UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

RAIMARA ARRUDA SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM CIDADES COM CARACTERÍSTICAS DISTINTAS: ESTUDO DE CASO EM DUAS PLANTAS, UMA LOCALIZADA EM PALMAS – TO E OUTRA EM CURITIBA – PR

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA - PR
2018

RAIMARA ARRUDA SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM CIDADES COM CARACTERÍSTICAS DISTINTAS: ESTUDO DE CASO EM DUAS PLANTAS, UMA LOCALIZADA EM PALMAS – TO E OUTRA EM CURITIBA – PR

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA – PR

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

RAIMARA ARRUDA SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM CIDADES COM CARACTERÍSTICAS DISTINTAS: ESTUDO DE CASO EM DUAS PLANTAS, UMA LOCALIZADA EM PALMAS – TO E OUTRA EM CURITIBA – PR

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 05 de setembro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A aluna foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

_____
Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

_____
Prof. Me. Romildo Alves dos Prazeres
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador – UTFPR

_____
Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
UTFPR

_____
Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

RESUMO

SANTOS, Raimara Arruda. **Análise Comparativa da Geração Solar Fotovoltaica em Cidades com Características Distintas: Estudo de Caso em Duas Plantas, Uma Localizada em Palmas – TO e Outra em Curitiba – PR.** 2018. 65f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A atual necessidade da diversificação da matriz elétrica brasileira, o alto preço da eletricidade e os avanços tecnológicos, faz com que as fontes alternativas de geração de energia elétrica se tornem opções para a constituição de uma matriz elétrica diversificada. Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Energia Elétrica (SFVCR) têm sido perspectivos e crescentes nos últimos anos no cenário brasileiro. O aproveitamento de telhados residências, comerciais e industriais em centros urbanos tem se tornado uma alternativa para o consumidor gerar eletricidade, de modo distribuído, isto é, gerar energia no próprio local no qual esta será consumida e, permite que o excedente gerado seja injetado na rede elétrica. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa de produtividade entre duas plantas de SFVCR instaladas em telhados residenciais urbanos e em diferentes regiões do Brasil. Neste trabalho é apresentado o estudo de caso entre dois sistemas fotovoltaicos, onde um é instalado na cidade de Palmas Tocantins na região Norte do país e o outro na cidade de Curitiba Paraná na região Sul do país, os dados para a análise são do período de janeiro de 2017 a dezembro de 2017. Nos quais foram realizados os cálculos de produtividade, desempenho e fator de capacidade de ambos os sistemas, realizados a partir de dados de irradiação solar disponibilizados pelas estações do Instituto Nacional de Meteorologia INMET e pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar e, utilizando o software RADIASOL. O estudo apresenta as características, os índices de irradiação e fatores que influenciam na geração de cada sistema, identificando o resultado de cada planta durante o período analisado. Foi possível concluir que a planta instalada em Palmas – TO obtém incidência de irradiação solar 15,11% a mais que a planta instalada na cidade de Curitiba – PR, porém o desempenho da planta de Curitiba mostrou-se superior. Concluindo que a alta temperatura na cidade de Palmas faz com que o sistema tenha perdas na geração de eletricidade, comparativamente a uma localidade com temperaturas inferiores.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Irradiação. Desempenho. Energia Renovável. Geração de Energia.

ABSTRACT

SANTOS, Raimara Arruda. **Comparative Analysis of Solar Photovoltaic Generation in Cities with Distinct Characteristics: Case Study in Two Plants, One Located in Palmas - TO and Another in Curitiba - PR**. 2018. 65f. Monography (Specialization in Renewable Energies) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

The current need for the diversification of the Brazilian electricity matrix, the high price of electricity and technological advances, mean that alternative sources of electricity generation become options for the constitution of a diversified electrical matrix. Photovoltaic Systems Connected to the Electric Power Grid (SFVCR) have been perspectives and increasing in recent years in the Brazilian scenario. The use of residential, commercial and industrial roofs in urban centers has become an alternative for the consumer to generate electricity in a distributed way, that is, to generate energy in the very place where it will be consumed and allows the surplus generated to be injected into the electrical network. In this sense, the objective of this work is to perform a comparative analysis of productivity between two SFVCR plants installed in urban residential roofs and in different regions of Brazil. In this work the case study between two photovoltaic systems is presented, where one is installed in the city of Palmas Tocantins in the northern region of the country and the other in the city of Curitiba Paraná in the southern region of the country, the data for the analysis are from the period of January 2017 to December 2017. In which the calculations of productivity, performance and capacity factor of both systems were performed, based on data from solar irradiation made available by the INMET National Meteorological Institute and the Brazilian Atlas of Energy Solar and using RADIASOL software. The study presents the characteristics, the irradiation indexes and factors that influence the generation of each system, identifying the result of each plant during the analyzed period. It was possible to conclude that the installed plant in Palmas - TO obtain an incidence of solar radiation 15,11% more than the plant installed in the city of Curitiba - PR, but the Curitiba plant performance was superior. Concluding that the high temperature in the city of Palmas causes the system to have losses in the generation of electricity, compared to a locality with lower temperatures.

