



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – DEER



ESTUDO DA METODOLOGIA PARA ESTIMAR A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

ITALO HEYNE LEITE MENDONÇA LANDIM

JOÃO PESSOA, PARAÍBA

2020

ITALO HEYNE LEITE MENDONÇA LANDIM

ESTUDO DA METODOLOGIA PARA A ESTIMAR A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa Pós-
Graduação em Energias
Renováveis da Universidade
Federal da Paraíba.

Orientador

Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel

Co-orientador

Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira

JOÃO PESSOA, PARAÍBA

2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L257e Landim, Italo Heyne Leite Mendonça.
ESTUDO DA METODOLOGIA PARA ESTIMAR A GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS / Italo Heyne Leite
Mendonça Landim. - João Pessoa, 2020.
67 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia Solar. 2. Geometria Solar. 3. Geração de
Energia. 4. Orientação da Superfície. I. Título

UFPB/BC


ITALO HEYNE LEITE MENDONÇA LANDIM

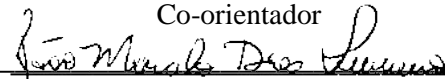
**ESTUDO DA METODOLOGIA PARA A ESTIMAR A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

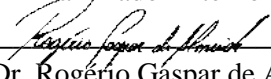
Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa Pós
Graduação em Energias
Renováveis da Universidade
Federal da Paraíba.

Aprovado em 18 de Fevereiro de 2020.

Prof. Dr. José Maurício A. M. Gurgel
Universidade Federal da Paraíba
Orientador


Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba
Co-orientador


Prof. Dr. João Marcelo Ferreira Dias
Universidade Federal da Paraíba
Examinador Interno


Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida
Universidade Federal da Paraíba
Examinador Externo

Prof. Dr. Marçal Rosas F. Lima Filho
Universidade Federal da Paraíba
Examinador Interno

JOÃO PESSOA, PARAÍBA
2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Adailson Landim e Haneide Mendonça, pelo amor, carinho e compreensão em todos os momentos. Por serem a minha fonte de força de vontade, por sempre me inspirarem a lutar e alcançar meus objetivos.

Aos meus irmãos Hudson Mendonça e Handerson Mendonça pelo apoio ao longo dessa jornada, pelos conselhos e carinho.

A toda a minha família por compreenderem as minhas ausências, pelo apoio incondicional dado em cada conquista e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos.

A minha namorada Alanna Feijó, pelo amor e apoio durante esse período e que foi crucial para enfrentar cada problema que foi resolvido.

Aos meus amigos que sempre estiveram sempre comigo, mesmo que as vezes distante, o meu sincero agradecimento. Especialmente a Jéssika, Camilla Soares, Filipe, Aline, Ícaro, Danilo, Mateus.

Aos meus colegas de turma que foram de suma importância para a finalização dessa etapa, por todas as aulas compartilhadas e experiências divididas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, o meu muito obrigado pela orientação, dedicação, conselhos durante todo o curso. Especialmente aos professores Kleber Oliveira e José Maurício, por toda a orientação prestada nesse trabalho de conclusão de curso. Também deixo o meu agradecimento aos professores João Marcelo, Rogério Gaspar e Marçal Rosas, por aceitarem fazer parte da banca examinadora e contribuírem com o presente trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Energia Solar – LES, pela amizade e carinho diário.

RESUMO

Observa-se um aumento do consumo de energia elétrica no Brasil devido ao crescimento populacional associado ao desenvolvimento econômico, por consequência, se faz necessário aumentar a oferta de energia elétrica enfatizando as formas renováveis e limpas de modo a diminuir a agressão ao meio ambiente, mas continuar o desenvolvimento do país, contribuindo com a produção de energia através de hidrelétricas, visto que estas tornaram-se insuficientes com a escassez de água que assola parte do território nacional. Este trabalho visa apresentar uma forma de simular a geração de energia por painéis fotovoltaicos, utilizando de dados solarimétricos, além de realizar uma comparação entre a energia gerada por um sistema real e os valores obtidos na simulação. De tal forma que se possa utilizar este estudo para melhor adequação dos painéis frente a demanda que vem surgindo no país, permitindo comparar e analisar a geração, a eficiência e as perdas provocadas de acordo com as condições de orientação e inclinação de instalação dos sistemas fotovoltaicos. As simulações foram realizadas no Matlab.

Palavras-Chaves: Energia Fotovoltaica, orientação da superfície, geometria solar, geração de energia.

ABSTRACT

There is an increase in the consumption of electricity in Brazil due to the population growth associated with economic development, therefore, it is necessary to increase the supply of electricity by emphasizing renewable and clean forms in order to reduce aggression to the environment, but continue the development of the country, contributing to the production of energy through hydroelectric dams, since these have become insufficient with the scarcity of water that plagues part of the national territory. This work aims to present a way to simulate the generation of energy by photovoltaic panels, using solarimetric data, in addition to performing a comparison between the energy generated by a real system and the values obtained in the simulation. In such a way that this study can be used to better adapt the panels to the demand that is emerging in the country, allowing to compare and analyze the generation, efficiency and losses caused according to the orientation conditions and installation inclination of the photovoltaic systems. The simulations were carried out in Matlab.

Keywords: Photovoltaic energy, surface orientation, solar geometry, power generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Matriz Energética Elétrica Mundial	14
Figura 2 - Matriz energética elétrica brasileira	15
Figura 3- Volume útil do reservatório de sobradinho-BA	16
Figura 4- Curva de geração de energia por fonte eólica.....	17
Figura 5 - Geração de energia elétrica a partir de energia térmica.....	18
Figura 6 - Curva de Energia do Espectro Solar.....	20
Figura 7- Processos de absorção e reflexão da energia solar na atmosfera terrestre.....	21
Figura 8 - Declinação solar ao longo do ano.....	24
Figura 9 - Ângulos Solares e a Superfície Inclinada	26
Figura 10 --Carta Solar para João Pessoa-PB	29
Figura 11 - Estrutura atômica após o processo de dopagem	30
Figura 12 - Representação da célula fotovoltaica de silício	32
Figura 13- Estrutura do painel fotovoltaico	32
Figura 14 - Número de Patentes e Publicações registradas.....	34
Figura 15 - Eficiência de células solares em laboratórios	36
Figura 16 - Modelo Ideal de célula fotovoltaico	38
Figura 17- Modelo de único diodo com resistência em série.....	38
Figura 18 - Modelo único diodo com resistência em série e em paralelo	39
Figura 19 - Modelo com dois diodos	40
Figura 20 - Piranômetro	41
Figura 21- Piranômetro com anel de sombreamento.....	42
Figura 22 -- Pireliômetro.....	42
Figura 23 - Irradiações Direta e Difusa para João Pessoa-PB.....	48
Figura 24- Quantidade de Energia Gerada e Simulada no Sistema Larissa.....	49
Figura 25- Irradiações Direta e Difusa para a cidade de Milagres-CE.....	51
Figura 26 - Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema de Haneide.....	53
Figura 27- Quantidade de Energia Gerada e Simulada Sistema em Milagres-CE	54
Figura 28- Gráfico Comparativo entre a energia real e simulada	55
Figura 29 -- Gráfico de Simulação da Geração do Sistema Juoplast	57
Figura 30- Irradiações Direta e Difusa da cidade de Fortaleza	59
Figura 31- Dados de Geração do Sistema do Tribunal de Contas do Ceará	59
Figura 32 - Comparação entre a geração média e a simulação	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das gerações de células fotovoltaicas	30
Tabela 2 -Dias Juliano Característico do Ano.....	44
Tabela 3 -- Folha de Dados do Módulo Canadian Solar 290Wp	47
Tabela 4 - Tabela de irradiações direta e difusa para cada mês para João Pessoa-PB	48
Tabela 5 -Quantidade de Energia Gerada por mês no Sistema Larissa.....	49
Tabela 6- Folha de Dados do Módulo GCL 330Wp	50
Tabela 7- Tabela de irradiações direta e difusa para Milagres-CE	51
Tabela 8 - Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema Haneide Mendonça	52
Tabela 9- Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Heimard Mendonça	53
Tabela 10 - Folha de Dados do Módulo Canadian Solar 335Wp.....	54
Tabela 11 - Características do Sistema Instalado.....	55
Tabela 12 - Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema JuaPlast	56
Tabela 13- Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema JuaPlast	57
Tabela 14- Folha de Dados do Módulo Canadian Solar 270Wp.....	58
Tabela 15- Dados de Energia Gerada Anualmente	60
Tabela 16 - Dados de Energia Gerada Anualmente	62
Tabela 17 -- Dados de Energia Gerada Anualmente	63
Tabela 18 - Dados de Energia Gerada Anualmente	63
Tabela 19 - Geração Média Anual	65

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Declinação Solar
n	Dia Juliano
L_P	Longitude Padrão
L_l	Longitude Local
H_L	Hora Legal
H_S	Hora Solar
ω	Ângulo Horário
ϕ	Latitude
γ	Azimute Solar
γ_s	Azimute da Superfície
h	Altura Solar
θ	Ângulo de Incidência
N	Insolação Teórica Máxima
H_h	Irradiação Global
H_b	Irradiação Direta
H_d	Irradiação Difusa
G_h	Irradiância Global
G_d	Irradiância Difusa
G_i	Irradiância incidente na superfície inclinada
G_{di}	Irradiância Difusa na Superfície Inclinada
G_{bi}	Irradiância Direta na Superfície Inclinada
G_{ri}	Irradiância Refletida na Superfície Inclinada
H_i	Irradiação na Superfície Inclinada
$I_{pv,STC}$	Corrente fovoltaica de condições padrões de teste
I_{pv}	Corrente Fotovoltaica
K_l	Coefficiente de temperatura
T_{STC}	Temperatura de condições padrões de teste
G_{STC}	Irradiância de condições padrões de teste
G_{on}	Radiação Extraterrestre
G_{sc}	Constante Solar
G	Irradiância incidente
T	Temperatura da célula
I_D	Corrente do diodo
I_S	Corrente de Saturação
V_D	Tensão do diodo
q	Carga do elétron
a	Fator de Idealidade do diodo
k	Constante de Boltzmann
V	Tensão
I	Corrente
R_S	Resistência em série
R_P	Resistência em paralelo
P	Potência Instantânea

E	Energia
P_{max}	Potência Máxima do Painel
α_p	Coefficiente de temperatura da potência do módulo
T_c	Temperatura da célula
T_a	Temperatura do ambiente
$T_{c,NOCT}$	Temperatura da célula nas condições normais de operação
$T_{a,NOCT}$	Temperatura do ambiente nas condições normais de operação
$G_{t,noct}$	Irradiância nas condições normais de operação
$n_{mp,STC}$	Eficiência nas condições de teste padrão
τ	Transmissividade
α	Absortividade
A_{PV}	Área
K_v	Coefficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto
V_{mpp}	Tensão de máxima potência

LISTA DE ABREVIATURAS

LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
CuS	Sulfeto de Cobre
CdTe	Telureto de Cádmio
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-Elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termo Nuclear
NREL	<i>National Research Energy Laboratory</i>
RNA	Rede Neurais Artificiais
NASA	National Aeronautics and Space Administration

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	RADIAÇÃO SOLAR	20
2.2	CÉLULA FOTOVOLTAICO	29
2.3	HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	33
2.4	MODELO ELÉTRICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	37
2.5	INSTRUMENTOS METEOROLÓGICOS	40
3	METODOLOGIA	44
4	RESULTADOS	47
4.1	UFV LARISSA AGUIAR JOÃO PESSOA-PB	47
4.2	UFV HANEIDE MENDONÇA EM MILAGRES-CE	50
4.3	UFV JUAPLAST EM JUAZEIRO DO NORTE-CE	54
4.4	UFV TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO CEARÁ EM FORTALEZA	58
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

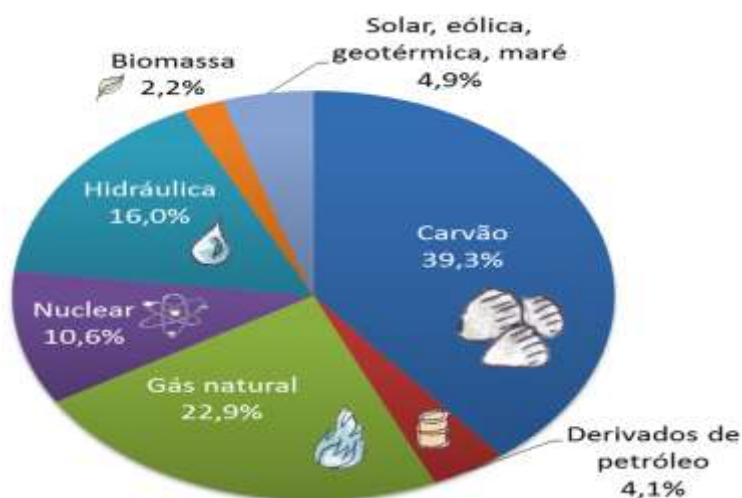
Desde o início da história humana na Terra, todos os processos realizados necessitavam de energia. Por exemplo, o homem primitivo tinha como fonte de energia o alimento, o homem agrícola primitivo utilizava da força animal para realizar as atividades e o homem agrícola avançado usava de quedas d'água e carvão. Já o homem moderno utiliza vários tipos de energia, principalmente derivados dos combustíveis fósseis e a eletricidade (GOLDEMBERG, LUCON; 2008).

O aumento da população mundial provocou um aumento também no consumo de energia. Assim, fontes de energia ligadas aos combustíveis fósseis passaram a ser utilizados em larga escala, devido principalmente a facilidade de utilização dos mesmos. A crescente demanda tem como principais fatores o progresso da tecnologia e o desenvolvimento humano, na qual estão incluídas as atividades, costumes, cultura e a sociedade na qual a pessoa está inserida (FERREIRA et al., 2018).

A imensa utilização dos combustíveis fósseis culminou no agravamento de um processo natural, chamado de efeito estufa. Este processo foi intensificado devido a grande emissão de gases lançados na atmosfera e devido degradação do meio ambiente. O efeito estufa é o aumento da temperatura global, devido ao aprisionamento da radiação solar emitida pela terra em comprimentos de ondas longas.

Atualmente, a matriz energética elétrica mundial é dependente do carvão e gás natural, conforme mostrado na Figura 1. Esses combustíveis são considerados finitos, devido ao largo consumo e a dificuldade de produção destes.

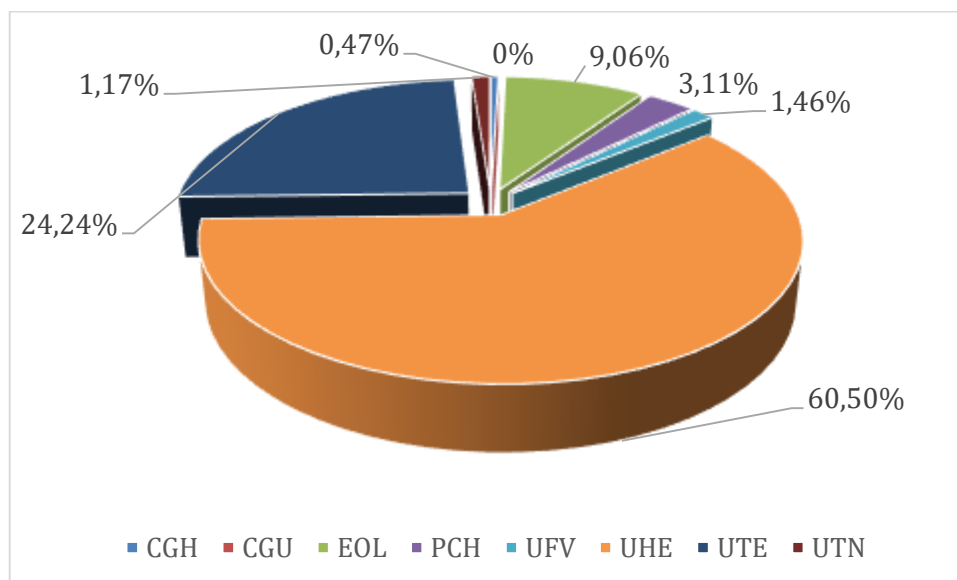
Figura 1- Matriz Energética Elétrica Mundial



Fonte: Brasil - Empresa de Pesquisa Energética (2015)

A matriz energética elétrica brasileira é diferente da matriz mundial, conforme apresentado na Figura 2, principalmente por conta do grande potencial hídrico e da biomassa tornando uma matriz mais limpa quando comparada a mundial.

Figura 2 - Matriz energética elétrica brasileira



Fonte: BRASIL - Banco de Informação de Geração (2018)

O Brasil possui uma forte dependência da fonte de energia hidráulica, conforme mostrado na Figura 2. A fonte hidráulica pode ser dividida em dois tipos: usina com reservatório e usinas a fio d'água. As usinas com reservatório são destinadas a acumular água para em períodos de estiagem possuir uma certa reserva da matéria prima. Esse acúmulo depende do nível de precipitação no curso do rio, para que seja renovado a quantidade de água no reservatório. Caso esse nível não seja renovado e a cada ano diminua, acabará gerando um colapso. Esse colapso poderá ser chamado de crise hídrica.

A crise hídrica registrada em 2014. Ocorreu por conta do longo período de estiagem, em que os volumes dos principais reservatórios ficaram em níveis de emergência. O volume de sobradinho, um dos principais reservatórios localizados no nordeste brasileiro, atingiu 1,11% do volume útil, prejudicando a geração de energia por meio de hidrelétricas. (BRASIL, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2018).

De forma resumida, ao atingir volumes muito baixos, a água do reservatório passa a ser utilizada apenas para consumo humano e animal, diminuindo a produção de energia nas hidrelétricas. A Figura 3 mostra a curva do volume útil de sobradinho no período de janeiro de 2014 até março de 2018.

