



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

PATRICK TEIXEIRA LIMA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADO À REDE
PÚBLICA DE ENERGIA NA REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA**

**FORTALEZA
2019**

PATRICK TEIXEIRA LIMA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADO À REDE
PÚBLICA DE ENERGIA NA REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro em Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiola Leite Almeida.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L71a Lima, Patrick Teixeira.
Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectado à rede pública de energia na Região Nordeste brasileira / Patrick Teixeira Lima. – 2019.
72 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2019.
Orientação: Profa. Dra. Fabiola Leite Almeida.
1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Índices de Méritos. 3. Avaliação de Desempenho. I. Título.
CDD 621.042
-

PATRICK TEIXEIRA LIMA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADO À REDE
PÚBLICA DE ENERGIA NA REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro em Energias Renováveis.

Aprovada em: __/__/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof.a Dra. Ana Fabiola Leite Almeida (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marcone Lima
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof. Dr. Nivaldo Freire Aguiar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela jornada que estou trilhando e por toda graça recebida. Não tenho como não ser grato a ele. Ser este homem em constante aprendizado que tenho aprendido a ser, é algo que vem dele.

A minha tia e minha avó, Daniele e Célia, pois sempre acreditaram que “de mim sairia algo bom” e que, além de me educarem no melhor caminho, me ensinaram que com dedicação e zelo eu conseguiria alcançar todos os meus sonhos. Agradeço por sonharem junto comigo.

A minha mãe, Monique, meu pai, Tibério, que sempre me apoiaram de uma forma única e em sua particularidade, a qual me ajudou a ser o homem que sou hoje.

Aos meus avós Lúcia e Luis Carlos. Minhas tias, Katiuscia, Rebeca, Luana e Valdirene. Aos meus tios, Selvis, Gustavo, Valder e Flaubert. Ao meu padrasto, Francisco Barbosa e ao meu avô, Ailton.

Não poderia esquecer meus irmãos, Naftali, Luan Matheus, Willian e aos pequenos Heitor e Loren, amo vocês.

Aos meus grandes amigos, Matheus, Suzana, João Igor, Francy, Cinara, Mariana Freire, Humberto, Yago, Nayara, Maitê e Roberta. Como cresço ao lado de vocês!

Aos meus amigos e companheiros de faculdade, Mariellen, Sérgio, Rayane, Marianna, Marcelo, Pedro Santiago, Ana Lídia, Pedro Lira, Ully, Matheus Nobre e Deusimar Romeu. Trilhar este caminho foi mais leve com vocês.

Não posso deixar de agradecer também a prof.a. Fabíola que nesse período “conturbado” (mas recompensador) me ajudou e não deixou que eu desistisse da realização desse trabalho.

Sem dúvida meus agradecimentos se estendem ao Rodrigo Carvalho, Ivan, Tionardo, Jonas, Maria, Rose, Tiago, seu João e a toda família Eco Soluções em Energia. Estou aprendendo com os melhores!

Agradeço a estes e a tantos, que tiveram uma parcela única em minha vida e que contribuem para a pessoa que sou hoje. Sem dúvida a realização deste trabalho é apenas mais uma conquista que obtive com todo o apoio de vocês. Obrigado!

RESUMO

A matriz energética brasileira é formada em sua maior parte pela fonte de energia hídrica o que é considerada uma fonte de energia renovável. Porém, os grandes impactos ambientais e o alto custo inerente a este tipo de fonte (além de fatores ambientais como secas prolongadas) faz com que a busca por outras fontes alternativas de energia esteja em ascendência em território nacional. Uma dessas fontes alternativas de energia é a energia solar fotovoltaica que, de forma geral, se divide em sistemas fotovoltaicos isolado e sistemas fotovoltaicos conectado à rede pública de energia. As maiores vantagens desse tipo de fonte, são a possibilidade da geração distribuída e o baixo custo de manutenção. A geração distribuída permite que a tecnologia fotovoltaica se adapte a edificação a qual será instalada, não demandando assim grandes áreas e nem espaço extra na edificação. Além disso, independentemente do tipo de edificação e consumidor, esses sistemas se adaptam a todos os casos. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo à análise de desempenho de dois sistemas fotovoltaicos na região nordeste do território brasileiro, um no estado do Ceará e outro no estado da Bahia.

Diante de tantas vantagens da implantação de sistemas de energia solar fotovoltaica, esta análise visa mostrar se os sistemas que estão sendo instalados nesta região, estão gerando aquilo que é proposto e se seu desempenho atende ou não às expectativas. Para isso, será utilizado os chamados índices de mérito que mostram e comprovam o desempenho deles.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Pública de Energia, Geração Distribuída, Índices de Mérito.

ABSTRACT

The Brazilian energy matrix is formed mostly by the source of hydroelectric energy, which is considered a source of renewable energy. However, the great environmental impacts and the high cost inherent to this type of source (besides environmental factors such as prolonged droughts) makes the search for other alternative sources of energy have an ascendancy in the national territory. One of these alternative sources of energy is photovoltaic solar energy, which is generally divided into photovoltaic systems isolated and photovoltaic systems connected to the public power grid. The major advantages of this type of source are the possibility of distributed generation and the low maintenance cost. The distributed generation allows the photovoltaic technology to adapt to the building which will be installed, thus not requiring large areas and no extra space in the building. In addition, regardless of the type of building and consumer, these systems adapt to all cases. In this context, this research has the objective of analyzing the performance of two SFVCRs in the northeast region of the Brazilian territory, one in the state of Ceará and another in the state of Bahia.

In view of the many advantages of the implementation of photovoltaic solar energy systems, this analysis aims to show if the systems being installed in this region are generating what is proposed and whether or not their performance meets expectations. For this, we will use the so-called merit indexes that show and prove their performance.

Keywords: Photovoltaic System Connected to Public Power Grid, Distributed Generation, Merit Indexes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geometria do sistema Sol-Terra e as estações do ano.	20
Figura 2: Declinação solar nos solstícios e equinócios.	20
Figura 3: Ângulos e relações geométricas entre os raios solares e observador.	21
Figura 4: Componentes da irradiância solar global.	22
Figura 5: Componentes de um coletor solar plano.	23
Figura 6: Coletor solar concentrador.	24
Figura 7: Processo de geração de eletricidade com coletores concentradores.	24
Figura 8: Dopagem de semicondutores.	26
Figura 9: Junção PN e o efeito fotovoltaico.	26
Figura 10: Fatores que diminuem a eficiência da célula fotovoltaica.	27
Figura 11: Perdas por resistências em série e paralelo.	27
Figura 12: Células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si).	28
Figura 13: Células fotovoltaicas de silício policristalino (p-Si).	28
Figura 14: Célula, módulo e painel fotovoltaico respectivamente.	29
Figura 15: Componentes de um módulo fotovoltaico.	29
Figura 16: Curva IxV de uma célula solar de silício.	30
Figura 17: Curva IxV de um módulo fotovoltaico de 330W e 72 células FV, em função da irradiância.	32
Figura 18: Curva IxV de um módulo fotovoltaico em função da temperatura.	32
Figura 19: Inversor SMA off-grid.	34
Figura 20: Inversor Fronius on-grid.	34
Figura 21: Sistema solar fotovoltaico off-grid.	35
Figura 22: Sistema solar fotovoltaico on-grid.	36
Figura 23: Imagem aérea de sistema fotovoltaico 16,12kW.	42
Figura 24: Sistema fotovoltaico 16,12kW.	43
Figura 25: Tela inicial do software Radasol para a estação da instalação 1.	48
Figura 26: Inserção dos parâmetros construtivos da instalação 1 no Radasol.	49
Figura 27: Imagem aérea de sistema fotovoltaico 12,96kW.	56
Figura 28: Sistema fotovoltaico 12,96kW em Acopiara, CE.	56
Figura 29: Tela inicial do Radasol para a estação 2.	61
Figura 30: Inserção dos parâmetros construtivos da instalação 2.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo de energia da instalação 1, de maio de 2016 até maio de 2017.....	43
Tabela 2: Geração estimada de energia da instalação 1.....	44
Tabela 3: Geração de energia da instalação 1.....	46
Tabela 4: Irradiação solar no plano horizontal e plano inclinado na localidade de Porto Seguro, BA.....	48
Tabela 5: Tabela de irradiação no plano inclinado da instalação 1.....	49
Tabela 6: Produtividade da instalação 1 no ano de 2018.....	50
Tabela 7: Taxa de desempenho da instalação 1 no ano de 2018.....	51
Tabela 8: Fator de capacidade da instalação 1 no ano de 2018.....	52
Tabela 9: Consumo de energia da instalação 2 no período de maio de 2012 até abril de 2013.....	57
Tabela 10: Geração estimada de energia da instalação 1.....	58
Tabela 11: Geração da instalação 2 nos anos de 2017/2018.....	59
Tabela 12: Irradiação Solar no plano horizontal e plano inclinado na localidade de Acopiara, CE.....	61
Tabela 13: Tabela de irradiação no plano inclinado da instalação 2.....	62
Tabela 14: Produtividade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.....	63
Tabela 15: Taxa de desempenho da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.....	64
Tabela 16: Fator de capacidade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Geração estimada do sistema fotovoltaico da instalação 1	45
Gráfico 2: Geração da instalação 1 no ano de 2018	46
Gráfico 3: Comparativo entre geração estimada e geração efetiva da instalação 1.	47
Gráfico 4: Produtividade da instalação 1 no ano de 2018.	51
Gráfico 5: Taxa de desempenho da instalação 1 no ano de 2018.	52
Gráfico 6: Fator de capacidade da instalação 1 no ano de 2018.....	53
Gráfico 7: Geração estimada do sistema fotovoltaico da instalação 2	58
Gráfico 8: Geração da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.	59
Gráfico 9: Comparativo entre geração estimada e geração efetiva da instalação 2.	60
Gráfico 10: Produtividade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.	63
Gráfico 11: Taxa de desempenho da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.	65
Gráfico 12: Fator de capacidade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	<i>Ampere</i>
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar
ADECE	Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará S.A
AM	<i>Air Mass</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
C _F	Fator de Capacidade
CIGS	Disseleneto de cobre, Índio e Gálio
COELBA	Companhia de Eletricidade do estado da Bahia
COELCE	Companhia Energética do Ceará
c-Si	Silício cristalino
EVA	Etileno, Vinil, Acetato
FF	Fator de Forma
FV	Fotovoltaico
G	Irradiância
<i>gap</i>	<i>Band gap</i>
GD	Geração Distribuída
I _{mp}	Corrente de máxima potência
I _{sc}	Corrente de curto-circuito
IEA-PVPS	<i>International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programm</i>
k	Quilo
M	Mega
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
m-Si	Silício monocristalino
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
P _{MP}	Ponto de máxima potência

P_N	Potência nominal
P_R	<i>Performance Ratio</i> ou Taxa de Desempenho
p-Si	Silício policristalino
SFVCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFVI	Sistemas Fotovoltaicos Isolado
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V	<i>Volts</i>
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
W	Potência
Wh	Energia
W_p	Potência de Pico
Y_F	<i>Yield</i> ou Produtividade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 Energia Solar	19
3.2 Tecnologia Solar Fotovoltaica	25
3.2.1 Efeito Fotovoltaico, Células Fotovoltaicas, Módulos e Estrutura.....	25
3.2.2 Características Elétricas.....	30
3.2.2.1. Principais Parâmetros Elétricos	30
3.2.2.2 Desempenho dos Módulos	31
3.3 Inversores	33
3.4 Sistemas Fotovoltaico.....	35
3.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Sistemas <i>Off-grid</i>	35
3.4.2. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede ou sistemas <i>On-grid</i>	36
3.5 Geração Estimada de Energia para um SFVCR	37
3.6 Índices de Mérito	37
4 METODOLOGIA.....	40
5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E DISCUSSÕES...42	
5.1 Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede - Projeto Residencial – Instalação 1- 16,12kW	42
5.1.1 Características do Sistema	42
5.1.2 Consumo.....	43
5.1.3 Estimativa de Geração	44
5.1.4 Geração Efetiva	45
5.1.5 Irradiação	47
5.1.6 Índices de Mérito	50
5.1.7 Resultados e Discussões – Sistema 1	54
5.2 Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede - Projeto Residencial – Instalação 2 12,96kW	56
5.2.1 Características do Sistema	56
5.2.2 Consumo.....	57
5.2.3 Estimativa de Geração	57

5.2.4 Geração Efetiva	59
5.2.5 Irradiação	60
5.2.6 Índices de Mérito	62
5.2.7 Resultados e Discussões – Sistema 2	67
7 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Fatores como crescimento populacional, avanços tecnológicos e econômicos e expansão da indústria são alguns dos motivos que mostram a crescente demanda, o alto consumo e a forte dependência da energia elétrica em todo cenário global. Além disso, o petróleo é a fonte de energia mais utilizada mundialmente e já se foi explorado cerca da metade do que se tinha originalmente. A previsão é que a metade restante deve se esgotar em cerca de 50 anos. Gás natural e carvão são algumas das alternativas ao petróleo, juntamente com a energia nuclear (GOLDEMBERG E LUCON, 2007).

À medida que os combustíveis fósseis forem se esgotando, mais custo e menos retorno se terá na exploração desse tipo de fonte de energia. No caso da energia nuclear, não se tem hoje uma tecnologia completamente desenvolvida para a sua exploração. Sem falar ainda, dos riscos de impactos ambientais e aceitação por parte da população, o que são indicadores nada agradáveis para o desenvolvimento desse tipo de energia (GOLDEMBERG E LUCON, 2007).

Diante deste cenário e da busca por um desenvolvimento econômico sustentável (progresso econômico atrelado à conscientização ambiental e segurança energética), as mais diversas instituições como, Organização das Nações Unidas (ONU), a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), organismos responsáveis pela gestão energética da União Europeia, Agência Internacional de Energia (AIE), e outras, têm se preocupado em desenvolver políticas de substituição das fontes de energia fóssil por energias renováveis. Esses são fatores extremamente importantes que têm norteado a tomada de decisões em muitos países nas últimas décadas (PEREIRA, 2014).

Segundo dados disponíveis pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), referente ao ano de 2016, a matriz elétrica brasileira é constituída em sua maior parte pela geração de energia elétrica a partir da energia hidráulica (cerca de 60%) seguido das termelétricas (cerca de 16%). A energia eólica constitui cerca de 7,6% e a energia solar compreende uma pequena parcela de 0,71%.

Isso levanta um questionamento: apesar da matriz de energia elétrica brasileira ser predominantemente de caráter renovável, a energia solar compreende um percentual muito pequeno frente ao potencial que a mesma possui. O local onde há a menor incidência de radiação solar no Brasil têm um potencial maior na geração de energia elétrica, que o local onde há maior incidência na Alemanha, país onde o incentivo à energia solar é amplo. Além disso, fatores como uniformidade e sazonalidade fazem do Brasil um país bastante propício ao desenvolvimento desse tipo de energia (PEREIRA, et al., 2017).

Segundo o Relatório de Energia Solar da Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará S.A. – ADECE, no Ceará, o cenário não difere desse citado anteriormente. Assim como no Brasil, os meses de maior incidência de radiação solar são aqueles em que corresponde ao período seco, ou seja, período em que há maior escassez de água. O que sugere que aplicações de sistemas que utilizem a energia solar (aquecimento, bombeamento de água e produção de energia elétrica) contribuiriam na conservação de água nos reservatórios que estão presentes no Nordeste e são utilizados na geração hidroelétrica.

A forma de produção de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica está dividida em duas formas atualmente: geração distribuída e centrais solares. A geração distribuída, por sua vez, pode ser subdividida em sistemas *on-grid* e sistemas *off-grid*. As resoluções nº482 e nº517, aprovadas pela ANEEL em 2012 e posteriormente a nº687/2015, regulamentam as condições da geração distribuída (micro e mini geração) e o sistema de compensação, onde a geração de energia excedente gera créditos que podem ser utilizados pela mesma unidade consumidora ou por outra que esteja sob mesma titularidade que a unidade geradora.