Keywords: Network-connected Photovoltaic Systems. Irradiation. Performance. Renewable energy. Power generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR 17
FIGURA 2 - POSIÇÃO DA TERRA EM RELAÇÃO AO SOL.....18
FIGURA 3 - POSIÇÃO DO SOL EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE TERRESTRE.....19
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA.....21
FIGURA 5 - PROCESSO DE AGRUPAMENTO CÉLULA, MÓDULO E PAINEL FOTOVOLTAICO 23
FIGURA 6 - CURVA I-V COM PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....25
FIGURA 7 - SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A UMA EDIFICAÇÃO E INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA 26
FIGURA 8 - MAPA DO POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO EM TERMOS DE RENDIMENTO ENERGÉTICO.....28
FIGURA 9 - INVERSOR INSTALADO NO SISTEMA RESIDENCIAL 1.....32
FIGURA 10 - DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO RESIDENCIAL 1.....33
FIGURA 11 - INVERSOR INSTALADO NO SISTEMA RESIDENCIAL 2.....34
FIGURA 12 - DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO SISTEMA RESIDENCIAL 2.....34
FIGURA 13 - PORTAL DO INMET.....36
FIGURA 14 - INTERFACE INICIAL DO PROGRAMA GOOGLE EARTH PRO 38
FIGURA 15 - ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E DADOS DE IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL PARA AS CIDADES DE PALMAS – TO E CURITIBA – PR.....39
FIGURA 16 - TELA INICIAL DO PROGRAMA RADIASOL, COM VALORES DE IRRADIAÇÃO SOLAR 40
FIGURA 17 - TABELA COM VALORES DE IRRADIAÇÃO CONFORME ÂNGULO DE INCLINAÇÃO.....41
FIGURA 18 - TELA DE ENTRADA DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL 44

FIGURA 19 - TELA DO RADIASOL COM VALORES DE IRRADIAÇÃO INCIDENTE NO PAINEL FV DO SISTEMA RESIDENCIAL 1 44
FIGURA 20 - ENERGIA PRODUZIDA MENSALMENTE PELO SISTEMA RESIDENCIAL 1 46
FIGURA 21 - TELA DE ENTRADA DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL 49
FIGURA 22 - TELA DO RADIASOL COM VALORES DE IRRADIAÇÃO INCIDENTE NO PAINEL FV DO SISTEMA RESIDENCIAL 49
FIGURA 23 - ENERGIA PRODUZIDA MENSALMENTE PELO SISTEMA RESIDENCIAL 2 51
FIGURA 24 - PRODUTIVIDADE ANUAL (KWH/KWP) 55
FIGURA 25 - TAXA DE DESEMPENHO ANUAL (%) 56
FIGURA 26 - FATOR DE CAPACIDADE ANUAL (%) 57
FIGURA 27- COMPARATIVO ÍNDICES DE MÉRITO RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 57
FIGURA 28 - IRRADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO kWh/m².dia 58
FIGURA 29 - COMPARATIVO ANUAL 58
FIGURA 30 - COORDENADAS INMET E ATLAS 60
FIGURA 31 - VALORES DE IRRADIAÇÃO FORNECIDA PELO ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 60
FIGURA 32 - COMPARATIVO DE IRRADIAÇÃO INMET E ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 2017 61
FIGURA 33 - COORDENADAS INMET E ATLAS 61
FIGURA 34 - VALORES DE IRRADIAÇÃO FORNECIDA PELO ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 62
FIGURA 35 - COMPARATIVO DE IRRADIAÇÃO INMET E ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 2017 62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE IRRADIAÇÃO MENSAL DO SISTEMA RESIDENCIAL 1 NO PLANO HORIZONTAL E NO INCLINADO (KWH/M².DIA).....45
TABELA 2 - PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 (KWH/KWP) 46
TABELA 3 - TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 1 (%) 47
TABELA 4 - FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 1 (%).....47
TABELA 5 - VALORES DE IRRADIAÇÃO MENSAL DO SISTEMA RESIDENCIAL 2 NO PLANO HORIZONTAL E NO INCLINADO (KWH/M².DIA).....50
TABELA 6 - PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 (KWH/KWP) 51
TABELA 7 - TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 2 (%) 52
TABELA 8 - FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 2 (%).....53
TABELA 9 - IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO INCLINADO (KWH/M².DIA)54
TABELA 10 - PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (KWH/KWP)54
TABELA 11 - TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (%) .55
TABELA 12 - FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (%).56