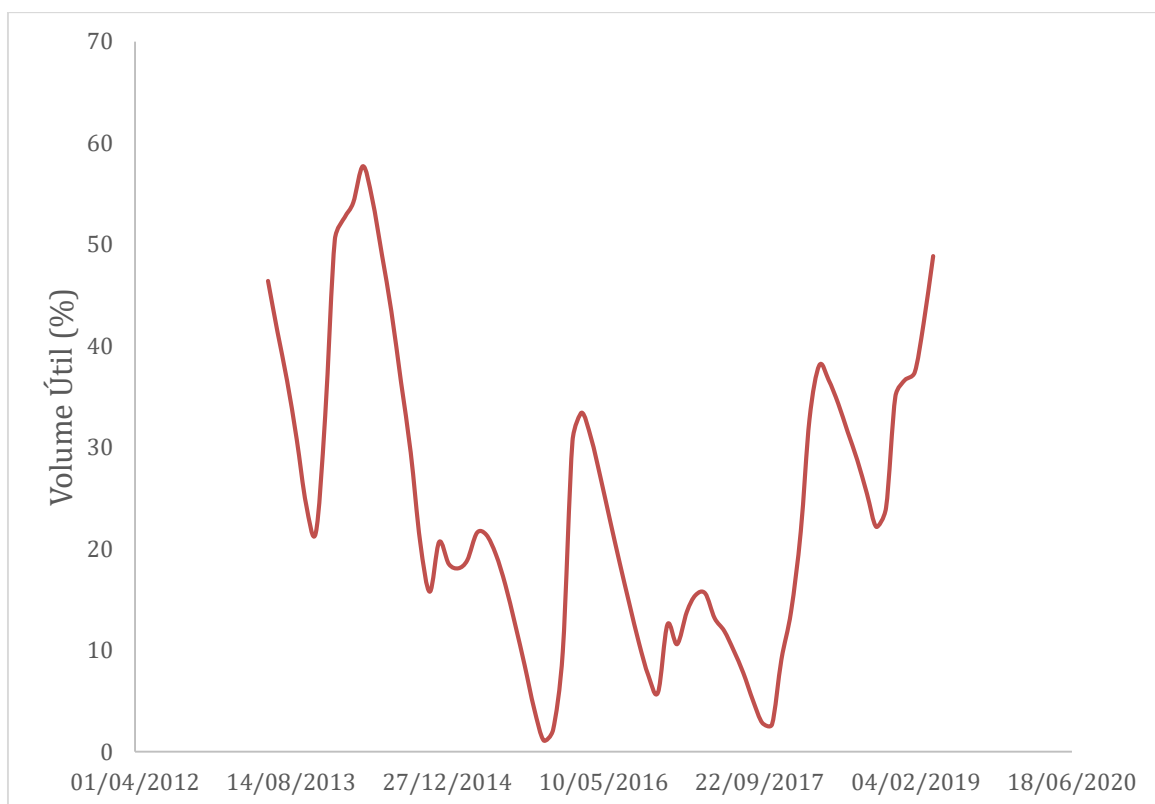
Apesar das implicações ambientais, a geração hidráulica é considerada renovável, limpa e com gigantesco potencial de geração. O principal problema ambiental é o alagamento da área do reservatório que acarreta na liberação de CH_4 , visto que é um gás altamente tóxico (FERREIRA et al., 2018), chegando 32 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (CO_2) (FARIA et al., 2015).

Durante a crise, foi necessário acionar um grande número de usinas termoeletricas para manter a quantidade de energia na rede com a finalidade de evitar um colapso. Os principais problemas desse tipo de geração é a poluição causada, devido à queima de combustível fóssil, e o aumento dos custos, quando comparada à fonte hidráulica e outras fontes de geração.

As sucessivas crises ligadas ao petróleo, o aumento da preocupação com o meio ambiente e as crises hídricas nos últimos anos levaram o governo brasileiro a buscar novas fonte de energia, com o objetivo de evitar outro colapso energético, como o registrado em 2001.

Foi buscando a diversificação da matriz através de fontes renováveis e menos poluente cresceu a busca pela energia eólica, solar e biomassa.

Figura 3- Volume útil do reservatório de sobradinho-BA

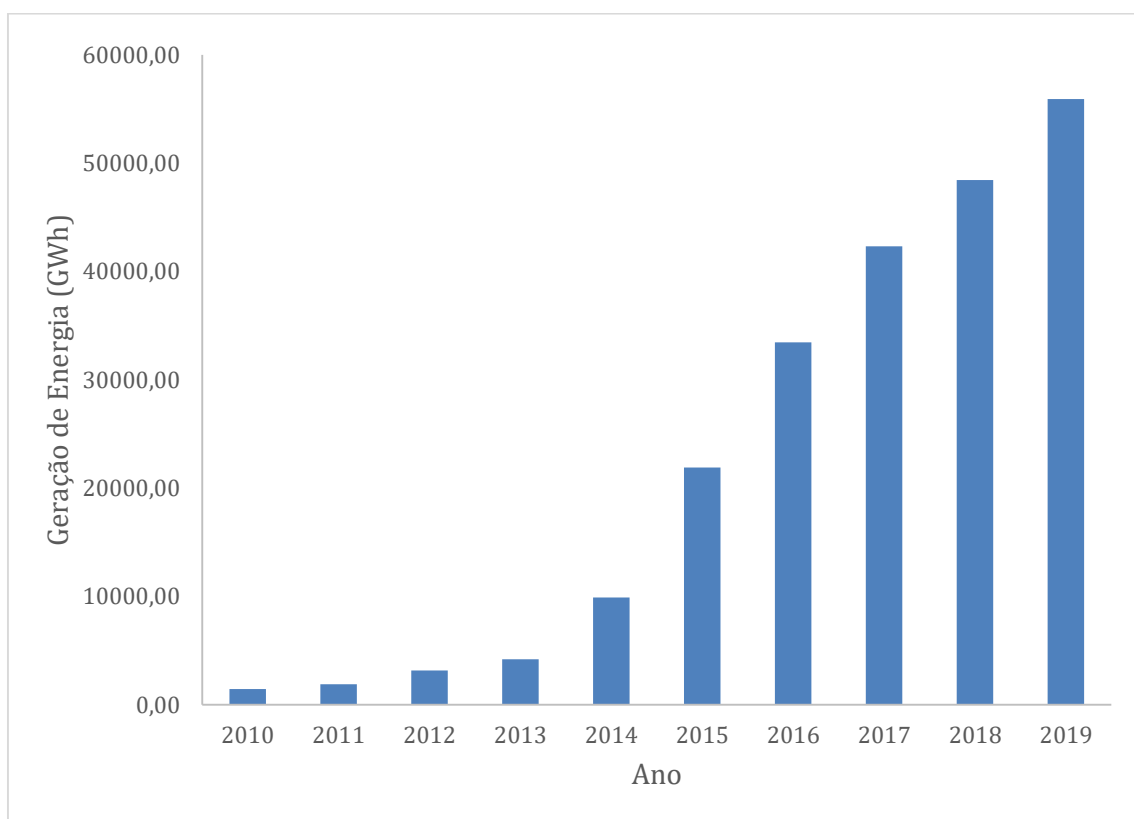


Fonte: Organização Nacional do Sistema, 2018.

A energia eólica é a geração a partir do vento, convertendo a energia cinética em energia rotacional de um eixo e por fim em energia elétrica (PINTO, 2013). Esse tipo de geração teve um grande aumento, principalmente na região do Nordeste do Brasil, na qual os estados do Rio Grande do Norte, Ceará e Bahia são os principais geradores (BRASIL, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017). A crescente utilização da energia eólica aconteceu a partir de 2010, conforme apresentado na Figura 4.

A geração de energia a partir da biomassa ocorre semelhante nas usinas termoelétricas, porém o óleo utilizado como combustível é substituído por algum material, como o bagaço de cana, que possa fornecer tal demanda de energia. Os principais tipos de biomassa que podem ser utilizados são os vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos, resíduos orgânicos e os biofluidos. A principal vantagem em utilizar a biomassa são as grandes quantidades de resíduos agrícolas, devido as diferentes formas de culturas promovida no país. (BARBOSA, 2008).

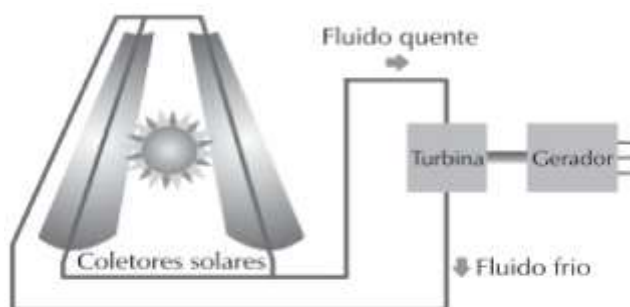
Figura 4- Curva de geração de energia por fonte eólica



Fonte: Brasil, Operador Nacional do Sistema, 2018.

O aproveitamento da energia solar pode ser realizado de duas maneiras: a térmica e a fotovoltaica. A energia térmica é a utilização da energia para aquecer algum fluido, como água, sal fundido ou óleo especiais, tanto para geração de energia elétrica ou para uma necessidade de energia térmica. (DUFFIE; BECKMAN; WOREK, 2003). O equipamento utilizado é o coletor solar, sendo de diversos tipos como plano, côncavo, parabólico e espelhos concentradores. A Figura 5 representa um esquema de geração de energia solar utilizando de energia térmica.

Figura 5 - Geração de energia elétrica a partir de energia térmica



Fonte: Villalva; Gazoli (2012)

A energia fotovoltaica é a conversão direta da irradiação solar em energia elétrica. Esse processo ocorre através do efeito fotovoltaico. O equipamento responsável por essa conversão é o painel ou módulo fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel em 1839 e ocorre devido à célula ser formada pela união de um material tipo-P e de outro tipo-N. A camada N terá elétrons livres que irão ocupar as lacunas existentes na camada P, gerando um campo elétrico. A incidência de luz favorecer o movimento dos elétrons, ou seja, o fluxo de elétrons de P para N, pois a irradiação trará a energia necessária para que os elétrons passem para a banda de condução (LANDIM, 2017).

O grande entrave da tecnologia fotovoltaica são os custos dos equipamentos, mas a evolução das técnicas de fabricação das células tende a baratear o produto e torná-los mais acessível, de tal modo que seja possível alterar o cenário atual do país e utilizar esta forma de produção elétrica.

Então analisar a geração de energia solar, visa auxiliar a entender o comportamento do sistema elétrico e a variação de geração de energia. Analisando quais

os meses de baixa e alta geração para a energia solar. Assim, entender qual o momento que será necessário um complemento de outra fonte energética para suprir a demanda não gerada pela energia solar.

Este trabalho visa apresentar uma forma de simular a geração de energia por painéis fotovoltaicos, utilizando de dados solarimétricos, além de realizar uma comparação entre a energia gerada por um sistema real e os valores obtidos na simulação. De tal forma que se possa utilizar este estudo para melhor adequação dos painéis frente a demanda que vem surgindo no país, permitindo comparar e analisar a geração, a eficiência e as perdas provocadas de acordo com as condições de orientação e inclinação de instalação dos sistemas fotovoltaicos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é estudar o desempenho da geração de energia através de um painel fotovoltaico, por simulação computacional e experimental. A simulação tem o intuito de obter o comportamento de geração, utilizando de dados de irradiação. O intuito de analisar a geração do sistema fotovoltaico nas condições locais na qual está instalado e comparar com a simulação da geração realizada para tal condição de operação do sistema.

Também será possível realizar alteração e simulação com variação de orientação e inclinação do sistema. Permitindo comparar a diferença de geração ocasionada com alteração impostas no simulador.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar a mudança de irradiação incidente de acordo com a instalação do sistema, visto que a orientação e a inclinação afetam na incidência dos raios solares.
- Simular a geração do sistema de acordo com as condições de instalação e verificar a geração se o sistema estiver instalado para o Norte.
- Comparar a energia gerada através da simulação e a energia gerada por um sistema real.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

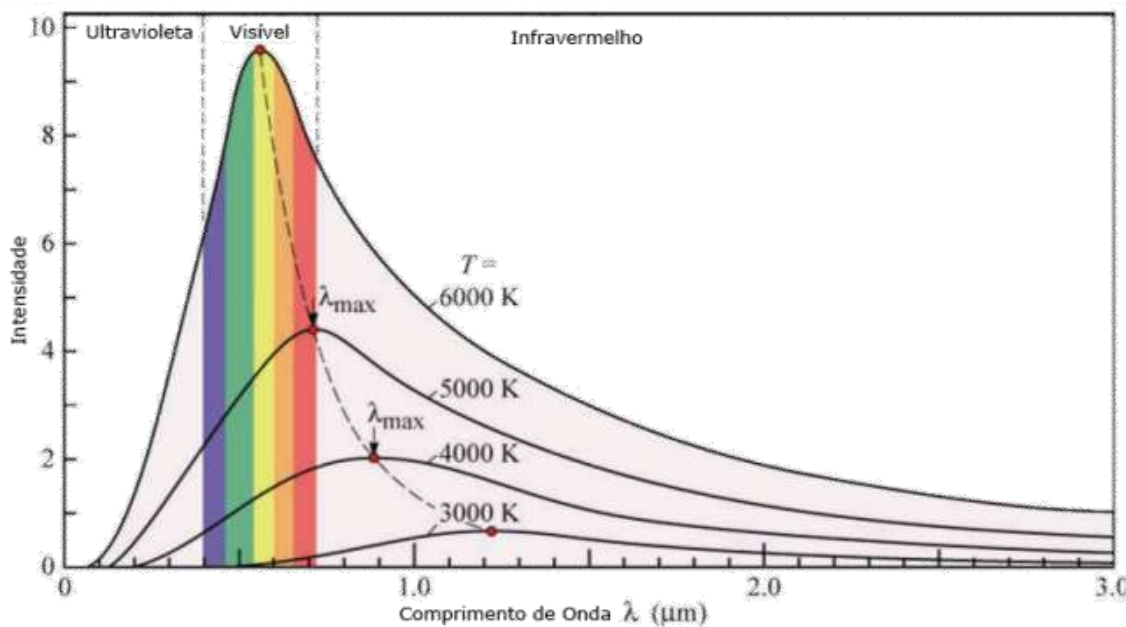
2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol é uma fonte de energia com gigantesca quantidade de energia liberada a cada segundo. Dessa energia emitida, à Terra recebe uma excelente quantidade que chega a impressionantes 10 bilhões de Itaipu (STENSMANN, 2018).

A radiação solar é transmitida através de ondas eletromagnéticas, possuindo diferentes níveis de energia de acordo com a frequência da onda. Assim, quanto maior a frequência da onda, maior será a energia transportada pela mesma. É válido salientar que, a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda. A mecânica quântica possibilitou o cálculo da quantidade de energia dessa radiação, na qual essa energia é transportada na forma de fótons (CANTOR, 2017).

A Figura 6 abaixo apresenta a curva de energia do espectro de acordo com a temperatura.

Figura 6 - Curva de Energia do Espectro Solar



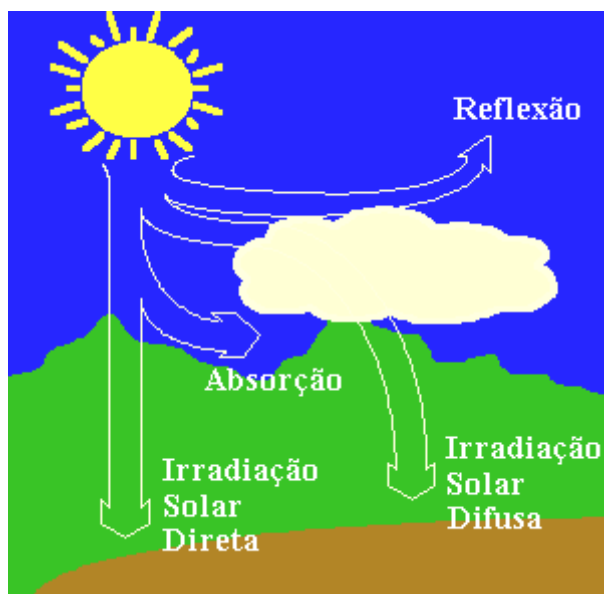
Fonte: Cantor (2017)

Quando a temperatura é 6000 K, a maior intensidade de energia é obtida na região do visível, já ao diminuir a temperatura, o pico de intensidade vai passando para a região

do infravermelho. De acordo com Villalva (2012), a maior quantidade de energia está nas regiões do ultravioleta e infravermelho.

Assim, o espectro passa por distintas etapas de perda que reduzem a quantidade de energia que realmente chega à superfície da Terra. A radiação solar sofre diversos processos, como reflexão e absorção. No caso da reflexão, os raios refletem na atmosfera e volta ao espaço. Outra parte é absorvida pela atmosfera e as nuvens. Essa parcela absorvida pelas nuvens e as outras partículas da atmosfera irão ser reemitidas, sendo essa parcela chamada de radiação difusa. Outra parte da energia não sofre nenhum desvio e atinge diretamente a superfície da Terra, a esta parcela foi classificada de radiação direta. Este processo está ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Processos de absorção e reflexão da energia solar na atmosfera terrestre



Fonte: CRESESB, 2018.

Existem diversos modelos para estimar a irradiação incidente numa superfície, podendo ser dividido em 3 grupos principais, de acordo com o tipo de abordagem.

O primeiro grupo considera o ângulo horário, comprimento do dia e a hora solar. Este grupo inclui diversos modelos como modelo de Whillier, modelo de Liu e Jordan, Collares-Pereira, Rabl (CPR), entre outros. Whillier (1956) propôs um modelo para estimar a radiação horária de valores diários assumindo um clima constante sem atmosfera. Liu e Jordan (1960) utilizaram do modelo de Whillier, com algumas simplificações. Mas, no ano de 1961 Liu e Jordan (1961) assumiram que a radiação difusa é isotrópica e essa relação serve para superfície inclinada através da adição de um fator

de correlação. Rabl (1979) aprimorou o modelo de Liu e Jordan, adicionando o efeito da atmosfera.

O segundo grupo assume uma variação aleatória das condições climáticas e uma distribuição simétrica entre a radiação solar global da manhã e da tarde, aproximando de uma distribuição normal. Os principais autores são Jain(1988), Baig *et. al.* (1991) e Shazly(1996). Jain (1988) propôs um modelo considerando um modelo de decomposição da radiação global diária em função Gaussiana. Baig *et. al.* (1991) e Shazly (1996) aprimoraram o modelo de Jain, aplicando um fator de correção.