A procura pela aquisição de um sistema solar fotovoltaico tem crescido em todo o Brasil, isso pode ser visto pelo crescimento exponencial dessa forma de energia no cenário brasileiro. Até o fim de 2018, a Associação Brasileira de Energia Solar (Absolar) estimou que o crescimento seria de 325% com relação à capacidade anterior. Além disso, estima-se que até 2030, o Brasil estará entre os cinco maiores produtores de energia elétrica tendo a energia solar fotovoltaica como uma das suas principais fontes. No ano de 2018, o Brasil atingiu a marca de 300MW de potência instalada em todo o território nacional. Por sua vez, entre todos os estados brasileiros, o Ceará ocupa o quarto lugar, com a representação de 5,84% de toda produção nacional. (ANEEL)

Com a crescente escala da utilização dos sistemas fotovoltaicos para a produção de energia em todo território nacional, o presente trabalho faz uma análise de desempenho de sistemas de energia solar fotovoltaica que estão localizados em alguns municípios do estado do Ceará. Aferindo assim, se a expectativa teórica de geração, perdas, compensação da energia e viabilidade econômica atendem aos parâmetros de projeto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é realizar uma análise de desempenho por meio de índices de mérito de dois sistemas localizados na região nordeste do Brasil. Espera-se avaliar por meio dos índices de mérito se o desempenho desses sistemas está dentro dos valores esperados para o modo de operação o qual ele foi proposto, avaliando a qualidade da tecnologia e dos projetos que estão sendo desenvolvidos.

2.2 Objetivos Específicos

Quanto aos objetivos específicos:

- Estudo das características de sistemas fotovoltaicos conectado à rede pública de energia;
- Coleta dos dados de geração de energia dos sistemas;
- Cálculo dos índices de mérito (produtividade, taxa de desempenho e fator de capacidade);
- Análise e comparação dos resultados obtidos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Energia Solar

A energia proveniente do Sol é chamada de energia solar e é dita como energia renovável, pois o seu tempo de vida é bem maior do que a escala que considera o tempo de vida no planeta Terra. Isto faz com que o seu aproveitamento como fonte de energia, em linhas gerais, seja dado como permanente. O sol é considerado uma estrela de tamanho médio e a sua energia é resultado das reações de fusão nuclear entre átomos de Hidrogênio que formam átomos de Hélio. Tais reações nucleares só ocorrem, pois, a temperatura (5778 K ou 5505 °C) e a pressão (340 milhões de vezes maior que a da Terra) são extremamente altas. O que também resulta em uma taxa de energia emitida que é constante há bilhões de anos e que tem uma potência da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W (PEREIRA et. al 2017).

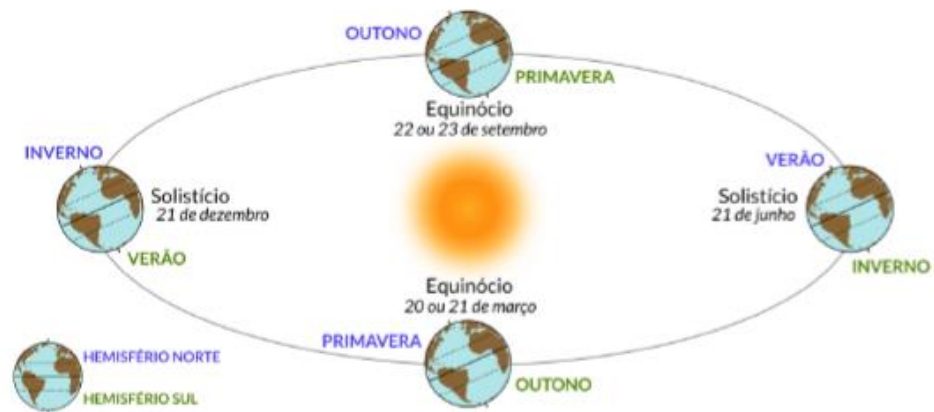
O potencial energético que chega do Sol ao planeta Terra e a sua disponibilidade temporal estão relacionados a geometria que os envolve. Tal energia chega a Terra por ondas eletromagnéticas (fótons) e em forma de luz e calor. Em média o fluxo de radiação solar, chamado de irradiância solar, é de 1366 W/m² e esse valor é tabelado e chamado de constante solar (NREL, 2017).

A geometria do sistema Sol-Terra (Figura 1) é compreendida pelo plano orbital da Terra, que descreve um movimento elíptico de baixa excentricidade ($\varepsilon \approx 0,017$) e o ângulo formado entre o plano equatorial da Terra e a linha que descreve o movimento do Sol (declinação solar, $\delta = \pm 23,45^\circ = \pm 23^\circ 27'$). Tais fatores, atrelado ainda a rotação da Terra em torno de seu eixo, dão origem as estações do ano e consequentemente, a duração dos dias (PINHO; GALDINO, 2014).

Ao se observar a incidência de energia solar ao meio dia solar (Figura 2), durante o ciclo anual, percebemos que, quando a declinação solar, que é medida a partir da linha do Equador, alcança seus maiores valores de amplitude ($\delta = \pm 23,45^\circ$) tem-se os chamados solstícios (21 de junho e 21 de dezembro). Quando a declinação solar é igual a zero ($\delta = 0^\circ$) a incidência de raios solares está alinhada no mesmo plano da Linha do Equador e temos então, os Equinócios (20 ou 21 de março e 22 ou 23 de setembro) (PEREIRA et. al 2017).

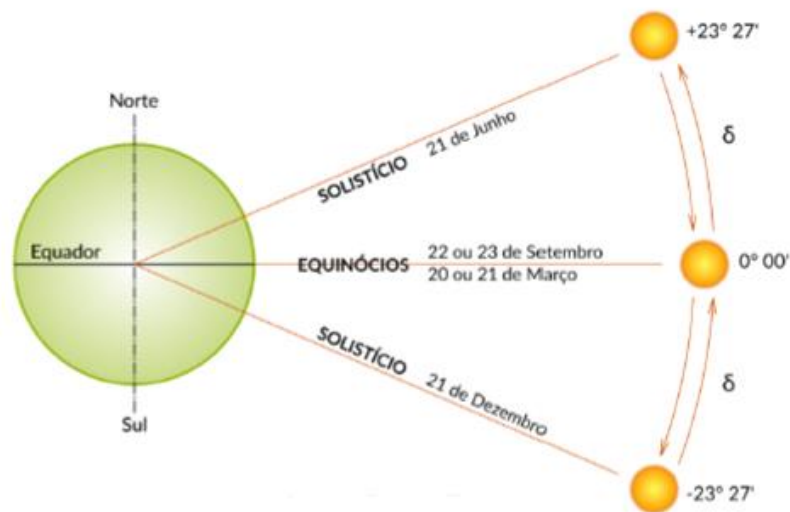
Considerando um observador que esteja no hemisfério sul, o inverno e verão terão início nos solstícios. Será verão quando a “face” do hemisfério sul está voltada para o Sol e inverno quando sua “face” está em direção oposta ao Sol (PEREIRA et. al 2017).

Figura 1: Geometria do sistema Sol-Terra e as estações do ano.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017). Adaptado pelo autor.

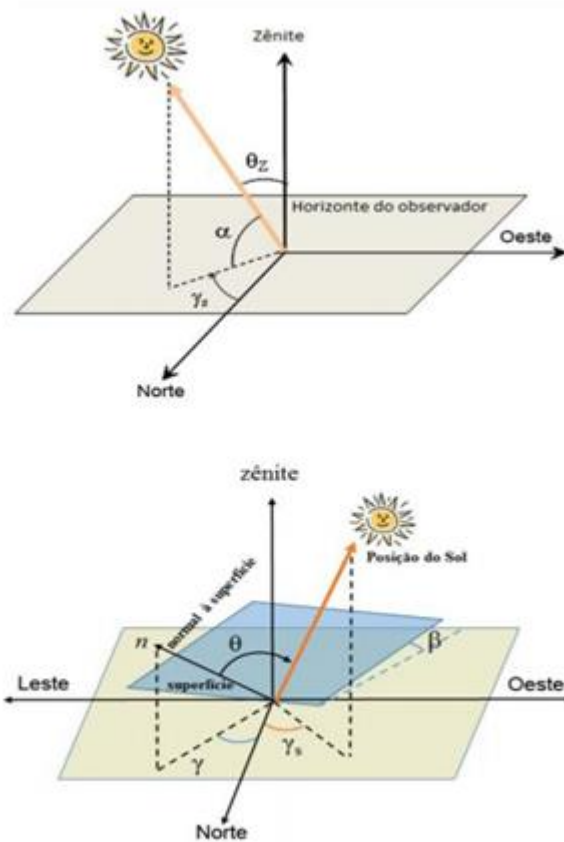
Figura 2: Declinação solar nos solstícios e equinócios.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017). Adaptado pelo autor.

Considerando um observador que está no Hemisfério Sul e uma posição aparente do Sol qualquer, os ângulos e relações geométricas que envolvem os raios de incidência solar são os demonstrados na Figura 3 (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Figura 3: Ângulos e relações geométricas entre os raios solares e observador.



Fonte: Manual de Engenharia (2014). Adaptado pelo autor.

Através da Figura 3 (a), temos:

- Ângulo Zênite (θ_z): Ângulo formado entre a linha vertical do observador e a linha de radiação incidente;
- Ângulo de Altitude Solar (α): Ângulo formado entre o plano horizontal do observador e a linha de radiação incidente (ângulo complementar ao Ângulo Zênite);
- Ângulo Azimute Solar (γ_s): Ângulo entre a projeção normal da posição aparente do Sol e a direção Norte-Sul (Norte quando o observador encontra-se no Hemisfério Sul e Sul quando o observador encontra-se no Hemisfério Norte).

Pela Figura 3(b), temos os seguintes:

- Ângulo de Incidência (θ): Ângulo formado entre a normal da superfície inclinada e a linha de radiação incidente na mesma;

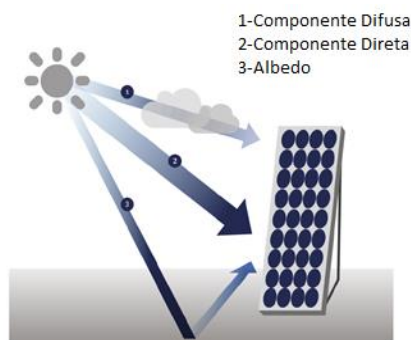
- Inclinação (β): Ângulo entre a superfície inclinada e o plano horizontal [$\beta \leq 90^\circ$];
- Ângulo Azimute de Superfície ou desvio azimutal (γ): Ângulo entre a normal da superfície inclinada e o plano horizontal [$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$].

Outros ângulos importantes:

- Latitude (φ): Posição angular norte ou sul em relação ao Equador. Por convenção, o hemisfério norte possui latitudes positivas e hemisfério sul latitudes negativas [$-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$];
- Ângulo Horário Solar (ω): Deslocamento angular aparente do Sol por conta da rotação da Terra em torno de seu eixo. Cada hora corresponde a 15° , e por convenção, pela manhã é positivo e à tarde, negativo [$-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$].

Pode-se especificar a irradiância solar global (taxa de radiação solar que incide em uma superfície plana) de acordo com suas componentes: direta, difusa e albedo, como pode ser visto na figura 4. A irradiância solar direta é aquela que incide diretamente em uma superfície e que não sofreu processos radiativos de absorção e espalhamento ao penetrar na atmosfera. A irradiância difusa, por sua vez, é aquela que sofreu esses processos por conta dos gases e materiais particulados que compõe a atmosfera terrestre. Albedo é a parte da irradiância global que foi refletida pelo ambiente externo, como solo, edificações, árvores, etc. e que incide na superfície coletora (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 4: Componentes da irradiância solar global.



Fonte: Solar Inovare (2016). Adaptado pelo autor.

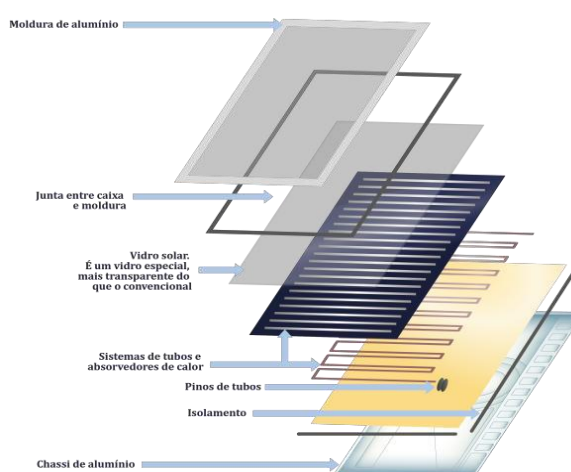
A energia solar é a fonte primária de todas as outras energias. Alguns exemplos desta constatação são: a energia elétrica proveniente de fontes hidráulicas (represamento de um

rio e posteriormente geração) é consequente do ciclo da água, que por sua vez, sem a radiação solar, não poderia realizá-lo; a energia eólica, energia proveniente do movimento das massas de ar, também só existe por conta da incidência de radiação solar de forma diferente nas diversas latitudes do planeta; carvão, gás natural e petróleo, foram gerados a partir de resíduos orgânicos (plantas e animais) que se decomposeram durante milhares de anos. Em vários momentos do seu ciclo de vida necessitaram da energia solar para o seu desenvolvimento; e por fim, lenha (utilizada na queima direta), cana-de-açúcar (álcool), óleos provenientes das mais diversas plantas (biodiesel), etc. necessitaram também da energia solar em seu ciclo de vida (PINHO; GALDINO, 2014).

Pode-se classificar a energia solar de acordo com a sua utilização. São elas:

- Energia Solar Fototérmica: tem esse nome por ter como objetivo a captação e o armazenamento do calor proveniente da energia solar plano (Figura 5). O dispositivo mais amplamente utilizado para esse fim chama-se coletor solar, onde este dependendo da sua faixa de aquecimento e estrutura, pode ser subdividido em coletor solar plano (60°C) e coletor solar concentrador (100-400°C). Os coletores solares plano têm aplicações bem diversificadas, como aquecimento de piscinas, água aquecida para banho, água aquecida para cozimento de alimentos, dessalinização de água, etc. (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 5: Componentes de um coletor solar plano.

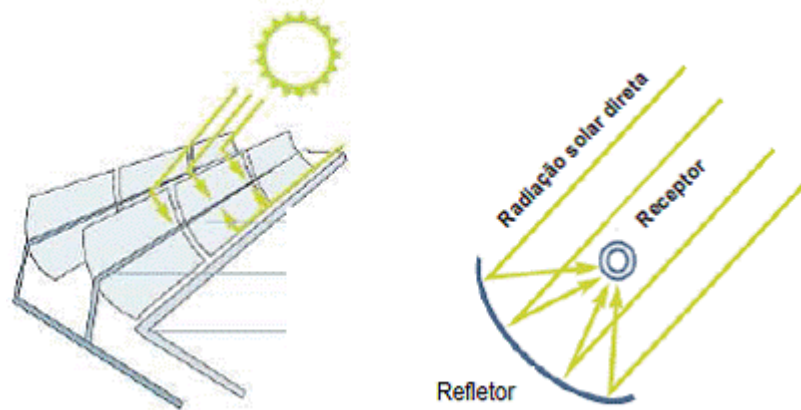


Fonte: Wiki IFSC (2016). Adaptado pelo autor.

Já os coletores concentradores (figura 6) possuem espelhos que fazem com que o fluido alcance temperaturas bastante elevadas. Este fluido aquecido é utilizado para movimentar turbinas a vapor e esta tem seu eixo atrelado a um gerador de energia elétrica. O

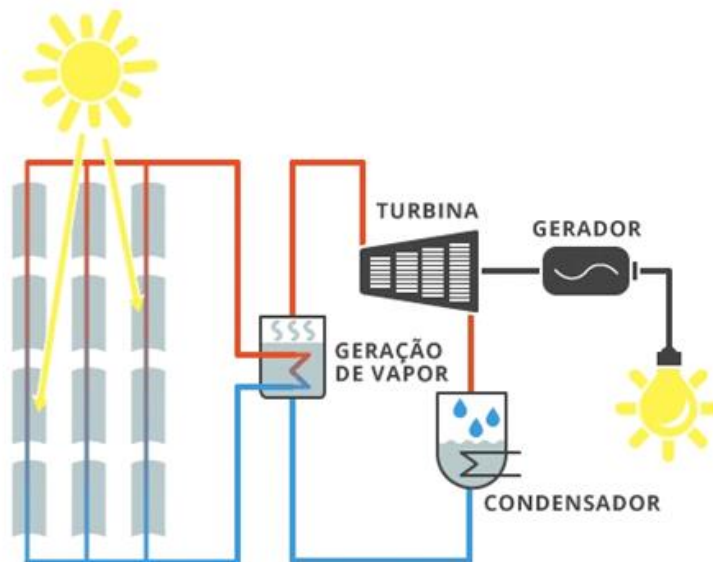
sistema de coletores solares está inserido em um ciclo térmico para geração de eletricidade, como pode ser visto na Figura 7. Isso quer dizer que o mesmo fluido que é aquecido pelos coletores solares, após o acionamento das turbinas, será então resfriado e utilizado novamente no aquecimento com os coletores (CRESESB, 2016).