LISTA DE ABREVIATURAS

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
CCST - Centro de Ciência do Sistema Terrestre
EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas
FV - Fotovoltaico
GD - Geração Distribuída
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABREN - Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
PDE - Plano Decenal de Energia
PR - Performance Ratio
SFV - Sistema Fotovoltaico
SFVCR - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica
SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment (Avaliação de recursos solares e eólicos)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 TEMA 13
1.1.1 Delimitação do Tema 13
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS 13
1.3 OBJETIVOS 13
1.3.1 Objetivo Geral 13
1.3.2 Objetivos Específicos 14
1.4 JUSTIFICATIVA 14
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 14
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 15
2 REVISÃO DA LITERATURA 16
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA 16
2.2 GEOMETRIA SOLAR 17
2.3 CONCEITOS BÁSICOS: IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO 19
2.4 CONVERSÃO FOTOVOLTAICA 20
2.5 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS 22
2.6 CÉLULA FOTOVOLTAICA 22
2.6.1 Módulos Fotovoltaicos 22
2.6.2 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos 23
2.7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE ELÉTRICA (SFVCR) 25
2.7.1 Fatores que Influenciam no Rendimento do Gerador Fotovoltaico integrado à Edificação 26
2.8 POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO BRASIL 27
2.8.1 Geração Distribuída 28
2.9 CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE SFVCR 30
3 ESTUDO DE CASOS DE SFVCR EM PALMAS – TO E CURITIBA – PR 32
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS SFVCR 32
3.1.1 Sistema Residencial 1 32
3.1.2 Sistema Residencial 2 33

3.2 DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR 35
3.2.1 Dados de irradiação Atlas de Energia Solar 36
3.3 PRODUTIVIDADE E DESEMPENHO 41
3.3.1 Desempenho e Produtividade Sistema Residencial 1 42
3.3.2 Desempenho e Produtividade Sistema Residencial 2 48
3.4 COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE OS SISTEMAS ESTUDADOS. 53
3.4.1 Irradiação no Plano Inclinado 53
3.4.2 Produtividade 54
3.4.3 Desempenho 55
3.4.4 Fator de Capacidade 56
3.4.5 Resumo Comparativo Residencial 1 e Residencial 2. 57
3.5 COMPARATIVO DADOS DO INMET E ATLAS DE ENERGIA SOLAR .59
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 63
REFERÊNCIAS 65

1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é predominantemente hídrica, mas nos últimos anos houve uma maior necessidade da diversificação desta matriz, devido às características de vulnerabilidade dos recursos hídricos, a grande preocupação com o meio ambiente e a crescente demanda de eletricidade. A escassez de chuva tem afetado grandes reservatórios de água, levando a população a pagar uma energia cada vez mais cara. Sendo assim, as fontes alternativas, de geração de energia elétrica, como eólica, solar e biomassa, vêm ganhando espaço no cenário da matriz elétrica brasileira (NASCIMENTO, 2017).

A inserção dessas fontes na matriz elétrica se dá pelos avanços nas tecnologias e incentivos governamentais. Em 2012 foi instituída pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica - a resolução normativa nº 482, que permite ao consumidor gerar sua própria energia, com sistemas conectados à rede elétrica. Esse sistema conhecido como *net –metering é* um sistema de “compensação” que funciona de forma a reduzir o custo de consumo de energia elétrica na unidade consumidora (Plano Decenal de energia 2026).

De acordo com a ANEEL, esta regulamentação fez com que este modelo de geração de energia elétrica se popularizasse, alcançando 81 MW de potência instalada em 2016. Embora tenha ocorrido um crescimento recente, é considerado irrelevante no cenário de geração de energia elétrica brasileiro.

Sabe-se que o potencial Solar brasileiro para geração de energia elétrica a ser explorado é imenso. O estado do Tocantins, por exemplo, apresenta consideráveis índices de irradiação solar em praticamente todos os meses do ano, no entanto, não tem nenhum estudo a nível estadual que afirma este potencial. Com isso o governo estadual instituiu a lei de nº 3179/2017, para incentivar a geração de energia através dos SFVCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. A capital Palmas conta com um programa de incentivo (Palmas Solar), onde quem aderir o sistema SFVCR tem redução de 80% no valor do IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano), proporcional ao índice de aproveitamento de energia solar. E em impostos cobrados sobre de serviços para implantação do sistema (CREA – TO, 2017).