O terceiro grupo inclui os modelos que não têm características semelhantes. O modelo mais comum nesse grupo é o modelo de Newell. Newell (1983) no qual propôs a simplificação do modelo de Rabl, desconsiderando qualquer variação na radiação solar horária e nem a aleatoriedade das condições climáticas.

A importância desses estudos está nas projeções realizadas para superfícies inclinadas, pois, os dados medidos em estações solarimétricas são para planos horizontais. Assim, para sistemas fotovoltaicos é possível prever a potência gerada, utilizando de modelos apropriados tanto para a irradiância como para a geração de potência. (AYVAZOĞLUYÜKSEL; FILIK, 2018)

Padovan e Del Col (2010) realizaram um estudo comparando a irradiância medida através de instrumentos solarimétricos e a estimada através do modelo de Liu e Jordan e a correlação de Erbs (1982), de maneira que o resultado foi uma aproximação entre os itens comparados.

Raptis *et al.*, (2017) buscou comparar a irradiância estimada e a medida através de piranômetro e pireliômetro. Além disso, analisou qual a melhor a orientação do painel para a determinada região. A pesquisa resultou no aumento de 20% na geração, quando utilizado a inclinação ótima.

Segundo Dahmani *et al.* (2014), os métodos convencionais de cálculo não são eficientes com passo de tempo menor que uma hora. Assim, o estudo buscou utilizar redes neurais artificiais (RNA) para realizar essa conversão com uma boa aproximação. A RNA obteve um erro em torno de 8%, correspondendo a uma excelente aproximação.

Shaddel, Seyed e Baghernia (2016) fizeram um estudo de cálculo utilizando RNA e variando a inclinação da superfície concluindo que as RNA podem ser empregadas para estimar a irradiância.

Notton, Paoli e Diaf (2013) realizaram estudos através de RNA, usando uma base de dados de 5 anos extraído como resultado que houve uma redução de 6% no erro de cálculo quando comparado aos métodos empíricos.

2.1.1 Geometria Solar

A radiação solar pode ser analisada de duas maneiras: irradiância e irradiação. A irradiância é a potência instantânea incidente numa superfície, definida em W/m^2 . A irradiação é a integração dos valores de irradiância para determinado período de tempo, obtendo assim a energia incidente na superfície, definida em Wh/m^2 .

Os movimentos de rotação e translação da Terra acabam variando a quantidade de energia que chega à atmosfera. Essa quantidade de irradiância é definida como irradiância extraterrestre (G_{on}). A Equação 1 é utilizada para o cálculo dessa variável a partir do dia juliano, ou seja, irá variar ao longo do ano. O n representa o dia juliano e o G_{sc} é a constante solar, com valor de $1367 W/m^2$ (DUFFIE; BECKMAN; WOREK, 2003).

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (1)$$

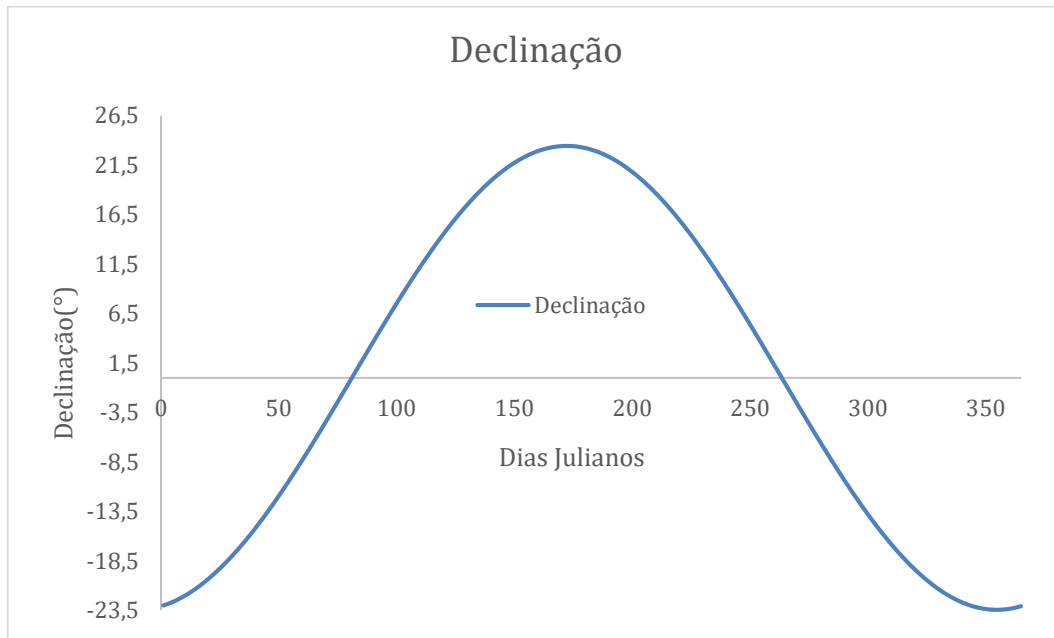
O cálculo realizado para estimar a quantidade de radiação solar que incide na superfície de um objeto, que esteja posicionado na superfície terrestre, leva em consideração alguns parâmetros de posicionamento solar e dados de medição solarimétrica. Esses parâmetros têm uma relevante importância para determinar o quanto de radiação incidirá na superfície (DUFFIE; BECKMAN; WOREK, 2003). As mesmas serão apresentadas a seguir.

- Declinação Solar (δ): é o ângulo formado pela reta que liga o centro do Sol ao centro da Terra, sendo que o mesmo varia de acordo com os dias do ano. O calendário utilizado para calcular esse parâmetro é Juliano. O cálculo dessa variável é realizado através a Equação 2. O n representa o dia juliano.

$$\delta = 23,45 \sin \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (2)$$

Essa variável vai compor um ciclo de anual, ou seja, todo ano o sol passará no mesmo ponto. A variação da declinação solar ao longo de um ano está apresentada da Figura 8.

Figura 8 - Declinação solar ao longo do ano



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

- Hora Solar: é o tempo verdadeiro do sol, determinada através da Equação 3. Na parte da manhã, a hora solar será negativa, e na parte da tarde, será positiva (KLUPPEL, 1985). O H_l representa a hora local, L_p representa a longitude padrão, representada pelo fuso horário do local, L_l representa a longitude local e o E representa a equação do tempo, calculada através da Equação 4.

$$H_S = H_L + \frac{(L_P - L_l)}{15} + \frac{E}{60} - 12 \quad (3)$$

$$E = 9,87 \sin \sin 2B - 7,53 \cos \cos B - 1,5 \sin \sin B \quad (4)$$

Na qual a variável B presente da equação acima também é representado por uma expressão, definida na Equação 5. O n representa o dia juliano.

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad (5)$$

- Ângulo Horário (ω): é o deslocamento angular do Sol devido à rotação da Terra em torno do eixo para o meio dia solar. Representa a hora solar em deslocamento angular, definida na Equação 6.

$$\omega = 15H_S \quad (6)$$

- Latitude (ϕ): é a distância de um ponto na Terra até a linha do Equador, sendo expressa em ângulo e variando entre -90° a 90° (KLUPPEL, 1985).
- Azimute Solar (γ): é o ângulo da projeção da irradiação solar no plano horizontal com a linha Norte-Sul, marcando 0° no Sul e 180° no Norte. O mesmo varia de -180° a 180° (KLUPPEL, 1985)
- Azimute da Superfície (γ_s): é o ângulo formado entre a projeção sobre um plano horizontal e o meridiano local, considerando o Sul como referência, ou seja, 0° . A variação ocorre no sentido horário até 360° .
- Inclinação da Superfície (β): é o ângulo formado entre a horizontal e a superfície.
- Altura Solar (h): é o ângulo formado entre a horizontal e o vetor da irradiação incidente na superfície, definida na Equação 7. O ϕ representa latitude, δ representa a declinação solar e ω representa o ângulo horário.

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (7)$$

- Insolação Teórica Máxima (N_{iso}): é a quantidade máxima de horas de brilho de Sol durante o dia. Durante esse intervalo, a irradiação solar é considerada útil, acima de 20 W/m^2 , para diversas atividades, de acordo com o local de análise (KLUPPEL, 1985). Definida através da Equação 8. O ϕ representa latitude e o δ representa a declinação solar.

$$N_{iso} = \frac{2 \arccos(-\tan(\delta) \tan(\phi))}{15} \quad (8)$$

- Ângulo de Incidência: é o ângulo formado entre o vetor do raio solar e o vetor normal da superfície (DUFFIE; BECKMAN; WOREK, 2003). O cálculo é realizado através da Equação 9. O β representa a inclinação da superfície e o γ_s representa o azimute da superfície.

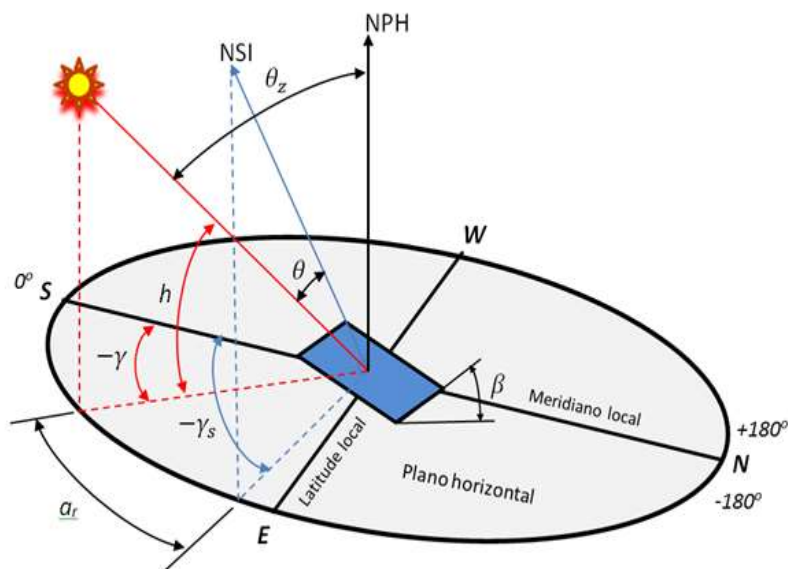
$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta) \cos(\beta) - \text{sen}(\delta)\text{sen}(\beta) \cos(\phi) \cos(\gamma_s) + \\ & \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\gamma_s) \text{sen}(\phi)\text{sen}(\beta) + \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta) \\ & \cos(\phi) + \cos(\delta) \text{sen}(\omega)\text{sen}(\beta)\text{sen}(\gamma_s) \end{aligned} \quad (9)$$

Alguns desses parâmetros citados podem ser visualizados na Figura 9. A partir desses fatores calculados através das equações acima, se pode estimar a quantidade de irradiação que incide na superfície inclinada.

Quanto a irradiação solar que incide na superfície de coleta, esta pode ser dividida em 3 parcelas: direta, difusa e refletida pela vizinhança. A irradiação direta incide diretamente na superfície, ou seja, sem passar ou sofrer qualquer tipo de desvio na atmosfera. A irradiação difusa é a parcela absorvida e refletida na atmosfera e posteriormente esses objetos que absorveram, passarão a emitir radiação. A soma da irradiação direta (H_b) e difusa (H_d) corresponde a irradiação global (H_h) na superfície horizontal, todos em kWh/m²dia, conforme mostrado na Equação 10.

$$H_h = H_b + H_d \quad (10)$$

Figura 9 - Ângulos Solares e a Superfície Inclinada



Fonte: Oliveira (2017).

Através dessas 3 parcelas citadas acima, é possível calcular a irradiação que incide na superfície inclinada. Essa é a soma de todas as parcelas em W/m², conforme mostrada na Equação 11.

$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri} \quad (11)$$

A irradiação direta na superfície inclinada depende dos dados de irradiação global e difusa, conforme mostrado na Equação 9, o ângulo de incidência e a altura solar. Conforme apresentado na Equação 12. O I_h representa a irradiação global na superfície horizontal e o I_d representa a irradiação difusa na superfície horizontal. O R_b é a razão entre a irradiação direta na superfície inclinada e na superfície horizontal, na Equação 13. e o h é a altura solar.

$$G_{bi} = (G_h - G_d) \frac{R_b}{\text{sen } h} \quad (12)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (13)$$

O ângulo zenital (θ_z) é definido sendo o ângulo complementar a h . Ou seja, $\theta_z = 90 - h$.

A irradiação difusa na superfície inclinada depende do dado de irradiação difusa e a inclinação da superfície. O cálculo dessa variável é mostrado na Equação 14. O G_d representa a irradiância difusa na superfície horizontal e β é a inclinação da superfície.

$$G_{di} = G_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (14)$$

A outra parcela é a refletida pela vizinhança (G_{ri}) que segue o mesmo processo da irradiação difusa, porém os objetos absorvedores estão na superfície e não na atmosfera. Essa resulta de uma propriedade dos materiais, definida como albedo. Também depende da inclinação da superfície. A expressão está definida na Equação 15. O ρ_s é o albedo médio das superfícies vizinhas. O G_h representa a irradiação global. O β é a inclinação da superfície.

$$G_{ri} = \rho_s G_h \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (15)$$

Assim a irradiação total na superfície inclinada é dada pela substituição das Equações 11, 12 e 13 na equação 10, sendo o resultado apresentado na Equação 16.

$$G_i = (G_h - G_d) \frac{\cos \theta}{\sin h \cos \theta_z} + G_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho_s G_h \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (16)$$

A irradiação incidente na superfície inclinada será obtida através da integração da irradiância incidente, conforme descrita na Equação 17.

$$H_i = \frac{24 \times 3600}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_i d\omega \quad (17)$$

Supondo que o fator de elevação não varia com a espessura da atmosfera devido aos ângulos de captação da energia solar, pode-se escrever a equação 18. A Equação 18 representa a Equação 17.

$$H_i = (H_h - H_d) \bar{R}_b + H_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho_s H_h \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (18)$$

O modelo destacado acima representa o modelo de Liu Jordan. Tal modelo considera o céu isotrópico, ou seja, a irradiância é igual em todas as direções. Também se destaca por compreender a parte difusa que incide na superfície inclinada (AYVAZOĞLUYÜKSEL; FILIK, 2018).

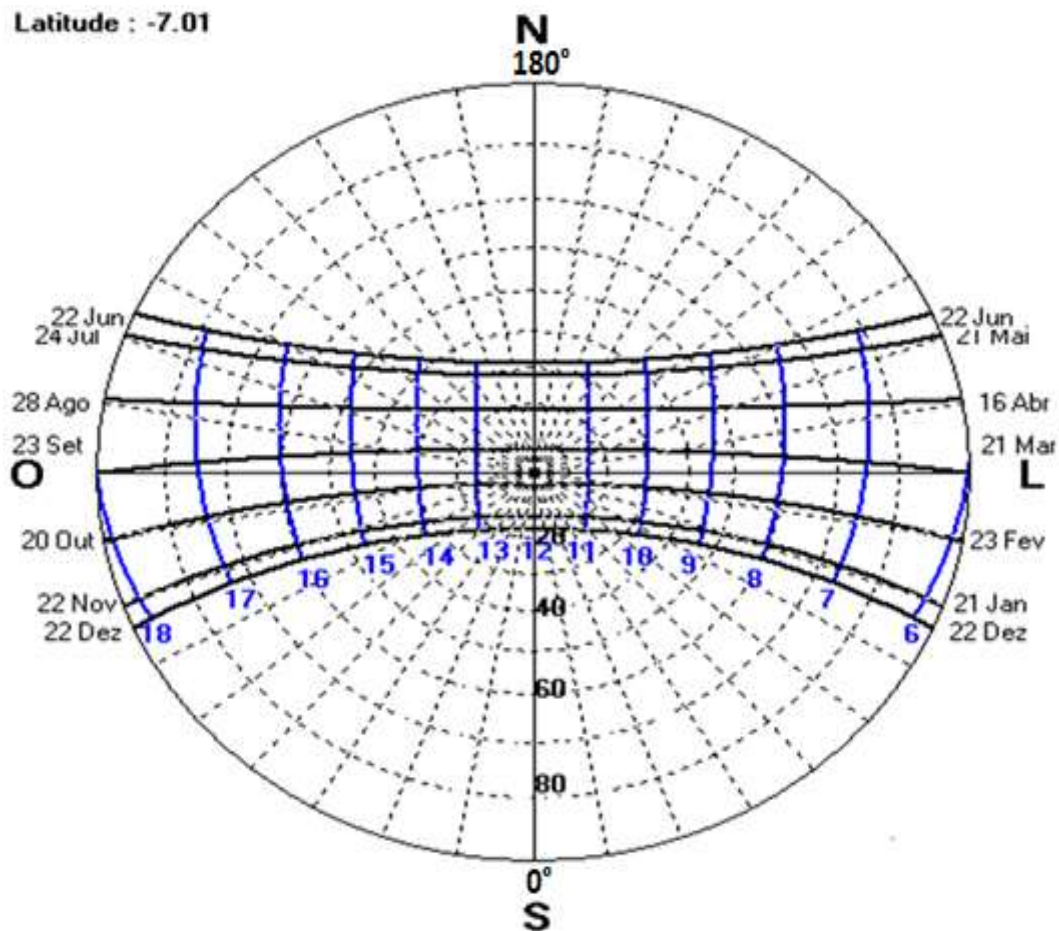
A Equação 16 para ser empregada deve-se considerar que a radiação é uniforme em todas as direções e também que a superfície inclinada é muito pequena em relação a vizinhança. Assim, pode-se utilizar essas equações apresentadas acima.

Alguns parâmetros listados acima também podem ser obtidos através da Carta solar. A carta solar irá apresentar as linhas de trajetória solar, azimute solar, altura solar e o número de horas de sol.

Analisando a Figura 10, pode-se notar que as linhas pretas demonstram a trajetória do Sol, desde o nascer até o pôr do Sol, e as linhas azuis representam o horário legal. Com isso é possível medir a quantidade de horas de insolação para um determinado dia. Também pode ser extraído o azimute do solar, demarcados pelas retas radiais ao círculo, a altura solar e a latitude do local. A carta solar também é usada para mostrar zonas de sombreamento e penetração solar.