Figura 6: Coletor solar concentrador.



Fonte: CRESESB (2016). Adaptado pelo autor.

Figura 7: Processo de geração de eletricidade com coletores concentradores.



Fonte: Portal Solar (2016). Adaptado pelo autor.

- **Arquitetura Bioclimática:** tem como objeto de estudo a adaptação das condições ambientais locais em uma construção, pensando nas pessoas que estarão ali presentes e de acordo com o seu padrão de uso. Ou seja, medidas como aproveitamento das correntes naturais de ar para ventilação, criação

de microclimas por uso da vegetação, são alguns das harmonizações proposta por esse estudo;

Quanto ao uso da energia solar na arquitetura bioclimática, pode-se fazer o aproveitamento da radiação solar como forma de iluminação natural, o que reduz o consumo de energia elétrica. Além disso, a orientação da construção, o uso de materiais isolantes em vidros e em paredes é uma forma eficiente de administração do calor proveniente do sol (INFOESCOLA NAVEGANDO E APRENDENDO, 2018).

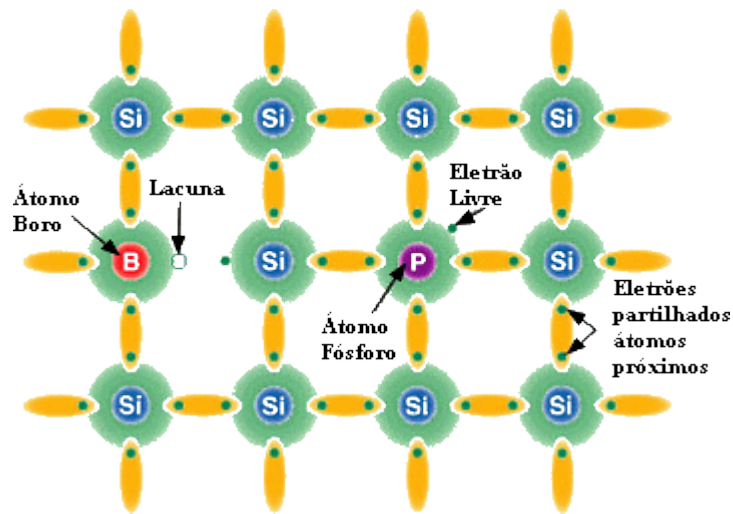
- Energia Solar Fotovoltaica: a radiação solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica, isso quando incide sobre alguns materiais específicos, em especial os semicondutores. Existem dois efeitos que permite a criação de uma diferença de potencial entre matéria, o efeito termoeletrico e o efeito fotovoltaico. O primeiro é resultado da junção de dois metais. Quando essa junção está em uma temperatura mais elevada que as extremidades dos fios, uma diferença de potencial é criada. O segundo acontece pela excitação dos elétrons quando na presença da luz solar (ANEEL, 2018).

3.2 Tecnologia Solar Fotovoltaica

3.2.1 Efeito Fotovoltaico, Células Fotovoltaicas, Módulos e Estrutura.

Na natureza é possível encontrar alguns materiais chamados semicondutores. Esses materiais têm esse nome por possuírem uma característica intermediária entre condutores e isolantes e isso vem do fato deles possuírem uma banda de valência totalmente preenchidas por elétrons e outra banda totalmente vazia às temperaturas muito baixas. O semicondutor mais utilizado atualmente para a fabricação de células fotovoltaicas é o silício, que é constituído de 4 elétrons na sua camada de valência. O silício puro quando dopado (processo de adição de um material para se obter determinadas características) com fósforo, que é um átomo que possui 5 elétrons na sua camada de valência, terá um elétron livre que estará fracamente ligado ao seu átomo. Portanto, o fósforo é chamado de dopante doador de elétrons, logo um dopante N. Por sua vez, quando o silício é dopado com o boro, que é um átomo que possui 3 elétrons na sua camada de valência, terá a falta de um elétron, o que é chamado de lacuna. Portanto, o boro é chamado de dopante receptor de elétrons, logo um dopante P (FADIGAS, 2012).

Figura 8: Dopagem de semicondutores.

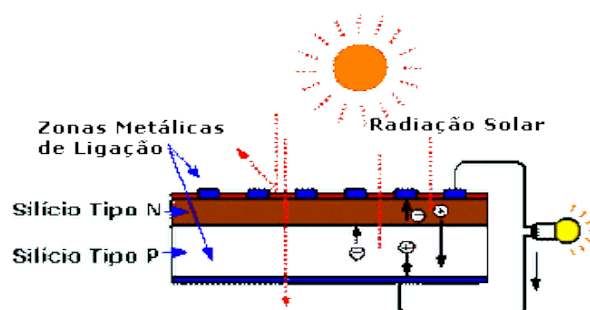


Fonte: Eletrônica PT (2007). Adaptado pelo autor.

Nisso constitui-se a chamada junção PN (Figura 9). Nessa junção os elétrons livres presentes no silício do tipo N passarão para o Silício do tipo P e preencherão as lacunas presente nesse material. Com essa troca, o lado N se tornará eletricamente positivo pois agora há lacunas do seu lado N e o lado P se tornará eletricamente negativo por apresentar elétrons livres. Esse efeito faz com que seja produzido um campo elétrico permanente, o que dificulta a troca entre lacunas e elétrons livres.

Ao ser conectado o lado N e o lado P e expondo esse material a fótons que tenha energia maior que a região onde o campo elétrico é diferente de zero (banda *gap*), as cargas serão aceleradas e resultará numa diferença de potencial e uma corrente que fluirá pelo sistema (FADIGAS, 2012).

Figura 9: Junção PN e o efeito fotovoltaico.

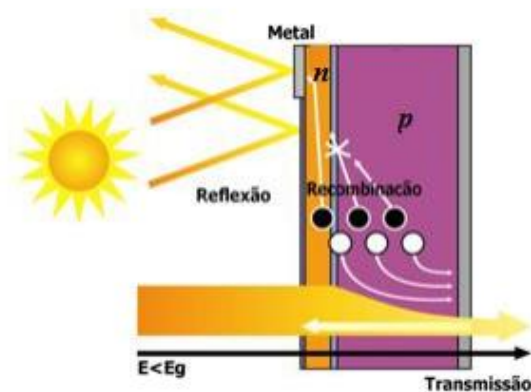


Fonte: Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica (2015). Adaptado pelo autor.

As células fotovoltaicas possuem alguns fatores que impedem uma melhor eficiência da conversão fotovoltaica (Figura 10). Pode ser citado:

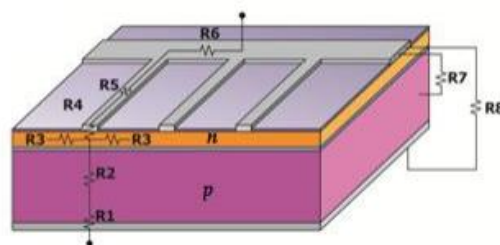
- a) Perdas devido à reflexão na superfície frontal da célula; fótons com menos energia que o necessário para romper a banda *gap*; sombreamento proporcionado pela parte metálica da moldura do módulo; e recombinação de portadores de carga minoritário;
- b) Perdas por resistências em série: contato metal-semicondutor (R1 e R4), perdas nas trilhas metálicas (R5 e R6) e nas regiões P (R2) e N (R3) inerente ao material; perda pelas resistências em paralelo entre as trilhas metálicas e a junção P (R7) e os contato dos trilhos metálicos (R8), como demonstrado na figura 11 (MOEHLECKE e ZNESCO, 2005).

Figura 10: Fatores que diminuem a eficiência da célula fotovoltaica.



Fonte: Moehlecke e Znesco (2005). Adaptado pelo autor.

Figura 11: Perdas por resistências em série e paralelo.



Fonte: Moehlecke e Znesco (2005). Adaptado pelo autor.

O silício é o segundo material mais abundante no planeta Terra, e como dito anteriormente, é o material semiconductor mais utilizado. Porém, além do silício, outros materiais semicondutores são utilizados para a produção de células fotovoltaicas. Vale salientar,

que cada um desses materiais possui características próprias. As tecnologias aplicadas para a produção de células fotovoltaicas podem ser classificadas em três gerações. São elas:

- Primeira geração: o material utilizado é o silício cristalino (c-Si), e pode ser subdividido em silício monocristalino (m-Si) (Figura 12) e policristalino (p-Si) (Figura 13). O silício policristalino possui uma eficiência menor de apenas 2% em relação ao mono, porém, seu custo é bem menor por possuir um processo de fabricação menos rigorosa e menos gasto de energia;
- Segunda geração: é chamada também de filmes finos e também é dividida em três subdivisões: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS);
- Terceira geração: são células que são mais eficientes e possui um custo/Wp mais baixos que os citados anteriormente. São elas as tecnologias orgânicas, células de portadores quentes, células solares sensibilizadas por cortantes, *upconversion* e células tandem/multijunção. (NASCIMENTO, 2004).

Figura 12: Células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si).



Fonte: *Direct Industry* (2018). Adaptado pelo autor.

Figura 13: Células fotovoltaicas de silício policristalino (p-Si).

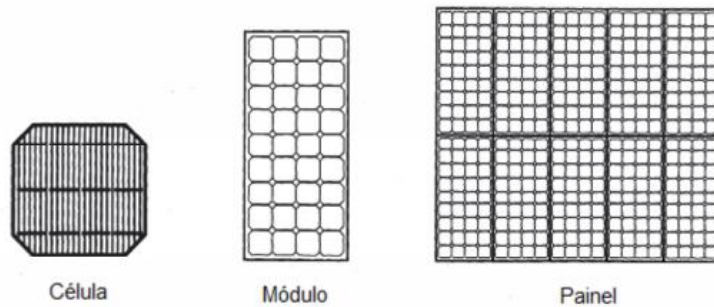


Fonte: *Direct Industry* (2018). Adaptado pelo autor.

Além dessas três gerações, existem diversas pesquisas quanto a células do tipo poliméricas e orgânicas, porém não há nada totalmente consolidado no mercado, portanto seu conhecimento ainda não foi difundido. (PINHO; GALDINO, 2014).

Para que possa ser usado células fotovoltaicas nas mais diversas aplicações, é necessário combinar várias células em série e/ou paralelo. Por definição esse agrupamento de células em série e/ou paralelo dá origem ao módulo fotovoltaico, que por sua vez, sendo agrupado, dão origem ao painel fotovoltaico, conforme é mostrado na Figura 14.

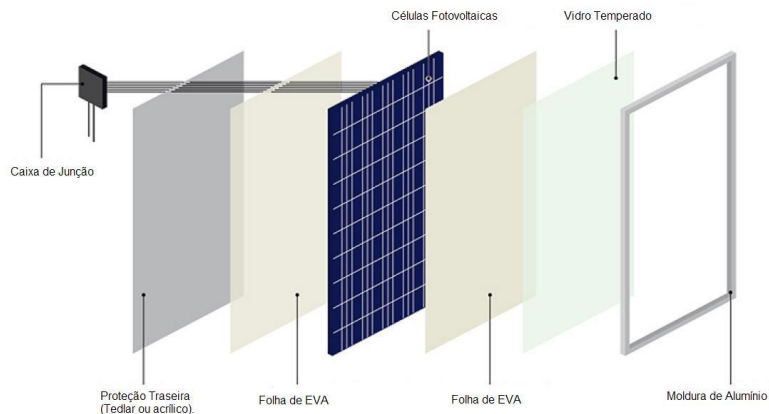
Figura 14: Célula, módulo e painel fotovoltaico respectivamente.



Fonte: Patel (1999). Adaptado pelo autor.

Os componentes que fazem parte de um módulo fotovoltaico são mostrados na imagem abaixo (Figura 15).

Figura 15: Componentes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Energia Solar Central (2018). Adaptado pelo autor.

Após a construção das células FV em um só conjunto (dependendo das características elétricas desejadas pode ter de 36 a 216 células FV associadas), este é encapsulado em duas finas camadas de EVA (Etileno, Vinil, Acetato), uma proteção traseira que pode ser feita de Tedlar ou acrílico; vidro temperado e uma moldura de alumínio, onde este encapsulamento tem por finalidade a proteção de intempéries e a promoção de uma melhor robustez e proteção mecânica. Por fim, a caixa de junção oferece a conexão elétrica às células fotovoltaicas, que por sua vez podem estar ligadas em série ou em paralelo.

3.2.2 Características Elétricas

3.2.2.1. Principais Parâmetros Elétricos

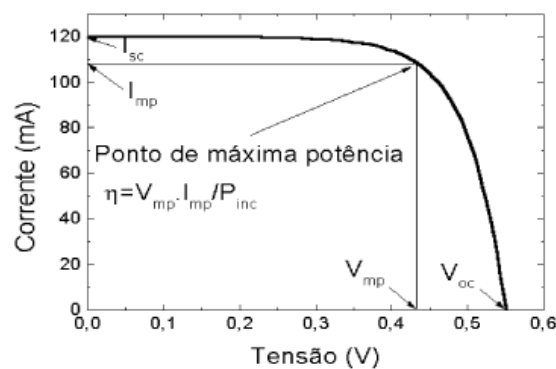
Os principais parâmetros de uma célula fotovoltaica, conseqüentemente módulo, são tensão (V), corrente (A) e potência nominal (Wp). Com isso, atualmente, temos dois padrões de testes que nos dão essas características elétricas dos mesmos, o padrão *Standard Test Conditions* (STC) e *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT). Abaixo as condições para cada padrão de teste:

- STC: Irradiância 1000W/m²; temperatura da célula 25°C e massa de ar (AM) 1.5;
- NOCT: Irradiância 800W/m²; temperatura ambiente 20°C e velocidade do vento 1m/s.

Definido o padrão de teste utilizado, é possível determinar os principais parâmetros que caracterizam uma célula e módulo fotovoltaico, que são eles:

- I_{sc} : Corrente de curto-circuito. Valor máximo da corrente quando o valor da tensão nos seus terminais é igual a zero;
- V_{oc} : Tensão de circuito aberto. Valor de tensão nos terminais de uma célula ou módulo, quando não há carga acoplada, ou seja, não há corrente circulando. O valor obtido para células de silício monocristalino varia de 0,5 a 0,7 V;
- P_{mp} : Ponto de máxima potência. Valor obtido através da curva IxV onde a corrente (I_{mp}) e a tensão (V_{mp}) levam à potência máxima (Figura 16).

Figura 16: Curva IxV de uma célula solar de silício.



Fonte: Veissid e Pereira (2000). Adaptado pelo autor.

- d) η : Eficiência. Parâmetro que mostra o quão eficiente a célula ou o módulo é na conversão de energia solar em energia elétrica. É dado pela seguinte fórmula (Equação 1):

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{mp}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde: A (m²) é a área da célula ou do módulo e G (W/m²) é a irradiância solar incidente

Os valores de V_{mp} (Equação 2) e I_{mp} (Equação 3) podem ser estimados quando os valores de I_{sc} e V_{oc} são conhecidos (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005):

$$V_{mp}(V) \approx (0,75 - 0,9) \cdot V_{oc} \quad (2)$$

$$I_{mp}(A) \approx (0,85 - 0,95) \cdot I_{sc} \quad (3)$$

Um último parâmetro que mostra a proximidade dos valores da curva característica com o real, é o fator de forma (FF), que tem uma dependência forte de como a célula foi construída. É dado pela Equação 4:

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (4)$$

Esta fórmula nos indica que melhor for a qualidade de produção e montagem dessa célula, mais próximo dos valores ideais serão a corrente e a tensão máxima.

3.2.2.2 Desempenho dos Módulos

Dois fatores bastante importante que influenciam a conversão de energia solar em energia elétrica são a irradiância e a temperatura. Conforme pode ser visto na Figura 17, quando um módulo fotovoltaico é mantido em uma temperatura constante de 25°C, mas com uma variação no valor da irradiância, a corrente possuirá uma maior variabilidade do que a tensão. Isso ocorre, pois, a corrente varia linearmente com irradiância e a tensão varia de forma logarítmica. Quanto maior for a quantidade de fótons que energizam os elétrons, maior será a corrente produzida (PINHO; GALDINO, 2014).