O estado do Paraná tem grande potencial para a geração solar, embora tenha temperaturas baixas, se comparado com o estado do Tocantins e tem mostrado um número crescente de sistemas implantados.

1.1 TEMA

A proposta deste trabalho é analisar a geração de eletricidade e fatores que influenciam para uma melhor produtividade da planta, em Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede elétrica em Palmas – TO e Curitiba – PR.

1.1.1 Delimitação do Tema

O trabalho tem o objetivo de analisar duas plantas residenciais de SFVCR por um período de um ano, em duas regiões do país, e caracterizar a produtividade de cada sistema, considerando os aspectos que cada região tem de influência na geração de energia.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Atualmente o consumidor de energia elétrica vem sentindo o aumento frequente da tarifa de energia. Com a falta de chuva, necessária para encher os reservatórios e gerar eletricidade, o governo opta pelas fontes não renováveis como as termelétricas. Além da conta de energia mais cara, o meio ambiente também sofre com a poluição oriunda destas fontes.

Contudo, a necessidade de diversificar a matriz elétrica utilizando as fontes de geração alternativas, onde o impacto ao meio ambiente é quase irrelevante seria uma solução.

Uma destas fontes alternativas seria a geração através da energia solar, que é um recurso natural e abundante no Brasil. Além disso, a mini e micro geração possibilitam também tornar o consumidor gerador da sua própria eletricidade, conforme a resolução da ANEEL de nº 482/2012. O problema ainda é o custo elevado para implantação do sistema e a falta de incentivos governamentais.

Por outro lado é promissor o aumento da geração de energia solar, devido o grande potencial fotovoltaico que o país possui.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar de forma comparativa a produtividade e fatores que influenciam na eficiência da geração de energia elétrica, em duas plantas fotovoltaicas residenciais, uma em Curitiba – PR e outra em Palmas – TO.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar coleta de dados de radiação solar nos dois estados por um período de um ano;
- Estudar as características construtivas e elétricas do SFVCR nas duas plantas;
- Realizar o levantamento dos valores de irradiação solar em Palmas – TO e Curitiba – PR;
- Identificar aspectos que influenciam nas perdas de geração, tanto em Palmas - TO, como em Curitiba - PR;
- Realizar análise comparativa de produtividade, taxa de desempenho e fator de capacidade entre as duas plantas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com a necessidade de diversificar a matriz elétrica brasileira, as fontes alternativas, como a Solar, têm grandes perspectivas de crescimento. Nos últimos anos, mesmo com timidez, houve-se um crescimento da geração SFVCR no Brasil.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) os benefícios alcançados com o aproveitamento de SFVCR em telhados residenciais, comerciais e industriais, são de âmbito econômico, social e ambiental.

Portanto, este trabalho tem a finalidade de expor uma análise de produtividade de SFVCR residenciais em diferentes regiões do país (Palmas – TO e Curitiba – PR), com o intuito de apresentar as características e aspectos que influenciam na geração em cada região onde será realizado o estudo, proporcionando resultados que podem servir de incentivo para geração de SFVCR.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste trabalho será realizada primeiramente uma revisão bibliográfica do assunto, com o auxílio de livros, dissertações, artigos e internet, como também em páginas web de órgãos governamentais do setor elétrico como: Agência Nacional de

Energia Elétrica, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, e Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Em seguida serão coletados dados de irradiação dos locais onde será realizado o estudo e calculados os índices de irradiação diária em Palmas – TO e Curitiba – PR. Com dados adquiridos serão realizados cálculos de geração em cada SFVCR, com auxílio do programa Swera, produtividade e desempenho de cada planta. Logo será feito estudo comparativo entre os sistemas e por fim as conclusões dos resultados alcançados.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresentará a seguinte estrutura:

No capitulo 1 será apresentada uma introdução sobre o assunto, objetivos, problemas e premissas, a justificativa para a realização do trabalho e metodologia adotada para a pesquisa.

No capitulo 2 abrangerá a revisão da literatura sobre Energia Solar Fotovoltaica e sistemas conectados à rede elétrica.

No terceiro capitulo, serão apresentadas as características e desempenho dos dois sistemas analisados e comparações realizadas com dados obtidos entre os dois sistemas.