Na carta solar, também pode estar contido dados de temperatura da determinada cidade. Assim, cada cidade vai possuir sua carta solar específica. A Figura 10 representa a carta solar da cidade de João Pessoa-Paraíba, com latitude $-7,01^\circ$, obtida no *software* Sol-Ar desenvolvido pelo LABEEE.

Figura 10 --Carta Solar para João Pessoa-PB

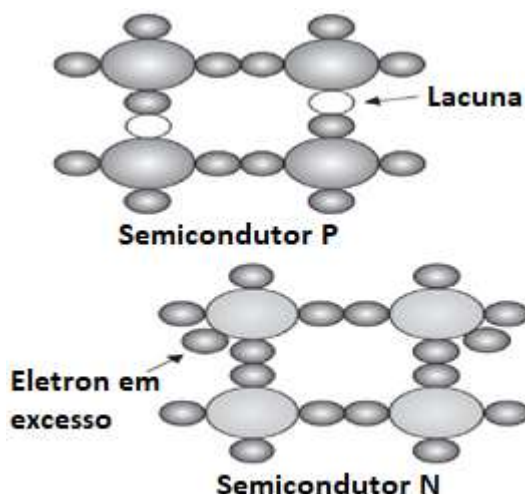


Fonte: Software SOL-AR

2.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas são formadas, na essência, por semicondutores dopados. A dopagem pode ser realizada de dois tipos: P e N. Esses tipos são obtidos de acordo com o material utilizado na dopagem. O tipo P é caracterizado por ter uma deficiência de elétrons na estrutura. O tipo N é descrito por possuir um excesso de elétrons na sua estrutura, facilitando a condução de elétrons. A Figura 11 representa as estruturas atômicas após a dopagem (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 11 - Estrutura atômica após o processo de dopagem



Fonte: Villalva (2012).

As células fotovoltaicas são divididas em 3 gerações, conforme apresentado na Tabela 1. A primeira geração é totalmente comercial, a segunda é baseada em filmes finos e a terceira envolve as células orgânicas.

Tabela 1 - Descrição das gerações de células fotovoltaicas

Geração	Tecnologia	Descrição
Primeira	Silício Monocristalino	São fabricadas a partir do processo de <i>Czochralski</i> . Possuem alta eficiência de conversão, porém apresenta um custo de produção elevado. Requer uso de material com alto nível de pureza.
	Silício Policristalino	Menor custo de produção, quando comparado ao monocristalino. Menor eficiência de conversão.
Segunda	Silício Amorfo	A diferença para o silício cristalino é a disposição dos átomos, que causa impacto nas propriedades elétricas. Possui menor eficiência de conversão. A primeira célula foi relatada por Carlson em 1976.
	CdTe	Uma das mais promissoras, com baixo custo e alta eficiência. Possui uma alta absorvidade do espectro solar. Os grandes problemas são a toxicidade do cádmio e a escassez do telúrio.
	CIGS	Tem alto potencial de absorção do espectro. O desafio é a produção com baixo custo.
Terceira	Células Orgânicas	São produzidas como filme finos através de semicondutores orgânicos, como os polímeros. O processo é mais barato por utilizar menor quantidade de material. São flexíveis e semitransparente. O desafio é a durabilidade das células e a capacidade de conversão da energia solar.

Fonte: Villalva *et. al.* (2012)

Atualmente, o principal material utilizado nas células comerciais é o silício policristalino e o monocristalino. Assim, o conjunto de células formam o painel fotovoltaico. O uso do silício é devido ao seu baixo custo, abundância na superfície terrestre, a durabilidade do material, que também não possui grandes riscos de contaminação e ainda o seu processo de fabricação está bem desenvolvido (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A célula de silício é composta por um material tipo-P e outro tipo-N, na qual a união desses dois materiais forma uma região, chamada de junção PN. O circuito externo é necessário para permitir a passagem do elétron liberado e, conseqüentemente, gerar a corrente elétrica. O esquema da célula de silício está representado na Figura 12.

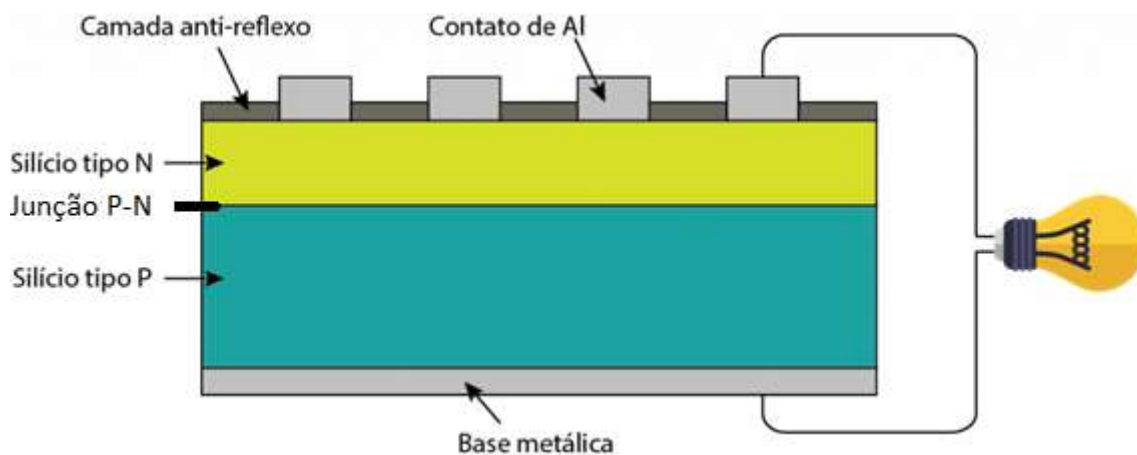
Os principais tipos de células fabricadas a partir do silício são as células monocristalinas, policristalinas e amorfas. A célula de silício monocristalino é produzida a partir de uma estrutura cristalina única e possui por principal característica a sua uniformidade do cristal de silício, tornando a célula mais eficiente na conversão de energia (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

Enquanto que a célula de silício policristalino é caracterizada por possuir diversos cristais em sua matriz, isso torna o processo de fabricação mais barato em relação a monocristalina. Entretanto, possuem uma eficiência menor em relação às células de silício monocristalino (NASCIMENTO, 2004).

As células de silício amorfo são obtidas a partir de camadas finas do material depositado sobre uma superfície, geralmente vidro ou metal. Tal tipo apresenta uma eficiência menor em relação aos dois citados anteriormente. Além disso, é classificada como filme finos, na qual existem diversos outros tipos de célula como a CdTe e a CIGS (VILLALVA; GAZOLI, 2015). As principais vantagens atribuídas aos filmes finos é que eles são flexíveis, bem resistentes, leves, semitransparentes, o que traz uma maior flexibilidade de aplicação do módulo (NASCIMENTO, 2004).

O painel fotovoltaico pode ser representado por modelo elétrico e térmico. O modelo térmico é composto por todos os materiais que formam o painel, na qual cada componente possui uma resistência a transferência de calor. A Figura 13 mostra a divisão de um dos tipos de painéis existente.

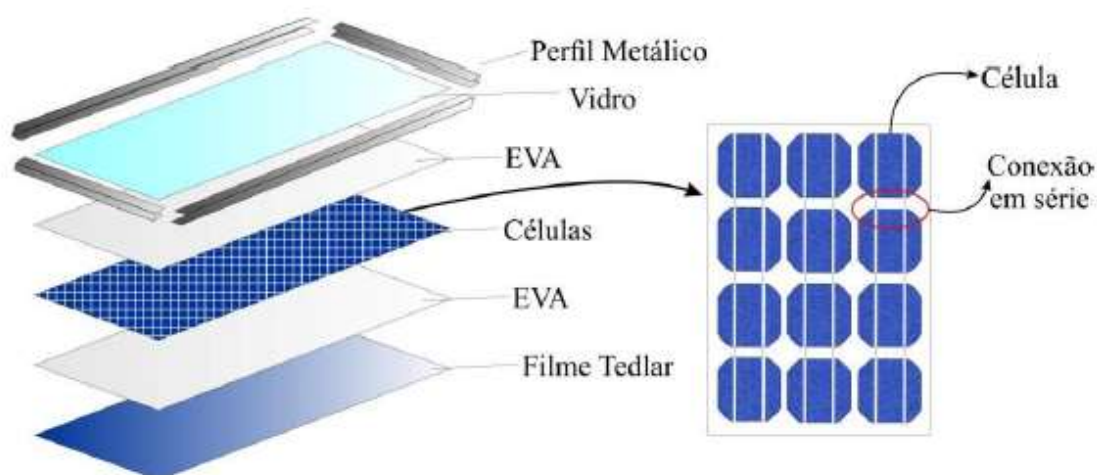
Figura 12 - Representação da célula fotovoltaica de silício



Fonte: Freire (2020)

A resistência envolvida dependerá do processo de transmissão de calor principal envolvido naquela superfície. Uma vez que, os tipos de transmissão são convecção, condução e radiação. Nas superfícies externas, o processo predominante é a convecção, devido a passagem do vento. A condução é predominante na passagem do calor por cada material. A radiação é emitida por todos os materiais, por suas temperaturas estarem maior que 0 K.

Figura 13- Estrutura do painel fotovoltaico



Fonte: Nascimento (2004)

2.3 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

O principal impulso para a fabricação de célula fotovoltaicas ocorreu em 1956, com o desenvolvimento da indústria de microeletrônica. O alto custo de produção desses objetos fez com que a utilização fosse para objetivos específicos, cujo custo não fosse um fator limitante (NASCIMENTO, 2004).

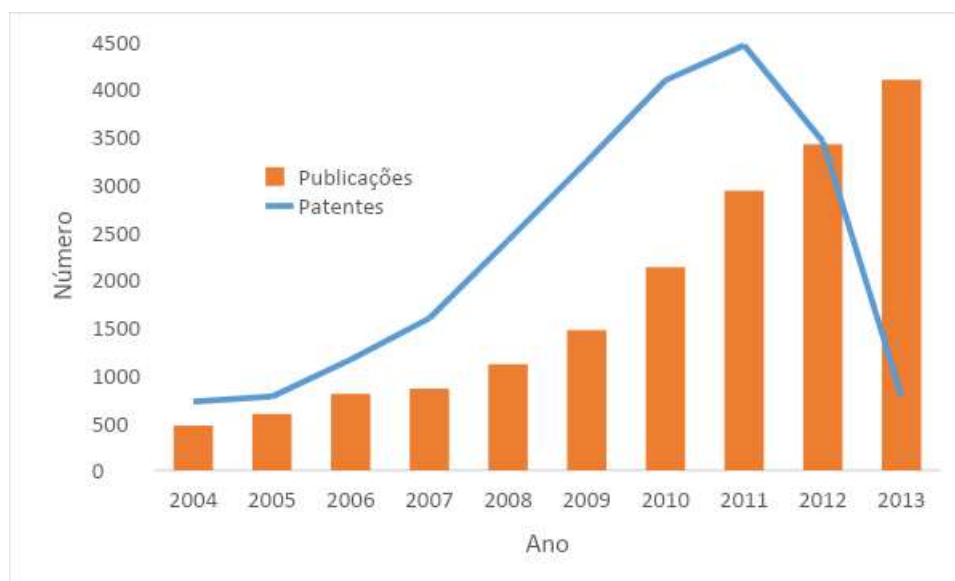
A utilização de painéis fotovoltaicos começou em 1975, na qual a NASA precisava de um meio de geração de energia para as estações espaciais. A entidade possuía recursos para promover o desenvolvimento dessa tecnologia (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013).

Em 1980, foi desenvolvido um grupo para realizar testes de qualidade nos painéis fabricados, denominada de CEC 201. Os principais aspectos analisados foram o impacto de granizo, exposição ultravioleta, pressão do vento, variação de temperatura (-40°C a 85°C), variação de umidade e a degradação térmica. Esse documento foi apresentado na Conferência em Cannes, França. Em 1985, foi incluído outros tipos de testes, como o teste térmico do diodo de passagem e teste de estresse eletroquímico (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013).

A tecnologia fotovoltaica está se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos, isso acarretou um aumento gigantesco de pesquisas e patentes registradas na área. No período de 2004 a 2013, foram depositadas cerca de 22 600 patentes referente a células solares, conforme apresentada na Figura 14. Os principais países que registraram patentes foram Estados Unidos, com 6473 patentes, seguido de China, Japão e Alemanha (SAMPAIO et al., 2018).

O número de publicações também cresceu principalmente ligado aos aumentos de investimentos nessa área, conforme mostrado na Figura 14. Os países com maiores números de publicações nesse período de tempo são Estados Unidos, China, Japão e Coreia do Sul (SAMPAIO et al., 2018).

Figura 14 - Número de Patentes e Publicações registradas



Fonte: Adaptado de SAMPAIO et al., 2018

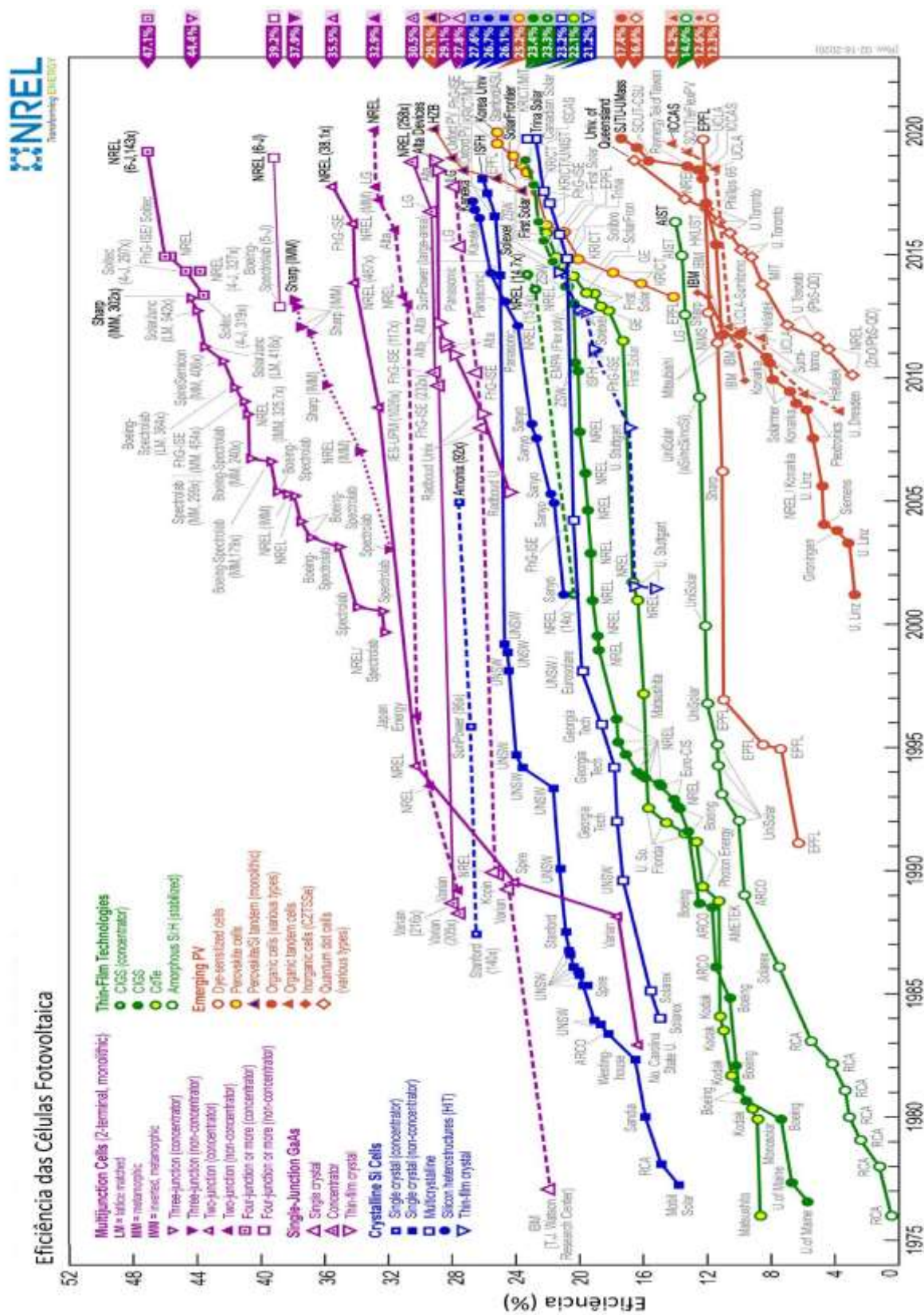
A maior parte dessas pesquisas são voltadas para a eficiência de conversão, seja para aumentar a eficácia de células já existentes ou busca por novos materiais que realizam a conversão. Um dos materiais mais pesquisados atualmente é a perovskita. De acordo com Burschka *et. al.* (2013), foram dos estudos sobre o pigmento da perovskita deposita em um filme óxido de metal poroso com uma mistura de solvente. O resultado observado foram variações morfológicas na produção da célula, com isso houve variação na *performance* dos dispositivos.

Hodes (2013) relatou que a alta eficiência das perovskitas deve-se a elevada mobilidade das cargas e obter uma maior absorção do espectro luminoso. Ball *et. al.* (2013) estudou a produção da célula em baixa temperatura, na qual o resultado foi eficiência de conversão acima de 12,3%

A Figura 15 apresenta os níveis de eficiência alcançado por alguns laboratórios de acordo com o tipo de célula. Vale salientar que, esses resultados são obtidos apenas para células laboratoriais, que são bem diferentes das comercializadas. A célula utilizada no laboratório tem um processo de produção bem controlado, as matérias primas possuem alto nível de pureza e os testes são realizados com os parâmetros controlados. Assim, os resultados são bem otimizados.

De acordo com os dados do NREL, a maior eficiência de conversão alcançada foi de 46% com a célula de 4 junções com concentrador por Fraunhofer ISE/Soitec. A célula de silício cristalino obteve uma eficiência máxima de 26,1%, diante das pesquisas realizadas até o presente momento. A menor eficiência registrada para as pesquisas realizada até o presente momento foi obtida da célula orgânica, cujo valor é 11,5%.

Figura 15 - Eficiência de células solares em laboratórios



Fonte: NREL, 2020.