A relação da corrente curto-circuito (I_{sc}) e a radiação pode ser dada pela seguinte relação (Equação 5):

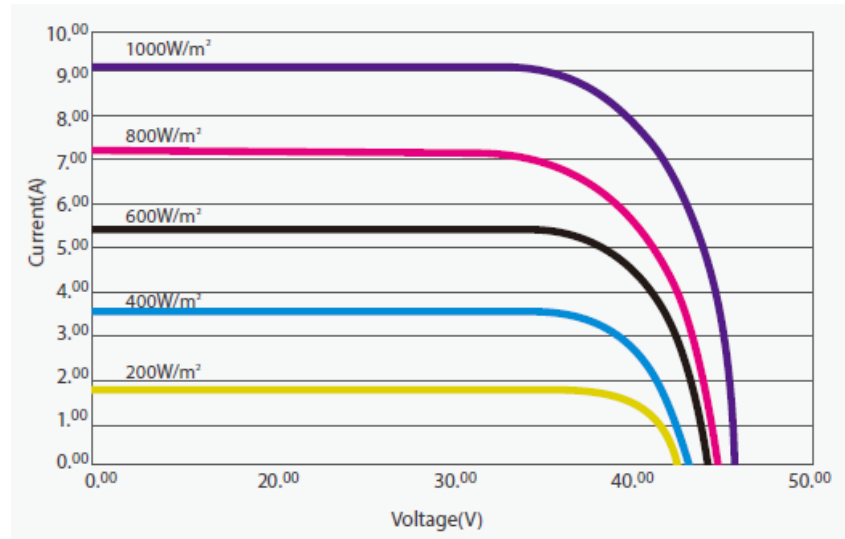
$$I_{sc} = I_{sc_{tc}} \times \frac{G}{1000} \quad (5)$$

Onde:

I_{sc} (A): corrente de curto-circuito do módulo;

$I_{sc_{tc}}$ (A): Corrente de curto-circuito do módulo no padrão STC;
 G (W/m²): Irradiância incidente;

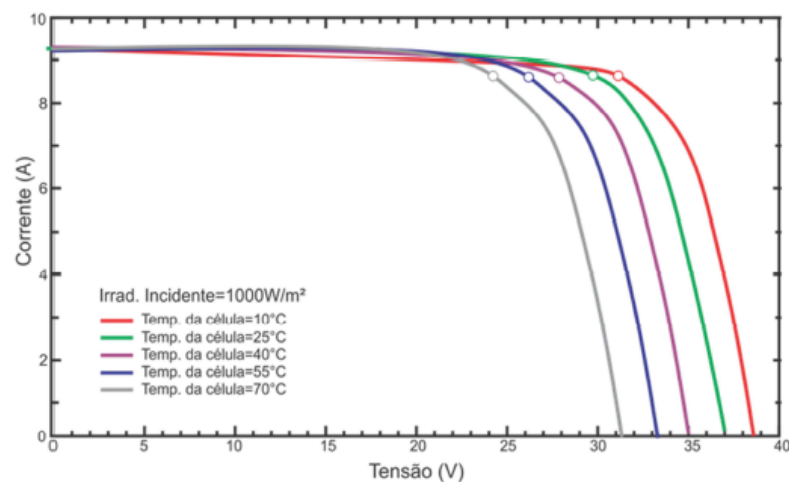
Figura 17: Curva IxV de um módulo fotovoltaico de 330W e 72 células FV, em função da irradiância.



Fonte: GCL (2018). Adaptador pelo autor.

Quanto a influência da temperatura, através da Figura 18, que mostra as curvas IxV para uma mesma irradiância, porém para temperaturas diferentes, nota-se que com o aumento desse parâmetro a corrente tem uma variação extremamente pequena e a tensão tem uma maior variação. Esse efeito faz com que a eficiência da célula e consequentemente do módulo, caia bruscamente, afetando assim o desempenho do sistema em questão.

Figura 18: Curva IxV de um módulo fotovoltaico em função da temperatura.



Fonte: Kyocera (2018). Adaptado pelo autor.

Para uma célula de silício onde a tensão varia de 0,5 a 0,7 V, quando sua temperatura atinge 100°C levando a um decréscimo de 0,2 V na tensão V_{oc} (em torno de 30% a menos em seu desempenho) e um aumento de 0,2% na sua corrente I_{sc} .

A Equação mostra como a tensão varia com a temperatura:

$$V_{oc} = \frac{k.T}{q} \times \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (5)$$

Onde:

V_{oc} (V): corrente de curto-circuito do módulo;

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

T (K): temperatura absoluta;

q (C): carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$);

I_L (A): corrente fotogerada;

I_0 (A): corrente de saturação reversa do diodo;

3.3 Inversores

Devido a tensão gerada nos módulos fotovoltaicos serem produzidas em corrente contínua (CC) e a maioria dos equipamentos utilizados em residências, indústrias e comércios utilizarem equipamentos de corrente alternada (CA), é necessário um equipamento que converta a tensão CC em CA. Esse equipamento é conhecido como inversor.

Para sistemas isolados (*off-grid*), o inversor (Figura 19) receberá a energia armazenada dos bancos de baterias em tensão CC e transformará essa energia para tensão alternada. A recomendação de receber a energia do banco de baterias e não do controlador de cargas, acontece por o inversor exigir uma alta demanda de corrente, o que poderia danificar o controlador. Esse tipo de inversor não possui nenhuma referência externa da rede de alimentação da concessionária, logo é preciso um dimensionamento correto para que atenda às características das cargas que serão supridas, como potência nominal, capacidade de sobrecarga, rendimento, autoconsumo, frequência, proteções e etc. (BERTO, 2018).

Figura 19: Inversor SMA off-grid.



Fonte: SMA Solar Technology Ag (2018). Adaptador pelo autor.

Quanto aos inversores utilizados nos sistemas conectados à rede (*on-grid*), o princípio de funcionamento é o mesmo dos utilizados no *off-grid*, porém este possui uma conexão com a rede de energia elétrica pública. Um exemplo deste pode ser visto na Figura 20. A partir disso, os parâmetros de utilização (amplitude, frequência, conteúdo harmônico, etc.) do inversor terão as mesmas características da rede pública. (CARDOSO; LIBERATO, 2017)

Figura 20: Inversor Fronius on-grid.



Fonte: Fronius International (2018). Adaptado pelo autor.

Os inversores possuem uma função importante que é chamado de seguimento do ponto de máxima potência, (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT). Devido a um mecanismo de rastreamento (nesse caso, circuitos eletrônicos e algoritmos) o inversor é capaz de deslocar

o ponto de operação da curva $I \times V$ para o ponto de máxima potência, ou seja, o ponto em que a geração é máxima. Dessa forma o sistema apresentará um maior rendimento global, pois o inversor sempre trabalhará nesse ponto. (CARDOSO; LIBERATO, 2017)

3.4 Sistemas Fotovoltaico

3.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Sistemas *Off-grid*

Os sistemas *off-grid* (do inglês, fora da rede) são aquelas em que, como o próprio nome já diz, não estão conectados com a rede elétrica da concessionária. Seu diferencial então, é que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é armazenada em bancos de baterias.

Figura 21: Sistema solar fotovoltaico off-grid.



Fonte: FARK Tecnologia (2018). Adaptado pelo autor.

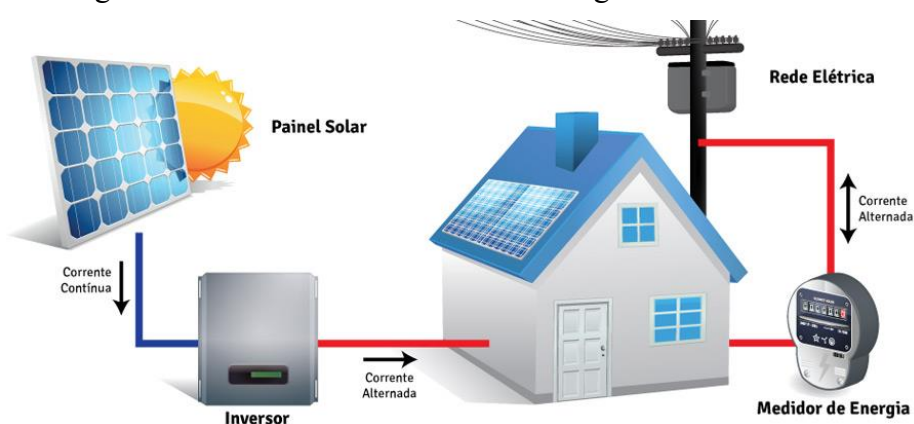
Nesse tipo de sistema é necessário que haja um equipamento chamado controlador de carga, que além de controlar a carga, controla a descarga da bateria. Esse equipamento é bastante importante para que não haja danos de sobrecarga ou descarga profunda no banco de bateria, trazendo assim prejuízos para o dono do sistema.

A partir da Figura 21, pode-se ver que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos passa pelo controlador de carga e então seu armazenamento é feito em baterias. Como a maioria das cargas utilizam corrente alternada (CA), é necessário que a energia CC seja convertida em CA pelo inversor, só então poderá ser utilizada pelos equipamentos. (CRESESB, 2018).

3.4.2. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede ou sistemas *On-grid*

Nessa modalidade de sistema, a energia gerada pelo sistema solar é enviada para a rede da concessionária que alimenta o empreendimento em questão ou consumida em tempo real. Para isso, como já falado anteriormente, é necessário que haja um equipamento que transforme e ajuste a energia gerada pelo gerador fotovoltaico aos parâmetros da rede. Esse equipamento é o inversor. Este tipo de sistema está exemplificado na Figura 22. (CRESESB, 2018).

Figura 22: Sistema solar fotovoltaico on-grid.



Fonte: Exatel Energia e Telecomunicações (2018). Adaptado pelo autor.

Segundo a resolução nº682 publicada em 2015, este tipo de sistema é subdividido em três categorias:

- Microgeração distribuída: sistemas de geração de energia elétrica com potência instalada que seja menor ou igual a 75kW;
- Minigeração distribuída: sistemas de geração de energia elétrica com potência instalada que seja maior que 75kW e menor ou igual a 5MW;
- Usina de eletricidade: sistema de geração de energia elétrica com potência instalada maior que 5MW.

A geração centralizada de energia é a forma mais comum de produção no Brasil, formada principalmente por hidrelétricas e termelétricas. Esse tipo de geração é caracterizado pela alta potência instalada, por exemplo Itaipu, 14.000 MWp, e por estar localizada a uma longa distância dos principais centros urbanos, o que leva a uma grande quantidade e custosas linhas de transmissão. Com a geração distribuída, algumas das vantagens desse tipo produção de energia são: a possibilidade de geração próximo ou dentro das cidades se tornou favorável

pelo baixo valor de investimento quando comparado à geração centralizada; e menores perdas por não haver linhas de transmissão. (REXPERTS – ESCOLA ONLINE DE INVESTIMENTOS IMOBILIÁRIOS, 2018).

Segundo as resoluções nº482 e 685, a geração distribuída no território nacional acontece pelo sistema de compensação de energia elétrica, onde todo excedente que é gerado pelo usuário é injetado na rede elétrica da concessionária gerando créditos que poderão ser utilizados para abatimento na conta de energia da unidade geradora ou em qualquer outra que esteja sob mesma titularidade do proprietário da unidade, desde que estejam na mesma área de concessão da distribuidora.

Esse sistema possui os seguintes componentes:

- Módulos de energia solar fotovoltaica: responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica;
- Inversor: responsável pela conversão CC/CA;
- Medidor bidirecional: responsável pelo monitoramento do que é consumido e injetado na rede.

3.5 Geração Estimada de Energia para um SFVCR

A estimativa de geração de energia elétrica é feita de acordo com a seguinte equação (ELEKTSOLAR INNOVATIONS, 2017):

$$Geração_{mensal} = \frac{P_N * H(t) * dias * TD}{G_R} \quad (6)$$

Onde:

$Geração_{mensal}$: em kWh;

P_N : potência nominal do sistema em kWp;

$H(t)$: irradiação média diária em kWh/m²;

G_R : irradiância nas condições STC (1kW/m²);

TD : Taxa de desempenho do SFVCR.

3.6 Índices de Mérito

Os índices de mérito ou ainda, figuras de mérito, são formas de avaliações tanto individual quanto de comparação do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectado à rede. A *International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programm* (IEA-PVPS) propôs tais índices para que fosse possível uma padronização do monitoramento dos sistemas

fotovoltaicos e com eles entender as perdas que estão presentes no sistema como um todo. São eles:

- Produtividade ou *Yield* (Y_F):

A produtividade de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede é a razão entre a energia gerada por esse sistema (integral da potência fornecida pelo sistema no instante t e a potência nominal do mesmo.

$$Y_F = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência Instalada}} = \frac{\int_0^t P(t)dt}{P_N} \text{ (kWh/kWp)} \quad (7)$$

Onde:

$P(t)$: potência instantânea no tempo t , em kW;

P_N : potência nominal do sistema em kWp;

t : período de tempo em horas. Para o período de um ano, t é igual à 8.760 horas.

Este parâmetro fornece a energia gerada (kWh) por cada kWp de potência instalada, assim podemos analisar sistemas fotovoltaicos que possuem diferentes tamanhos.

Esta figura de mérito apesar de ser um bom parâmetro comparativo, depende que os sistemas possuam características físicas semelhantes, como montagem, inclinação, desvio azimutal, tecnologia utilizada, etc.

- Taxa de Desempenho ou *Performace Ratio* (P_R):

Pode ser definido através da equação 7, a seguir:

$$P_R = \frac{\text{Produtividade}}{\text{Irradiação}/1000} = \frac{Y_F}{H(t)/G_R} \text{ (\%)} \quad (8)$$

Onde:

$H(t)$: irradiação no plano do arranjo fotovoltaico, em kWh/m²;

G_R : irradiância nas condições padrão STC, 1000 W/m².

Através deste índice de mérito pode-se avaliar o real desempenho do sistema em questão pois é levada em consideração perdas existentes no sistema, como as perdas nos inversores, nas conexões, elevação na temperatura dos módulos, etc. (TIEPOLO, 2015).

No Brasil o desempenho de SFVCR residenciais gira entre os valores de 70 e 80%. Porém, tem forte dependência da temperatura ambiente e tecnologia que foi utilizada na instalação (SILUK, 2017).

- Fator de Capacidade (C_F):

Este índice é dado pela seguinte equação:

$$C_F = \frac{\text{Energia}}{\text{Potência instalada} \times \text{Tempo}} = \frac{Y_F}{8760} = \frac{\int_0^t P(t) dt}{P_N \times t} (\%) \quad (9)$$

Onde:

$P(t)$: potência instantânea no tempo t , em kW;

P_N : potência nominal do sistema em kWp;

t : período de tempo em horas. Para o período de um ano, t é igual à 8.760 horas.

Neste parâmetro, pode-se ter a razão entre a produção real de energia elétrica e a produção total máxima de energia caso a usina funcionasse sempre na sua potência máxima que possui uma relação direta com a produtividade (Y_F). Ao se determinar a produtividade é possível obter o fator de capacidade. Os valores desejados para este índice no Brasil, está em torno de 13 a 18% (SILUK, 2017).

4 METODOLOGIA

Optou-se por fazer uma análise de desempenho de dois sistemas solares fotovoltaico que estão na região nordeste do Brasil. Analisando se os desempenhos destes sistemas estão dentro dos objetivos aos quais foram projetados. São eles:

- Instalação 1: sistema de 16,12kWp localizado na cidade de Porto Seguro, Bahia;
- Instalação 2: sistema de 12,96kWp localizado na cidade de Acopiara, Ceará.

O processo de análise de desempenho de SFVCR é feito através dos chamados índices de mérito, que são equações matemáticas que depende de variáveis como como potência, energia e irradiação incidente. Além disso, esses índices, fornecem um panorama da eficiência global do sistema em questão e uma possível comparação com sistemas parecidos em que este estudo já tenha sido feito previamente.

Segundo BENEDITO (2009), o três os valores calculados para que essa análise seja possível, são os seguintes:

- Produtividade (*Final Yield*);
- Taxa de Desempenho (*Performance Ratio*);
- Fator de Capacidade.

Para o cálculo desses parâmetros será preciso valores como o da irradiação solar diária média. Esses dados podem ser obtidos através de uma ferramenta online chamada *SunData v3.0* que pode calcular este valor em qualquer ponto do território nacional. Para isso, basta ter as coordenadas geográficas do local que então obtém-se os dados requeridos. Vale salientar, que essa ferramenta usa como base de cálculo imagens de satélites de 17 anos e com mais de 72.000 pontos em todo território brasileiro. Logo, sendo uma das ferramentas de maior confiança para o dimensionamento de SFVCR.