O último capítulo apresentará as conclusões sobre o estudo realizado e resultados obtidos com a pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

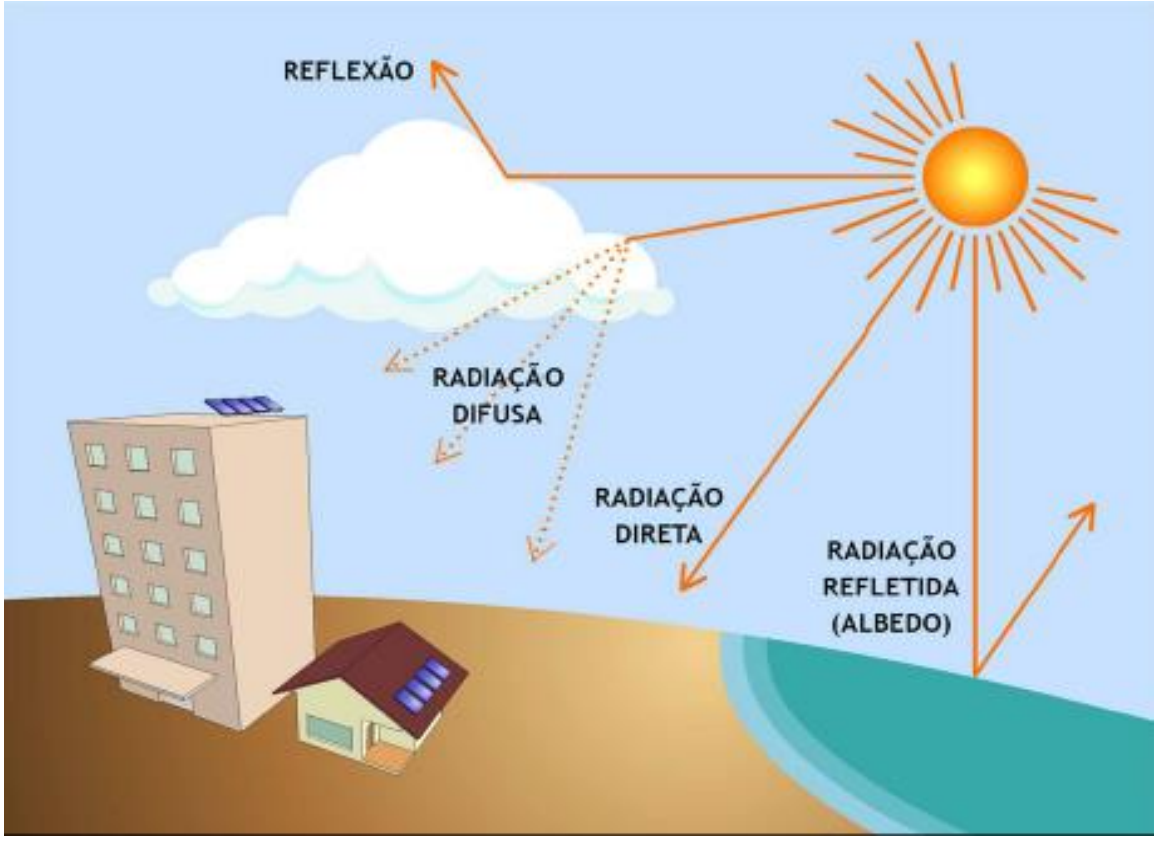
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar que a terra recebe anualmente em toda a sua superfície é de 1,5 x 10^{18} kWh, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Considerando apenas a superfície terrestre, ou seja, com potencial para a instalação de geradores de energia por meio do sol, esta energia passa a ser de 10,8 x 11^{11} GWh/ano. Este fato atesta que, além de ser responsável pela vida na Terra, a radiação solar consiste em uma inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, elétrica, etc.) (CRESESB, 2008).

No entanto, a energia solar que chega à superfície terrestre sofre influência dos efeitos físicos (reflexão, absorção e dispersão), fazendo com que apenas parte da radiação solar total atinja a terra. O nível de irradiância incidente na superfície da terra atinge no máximo aproximadamente 1.000 W/m² ao meio dia e em condições de céu claro (PEREIRA *et al*., 2017).

A radiação solar que atinge a terra é constituída por suas componentes direta e difusa. A radiação solar direta é aquela que chega diretamente à superfície da terra e que não sofre os efeitos de absorção e espalhamento que acontecem na atmosfera, já a radiação difusa chega indiretamente à terra devido os processos de espalhamentos pelos gases e demais partículas presentes na atmosfera. Além dessas duas componentes, existe a radiação de albedo, que é aquela refletida da terra, por construções, vegetação, entre outros, isso quando a superfície receptora for inclinada (PEREIRA *et al*., 2017). A Figura 1 demonstra as componentes da radiação solar: direta, difusa e albedo.