2.4 MODELO ELÉTRICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas são estudadas através de modelos. Existem diversos modelos de células fotovoltaicas, na qual a divisão entre os modelos ocorre através da complexidade do modelo e da precisão para o cálculo de parâmetros. Assim, quanto maior o número de parâmetros listados nos cálculos do modelo da célula, maior será a complexidade do modelo e precisão registrada nos resultados. Os principais componentes são a fonte de corrente, diodo e resistências.

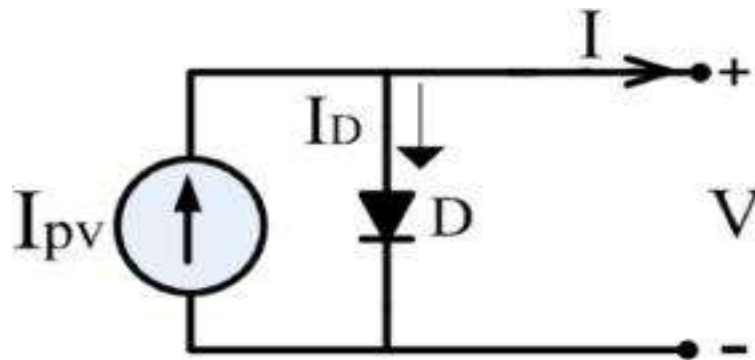
Há 4 tipos principais de modelo são: ideal, único diodo com resistência em série, único diodo com resistência em série e paralelo, dois diodos.

2.4.1 Modelo Ideal

O modelo ideal é composto apenas pela fonte de corrente e um diodo. A corrente resultante (I) será apenas a diferença entre a gerada pela fonte e a corrente de passagem do diodo (JORDEHI, 2016 *apud* LANDIM, 2017). A Figura 16 representa o mesmo. A Equação 19 calcula a corrente total do sistema. O I_{pv} representa a corrente fotovoltaica. O I_D representa a corrente do diodo. O $I_{pv,STC}$ representa a corrente fotovoltaica nas condições de teste padrão. O K_I representa o coeficiente da corrente. O T representa a temperatura ambiente. O T_{STC} representa a temperatura de condição de teste padrão, igual a 25°C. O G representa a irradiância incidente na célula. O G_{STC} representa a Irradiância de condição de teste padrão, igual a 1000 W/m². O I_S representa a corrente de saturação. O V_D representa a tensão do diodo. O q representa a carga do elétron. O A representa o fator de idealidade do diodo. O k é a constante de Boltzmann.

$$I = I_{pv} - I_D = \left(\left(I_{pv,STC} + K_I(T - T_{STC}) \right) \frac{G}{G_{STC}} \right) - \left(I_S \left(\exp \left(\frac{V_D q}{A k T} \right) - 1 \right) \right) \quad (19)$$

Figura 16 - Modelo Ideal de célula fotovoltaica



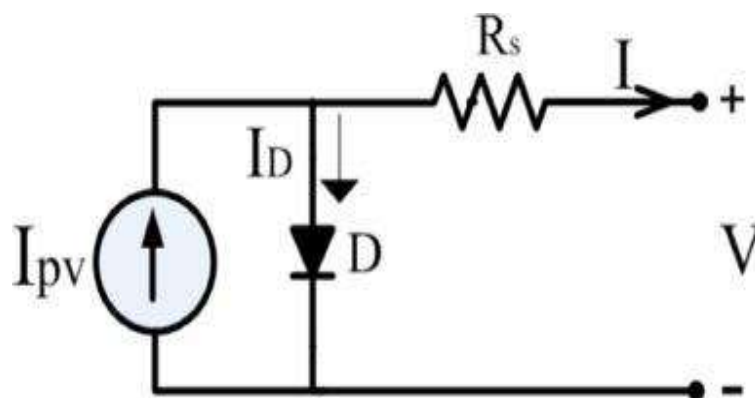
Fonte: Jordehi (2016)

2.4.2 Modelo com único diodo e resistência em série

O modelo com único diodo com resistência em série apresenta uma resistência de contato, resistência dos eletrodos e ao fluxo de corrente. Essas são unidas e formam a resistência em série (R_s). Apesar desse modelo ser bem parecido com a célula real, apresenta ainda baixa precisão. A Figura 17 representa o modelo de único diodo. A Equação 20 rege a corrente de saída do modelo. O V representa a tensão da célula. O R_s representa a resistência em série da célula fotovoltaica.

$$I = I_{pv} - I_s \left[\exp \left(\frac{(V + R_s I) q}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Figura 17- Modelo de único diodo com resistência em série



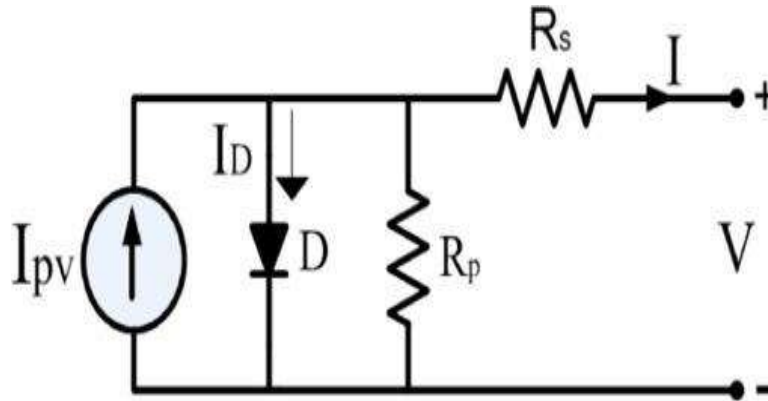
Fonte: Jordehi (2016)

2.4.3 Modelo com único diodo e resistência em série e paralelo

O modelo de único diodo com resistências em série e em paralelo apresentou uma boa precisão dos cálculos, mas ruim para baixos níveis de radiação. O modelo está representado na Figura 18. Esse tipo envolve mais variáveis, logo, compreende maior número de equações. A Equação 21 representa esse modelo. O R_p representa a resistência em paralelo da célula fotovoltaica. O V_t representa a tensão térmica da célula fotovoltaica.

$$I = I_{pv} - I_S \left[\exp \left(\frac{(V + R_S I)}{AV_t} \right) - 1 \right] - \frac{(V + R_S I)}{R_P} \quad (21)$$

Figura 18 - Modelo único diodo com resistência em série e em paralelo



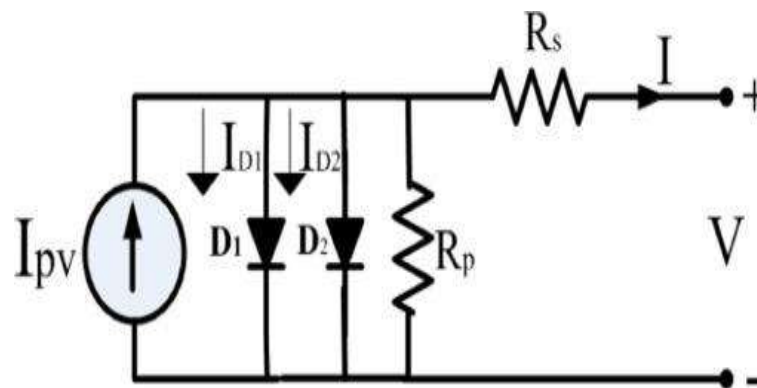
Fonte: Jordehi (2016)

2.4.4 Modelo com dois diodos

O modelo de dois diodos é bastante preciso, principalmente para baixas radiações diferente do modelo de único diodo com as duas resistências, representado na Figura 19. Porém, é bastante complexo devido à presença desse outro diodo e faz com que aumente o número de parâmetros, conforme apresentado na Equação 22.

$$I = I_{PV} - I_{S1} \left[\exp \left(\frac{(V + R_S I)q}{A_1 K T} \right) - 1 \right] I_{S2} \left[\exp \left(\frac{(V + R_S I)q}{A_2 K T} \right) - 1 \right] - \frac{(V + R_S I)}{R_P} \quad (22)$$

Figura 19 - Modelo com dois diodos



Fonte: Jordehi (2016)

Na literatura, existem outros modelos elétricos para célula fotovoltaica como único diodo com capacitor, modelo com 3 diodos e modelo com 2 diodos modificados. O principal problema associado é a complexidade dos cálculos para obter corrente e outros parâmetros (JORDEHI, 2016).

Os modelos podem variar de acordo com os componentes e com os parâmetros. O modelo L4P, único diodo e 4 parâmetros, é melhor que o L5P, único diodo e 5 parâmetros, devido as redes neurais artificiais (KARAMIRAD et al., 2013). Segundo Dongue et al., (2012), o L5P teve maior confiabilidade que o L4P, devido a análises experimentais.

Askarzadeh e Rezazadeh (2012) compararam o L5P e o modelo 2M7P, 2 diodos e 7 parâmetros. O 2M7P mostrou maior precisão nos cálculos, porém, também apresentou maior complexidade para obter os parâmetros.

Os métodos de obtenção de parâmetros utilizam equações não lineares, assim a escolha do modelo é bastante importante para buscar simplificar os cálculos. Os principais métodos são gráfico, analítico e numérico (TOSSA et al., 2014).

2.5 INSTRUMENTOS METEOROLÓGICOS

A estação meteorológica é responsável por realizar medições de diversas variáveis com o principal intuito de analisar o clima e o tempo do local de instalação da estação. Essa é composta por diversos equipamentos com finalidade de medir a radiação solar, pluviosidade, direção e velocidade do vento. Os principais equipamentos serão listados a seguir.

O piranômetro é responsável por quantificar a irradiância que chega a sua superfície, ou seja, a irradiância global, na qual a presença de uma semiesfera, proporciona uma uniformidade na radiação que será medida. Além disso, o instrumento pode ser utilizado tanto na horizontal quanto inclinado, conforme é apresentado na Figura 20.

Os dois tipos principais de piranômetro é de termopilha e fotodiodo. O primeiro realiza a medição dos dados através da transformação da energia térmica em energia elétrica, por conta da termopilha. Esse equipamento é revestido de um material com a finalidade de simular um corpo negro (PEREIRA et al., 2017).

O piranômetro de fotodiodo tem como instrumento de medição uma célula semicondutora que converte a energia solar em energia elétrica, ou seja, mesma função de um painel fotovoltaico. Um problema associado é a não linearidade dos dados, que acarreta em uma incerteza nas medições.

Figura 20 - Piranômetro



Fonte: Geodesign (2017)

O piranômetro com anel de sombreamento é responsável por quantificar a irradiância difusa que incide na superfície, pois, o anel impedirá a penetração de irradiância direta, sendo o mesmo composto por um sistema de acompanhamento solar. Logo, este deve ser ajustado periodicamente, para evitar possíveis falhas nas medições.

Os equipamentos mais recentes já vêm com sistema de rastreamento. O instrumento está representado na Figura 21.

Figura 21- Piranômetro com anel de sombreamento



Fonte: Vianello (2011).

O pireliômetro é responsável por medir a irradiância direta que incide na superfície, assim como, o piranômetro com anel de sombreamento possui um sistema de acompanhamento solar que emprega o mesmo formato do piranômetro de termopilha (PEREIRA et al., 2017). O pireliômetro está apresentado na Figura 22.

Figura 22 -- Pireliômetro



Fonte: Romiotto (2017).

O heliógrafo é um instrumento mais antigo responsável por medir a duração da insolação, ou seja, o número de horas de sol. O funcionamento é através de uma esfera de vidro que acaba concentrando os raios em um ponto específico. Os raios concentrados queimam um papel especial e através dessa faixa de papel queimado é possível medir a quantidade de horas.

O Anemômetro e Biruta irão medir a velocidade o vento e a direção do vento, respectivamente. Um exemplo do instrumento é apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Biruta e Anemômetro



Fonte: Ciências (2017)

O termômetro é responsável por medir a temperatura durante o dia, podendo auferir de seca e a úmida. Existem outros equipamentos como o pluviômetro, responsável por medir a precipitação pluvial, o higrômetro, registra a umidade relativa do ar, e o barógrafo, registra a pressão atmosférica.

3 METODOLOGIA

O trabalho visa simular a energia gerada por sistemas fotovoltaicos e comparar com a energia gerada por já sistemas instalados em diversas cidades do Nordeste, usando o método de obtenção da energia gerada pelo módulo fotovoltaico descrito por Villalva (2012).

A partir desse modelo são usados os dados de irradiação horizontal obtidos no site da NASA, baseados em médias anuais de 1983 a 2005. e as equações de posicionamento solar para obter a irradiação que incide na superfície do módulo de acordo com a orientação e inclinação que o sistema real está instalado.

O cálculo dessa variação de irradiação é necessário para comparar a simulação e a energia gerada pelo sistema já instalado, visto que, a irradiação varia segundo as condições de instalação dos módulos. Logo, tal variação também interfere na energia gerada, sendo necessário realizar o estudo da irradiação previamente.

A partir dos dados de irradiação obtidos pode se calcular a energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos, através do método descrito a seguir. Para cálculo da geometria solar é necessário usar o dia juliano em questão e como os dados de irradiação são dados mensais, foi usado o dia juliano característico do mês, conforme Tabela 2 apresentada por Duffie (2013).

Tabela 2 -Dias Juliano Característico do Ano

Mês	Dia Juliano Característico
Janeiro	17
Fevereiro	47
Março	75
Abril	105
Mai	135
Junho	162
Julho	198
Agosto	228
Setembro	258
Outubro	288
Novembro	318
Dezembro	344

Fonte: Duffie (2013).

Na realização dos cálculos foi considerada que a perdas envolvidas no sistema seja de 23%. Tais perdas são por aumento de temperatura na célula, conexão entre os

módulos e por conversão de energia. Também não foram consideradas aquelas que foram provocadas pela limitação do inversor.

O método descrito por Villalva (2012) para calcular a energia gerada por cada módulo é descrito a seguir na Equação 23, na qual I_S é a irradiação na superfície do módulo, A é a área do módulo, ε é a eficiência do módulo e P são as perdas.

$$E_M = I_S A \varepsilon (1 - P) \quad (23)$$

Através da energia gerada em cada módulo, pode se obter a energia realmente gerada pelo conjunto de módulos, apenas multiplicando a energia gerada individualmente e o número de módulos (M), conforme expresso na Equação 24.

$$E_T = E_M M \quad (24)$$

Desta forma tem-se a energia gerada pelo conjunto de módulos para cada dia, assim multiplicando pelo respectivo número de dias presente em cada mês obtém se a energia gerada estimada para cada mês.

Foi desenvolvido um programa para realizar as simulações dos sistemas. O programa permite realizar mudança de orientação e inclinação, com intuito de apresentar uma variação de resultados e buscar uma melhor compreensão do comportamento das curvas relacionadas a geração de energia via sistema fotovoltaicos.

Também foi calculado o erro ($\sigma(\%)$) atrelado a diferença existente entre a energia gerada e simulada através do software, conforme, apresentado na Equação 25.

$$\sigma(\%) = 100 * \frac{E_{gerada} - E_{simulada}}{E_{simulada}} \quad (24)$$

O método utilizado para a obtenção dos resultados também pode ser visto em forma de fluxograma, no Anexo 1.

O passo a passo para obter a energia será descrito a seguir:

Passo 1: Obter os dados de irradiação horizontal direta e difusa, temperatura ambiente no site da NASA.

Passo 2: Calcular a declinação solar, ângulo horário, altura solar e o ângulo de incidência conforme a Equação 1, Equação 5, Equação 6, Equação 8 respectivamente.

Passo 3: Calcular a irradiação incidente na superfície de acordo com a orientação e inclinação da superfície para cada respectivo mês.

Passo 4: Obter os dados dos módulos presente na folha de dados do mesmo.

Passo 5: Calcular a energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

4 RESULTADOS

Foram selecionados alguns sistemas para realizar a comparação entre a energia simulada e a energia efetivamente gerada pelo sistema real, de acordo com as condições de instalação do mesmo.

Os sistemas escolhidos para análise estão instalados nas cidades de João Pessoa-PB, Juazeiro do Norte-CE, Milagres-CE e Fortaleza-CE.

4.1 UFV LARISSA AGUIAR JOÃO PESSOA-PB

O sistema instalado em João Pessoa-PB é composto por 28 módulos *Canadian Solar* com potência máxima de 290Wp. Os dados desse módulo são apresentados na Tabela 3. O mesmo foi instalado pela empresa Live Engenharia.

O sistema está instalado em telhado cerâmico, com latitude igual a -7° e longitude de $-34,8^\circ$.

Tabela 3 -- Folha de Dados do Módulo Canadian Solar 290Wp

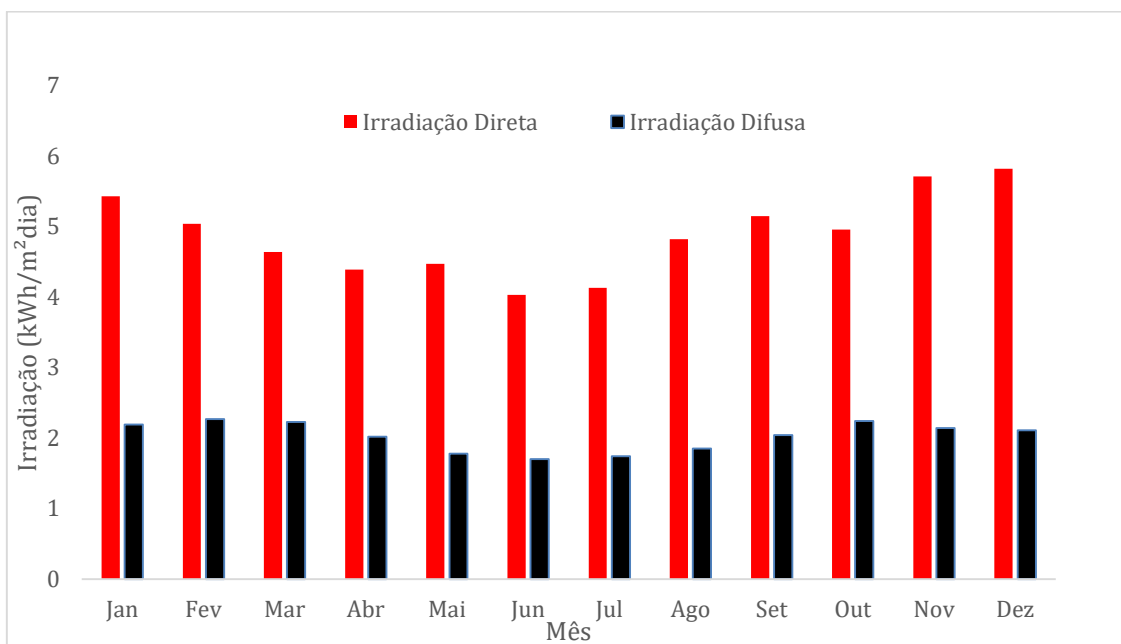
Tensão de Circuito Aberto	39,1 V
Corrente de Curto Circuito	9,57 A
Corrente de Máxima Potência	9,08 A
Tensão de Máxima Potência	32,5 V
Eficiência	17,45%
Área	1,66 m ²
Células Fotovoltaicas	120

Fonte: Canadian Solar (2019)

A orientação de instalação dos módulos é Leste, com inclinação de 10° .