Essa ferramenta é bastante útil, porém, tem uma limitação de não levar em conta as características construtivas do local onde o sistema está instalado. Logo, o valor da radiação incidente obtida pelo *SunData v 3.0* não é o valor real. Foi utilizado, então, um *software* chamado *Radiasol*, que foi desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar do Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos do Programa da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS. A partir dos valores obtidos no *SunData* e levando em conta as características

construtivas reais, o programa fornece os valores da irradiação solar diária média incidente, no plano em questão, para qualquer período do ano. (KREZNINGER; BUGS, 2010)

Além da irradiação solar diária média, outro parâmetro importante, como citado anteriormente, é a geração de energia real do sistema. Esses dados foram obtidos através dos *sites* de monitoramento dos inversores, como, *Sunny Portal* e *Aurora Vision*. Infelizmente como esta é uma tecnologia nova os sistemas listados só possuíam dados do período do ano de 2018.

Quanto ao consumo do estabelecimento, esses dados foram obtidos por meio da conta de energia elétrica do cliente com base no histórico de consumo de energia no período de apenas um ano. Isso acontece pois é difícil encontrar clientes que possuam histórico de consumo maior do que este período. Esse procedimento tem sido adotado pelas diversas empresas do ramo fotovoltaico.

A geração mensal estimada, foi calculada através da equação (6) no programa *Microsoft Excel* e com base nos valores de irradiação fornecidos pelo *Radiasol*.

Esses parâmetros foram fornecidos para fins de discussão.

5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E DISCUSSÕES

5.1 Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede - Projeto Residencial – Instalação 1-16,12kW

5.1.1 Características do Sistema

A instalação 1 começou a operar no dia 05 de janeiro de 2018 e está localizado na cidade de Porto Seguro, BA. Na Figura 23, é apresentado uma imagem aérea do local e na Figura 24 é mostrada uma foto do sistema solar em questão.

Figura 23: Imagem aérea de sistema fotovoltaico 16,12kW.



Fonte: Google Earth (2018). Adaptado pelo autor.

Figura 24: Sistema fotovoltaico 16,12kW.



Fonte: Acervo Eco Soluções em Energia (2018). Adaptado pelo autor.

Este sistema é formado por 52 módulos fotovoltaico da marca GCL Solar, de potência unitária de 310W e um inversor SMA STP 15000TL-30, de potência unitária de 15kW.

Além disso, os módulos possuem uma inclinação de 10° e ângulo azimute de superfície de aproximadamente 0° , ou seja, o sistema está orientado para o norte.

5.1.2 Consumo

Segundo dados da fatura de energia elétrica da Companhia de Eletricidade da Bahia – COELBA, referente ao mês de maio do ano de 2017, o histórico de consumo do cliente, de maio de 2016 até maio de 2017 está mostrado na tabela abaixo:

Tabela 1: Consumo de energia da instalação 1, de maio de 2016 até maio de 2017.

Mês/Ano	Consumo de Energia (kWh)
Maio/2016	476
Junho/2016	436
Julho/2016	581
Agosto/2016	687
Setembro/2016	736
Outubro/2016	885
Novembro/2016	1020
Dezembro/2016	1120

Janeiro/2017	918
Fevereiro/2017	593
Março/2017	678
Abril/2017	663
Mai/2017	318

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 Estimativa de Geração

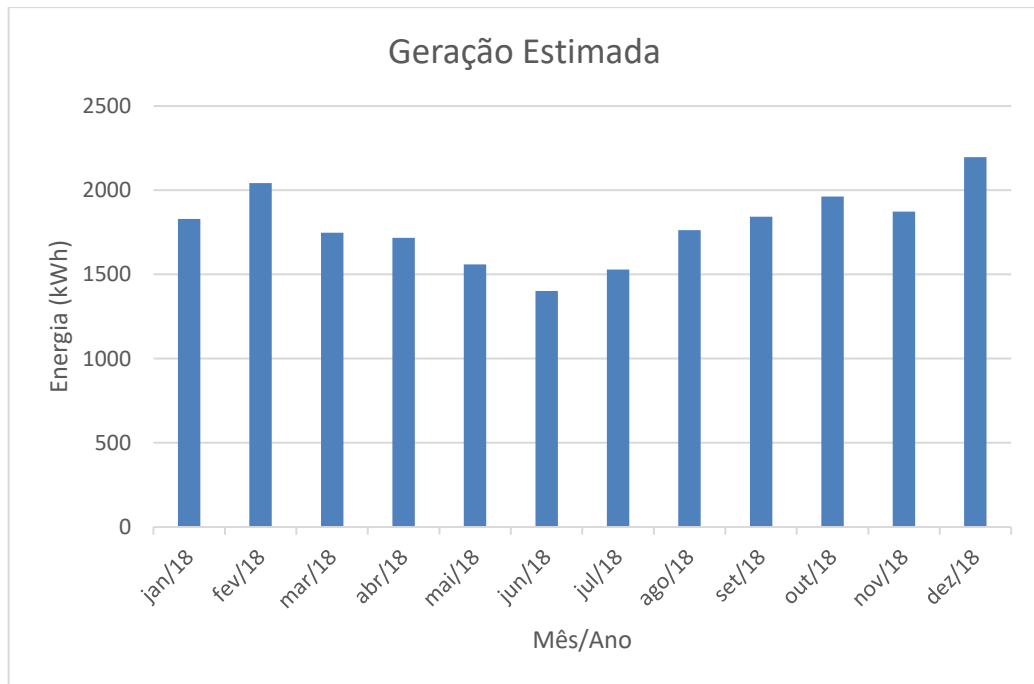
A estimativa de geração de energia foi feita de acordo com a equação 6 e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 2 e Gráfico 1:

Tabela 2: Geração estimada de energia da instalação 1.

Mês	Geração estimada de energia (kWh)
Janeiro	1605,83
Fevereiro	1472,02
Março	1602,17
Abril	1453,33
Mai	1439,90
Junho	1377,67
Julho	1514,99
Agosto	1731,26
Setembro	1794,89
Outubro	1855,28
Novembro	1778,83
Dezembro	1254,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 1: Geração estimada do sistema fotovoltaico da instalação 1



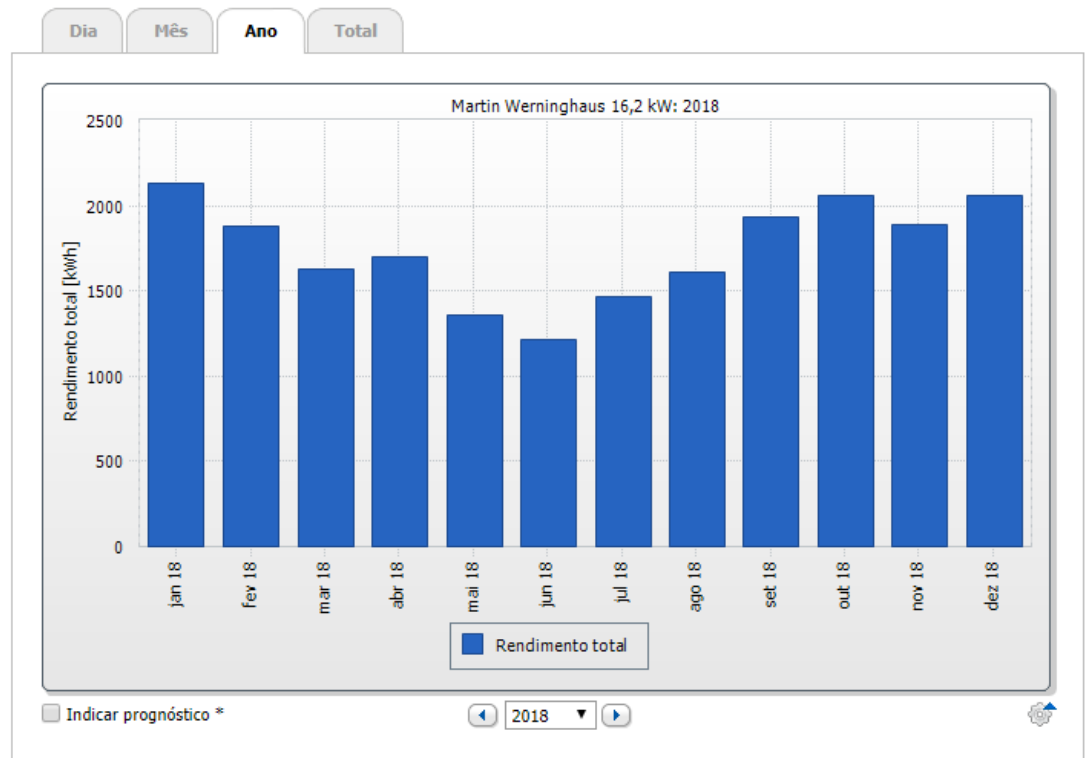
Fonte: Elaborado pelo autor.

Todo o excedente de geração beneficia o usuário com créditos que podem ser usados em unidades consumidoras que estejam sob a mesma titularidade da que abriga o SFVCR.

5.1.4 Geração Efetiva

Os dados de geração do ano de 2018 desse sistema foram coletados através do sistema de monitoramento da *SMA Solar Technology AG* (SMA), o *Sunny Portal*. Abaixo o Gráfico 2 e a Tabela 3 respectivamente, para este sistema mostram a geração de energia mensal no ano de 2018.

Gráfico 2: Geração da instalação 1 no ano de 2018



Fonte: *Sunny Portal* (2018). Adaptado pelo autor.

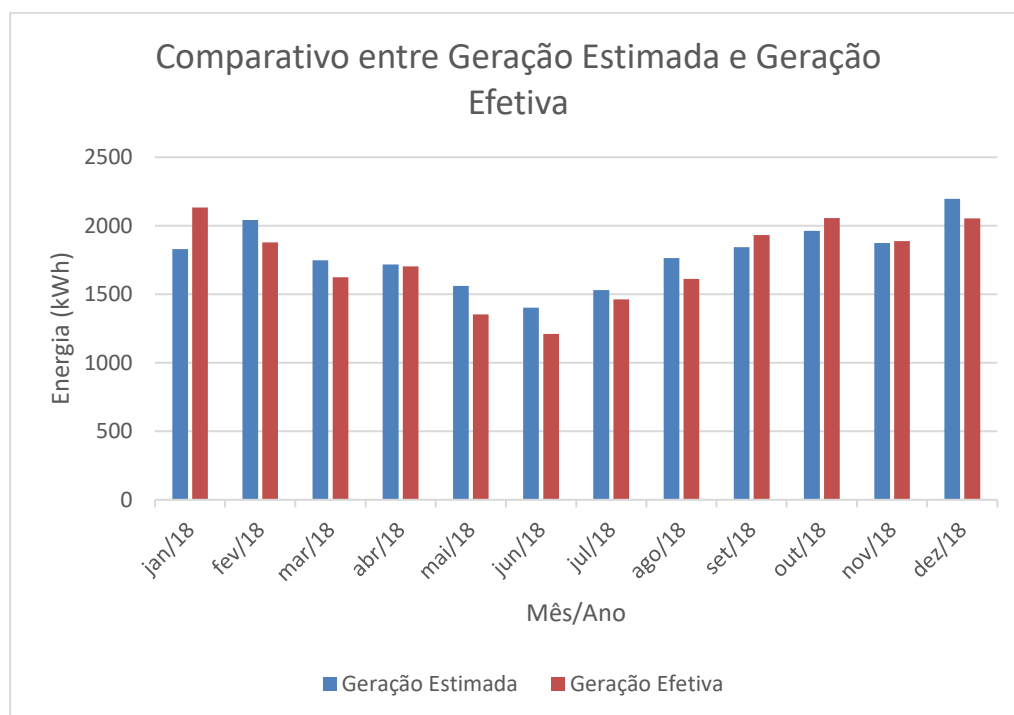
Tabela 3: Geração de energia da instalação 1.

Mês/Ano	Geração de Energia (kWh)
Janeiro/2018	2133,52
Fevereiro/2018	1879,83
Março/2018	1625,21
Abril/2018	1703,10
Maio/2018	1353,81
Junho/2018	1209,77
Julho/2018	1463,42
Agosto/2018	1611,74
Setembro/2018	1932,59
Outubro/2018	2057,17
Novembro/2018	1887,71
Dezembro/2018	2054,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo os dados estimados e reais da geração, é possível fazer uma comparação entre as duas. Esta comparação é mostrada no gráfico 4.

Gráfico 3: Comparativo entre geração estimada e geração efetiva da instalação 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se notar que há meses em que a geração efetiva de energia ultrapassa a estimada. Porém, há mais meses em que a estimada é maior que o valor real da energia. Fatores como tempo nublado e chuvoso, sombreamento ou sujidade, são bastante críticos e influenciam diretamente a produção efetiva de energia elétrica.

Por isso, é recomendado que caso a região onde o sistema fotovoltaico está instalado for de zona litorânea (caso da instalação 1) seja feito limpezas periódicas para que se obtenha um maior aproveitamento do sistema de geração, já que o vento leva bastante areia nessas áreas.

5.1.5 Irradiação

Inserindo as coordenadas geográficas do local da instalação é calculado o valor da irradiação solar diária média para qualquer mês do ano. A Tabela 4 mostra o valor desse parâmetro para a instalação 1 (CRESESB, 2018).

Tabela 4: Irradiação solar no plano horizontal e plano inclinado na localidade de Porto Seguro, BA.

Estação: Porto Seguro
 Município: Porto Seguro, BA - BRASIL
 Latitude: 16,401° S
 Longitude: 39,049° O
 Distância do ponto de ref. (16,47° S; 39,0623° O): 7,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	6,23	6,35	5,69	4,70	4,02	3,69	3,90	4,58	5,13	5,46	5,49	6,30	5,13	2,67
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	16° N	5,74	6,09	5,78	5,08	4,87	4,31	4,52	5,08	5,32	5,33	5,13	5,73	5,22	1,78
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	13° N	5,85	6,16	5,77	5,02	4,49	4,21	4,42	4,99	5,31	5,38	5,22	5,88	5,22	1,95
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	29° N	5,13	5,63	5,58	5,14	4,83	4,63	4,82	5,23	5,25	5,01	4,68	5,08	5,08	1,00

Fonte: CRESESB (2018). Adaptado pelo autor.

Levando em conta a inclinação e o ângulo azimutal de superfície presente no sistema, foi preciso calcular a irradiação média diária no plano inclinado em que o sistema se encontra. Este procedimento pode ser feito através do software Radiesol a partir das coordenadas geográficas do sistema e valores da irradiação média diária no plano horizontal (dados obtidos pelo *SunData v 3.0*). Assim, é possível calcular os valores para qualquer plano, ou seja, podemos obter dados de acordo com as características construtivas reais. A Figura 25 mostra a criação da estação de estudo.

Figura 25: Tela inicial do software Radiesol para a estação da instalação 1.

Selecione um país e uma estação

País: **Brazil**

Estação: **MARTIN**

OK Editar Sair

Latitude: 16,47 N/S: S Longitude: 39,00 E/W: W

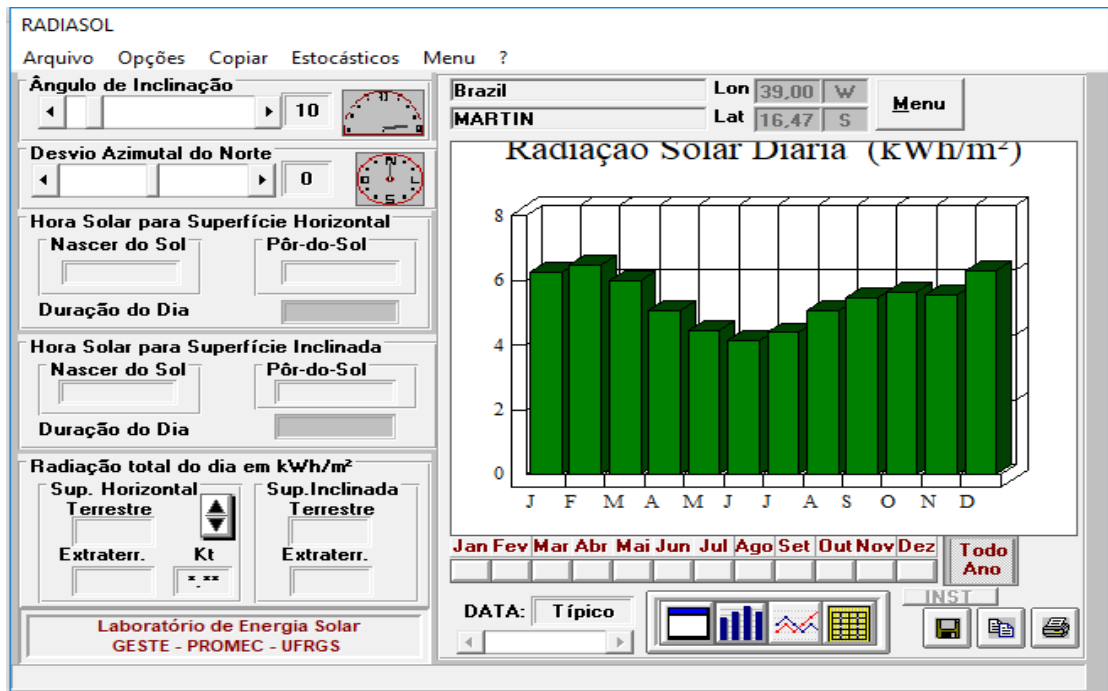
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
6,23	6,35	5,69	4,70	4,02	3,69	3,90	4,58	5,13	5,46	5,49	6,30

Radiação em kWh/m²

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a criação da estação, são fornecidos os valores da inclinação e do desvio azimutal, obtendo assim os valores da irradiação para o plano desejado, tanto na forma de gráfico como de tabela. A Figura 26 mostra a tela em que pode ser inserida as características construtivas e a Tabela 5 mostra os valores no plano inclinado de 10°.