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR



FONTE: VIANA (2010).

A radiação que chega à superfície horizontal é conhecida como radiação global, composta pela radiação direta mais a difusa. Já a radiação recebida em uma superfície inclinada, refletida pelo solo e demais componente arredores é o albedo. A soma das três componentes é a radiação solar total.

2.2 GEOMETRIA SOLAR

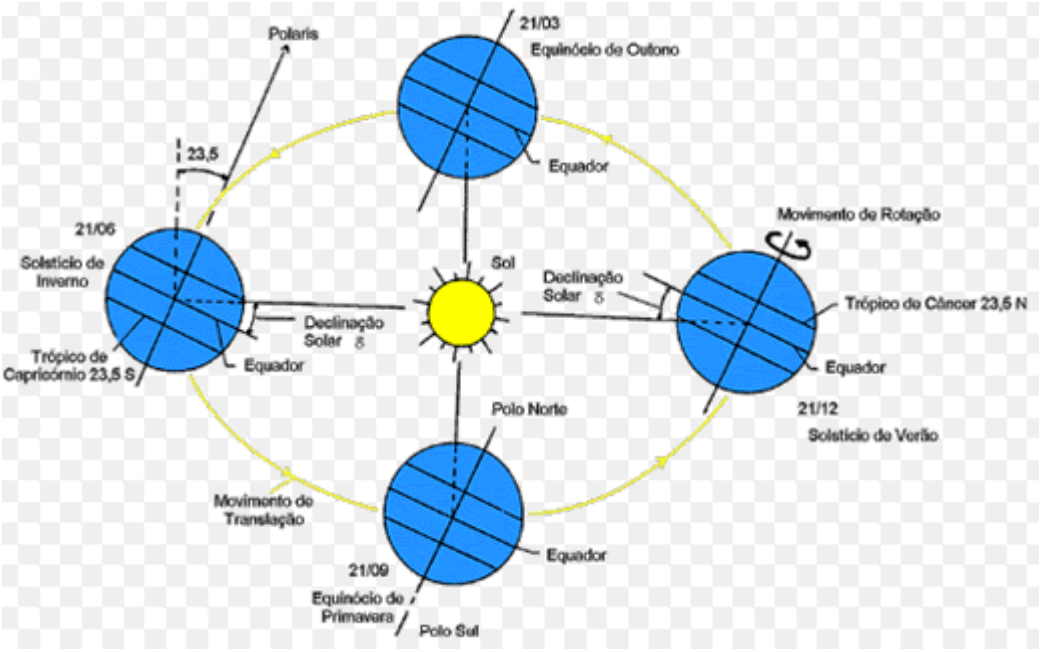
O sol nasce no leste e se põe no oeste, elevando no céu. Essa elevação varia para mais ou para menos de acordo com a época do ano.

A terra se move em uma órbita elíptica em torno do sol e o eixo de rotação da Terra forma um ângulo de 23,5° de inclinação em relação ao plano equatorial. Essa inclinação é a responsável pela duração do dia e da noite nas distintas estações do ano, e também é a responsável pela variação da elevação do sol no horizonte à mesma hora, ao longo do ano (CRESESB, 2008).

O ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da terra e a linha de direção Sol-Terra é conhecido como declinação solar (δ). Possui variação de -23º 27’

e + 23º 27¹ ao longo do período de um ano. Sendo positiva no hemisfério norte e negativa ao sul. A soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra. A Figura 2 demonstra a posição da terra em torno no sol, com eixo norte sul inclinado de um ângulo de 23,5º.