As irradiações diretas e difusas para a cidade de João Pessoa disponibilizada pela NASA para a cidade supracitada estão apresentadas na Tabela 4 e na Figura 24. É válido salientar que esses dados são para a superfície na horizontal, ou seja, os mesmos ainda serão calculados para a superfície inclinada. Além disso, esses dados são médios anual de 22 anos de medição, obtidos no intervalo de 1983 a 2005.

Figura 23 - Irradiações Direta e Difusa para João Pessoa-PB



Fonte: NASA (2019)

Tabela 4 - Tabela de irradiações direta e difusa para cada mês para João Pessoa-PB

Mês	Irradiação Direta (kWh/m²/dia)	Irradiação Difusa (kWh/m²/dia)	Temperatura Média (°C)
Janeiro	5,43	2,19	27,19
Fevereiro	5,04	2,27	27,29
Março	4,64	2,23	27,45
Abril	4,39	2,02	27,10
Mai	4,47	1,78	26,52
Junho	4,03	1,70	25,61
Julho	4,13	1,74	24,89
Agosto	4,82	1,85	24,63
Setembro	5,15	2,04	25,09
Outubro	4,96	2,24	25,88
Novembro	5,71	2,14	26,61
Dezembro	5,82	2,11	27,07

Fonte: NASA (2019).

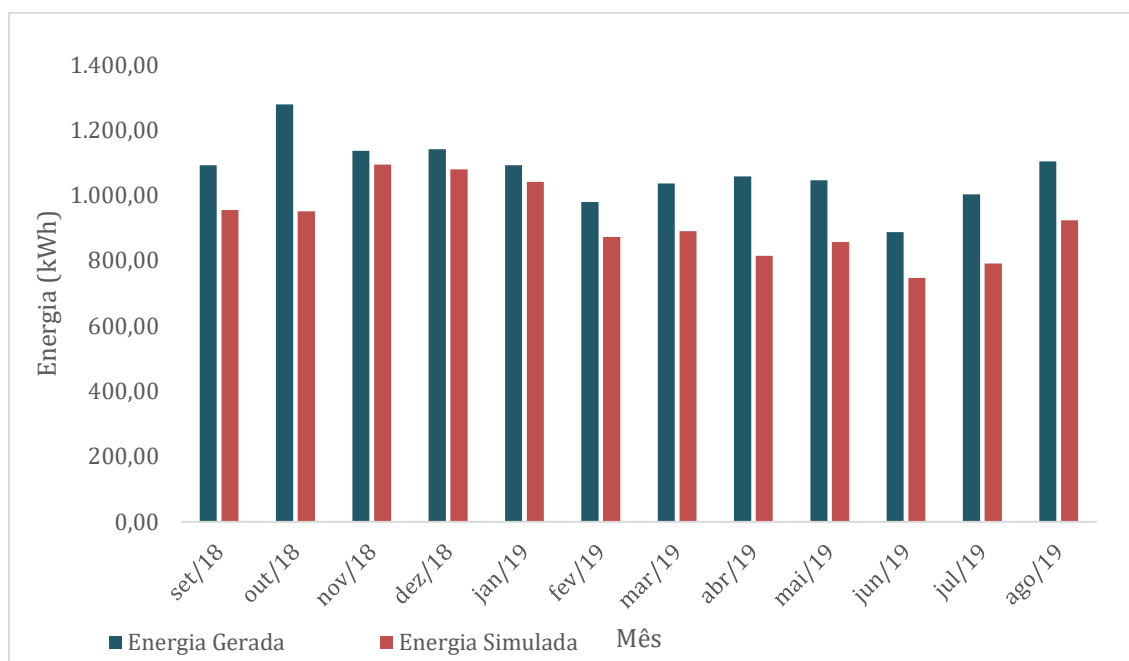
Os dados de geração do sistema adquiridos através do sistema de monitoramento incorporado aos inversores instalados são apresentados na Tabela 5 e na Figura 25.

Tabela 5 -Quantidade de Energia Gerada por mês no Sistema Larissa

Mês	Energia Gerada (kWh)	Simulada (kWh)	Erro (%)
Setembro/2018	1.091,91	955,30	14,30%
Outubro/2018	1.278,06	951,00	34,39%
Novembro/2018	1.136,86	1.094,56	3,86%
Dezembro/2018	1.140,91	1.079,48	5,69%
Janeiro/2019	1.092,73	1.040,96	4,97%
Fevereiro/2019	979,40	872,94	12,20%
Março/2019	1.036,59	889,90	16,48%
Abril/2019	1.057,66	814,54	29,85%
Mai/2019	1.046,69	856,76	22,17%
Junho/2019	886,97	747,64	18,64%
Julho/2019	1.002,68	791,73	26,64%
Agosto/2019	1.104,43	923,74	19,56%

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Figura 24- Quantidade de Energia Gerada e Simulada no Sistema Larissa



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

De acordo com as informações mostradas na Tabela 5 e na Figura 25, é possível perceber que o sistema instalado gerou mais do que o previsto na simulação. Nesse caso, pode ter ocorrido período atípico de irradiação, ou seja, nesse intervalo de tempo houve

um maior índice de irradiação, devido o sistema ter um curto período de operação. A simulação é baseada em dados histórico, conforme mencionado.

As duas variáveis seguem o mesmo comportamento, com exceção do mês de outubro, na qual houve um ápice de geração em relação aos demais meses.

Comparando as Figuras 24 e 25, pode-se notar que o comportamento da energia simulada segue o comportamento da irradiação. Isso significa que em meses de menor irradiação, também houve uma menor geração. Evidenciando o comportamento similar das curvas. O único mês que fugiu do comportamento foi Outubro de 2018.

4.2 UFV HANEIDE MENDONÇA EM MILAGRES-CE

O sistema instalado na cidade de Milagres-CE é composto por 10 módulos GCL-P6/72, com potência de 330Wp. Os dados do módulo estão disponíveis na Tabela 6, apresentada a seguir. É válido salientar que, a orientação dos módulos é Norte com inclinação de 7°. O mesmo foi instalado pela empresa Luz do Sertão Soluções Energéticas. O sistema está instalado em Solo, com latitude de -7,33° e longitude de 38,83°.

Tabela 6- Folha de Dados do Módulo GCL 330Wp

Tensão de Circuito Aberto	46,2 V
Corrente de Curto Circuito	9,33A
Corrente de Máxima Potência	8,73 A
Tensão de Máxima Potência	37,8 V
Eficiência	17%
Área	1,94 m ²
Células Fotovoltaicas	72

Fonte: GCL (2019)

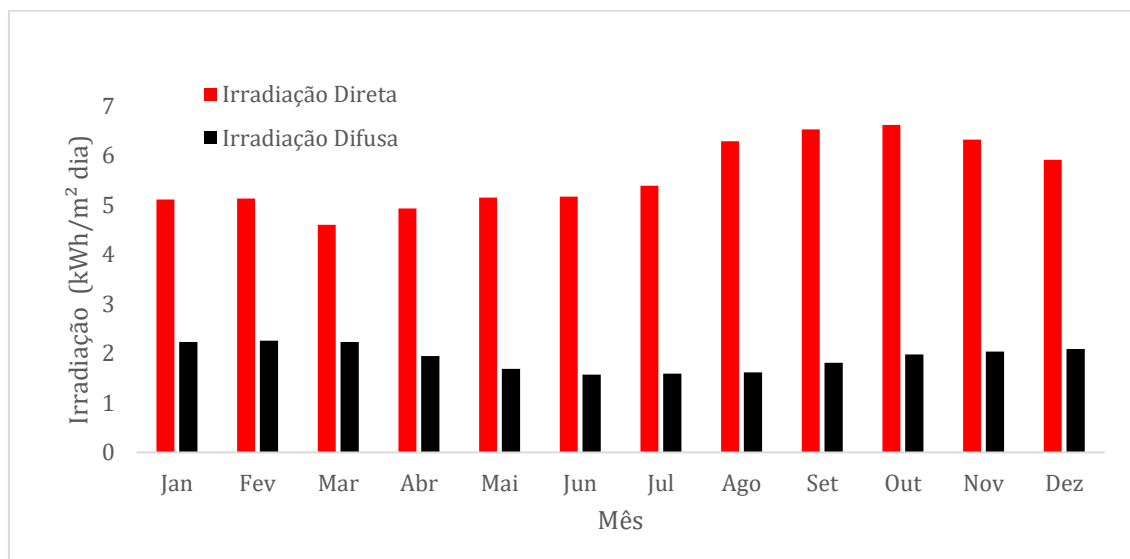
A irradiação direta e difusa para a cidade de Milagres-CE disponibilizada pela NASA, estão apresentadas na Tabela 7 e na Figura 26. A temperatura média para cada mês também está disponível na Tabela 7. Os dados são médios anuais de 22 anos, compreendendo o intervalo de 1983 a 2005.

Tabela 7- Tabela de irradiações direta e difusa para Milagres-CE

Mês	Irradiação Direta (kWh/m ² dia)	Irradiação Difusa (kWh/m ² dia)	Temperatura Média (°C)
Janeiro	5,11	2,23	26,98
Fevereiro	5,13	2,26	25,95
Março	4,6	2,23	25,38
Abril	4,93	1,95	24,83
Mai	5,15	1,69	24,69
Junho	5,17	1,57	24,33
Julho	5,39	1,59	24,47
Agosto	6,29	1,62	25,71
Setembro	6,53	1,81	27,6
Outubro	6,62	1,98	28,99
Novembro	6,32	2,04	29,32
Dezembro	5,91	2,09	28,66

Fonte: NASA (2019)

Figura 25- Irradiações Direta e Difusa para a cidade de Milagres-CE



Fonte: NASA (2020)

O sistema instalado não tem um ano completo de geração, logo, só serão comparados os resultados na qual o sistema registrou. Porém, será disponibilizado o resultado da simulação para os demais meses.

Também será possível realizar a comparação com outro sistema instalado na cidade de Milagres - CE, porém, com outra orientação e módulos diferente. Assim, pode-se analisar a diferença entre as gerações para cada mês.

Os dados de energia gerada até o presente momento e o valor simulado estão presentes na Tabela 8 e na Figura 27.

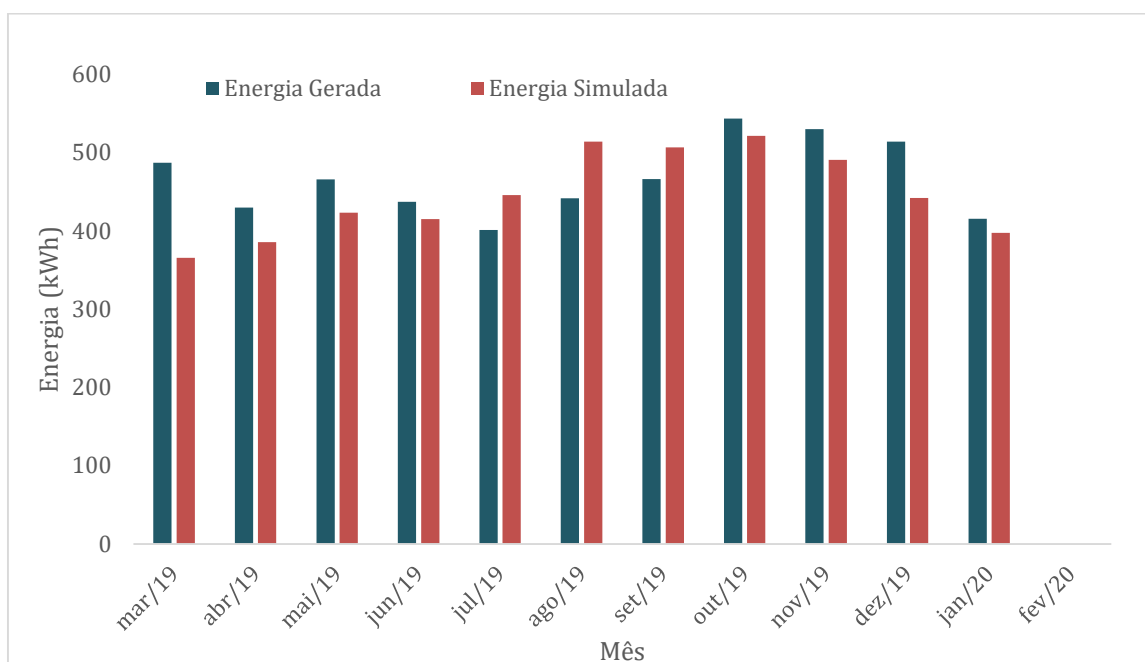
Tabela 8 - Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema Haneide Mendonça

Mês	Energia Gerada (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Erro (%)
Março/2019	487,06	365,88	33,12%
Abril/2019	429,90	385,66	11,47%
Mai/2019	465,85	423,50	10,0%
Junho/2019	437,38	415,20	5,34%
Julho/2019	401,12	445,93	-10,05%
Agosto/2019	441,78	514,17	-14,08%
Setembro/2019	466,27	506,85	-8,01%
Outubro/2019	543,67	521,45	4,26%
Novembro/2019	530,18	491,06	7,97%
Dezembro/2019	514,35	442,07	16,35%
Janeiro/2020	415,80	397,41	4,63%
Fevereiro/2020	N/D	N/D	N/D

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

O mês de Fevereiro/2020 não apresenta dados de geração.

Figura 26 - Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema de Haneide



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

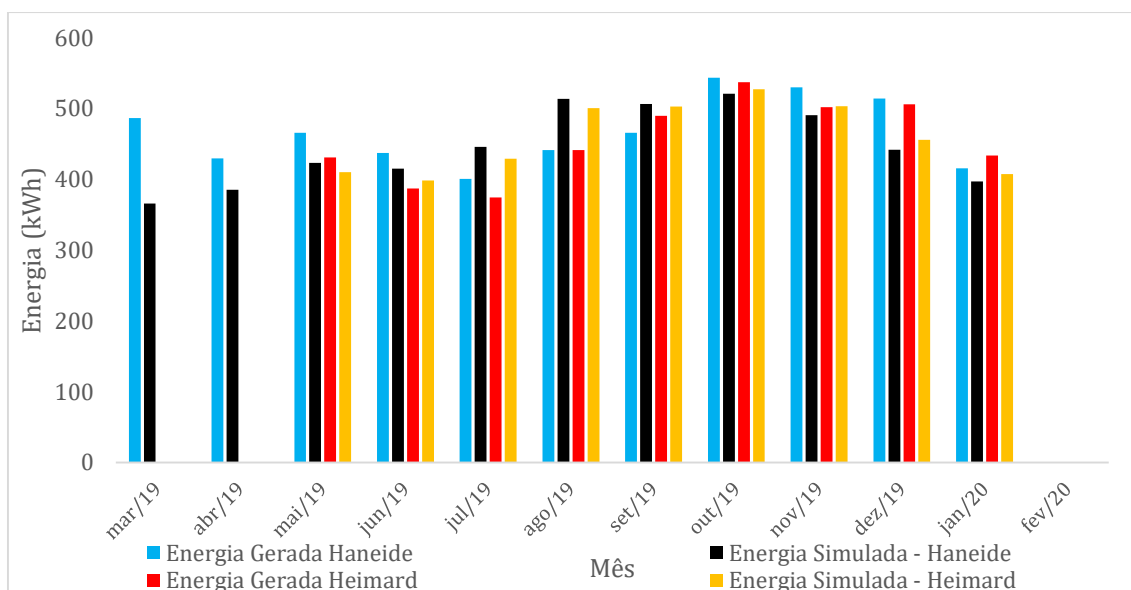
Também é possível realizar a comparação do sistema com outro sistema instalado em Milagres, porém esse segundo tem como orientação Leste-Oeste. Os dados do mesmo são apresentados na Tabela 9. Na Figura 28, realiza-se a comparação entre os a energia gerada e a simulada para os dois sistemas instalado em Milagres-CE. Apesar dos mesmos ainda não possuírem um ano completo de geração. Os meses de Fevereiro a Abril de 2020 não possuem dados de geração registrados.

Tabela 9- Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Heimard Mendonça

Mês	Energia Gerada (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Erro (%)
Mai/2019	431,05	410,38	5,04%
Junho/2019	387,46	398,58	-2,79%
Julho/2019	374,55	429,33	-12,76%
Agosto/2019	441,47	500,87	-11,86%
Setembro/2019	489,81	503,32	-2,68%
Outubro/2019	537,50	527,40	1,92%
Novembro/2019	502,18	503,59	-0,28%
Dezembro/2019	506,5	455,87	11,11%
Janeiro/2020	433,93	407,59	6,46%
Fevereiro/2020	N/D	N/D	N/D
Março/2020	N/D	N/D	N/D
Abril/2020	N/D	N/D	N/D

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Figura 27- Quantidade de Energia Gerada e Simulada Sistema em Milagres-CE



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Comparando as curvas dos valores referentes os dados de energia simulada para os sistema de Haneide e Heimard. Pode-se verificar que apesar dos sistemas terem orientações diferentes a energia gerada é bastante similar. Comparando a energia efetivamente gerada pelo sistema, percebe-se que o comportamento é similar a simulação, ou seja, apresenta uma similaridade nas curvas e valores apresentados. Apesar do sistema voltado ao Norte apresentar uma superioridade em quantidade de energia. Porém não é uma diferença bastante expressiva.