Figura 26: Inserção dos parâmetros construtivos da instalação 1 no Radiasol.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5: Tabela de irradiação no plano inclinado da instalação 1

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
4:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:30	122	106	75	40	16	2	6	29	57	84	103	127	64
7:30	294	291	249	190	149	130	141	180	217	244	256	299	220
8:30	485	499	453	373	316	288	307	366	408	430	428	489	404
9:30	647	677	633	545	482	449	474	544	582	592	577	650	571
10:30	756	797	753	665	603	570	598	670	700	700	675	758	687
11:30	814	862	815	723	664	632	661	732	758	755	728	816	747
12:30	814	862	815	723	664	632	661	732	758	755	728	816	747
13:30	756	797	753	665	603	570	598	670	700	700	675	758	687
14:30	647	677	633	545	482	449	474	544	582	592	577	650	571
15:30	485	499	453	373	316	288	307	366	408	430	428	489	404
16:30	294	291	249	190	149	130	141	180	217	244	256	299	220
17:30	122	106	75	40	16	2	6	29	57	84	103	127	64
18:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6236	6464	5956	5072	4460	4142	4374	5042	5444	5610	5534	6278	5384

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.6 Índices de Mérito

a) Produtividade ou *Yield*:

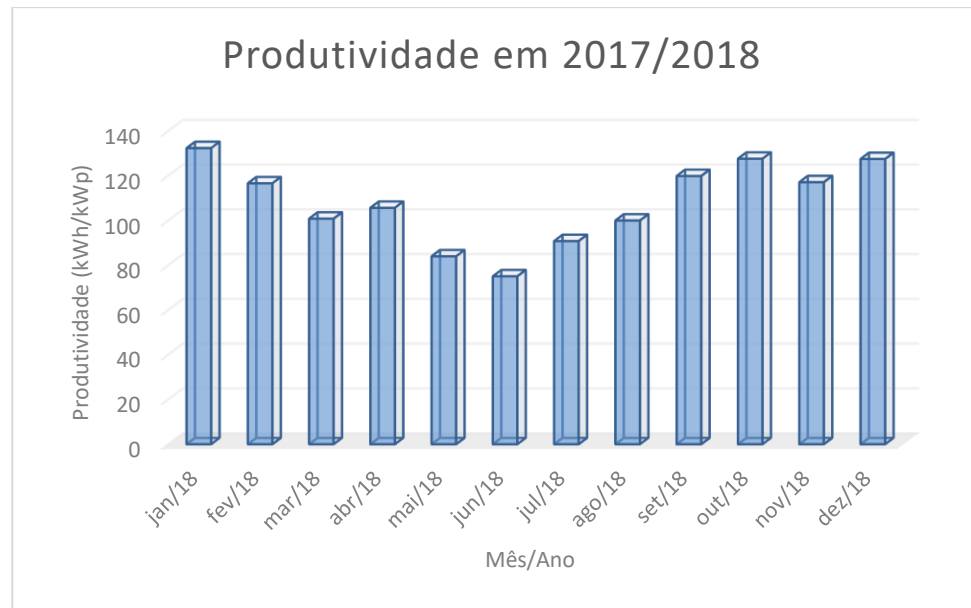
A partir dos valores de geração de energia mostrado na tabela 01 e utilizando a equação 7, foi possível obter os seguintes valores para a produtividade do sistema. Esses valores são mostrados na tabela 6 e também no Gráfico 4 respectivamente.

Tabela 6: Produtividade da instalação 1 no ano de 2018.

Mês/Ano	Produtividade (<i>Yield</i>) (kWh/kWp)
Janeiro/2018	132,35
Fevereiro/2018	116,61
Março/2018	100,81
Abril/2018	105,65
Maió/2018	83,98
Junho/2018	75,04
Julho/2018	90,78
Agosto/2018	99,98
Setembro/2018	119,89
Outubro/2018	127,62
Novembro/2018	117,10
Dezembro/2018	137,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4: Produtividade da instalação 1 no ano de 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A produtividade possui a mesma tendência da irradiação e da energia gerada. Uma diminuição nos meses de maio e junho, o que está dentro do previsto, e um aumento expressivo nos meses de setembro a dezembro.

b) Taxa de desempenho ou *Performance Ratio*:

Dado os valores já mostrados nos itens anteriores e utilizando a equação 8, obtemos os seguintes valores para a taxa de desempenho do sistema solar fotovoltaico:

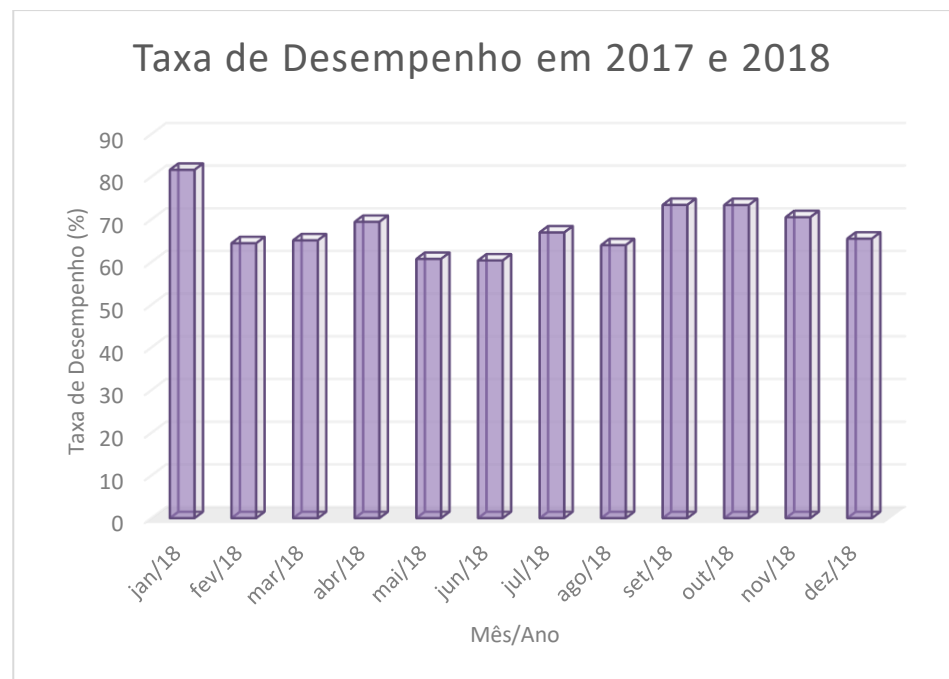
Tabela 7: Taxa de desempenho da instalação 1 no ano de 2018.

Mês/Ano	Taxa de desempenho (<i>Performance Ratio</i>) (%)
Janeiro/2018	81,63
Fevereiro/2018	64,43
Março/2018	65,10
Abril/2018	69,43
Mai/2018	60,74
Junho/2018	60,39
Julho/2018	66,95
Agosto/2018	63,96

Setembro/2018	73,40
Outubro/2018	73,38
Novembro/2018	70,53
Dezembro/2018	65,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5: Taxa de desempenho da instalação 1 no ano de 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar que o gráfico da taxa de desempenho possui uma tendência mais suave e linear, o que mostra regularidade no desempenho desse sistema em torno dos valores considerados bons para esse tipo de instalação (70%).

c) Fator de capacidade:

A partir da equação 9, é possível calcular os valores do fator de capacidade para cada mês.

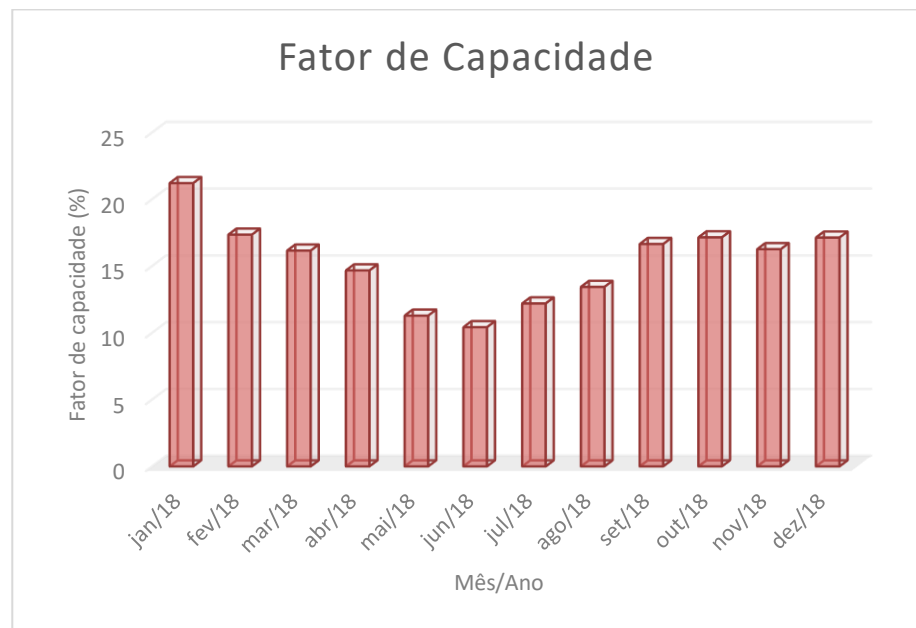
Tabela 8: Fator de capacidade da instalação 1 no ano de 2018.

Mês/Ano	Fator de capacidade (%)
Janeiro	21,21
Fevereiro	17,35
Março	16,157

Abril	14,67
Mai	11,28
Junho	10,42
Julho	12,20
Agosto	13,43
Setembro	16,65
Outubro	17,15
Novembro	16,26
Dezembro	17,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6: Fator de capacidade da instalação 1 no ano de 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.7 Resultados e Discussões – Sistema 1

De acordo com os dados obtidos referente a instalação 1, em 2018, o valor total de geração de energia elétrica foi de 20,91MWh, o que nos dá uma média de 1742,73kWh/mês. Considerando o período de maio de 2016 até maio de 2017, o consumo médio da residência estava em torno de 700,84kWh. É possível ver que os valores de geração obtidas em doze meses de uso excedeu bastante o valor do consumo, quando comparado a anos anteriores.

Algumas características físicas deste sistema ajudam na melhor captação e geração de energia elétrica, como por exemplo: os módulos estão orientados para o norte com desvio azimutal de 0°; a residência onde estão instalados se encontra em zona litorânea, o que diminui, de certo modo, o sombreamento por edifícios próximos e a inclinação do sistema facilita a autolimpeza quando há presença de chuva. Esses resultados mostram que este sistema foi implantado para que a geração de energia fosse maior que o consumo, assim gerando créditos para outras unidades.

A taxa de desempenho média deste sistema é de aproximadamente 68%, o que apesar de estar abaixo dos valores considerado bons (70%), é regular para clientes residenciais e atende de forma integral a todo o consumo da residência onde está instalada. Fatores como sujidades, sombreamento de árvores ou outros obstáculos, ou ainda a constante presença de nuvens afeta diretamente a produção de energia elétrica. Sendo assim, a limpeza regular dos módulos, poda de árvores próximas ou a mitigação de qualquer outro fator que gere sombreamento pode aumentar a produção de energia e conseqüentemente a taxa de desempenho do sistema.

A sujidade é um fator que reduz a transparência dos módulos, o que dificulta na captação da luz solar. Areia, poeira, resíduos de óleo, pólen de plantas, fezes de aves, etc. são exemplos de sujidades que constantemente estão presentes em instalações.

Quanto ao sombreamento parcial de módulos acarreta tanto em perdas ao sistema quanto geração de pontos quentes (acarreta em degradação dos módulos), e pode ser causado por árvores, postes, estruturas do próprio estabelecimento, outros módulos, etc. Este é um fator que deve ser levado em consideração na hora do projeto. No caso da instalação 1, não há sombreamento de estruturas, porém há muitas árvores próximas.

Com exceção dos meses de quatro meses (maio, junho, julho e outubro), o fator de capacidade esteve dentro da faixa esperada (13-18%) chegando até a exceder esse valor no mês de janeiro (21%). Assim como nos outros índices, sujidades, sombreamento, etc. influenciam nos valores do fator de capacidade.

Vale salientar que no mês de março, apesar do sistema estar desligado por um período de 5 dias consecutivos, por motivos desconhecidos, segundo o site de monitoramento *Sunny Portal*, a produção de energia supera bastante o valor de consumo médio para esta residência.

Como dito anteriormente, sistemas com esta característica (geração muito maior que consumo) possuem a vantagem de usar os créditos gerados em uma outra unidade consumidora, desde que esteja sobre mesma titularidade da unidade que possui o SFVCR. Isto só se tornou possível depois da resolução nº 687 de 2015 o que gerou ainda mais benefícios para o uso de sistemas fotovoltaicos no Brasil.

5.2 Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede - Projeto Residencial – Instalação 2 12,96kW

5.2.1 Características do Sistema

O SFVCR da instalação 2 começou a operar no dia 10 de agosto de 2017, porém, os seus dados de geração só começaram a ser monitorado a partir do dia 14 de novembro de 2017. Este sistema está localizado no município de Acopiara, CE. Na Figura 27, temos uma imagem aérea do local onde também é possível ver o sistema solar instalado nessa propriedade.

Figura 27: Imagem aérea de sistema fotovoltaico 12,96kW.



Fonte: Google Earth (2018). Adaptado pelo autor.

Figura 28: Sistema fotovoltaico 12,96kW em Acopiara, CE.



Fonte: Acervo Eco Soluções em Energia (2018). Adaptado pelo autor.

Este sistema é formado por 48 módulos fotovoltaico da marca Trina Solar, de potência unitária de 270W e três inversores, dois ABB PVI 4.2 e um ABB UNO 3.6, de potência unitária de 4,2kW e 3,6kW respectivamente.

Além disso, os módulos possuem características construtivas de inclinação de 10° e desvio azimutal de aproximadamente 109°.

5.2.2 Consumo

Segundo dados da fatura de energia elétrica da Companhia Energética do Ceará - COELCE referente ao mês de abril do ano de 2013, o histórico de consumo do proprietário do sistema 2 de maio de 2012 até abril de 2013 está mostrado na tabela abaixo:

Tabela 9: Consumo de energia da instalação 2 no período de maio de 2012 até abril de 2013.