FIGURA 2 - POSIÇÃO DA TERRA EM RELAÇÃO AO SOL



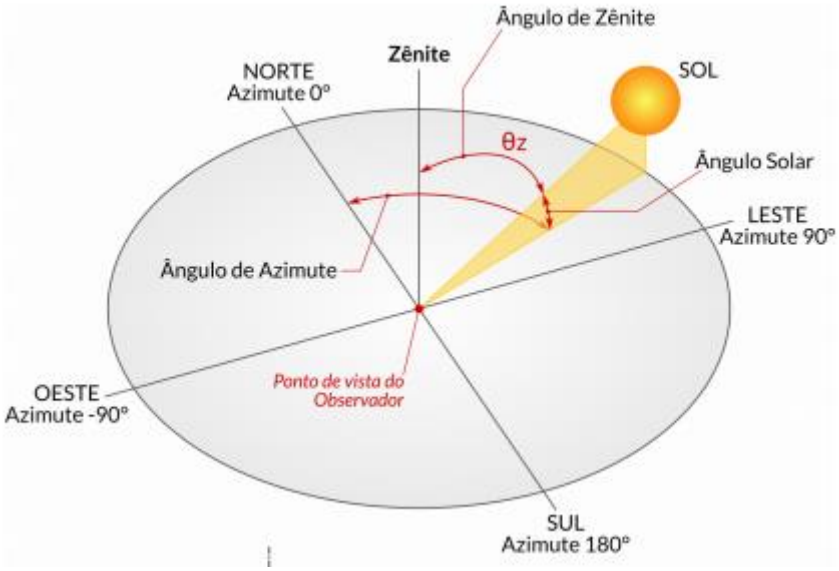
FONTE: CRESESB (2008).

As relações geométricas entre os raios solares, que variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre, são descritas através de vários ângulos.

- **Ângulo horário solar (ω)** corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre -180° e +180°. Cada hora corresponde a 15° de variação do ângulo horário solar. Durante a manhã é positivo, a tarde é negativo e, ao meio dia assume o valor zero.
- **Ângulo zenital solar (θz)** representa o ângulo formado entre a vertical no ponto de observação e a direção da linha que liga o mesmo ponto da superfície da Terra ao Sol. Pode ser calculado conhecendo-se os valores da latitude do local (φ), a declinação solar (δ) e o ângulo horário solar (ω). Ângulo zenital é igual a 90° quando o Sol está no horizonte ao nascer ou pôr do Sol.
- **Ângulo azimutal do Sol** é o ângulo formado entre a linha de projeção da direção do Sol no plano horizontal com o meridiano do observador. Seu valor pode variar entre -180° e +180°, sendo positivo no sentido horário a partir da direção Norte Geográfico no meridiano local.

A Figura 3 demonstra a posição do sol em relação ao ponto na superfície terrestre.

FIGURA 3 - POSIÇÃO DO SOL EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE TERRESTRE



FONTE: PEREIRA *et al*. (2017).

2.3 CONCEITOS BÁSICOS: IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO

A terminologia empregada na literatura muitas vezes tem interpretações diversas para os termos Irradiância e irradiação. Com o objetivo de padronizar e estabelecer termos técnicos sobre a energia solar no Brasil foi criada a norma ABNT NBR 10899:2006 que trata- se da Energia Solar Fotovoltaica (ABNT, 2006).

No qual foram adotados os seguintes termos e simbologias para a energia vinda do sol.

- **Irradiância solar (G)** - Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado (W/m²).
- **Irradiância direta (G_{DIR})** - Irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal ou normal.
- **Irradiância difusa (G_{DIF})** - Potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta.
- **Irradiância global (G_{HOR})** - Potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa.

- **Albedo** - Índice relativo à fração da energia radiante solar, recebida em uma unidade de área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo. A irradiância devida ao albedo é simbolizada por GALB.
- **Irradiância total (G_{TOT})** - Potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer.
- **Irradiação solar (I ou H)** - Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia. Medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado (Wh/m² ou J/m²). É simbolizada por "I", quando integrada em uma hora "H", quando integrada em um dia.
- **Irradiação difusa** - Irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado (I_{DIF} ou H_{DIF}).
- **Irradiação direta** - Irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo especificado (I_{DIR} ou H_{DIR}).
- **Irradiação global** - Irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado (I_{HOR} ou H_{HOR}).
- **Irradiação total** - Irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado (I_{TOT} ou H_{TOT}).

A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão intrinsicamente relacionadas a conceitos astronômicos. A constante solar é definida como o valor da irradiância que chega sobre uma superfície perpendicular aos raios solares na distância média Terra-Sol, e tem valor aproximado de 1.367 W/m². A trajetória da terra em torno do sol faz com que o fluxo da irradiância solar oscile entre 1.325 W/m^2 e 1.412 W/m^2 (PEREIRA *et al*., 2017), (PINHO; GALDINHO, 2014).

2.4 CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

A conversão fotovoltaica é a transformação da energia contida na luz do sol em energia elétrica, que se dá através do efeito físico conhecido como *efeito fotovoltaico.* Este efeito foi observado primeiramente pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839 (ZILLES *et al*., 2012).