4.3 UFV JUAPLAST EM JUAZEIRO DO NORTE-CE

Esse sistema é composto por 550 módulos *Canadian Solar* de 335Wp. A Tabela 10 apresentará os dados característicos do módulo fotovoltaico.

Tabela 10 - Folha de Dados do Módulo Canadian Solar 335Wp

Tensão de Circuito Aberto	46,1 V
Corrente de Curto Circuito	9,41 A
Corrente de Máxima Potência	37,8 V
Tensão de Máxima Potência	8,87 A
Eficiência	17,23%
Área	1,94
Células Fotovoltaicas	72

Fonte: Canadian Solar (2019)

Os módulos estão divididos da seguinte maneira, 301 módulos com orientação para o Sul, com inclinação variando de 10° e 14°. Os outros 249 módulos foram instalados voltados para o Norte. Além disso, as inclinações dos telhados variam entre 10° e 14°. O sistema está instalado em telhado metálico, com latitude de -7,30° e longitude de -39,31°.

As características de instalação do sistema serão apresentadas na Tabela 11.

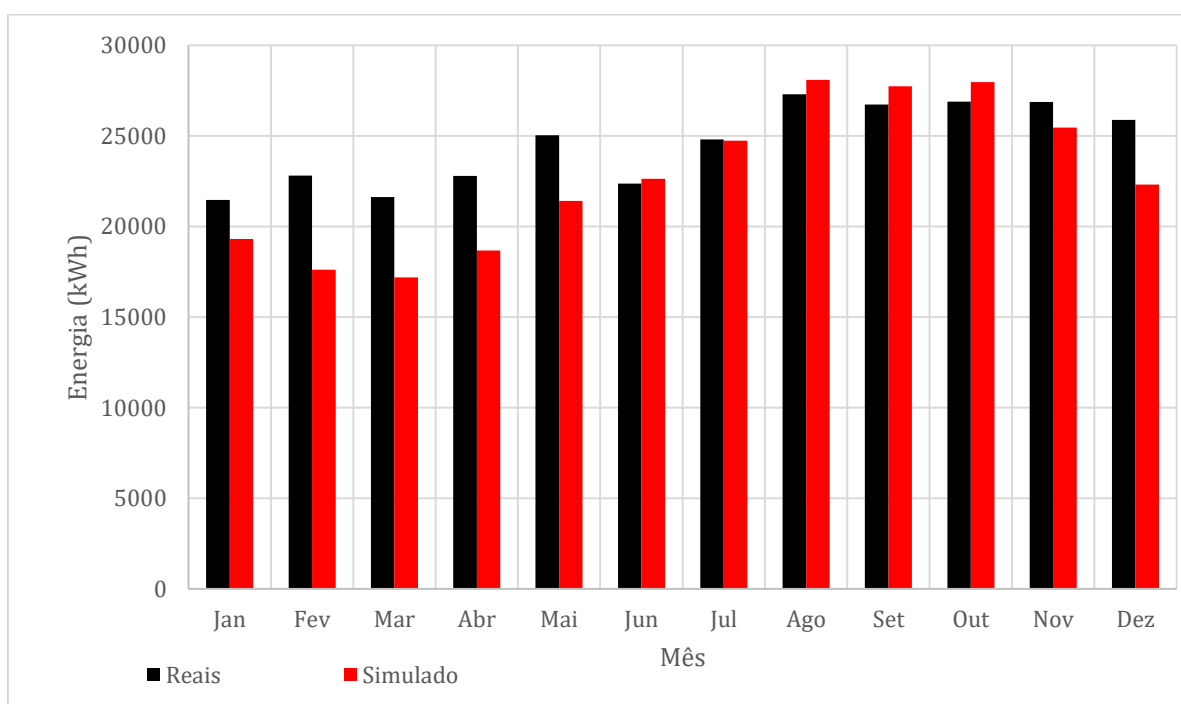
Tabela 11 - Características do Sistema Instalado

Orientação	Inclinação	Quantidade de Módulos
Norte	10°	189
Norte	14°	60
Sul	10°	189
Sul	14°	112

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Os resultados obtidos de energia gerada e simulada são comparados conforme a Figura 29 e na Tabela 12. Esses dados de geração são todos relacionados ao ano de 2018. Os dados da energia simulada são dados obtidos através da irradiação baseada em médias anuais de 22 anos, compreendendo do intervalo de 1983 a 2005.

Figura 28- Gráfico Comparativo entre a energia real e simulada



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Tabela 12 - Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema JuaPlast

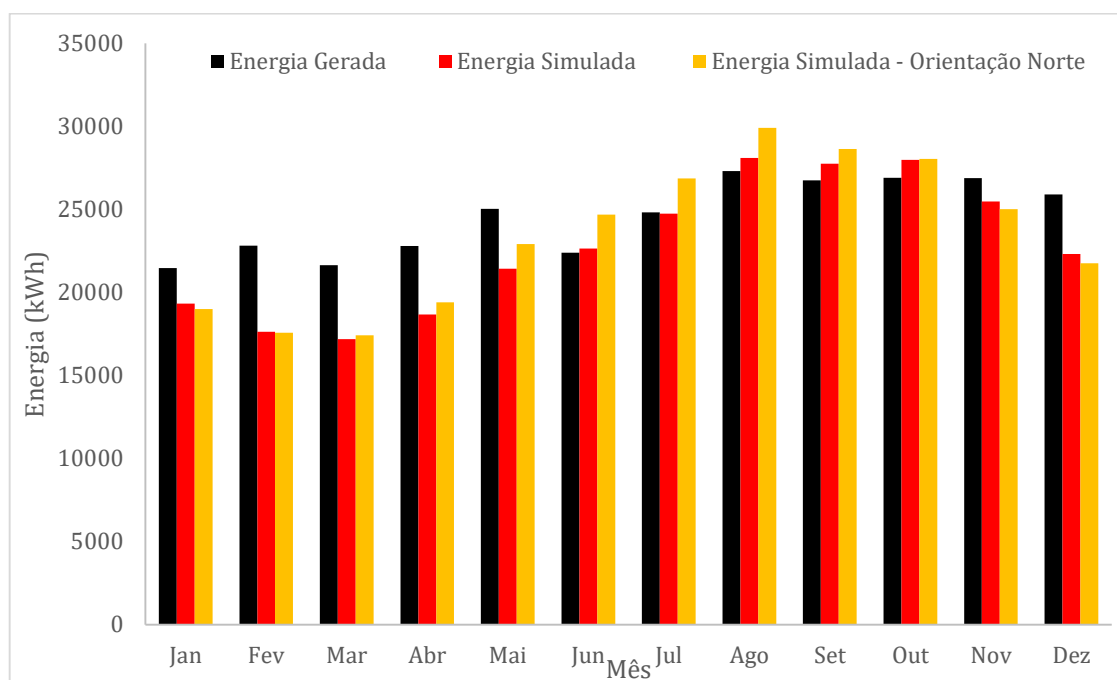
Mês	Energia Gerada (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Erro (%)
Janeiro/2018	21463,5	19313,2	11,13%
Fevereiro/2018	22808,2	17621,8	29,43%
Março/2018	21627,6	17185,9	25,84%
Abril/2018	22796,4	18671,2	22,09%
Maiio/2018	25033,5	21419,3	16,87%
Junho/2018	22379,9	22635,9	-1,13%
Julho/2018	24809,2	24733,0	0,31%
Agosto/2018	27303,1	28100,4	-2,84%
Setembro/2018	26737,8	27744,1	-3,63%
Outubro/2018	26894,9	27973,9	-3,86%
Novembro/2018	26884,3	25470,2	5,55%
Dezembro/2018	25893,2	22315,0	16,04%

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Comparando os dados apresentados na Tabela 12, percebe-se que no período de dezembro a maio, o sistema gerou a mais do que o previsto na simulação. Nos demais meses do ano, os dados de geração do sistema mostraram uma certa igualdade ou aproximação com os dados obtidos na simulação.

Também é possível analisar a diferença entre o sistema que está implantado e o mesmo sistema com a orientação completamente ao Norte, ou seja, todos os módulos orientador ao Norte, e com uma inclinação de 10°, pois, essas características permitem uma otimização na geração. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13 e na Figura 29, conforme denominado de Simulação Norte. Essa simulação também foi utilizada a irradiação média anual de 22 anos, compreendendo o intervalo de 1983 a 2005.

Figura 29 -- Gráfico de Simulação da Geração do Sistema Juaplast



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Tabela 13- Quantidade de Energia Gerada e Simulada do Sistema JuaPlast

Mês	Energia Gerada (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Diferença	Energia Simulada Norte (kWh)	Diferença - Norte
Janeiro/2018	21463,5	19313,2	11,13%	19003,8	12,94%
Fevereiro/2018	22808,2	17621,8	29,43%	17574,9	29,78%
Março/2018	21627,6	17185,9	25,84%	17411,3	24,22%
Abril/2018	22796,4	18671,2	22,09%	19394,1	17,54%
Mai/2018	25033,5	21419,3	16,87%	22912,4	9,26%
Junho/2018	22379,9	22635,9	-1,13%	24673,8	-9,30%
Julho/2018	24809,2	24733,0	0,31%	26849,6	-7,60%
Agosto/2018	27303,1	28100,4	-2,84%	29898,0	-8,68%
Setembro/2018	26737,8	27744,1	-3,63%	28621,3	-6,58%
Outubro/2018	26894,9	27973,9	-3,86%	28038,1	-4,08%
Novembro/2018	26884,3	25470,2	5,55%	25012,4	7,48%
Dezembro/2018	25893,2	22315,0	16,04%	21758,41	19,00%

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

No caso em que todos os módulos estão voltados para o Norte, haveria um ganho de geração quando comparado aos valores da simulação com base no sistema já instalado.

Porém quando comparado aos dados de energia gerada pelo sistema instalado, permanece existindo uma diferença bastante expressiva nos primeiros meses do ano. Apresentado as mesmas características quando comparada os dados de energia gerada pelo sistema instalado e a energia simulada de acordo com as condições do sistema implantados.

Analisando as médias obtidas, nota-se que o sistema instalado gerou bem mais do que o previsto nas simulações 1 e 2. Logo, devido a comparação das curvas, nota-se que houve um ano atípico na irradiação solar. Caracterizado por um ano com menor quantidade de chuvas na cidade de Juazeiro do Norte, na qual o período chuvoso está compreendido entre os meses de janeiro a maio. A menor quantidade de precipitação acarretou em uma maior quantidade de radiação solar, conseqüentemente uma maior geração do sistema.

4.4 UFV TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO CEARÁ EM FORTALEZA

O sistema do tribunal de contas do Ceará foi instalado em fevereiro de 2017, pela empresa *Souenergy*. O sistema implantado é composto por 110 módulos *Canadian* de 270 Wp e 1 inversor SMA *Sunny Boy* de 25kW. Os dados característicos dos módulos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Folha de Dados do Módulo Canadian Solar 270Wp

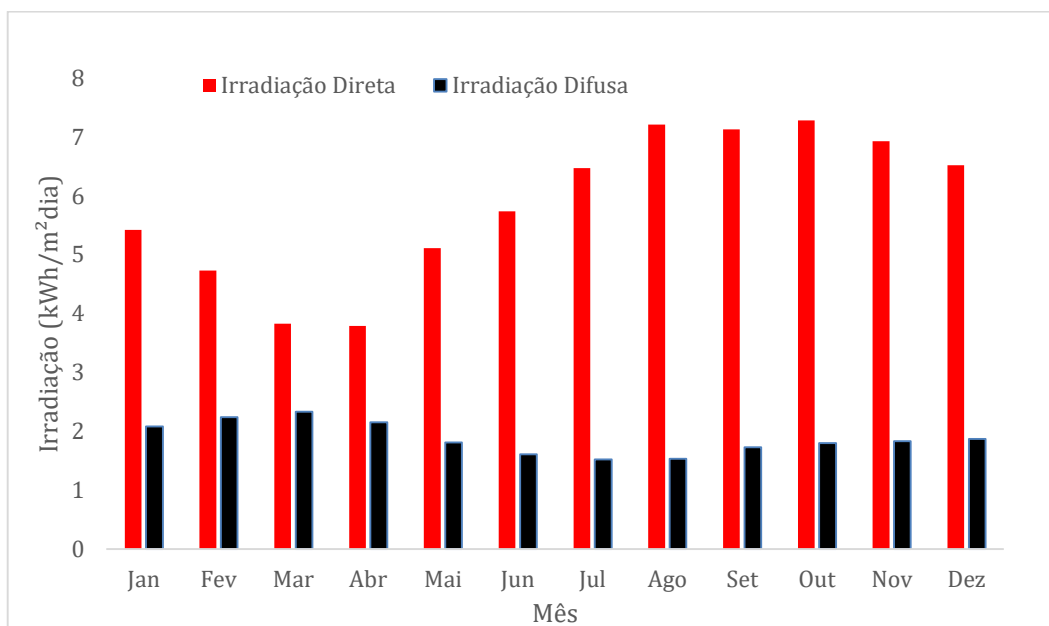
Tensão de Circuito Aberto	37,9 V
Corrente de Curto Circuito	9,32 A
Corrente de Máxima Potência	30,8 V
Tensão de Máxima Potência	8,75 A
Eficiência	16,5%
Área	1,64
Células Fotovoltaicas	60

Fonte: Canadian Solar (2019)

Todos os módulos estão orientando em 160° e com uma inclinação de 12°.

Os dados de irradiação direta e difusa disponibilizados pela NASA para a cidade de Fortaleza – CE , são apresentados na Figura 30. Esses dados são baseados em médias anuais de 22 anos de medições, compreendendo o período de 1983 a 2005.

Figura 30- Irradiações Direta e Difusa da cidade de Fortaleza

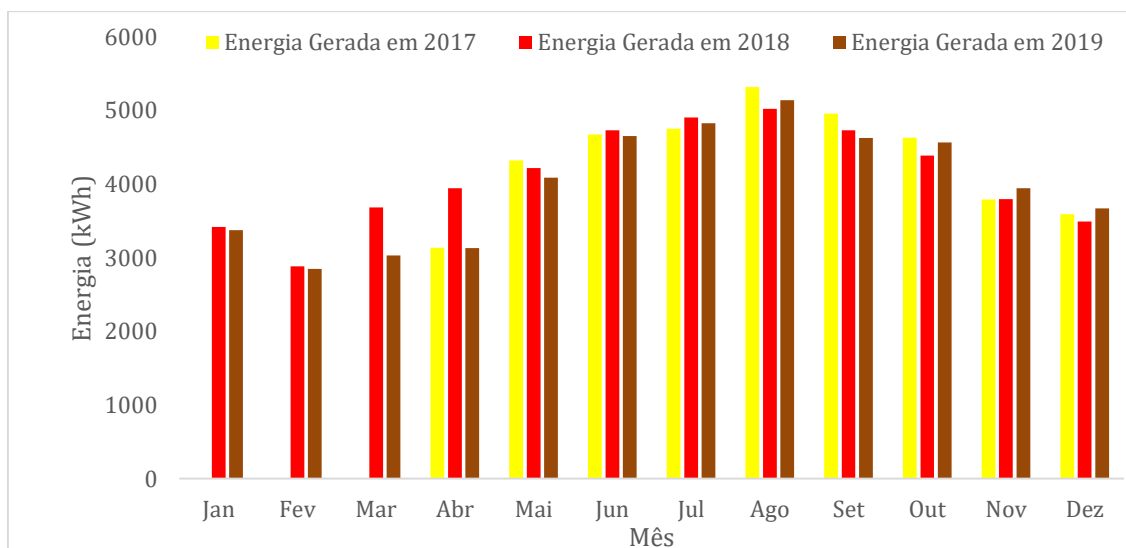


Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Através dos dados apresentados na Figura 30 percebe-se que os níveis de irradiação direta para Fortaleza – CE são elevados, principalmente nos últimos meses do ano. Esse fator irá também elevar a produção de energia, visto que, a irradiação direta é a principal fonte de energia para realizar a conversão devido à grande quantidade de energia presente.

Os dados de geração do sistema são apresentados na Figura 31 e na Tabela 14.