Mês/Ano	Consumo de Energia (kWh)
Maio/2012	1713
Junho/2012	1394
Julho/2012	1648
Agosto/2012	1709
Setembro/2012	1626
Outubro/2012	1824
Novembro/2012	1840
Dezembro/2012	1978
Janeiro/2013	2111
Fevereiro/2013	1922
Março/2013	2098
Abril/2013	1683

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3 Estimativa de Geração

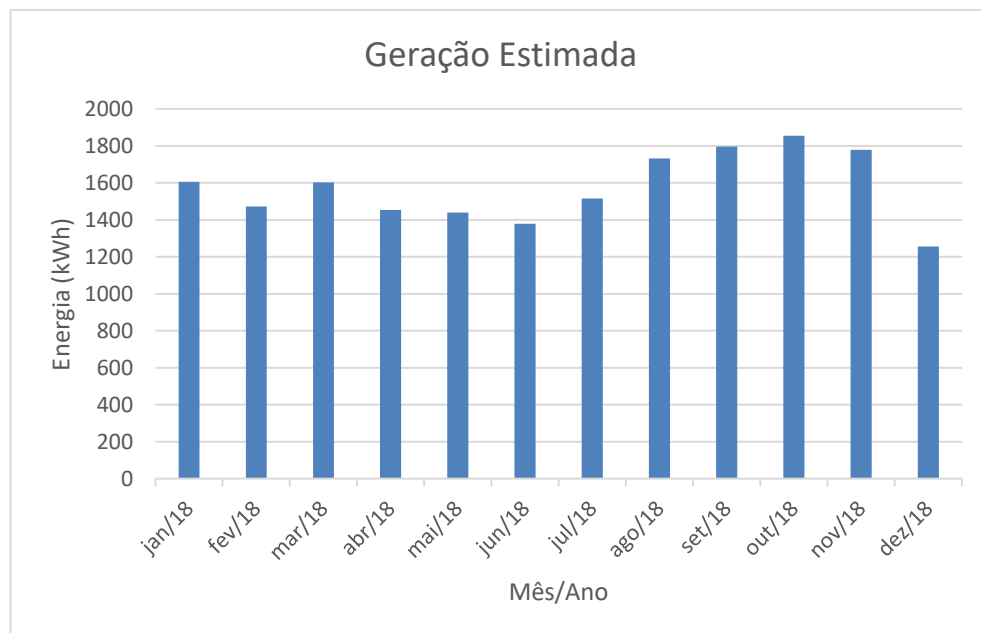
A estimativa de geração de energia foi feita de acordo com a equação 6 e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 10 e Gráfico 7:

Tabela 10: Geração estimada de energia da instalação 1.

Geração estimada de energia (kWh)	
Janeiro	1605,83
Fevereiro	1472,02
Março	1602,17
Abril	1453,33
Mai	1439,90
Junho	1377,67
Julho	1514,99
Agosto	1731,26
Setembro	1794,89
Outubro	1855,28
Novembro	1778,83
Dezembro	1254,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7: Geração estimada do sistema fotovoltaico da instalação 2

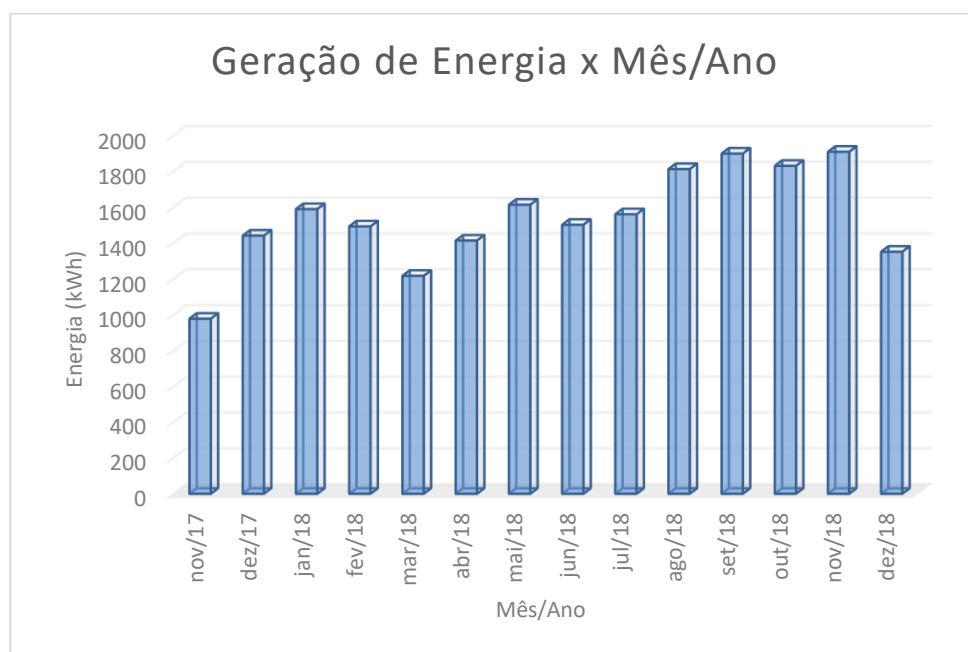


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4 Geração Efetiva

Os dados de geração do ano de 2018 desse sistema foram coletados através do sistema de monitoramento da ABB, *Aurora Vision*. Logo abaixo é mostrado o gráfico 10 com a geração de energia mensal nos meses de novembro e dezembro, para o ano de 2017 e janeiro a dezembro do ano de 2018. Já na Tabela 11, os valores da geração para estes mesmos anos.

Gráfico 8: Geração da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: *Aurora Vision* (2018). Adaptado pelo autor.

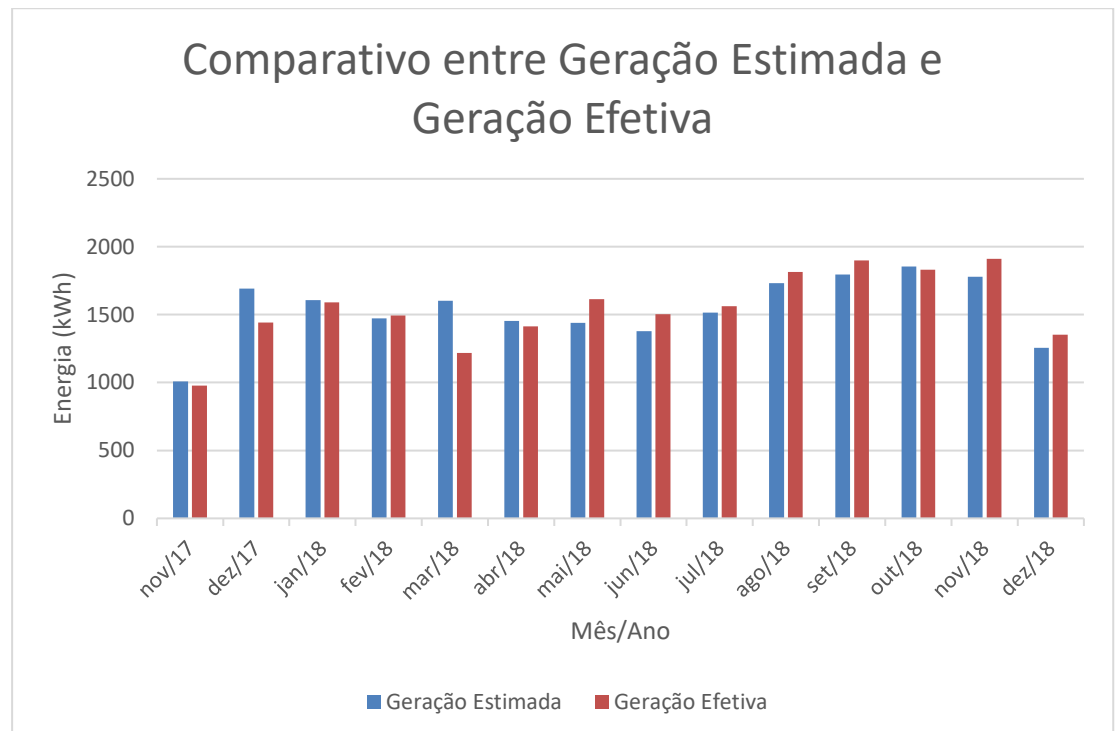
Tabela 11: Geração da instalação 2 nos anos de 2017/2018.

Mês/Ano	Geração de Energias (kWh)
Novembro/2017	977,62
Dezembro/2017	1441,77
Janeiro/2018	1589,81
Fevereiro/2018	1493,17
Março/2018	1217,09
Abril/2018	1414,01
Mai/2018	1614,38
Junho/2018	1502,31
Julho/2018	1560,9

Agosto/2018	1813,25
Setembro/2018	1899,92
Outubro/2018	1831,41
Novembro/2018	1909,93
Dezembro/2018	1351,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9: Comparativo entre geração estimada e geração efetiva da instalação 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na instalação 1 pode-se notar que há meses em que a geração efetiva de energia ultrapassa a estimada (período que há muitas chuvas). Porém, nos meses em que há maior incidência de irradiação a geração efetiva ultrapassou a geração estimada de energia.

5.2.5 Irradiação

Para a instalação 2 a irradiação solar diária média é a seguinte conforme o site do CRESESB (CRESESB 2018).

Tabela 12: Irradiação Solar no plano horizontal e plano inclinado na localidade de Acopiara, CE.

Estação: Acopiara
 Município: Acopiara, CE - BRASIL
 Latitude: 6,101° S
 Longitude: 39,549° O
 Distância do ponto de ref. (6,0912° S; 39,4607° O) : 9,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,51	5,54	5,52	5,19	5,02	5,00	5,40	6,17	6,53	6,39	6,30	5,74	5,69	1,53
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	6° N	5,32	5,42	5,51	5,31	5,23	5,27	5,68	6,39	6,59	6,29	6,08	5,51	5,72	1,35
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	6° N	5,32	5,42	5,51	5,31	5,23	5,27	5,68	6,39	6,59	6,29	6,08	5,51	5,72	1,35
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	7° N	5,28	5,40	5,51	5,32	5,26	5,31	5,72	6,42	6,59	6,27	6,04	5,47	5,72	1,33

Fonte: CRESESB (2018). Adaptado pelo autor.

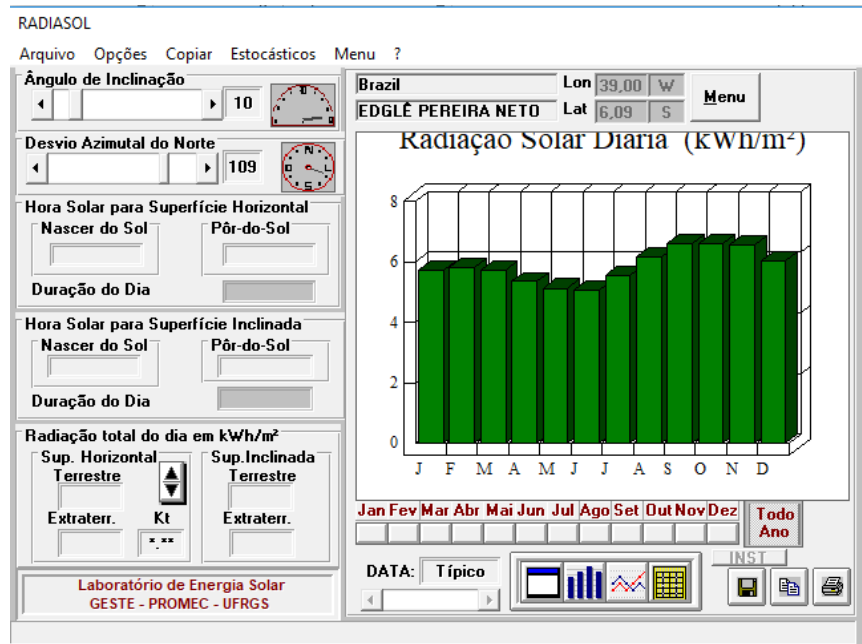
Por meio do Radasol foi possível calcular os valores da irradiação de acordo com as características construtivas reais do sistema.

Figura 29: Tela inicial do Radasol para a estação 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a criação da estação, foram colocados os valores da inclinação e do desvio azimutal, obtendo assim os valores da irradiação para o plano desejado, tanto na forma de gráfico como de tabela. A Figura 30 mostra a tela do Radasol para a estação da instalação 2, que possui uma inclinação de 10° e um desvio azimutal de 109°.

Figura 30: Inserção dos parâmetros construtivos da instalação 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13: Tabela de irradiação no plano inclinado da instalação 2.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
4:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:30	99	94	83	67	57	54	66	86	105	113	120	109	88
7:30	277	278	267	241	226	223	255	299	330	333	333	298	280
8:30	475	484	475	441	421	418	468	531	573	570	562	507	494
9:30	636	650	643	608	589	586	646	718	762	753	740	674	667
10:30	733	748	743	708	692	691	756	832	877	862	846	773	772
11:30	773	790	786	748	731	731	797	876	923	908	889	813	814
12:30	757	774	769	731	711	708	769	845	892	881	864	794	791
13:30	688	700	693	658	635	628	677	745	790	786	776	719	708
14:30	568	577	568	533	506	496	532	589	632	639	635	592	572
15:30	403	407	396	365	340	329	352	394	432	446	448	420	394
16:30	226	224	213	191	173	163	172	196	223	239	247	236	209
17:30	75	69	61	49	39	35	37	45	56	67	76	79	57
18:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5710	5795	5697	5340	5120	5062	5527	6156	6595	6597	6536	6014	5846

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.6 Índices de Mérito

a) Produtividade ou *Yield*:

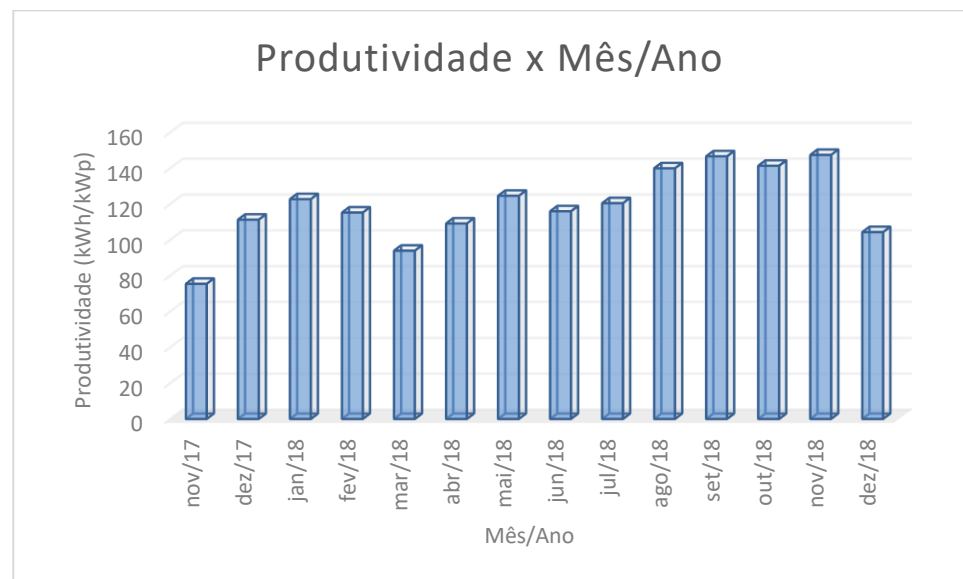
A partir dos valores de geração de energia mostrado na Tabela 13 e utilizando a equação 7, foi possível obter os seguintes valores para a produtividade do sistema. Esses valores são mostrados na Tabela 14 e também no Gráfico 10.

Tabela 14: Produtividade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.

Mês/Ano	Produtividade (Yield) (kWh/kWp)
Novembro/2017	75,43
Dezembro/2017	11,24
Janeiro/2018	122,67
Fevereiro/2018	115,21
Março/2018	93,91
Abril/2018	109,10
Mai/2018	124,56
Junho/2018	115,91
Julho/2018	120,44
Agosto/2018	139,91
Setembro/2018	146,59
Outubro/2018	141,31
Novembro/2018	147,37
Dezembro/2018	104,302

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10: Produtividade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva da produtividade é semelhante a da irradiação, com exceção do mês de março onde houve uma queda na produção de energia

b) Taxa de desempenho ou *Performance Ratio*:

Dado os valores já mostrados nos itens anteriores e utilizando a equação 8, foram obtidos os seguintes valores para a taxa de desempenho do sistema solar fotovoltaico:

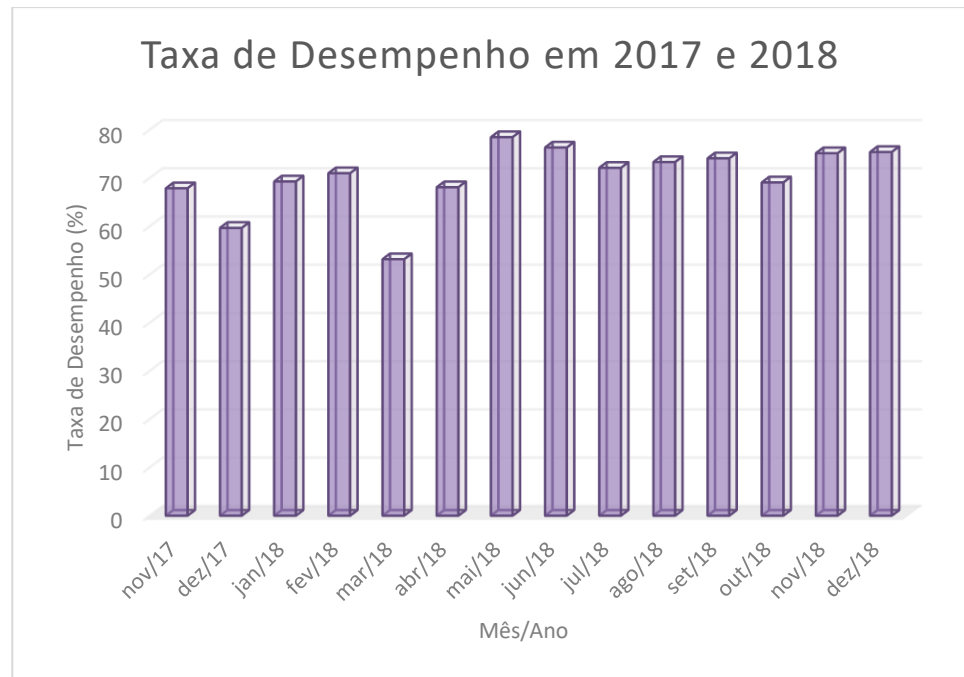
Tabela 15: Taxa de desempenho da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.