Figura 31- Dados de Geração do Sistema do Tribunal de Contas do Ceará



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Tabela 15- Dados de Energia Gerada Anualmente

Mês	Geração de Energia (kWh)				Energia Simulada (kWh)	Diferença
	2017	2018	2019	Média		
Janeiro	N/D	3.420,66	3.376,95	3.398,81	3.642,77	-6,70%
Fevereiro	N/D	2.885,04	2.847,56	2.866,30	2.936,38	-2,39%
Março	N/D	3.682,11	3.034,09	3.358,10	2.686,67	24,99%
Abril	3.136,40	3.946,96	3.130,09	3.404,48	2.618,84	30%
Mai	4.323,83	4.217,34	4.087,23	4.209,47	3.757,98	12,01%
Junho	4.674,46	4.730,42	4.655,54	4.686,81	4.155,87	12,78%
Julho	4.752,03	4.905,75	4.827,11	4.828,30	4.830,75	-0,05%
Agosto	5.317,52	5.023,70	5.140,38	5.160,53	5.270,20	-2,08%
Setembro	4.956,83	4.732,24	4.627,56	4.772,21	4.888,01	-2,37%
Outubro	4.630,42	4.388,41	4.568,72	4.529,18	4.999,54	-9,41%
Novembro	3.793,84	3.796,50	3.945,00	3.845,11	4.642,40	-17,17%
Dezembro	3.591,75	3.492,01	3.670,50	3.584,75	4.183,88	-14,32%

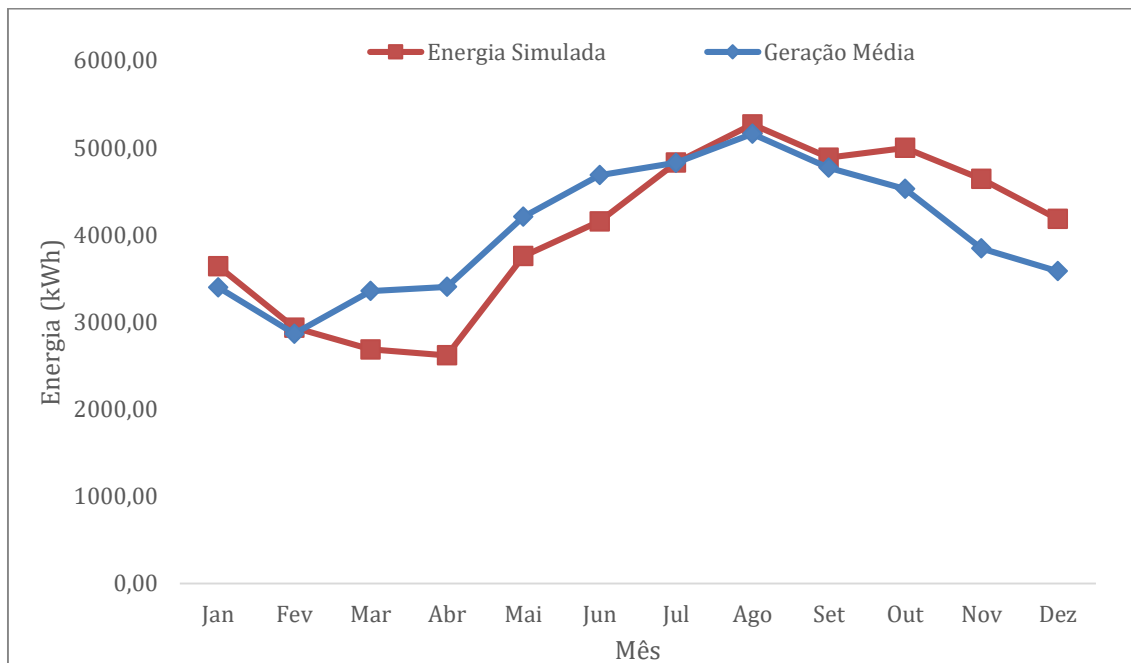
Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Na Figura 31 percebe-se que a praticamente os dois anos de dados existentes seguem o mesmo padrão, existindo apenas algumas variações de valores. Além disso, apresenta o mesmo comportamento que a curva da irradiação direta, confirmando que a irradiação predominante na geração é a direta.

Analisando os 3 anos de dados, nota-se que o mês com maior índice de geração é agosto, com uma média diária de 166,47 kWh, coincidindo com os dados de irradiação. O mês de fevereiro possui o menor nível de geração de energia, com uma média diária de 102,37 kWh, também coincide com os dados de irradiação apresentados para a cidade de Fortaleza. Assim, a energia gerada pelo sistema possui um comportamento similar quando comparado com o comportamento dos níveis de irradiação.

A critério de realizar a comparação com a simulação realizada, será apresentada de duas maneiras, devido os dados de irradiação utilizados serem apenas médias. A primeira será realizada a comparação da média dos dados de geração reais e a simulação realizada. A segunda será comparada a geração de cada mês de forma separada com o respectivo mês da simulação. A Figura 32 apresenta a primeira comparação realizada entre a geração real e a simulação.

Figura 32 - Comparação entre a geração média e a simulação



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Comparando a média de geração real e a realizada através da simulação com base nos dados da NASA, pode-se notar que os comportamentos das curvas são similares.

Os valores apresentados são um pouco diferentes, sendo possível notar que nos meses de março a junho, o sistema gerou mais energia do que o previsto.

Nos meses de janeiro, outubro, novembro e dezembro aconteceu o inverso. O sistema produziu menos do que o previsto.

Os meses de fevereiro, julho, agosto e setembro aconteceram praticamente uma igualdade entre os valores reais e obtidos na simulação.

Realizando o cálculo da média anual de geração, tem-se que os valores são praticamente iguais, na qual o sistema real gerou 4.045,94kWh e a simulação obteve um resultado de 4.051,11kWh. Relacionado à energia produzida anualmente existe uma equivalência entre o modelo e o sistema real.

Através do *software* de simulação também é possível realizar simulações, variando inclinação e orientação. Assim, foi realizada a simulação com a inclinação igual a 7°, 10°, 15° e 20°, além de variar a orientação entre o Norte (180°) e o Sul (0°), como será mostrado posteriormente.

O sistema está instalado com o azimute em 160°, logo, foi fixado esse valor e variando a inclinação. Os resultados obtidos estão descritos e apresentados na Tabela 16. Os dados de irradiação utilizados para as simulações são médias anuais de 22 anos,

compreendendo o período de 1983 a 2005. O variação apresenta nas Tabelas 16, 17 e 18 foram obtidas através da subtração da maior geração pela menor geração e dividindo com a maior geração registrada para o mês em questão.

Tabela 16 - Dados de Energia Gerada Anualmente

Mês	Geração de Energia (kWh)				Variação
	7°	10°	15°	20°	
Janeiro	3744,777	3686,128	3571,456	3436,4	8,23%
Fevereiro	2989,239	2959,478	2896,923	2818,6	5,71%
Março	2710,619	2697,873	2665,843	2620,548	3,32%
Abril	2622,956	2622,11	2609,872	2584,191	1,48%
Maiο	3720,639	3745,762	3769,484	3770,38	1,32%
Junho	4086,776	4131,369	4184,693	4211,432	2,96%
Julho	4754,893	4804,155	4861,211	4886,605	2,70%
Agosto	5232,768	5259,372	5276,06	5258,095	0,82%
Setembro	4916,045	4902,982	4856,196	4778,471	2,80%
Outubro	5094,303	5041,283	4927,451	4782,56	6,12%
Novembro	4780,715	4701,258	4545,475	4361,544	8,77%
Dezembro	4327,319	4244,389	4085,452	3901,681	9,84%
Média	4081,75	4066,35	4020,84	3950,88	-----

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Comparando com os valores obtidos do sistema real, apresentados na Tabela 14. Pode-se destacar a questão de que a diminuição da inclinação do sistema tende a aumentar a geração média anual. Nesse contexto, é perceptível que a variação de inclinação afeta na geração do sistema fotovoltaico.

O mês de Agosto teve a menor variação entre os resultados obtidos para as simulações. O mês de maior variação entre os valores obtidos foi o mês de dezembro.

O sistema está instalado com uma inclinação aproximada de 12°, na qual a média de geração anual ficou em 4045,94 kWh por mês. Analisando esse valor, percebe-se que está justamente entre os valores simulados para as inclinações de 10° e 15°.

A menor média de geração anual foi obtida, através das simulações, quando a inclinação igual a 20°.

Também foi realizada a simulação do sistema com a orientação igual a 180°, ou seja, os módulos orientados para o Norte, conforme os resultados explícitos na Tabela 17.

Tabela 17 -- Dados de Energia Gerada Anualmente

Mês	Geração de Energia (kWh)				Variação
	7°	10°	15°	20°	
Janeiro	3739,375	3678,432	3559,985	3421,241	8,51%
Fevereiro	2987,327	2956,754	2892,864	2813,235	5,83%
Março	2710,796	2698,125	2666,218	2621,044	3,31%
Abril	2624,889	2624,863	2613,976	2589,614	1,34%
Mai	3727,777	3755,933	3784,645	3790,414	1,65%
Junho	4097,316	4146,389	4207,079	4241,014	3,39%
Julho	4766,889	4821,246	4886,686	4920,269	3,12%
Agosto	5241,93	5272,427	5295,517	5283,807	1,01%
Setembro	4918,878	4907,019	4862,213	4786,421	2,69%
Outubro	5091,351	5037,077	4921,182	4774,276	6,23%
Novembro	4773,479	4690,947	4530,106	4341,234	9,06%
Dezembro	4319,071	4232,637	4067,937	3878,534	10,20%
Média	4083,26	4068,49	4024,03	3955,09	-----

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Comparando os resultados dessa simulação com os dados mostrados na Tabela 14, percebe-se que os valores obtidos são bem semelhantes, ocorrendo uma pequena variação. Visto que, as orientações são bem próximas na implicaria em uma variação tão grande entre os valores, conforme esperado.

O mês de Agosto teve a menor variação entre os resultados obtidos para as simulações. O mês de maior variação entre os valores obtidos foi o mês de dezembro. Mesmo comportamento obtido na simulação anterior e valores aproximados.

A critério de realizar uma comparação da geração do sistema entre o Sul e Norte, também foi simulado a geração considerando que a orientação do sistema seja 0°, ou seja, Sul. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Dados de Energia Gerada Anualmente

Mês	Geração de Energia (kWh)				Variação
	7°	10°	15°	20°	
Janeiro	3918,504	3933,667	3940,407	3923,955	0,56%
Fevereiro	3050,721	3047,083	3027,497	2991,148	1,95%
Março	2704,936	2689,776	2653,773	2604,598	3,71%
Abril	2560,802	2533,549	2477,874	2409,76	5,90%

Maio	3491,035	3418,605	3281,865	3126,008	10,46%
Junho	3747,743	3648,291	3464,675	3259,954	13,02%
Julho	4369,086	4254,428	4041,855	3803,855	12,94%
Agosto	4938,095	4839,501	4650,25	4431,11	10,27%
Setembro	4824,925	4773,149	4662,682	4522,749	6,26%
Outubro	5189,246	5176,564	5129,086	5049,013	2,70%
Novembro	5013,476	5032,912	5039,798	5014,774	0,52%
Dezembro	4592,587	4622,362	4648,813	4646,142	1,21%
Média	4033,43	3997,49	3918,21	3815,26	-----

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Analisando a variação calculada, tem-se que o mês com menor variação de resultados foi Novembro. O mês com maior variação registrada foi Junho. Comparando aos resultados das simulações anteriores, tem-se que a variação a orientação provocou uma mudança nos resultados. A interpretação dessa mudança é verificada na carta solar, justamente com a análise da trajetória solar.

Os resultados mostram que realmente existe uma variação de geração quando os módulos estão orientados ao Sul. Tal variação é perceptível para todos os valores de inclinação, na qual também seguiu o mesmo comportamento das simulações anteriores, quanto maior a inclinação menor a geração média do sistema.

Apesar da média ser um valor menor, alguns meses são caracterizados por ter uma geração maior quando os módulos voltados ao Sul são comparados aos voltados para o Norte. Esses meses são janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro. Analisando a Carta Solar da cidade de Fortaleza - CE, é possível perceber que nesses meses o Sol está completamente a Sul, ou seja, realmente qualquer superfície voltada a essa orientação irá receber maior quantidade de irradiação e conseqüentemente irá gerar mais energia.

5 CONCLUSÃO

Apesar de alguns sistemas não terem mais de um ano de geração, para qual fosse possível analisar uma média de geração de pelo menos 3 anos, pois nesse tempo seria eliminado a questão de um ano atípico.

Analizados os resultados, conclui-se que a simulação apresentar uma boa representatividade da geração média anual, conforme pode-se analisar na Tabela 19.

Tabela 19 - Geração Média Anual

Sistema	Energia Gerada (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Diferença
Larissa	1.071,24	918,21	16,67%
Haneide	466,65	439,43	6,19%
Heimard	456,05	437,83	4,16%
Juaplast	24.552,63	22.765,32	7,85%
TCE-Fortaleza	4.053,67	4.051,11	0,06%

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Considerando que os sistemas de Larissa, Haneide, Heimard e Juaplast foram comparados apenas um ano de dados, devido a recente instalação. A diferença entre a energia gerada e simulada pode se dar devido a incidência de um ano atípico em relação a irradiação solar.

Comparando os dados do sistema do sistema do TCE Fortaleza, na qual o mesmo já apresenta uma base de dados considerável para análise, pode se destacar a similaridade dos valores de energia gerada e simulada. Ou seja, a simulação obteve um valor próximo a realidade de geração do sistema.

Se comparamos a geração mensal, haverá uma diferença entre valores para alguns meses, podendo estar relacionado com a variação das perdas no sistema de geração de energia solar. Em outros meses houve uma ótima proximidade entre a energia gerada real e a simulada pelo *software*.

Realizando uma análise de diferença, tem se que a maior diferença registrada foi para o sistema de Larissa. Mostrando que os valores ficaram bem abaixo dos registrados no sistema de monitoramento do sistema real. Porém, o sistema do TCE apresentou uma excelente aproximação, visto que a diferença registrada foi baixa.

O programa utilizado para a simulação da geração de energia obteve um resultado satisfatório quando comparado a geração real dos sistemas implantados em diferentes localidades.

REFERÊNCIAS

- ASKARZADEH, A.; REZAZADEH, A. Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms. **Solar Energy**, v. 86, n. 11, p. 3241–3249, 2012.
- AYVAZOĞLUYÜKSEL, Ö.; FILIK, Ü. B. Estimation methods of global solar radiation, cell temperature and solar power forecasting: A review and case study in Eskişehir. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, n. May 2017, p. 639–653, 2018.
- BARBOSA, C. et al. **Biomassa para energia**. Unicamp, 2008.
- BRASIL - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Análise Energética e Dados Agregados. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**, 2015.
- BRASIL - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanco Energético Nacional 2017. **Epe**, p. 296 p., 2017.
- BURSCHEKA, J, *et al.* Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. **Nature**, 2013.
- CANADIAN SOLAR, Folha de Dados do Módulo Canadian 290Wp. <https://siccossolar.com.br/wp-content/uploads/2017/12/CSI_KuPower_CS3K-285-300-P.pdf>, Acesso em 29 de Julho de 2019.
- CANTOR, G. A. R. Influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical. **Dissertação de Mestrado apresentada a Pós-graduação em Energias Renováveis**, p. 177, 2017.
- COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The averaged distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, 1979.
- DA, A.; OLIVEIRA, S. Modelagem da Transferência de Calor em Absorvedores de Concentradores Solares Parabólicos Lineares Modelagem da Transferência de Calor em Absorvedores de Concentradores Solares Parabólicos Lineares. 2017.
- DAHMANI, K. et al. Estimation of 5-min time-step data of tilted solar global irradiation using ANN (Artificial Neural Network) model. **Energy**, v. 70, p. 374–381, 2014.
- DANANDEH, M. A.; MOUSAVI, S. M. G. Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches : A comparative study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, n. April, p. 319–330, 2018.
- DE BLAS, M. A. et al. Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. **Renewable Energy**, v. 25, n. 3, p. 371–380, 2002.
- DONGUE, S. et al. Modeling Of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four-And Five-Parameter Models. **Ijtae.Com**, v. 2, n. 11, p. 612–619, 2012.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; WOREK, W. M. **Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed.** [s.l.: s.n.]. v. 116
- FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. June 2017, p. 181–191, 2018.

FLICKER, J.; JOHNSON, J.; ALBERS, M.; BALL, G. Recommendations for isolation monitor ground fault detectors on residential and utility-scale PV system. Em: 42^a Conferência de EspecialistasFotovoltaicos, 2015. p. 1-6.

FREIRE, F., Como funciona a célula fotovoltaica. <<https://shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/>>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2020.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 2008.

HOUSMANS, C.; LELOUX, J.; JOURN, M. Solar irradiation from the energy production of residential PV systems. v. 125, p. 306–318, 2018.

JORDEHI, A. R. Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 354–371, 2016.

KARAMIRAD, M. et al. ANN based simulation and experimental verification of analytical four- and five-parameters models of PV modules. **SimulationModellingPracticeandTheory**, v. 34, p. 86–98, 2013.

LANDIM, I. H. L. M. L. Metodologia para estimar a produção de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. **Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba**, v. 1, p. 71, 2017.

MARZOUQ, M. et al. New daily global solar irradiation estimation model based on automatic selection of input parameters using evolutionary artificial neural networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 1105–1118, 2019.

NASCIMENTO, C. A. DO. Princípio De Funcionamento Da Célula Fotovoltaica. **Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras**, p. 21, 2004.

NEWELL, T. A. Simplemodels for hourlytodailyradiationratiocorrelations. **Sol Energy**, 1983.

NOTTON, G.; PAOLI, C.; DIAF, S. Estimation of tilted solar irradiation using Artificial Neural Networks. **Energy Procedia**, v. 42, p. 33–42, 2013.

OTHMAN, A. BEN; BELKILANI, K.; BESBES, M. Global solar radiation on tilted surfaces in Tunisia : Measurement , estimation and gained energy assessments. **Energy Reports**, v. 4, p. 101–109, 2018.

PADOVAN, A.; DEL COL, D. Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. **Solar Energy**, v. 84, n. 12, p. 2068–2084, 2010.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro da Energia Solar**. p. 31, 2017.

PINTO, M. de O. **Fundamentos de energia eólica**. Grupo Gen-LTC, 2013.

RAPTIS, P. I. et al. Measurements and model simulations of solar radiation at tilted planes, towards the maximization of energy capture. **Energy**, v. 130, p. 570–580, 2017.

SAMPAIO, P. G. V. et al. Photovoltaic technologies: Mapping from patent analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, n. May 2017, p. 215–224, 2018.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, n. March, p. 590–601,

2017.

SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 698–733, 2013.

SHADDEL, M.; SEYED, D.; BAGHERNIA, P. Estimation of hourly global solar irradiation on tilted absorbers from horizontal one using Artificial Neural Network for case study of Mashhad. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 59–67, 2016.

SHAZLY, S.M.E. Estimation of hourly and daily global solar radiation at clear days using an approach based on modified version of Gaussian distribution. **AdvAtmosSci**, 1996.

SOBRI, S.; KOOHI-KAMALI, S.; RAHIM, N. A. Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review. *Energy Conversion and Management*, v. 156, n. May 2017, p. 459–497, 2018.

TOSSA, A. K. et al. A new approach to estimate the performance and energy productivity of photovoltaic modules in real operating conditions. **Solar Energy**, v. 110, p. 543–560, 2014.

VIANELLO, R. L. A estação meteorológica e seu observador: uma parceria secular de bons serviços prestados a humanidade. **Instituto Nacional de Meteorologista**, 2011.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica -Conceitos e Aplicacoes**São Paulo Érica, , 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Modeling and simulation of photovoltaic arrays. **World energy system conference**, v. 14, n. 1, p. 6, 2009.

XIAO, W.; DUNFORD, W. G.; CAPEL, A. A novel modeling method for photovoltaic cells. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, v. 3, p. 1950–1956, 2004.