Mês/Ano	Taxa de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>) (%)
Novembro/2017	67,88
Dezembro/2017	59,67
Janeiro/2018	69,30
Fevereiro/2018	71,00
Março/2018	53,17
Abril/2018	68,10
Mai/2018	78,48
Junho/2018	76,33
Julho/2018	72,12
Agosto/2018	73,31
Setembro/2018	74,09
Outubro/2018	69,09
Novembro/2018	75,15
Dezembro/2018	75,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado é bastante satisfatório, já que na maioria dos meses do ano de 2018 o valor da taxa de desempenho está próximo dos 70%.

Gráfico 11: Taxa de desempenho da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No ano de 2018, com exceção do mês de março onde houve uma queda maior na energia gerada, a instalação 2 possui uma tendência bem linear e regular para a taxa de desempenho do sistema, o que mostra regularidade na produção e bom funcionamento do sistema apesar dos fatores que podem diminuir a produção.

c) Fator de capacidade:

A partir da equação 9, é possível calcular os valores do fator de capacidade para cada mês em que o sistema esteve funcionando.

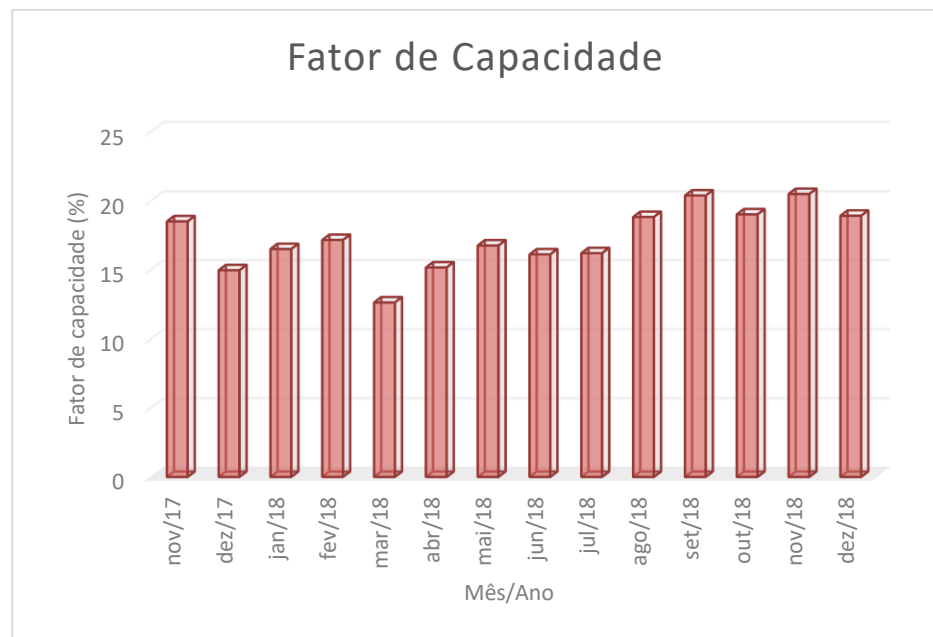
Tabela 16: Fator de capacidade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.

Mês/Ano	Fator de Capacidade (%)
Novembro/2017	18,48
Dezembro/2017	14,95
Janeiro/2018	16,48
Fevereiro/2018	17,14
Março/2018	12,62

Abril/2018	15,15
Mai/2018	16,74
Junho/2018	16,09
Julho/2018	16,18
Agosto/2018	18,80
Setembro/2018	20,36
Outubro/2018	18,99
Novembro/2018	20,46
Dezembro/2018	18,89

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12: Fator de capacidade da instalação 2 nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tendência do fator de capacidade para a instalação 2 segue a mesma tendência da irradiação incidente e conseqüentemente da energia gerada. Seus valores estão dentro dos valores esperados.

5.2.7 Resultados e Discussões – Sistema 2

Da mesma forma, para o SFVCR 2, a geração total deste sistema no período analisado foi de 21,61MWh tendo uma média de 1544,1kWh/mês. Este sistema atende a duas unidades consumidoras, uma com consumo médio de 500kWh e a segunda de 1550kWh, totalizando 2050kWh.

A geração não é suficiente para zerar o consumo nenhuma das duas contas de energia, porém a diminuição no valor final de ambas é bastante considerável.

Percebe-se que apesar de possuir obstáculos próximos aos módulos, como antenas parabólicas, caixa d'água, etc. o sistema possui uma taxa de desempenho média de 70% (2% a mais que o sistema 1), o que está dentro dos valores considerados bons para este tipo de instalação. Nos meses em que há maior irradiação incidente também há os maiores índices de taxa de desempenho, é possível ver pelos gráficos que eles seguem a mesma tendência.

Este sistema foi instalado em uma residência que possui telha cerâmica em sua total composição. Este tipo de telhado é de difícil acesso (diferente da instalação 1 que está em uma laje) dificultando qualquer tipo de lavagem manual, dependendo assim somente do clima da região. Vemos também, que apesar de um grande desvio azimutal o sistema não possui perdas relevantes, isso acontece pelo município de Acopiara (assim como todo o estado do Ceará) está mais próximo da linha do equador.

Além dos fatores convencionais que afetam a geração, no Ceará é possível verificar que dependendo da região onde o sistema é instalado a rede da concessionária de energia não suporta a produção de energia, gerando diversos desligamentos do inversor ao longo do dia por sobretensões. Isso gera um impacto direto na produção de energia, já que sempre no pico de produção haverá um desligamento do aparelho.

Na região centro-sul do Ceará as temperaturas são consideradas elevadas. Para o módulo FV este é um agravante ruim, já que com o aumento da temperatura e a falta de ventilação, a eficiência dos módulos cai.

Para ambos os sistemas, tanto o gráfico da taxa de desempenho e produtividade quanto o fator de capacidade, seguem a mesma tendência do gráfico da irradiação incidente. Além disso, há dias em que o SFVCR, por motivos desconhecidos, fica desligados. Como é o caso do sistema de Porto Seguro que no mês de março esteve cinco dias consecutivos desligado. Isso influenciará diretamente a geração de energia e todos os outros parâmetros.

É possível ver que apesar de vários fatores que fazem com que a geração diminua bastante, tanto a produtividade quanto taxa de desempenho e fator de capacidade estão em torno

dos valores ideais. Isso mostra que o rendimento e performance dos sistemas instalados estão dentro de valores reguláveis e que o investimento nesse tipo de tecnologia está valendo a pena.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal a análise de sistemas fotovoltaicos conectados à rede que estão em operação no nordeste brasileiro seguindo as resoluções da ANEEL e das concessionárias locais. Dependendo da localidade, o projeto deve seguir normas específicas da localidade. Os projetos apresentados seguiram todos os parâmetros apresentado mostrando que estão em conformidade com a legislação vigente.

A coleta de dados se deu de forma facilitada pois já haviam sido instalados equipamentos de monitoramento nos sistemas em questão e todos estes dados ficam disponíveis na internet.

Os resultados apresentados através da análise feita mostraram que os valores estão dentro do esperado, mostrando que qualquer pessoa que desejar instalar um sistema desse tipo em sua residência, comércio ou em qualquer outra edificação, desde que seja bem dimensionado, projetado e instalado, e seja realizado limpezas periódicas, pode aguardar o bom desempenho do seu investimento.

É interessante que, apesar de muitas vezes o sistema fotovoltaico está limitado a construção do estabelecimento onde é instalado, o desempenho girou em torno do esperado, cumprindo o objetivo o qual foi proposto, seja zerar o consumo ou gera excedentes para outras unidades.

No Ceará, apesar do desvio azimutal grande, o sistema operou de forma bastante regular. Já nos estados da região sul e sudeste, a preferência é que os módulos do sistema estejam voltados para o norte, senão haverá perdas de 5 a 10%.

Um fator muito importante para região nordeste, que é o aumento de temperatura nos módulos, não afetou muito a produção de energia dos dois sistemas. Isso mostra que deve ser feito um bom dimensionamento e projeto para sistemas nessa reunião já que as perdas por temperatura podem chegar até 15%.

Além disso, pelo Nordeste ser a região do Brasil com a menor quantidade de bacias hidrográficas, assim sendo a que menos contribui com a energia proveniente de hidroelétricas, esta é uma opção bastante viável para esta região de forma que possua uma contribuição maior para a matriz energética brasileira, além da geração de empregos e tantos outros benefícios.

REFERÊNCIAS

(ABSOLAR), Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **MAPEAMENTO NACIONAL APONTA MINAS COMO LÍDER NA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO PAÍS.** Disponível em: <<http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/mapeamento-nacional-aponta-minas-como-lider-na-geracao-de-energia-solar-fotovoltaica-no-pais.html>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica.** Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 09 maio 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 687.** 24 novembro, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br, CEdoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2018.

BERTO, Alessandra. **Características de Inversores para sistemas de energia solar Off-Grid.** Disponível em: <<http://www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/149-caracteristicas-de-inversores-para-sistemas-de-energia-solar-off-grid>>. Acesso em: 21 out. 2018.

BRASIL, Cristina Indio do. **Energia solar fotovoltaica pode crescer mais de 300% até o fim do ano, diz setor.** 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-07/energia-solar-fotovoltaica-pode-crescer-mais-de-300-ate-o-fim-do-ano-diz>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

CARDOSO, Mauro; LIBERATO, Thaigor Vescovi. **Sistemas Fotovoltaicos Conectador à rede: Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e financeira.** 2017. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017. Disponível em: <<https://riuni.unisul.br/handle/12345/3943>>. Acesso em: 10 maio 2018.

Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sergio de S. Brito - CRESESB. **Coletores Solares.** 2016. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_solar>. Acesso em: 06 maio 2018.

DIRECT INDUSTRY. **Célula Solar Monocristalina.** Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial, CELula-solar-monocristalina-85057.html>>. Acesso em: 17 out. 2018.

DIRECT INDUSTRY. **Célula Solar Policristalina.** Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/solarfun-power/product-54785-358252.html>>. Acesso em: 17 out. 2018.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. Solar Engineering of thermal processes. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.

ELECTRONICA PT. **Efeito Fotovoltaico: Dopagem Semicondutores.** Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com/efeito-fotovoltaico>>. Acesso em: 11 maio 2018.

ELÉTRICA, Agência Nacional de Energia. **Capacidade de operação no Brasil**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 01 maio 2018.

ENERGIA SOLAR SOL CENTRAL. **Módulos Fotovoltaicos**. Disponível em: <http://www.solcentral.com.br/produtos/>>. Acesso em: 21 out. 2018.

ENERGIAS RENOVÁVEIS: UM FUTURO SUSTENTÁVEL. São Paulo: Revista Usp, fev. 2007. José Goldemberg e Oswaldo Lucon. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13564>>. Acesso em: 01 maio 2018.

ENGEMEP – SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E DE EQUIPAMENTOS DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO LTDA. Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará S.a. - Adece (Org.). **Atração de Investimentos no Estado do Ceará: Relatório de Energia Solar**. Fortaleza, 2010. Disponível em: <<http://www.adece.ce.gov.br/index.php/downloads/category/5-energia?start=20>>. Acesso em: 01 maio 2018.

EXATEL ENERGIA E TELECOMUNICAÇÕES. **Qual sistema instalar: on-grid ou off-grid?** Disponível em: <<http://exatel.com.br/site/qual-sistema-instalar-ongrid-ou-offgrid-fotovoltaico/>>. Acesso em: 23 out. 2018.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral (Org.). **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade Técnico-Econômica**. São Paulo: Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo - Gepea, 2012. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf>. Acesso em: 11 maio 2018.

FARK TECNOLOGIA. **Energia solar com placas fotovoltaicas: Sistema off-grid**. Disponível em: <<https://fark.eng.br/off-grid/>>. Acesso em: 23 out. 2018.

FRONIUS INTERNATIONAL. **Fronius Symo: MAXIMA FLEXIBILIDADE PARAS AS APLICAÇÕES DO FUTURO**. 2018. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/produtos/comercial/inversor/fronius-symo/fronius-symo-17-5-3-m>>. Acesso em: 21 out. 2018.

GOETZBERGER, Adolf; HOFFMANN, Volker Uwe. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Berlin: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2005. html> Acesso em: 14 maio 2018.

IFSC (Santa Catarina). **EEN18704 AULA03: Coletores de baixa temperatura (menor que 125°C)**. Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/EEN18704_AULA03>. Acesso em: 15 maio 2018.

INFOESCOLA NAVEGANDO E APRENDENDO. **Arquitetura Bioclimática**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/arquitetura/arquitetura-bioclimatica/>>. Acesso em: 06 maio 2018.

KYOCERA. **Módulos Solares**. Disponível em: <http://www.kyocerasolar.com.br/modulossolares>>. Acesso em: 14 maio 2018.

LABORATORY, National Renewable Energy. **Solar Resource Glossary**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>>. Acesso em: 05 maio 2018. Metalurgia e Materiais, v. 61, n. 557, 2005. p. 394-397.

MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. **Mercado, física e processamento de células solares**. NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de Funcionamento da Célula Solar Fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 20 maio 2018.

NEO SOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico GCL-P6/72 330Wp**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FFile-1526412717.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

OLIVEIRA SOBRINHO, Louise Cristine de. **DESENVOLVIMENTOS E PESQUISAS NA TERCEIRA GERAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**. 2016. 80 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018694.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

PATEL, M. R. **Wind and solar power systems**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 2017.

PEREIRA, Filipe Alexandre de Sousa; OLIVEIRA, Manuel Ângelo Sarmento de. **Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica**. 2. ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2015. 400 p.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.

PORTAL SOLAR. **Energia heliotérmica: entenda como funciona**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-heliotermica-entenda-como-funciona.html>>. Acesso em: 05 maio 2018.

POVO, Redação O. **Brasil atinge recorde e Ceará é 4º do País em potência solar instalada**. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/jornal/farol/2018/05/brasil-atinge-recorde-e-ceara-e-4-do-pais-em-potencia-solar-instalada.html>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

REXPERS ESCOLA ONLINE DE INVESTIMENTOS MOBILIÁRIOS. **Geração de Energia: Centralizada ou distribuída?** Disponível em: <<http://rexperts.com.br/geracao-de-energia-eletrica-centralizada-ou-distribuida/>>. Acesso em: 24 out. 2018.

SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. **SMA SUNNY ISLAND 8.0H-12 BATTERY INVERTER SMA SI8.0H-12**. Disponível em: <<https://zerohomebills.com/product/sma-sunny-island-8-0h-12-battery-inverter-sma-si8-0h-12/>>. Acesso em: 21 out. 2018.

SOLAR INOVARE. **Componentes da radiação solar sobre um dispositivo fotovoltaico**. Disponível em: <<https://solarinovare.wordpress.com/2016/01/04/110/>>. Acesso em: 10 maio 2018.

THULIO CÍCERO GUIMARÃES PEREIRA (Curitiba) (Org.). **Energias Renováveis: Políticas Públicas e Planejamento Energético**. 2014. Disponível em:

<http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/942/1/Energias%20Renov%C3%A1veis_Pereira%2c%20Thulio%20C%C3%ADcero%20Guimar%C3%A3es_2014.pdf>. Acesso em: 01 maio 2018.

TIEPOLO, Gerson Máximo. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. 17 de março de 2015. Total de folhas: 230 páginas. Tese Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho.

VEISSID, N.; PEREIRA, E. B. **Estimativa do Albedo Planetário empregando dados do Experimento Célula Solar do satélite brasileiro SCD2**. Revista Brasileira de Geofísica, [s.l.], v. 18, n. 1, p.25-38, mar. 2000. FapUNIFESP (SciELO).

<http://dx.doi.org/10.1590/s0102-261x2000000100003>. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2000000100003>. Acesso em: 14 maio 2018.