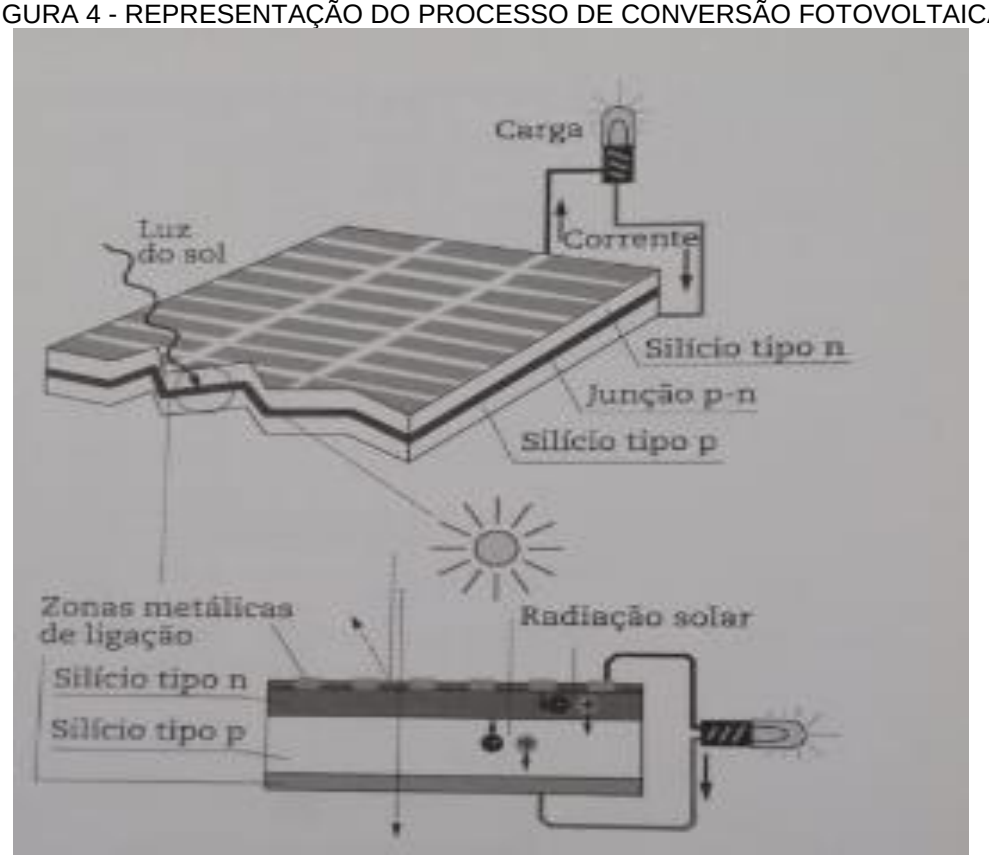
O efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores como: Silício (Si) monocristalino, policristalino e amorfo; arsenieto de gálio (GaAs) Telureto de

Cádmio ou Disselineto de Cobre e Índio, com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa, transformando-a em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas. Com isso, cargas elétricas são liberadas. (ZILLES *et al*., 2012).

O efeito fotovoltaico se caracteriza pela diferença de potencial (tensão elétrica) entre os terminais de uma junção PN ou PIN semicondutora quando o mesmo é exposto à luz. No qual os elétrons fotogerados são movidos para o material N e as lacunas aparecem no material P. A barreira de potencial mantém elétrons e lacunas afastados. Se for estabelecido um circuito externo, os elétrons poderão circular, caracterizando uma corrente elétrica (ZILLES *et al*., 2012).

A corrente estabelecida com cada lado da junção conectados a terminais metálicos é chamada de fotocorrente, a qual estará presente enquanto houver radiação solar incidindo no semicondutor. A FIGURA 4 ilustra o processo de conversão fotovoltaica com o aproveitamento da corrente foto gerada.

FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA



FONTE: ZILLES *et al*. (2012).

2.5 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

A transformação da energia contida na radiação solar em eletricidade ocorre através das células fotovoltaicas, que são dispositivos feitos de materiais semicondutores, que é responsável pela conversão fotovoltaica (ZILLES *et al*., 2012).

Existem diversas tecnologias de fabricação das células fotovoltaicas, porém, a tecnologia tradicional para a fabricação das células fotovoltaicas é o silícioc-Si. Podendo ser silício monocristalino (m-Si), policristalino (p-Si) ou também chamado de silício multicristalino. Outra tecnologia é a tecnologia de filmes finos, filmes finos de silício ou outros materiais – depositados sobre substratos rígidos ou flexíveis, silício amorfo ou silício amorfo hidrogenado (a-Si), Telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), micromorfo ou microcristalino (µcSi/a-Si) (URBANETZ JUNIOR, 2014).

O motivo de o silício ser o material de domínio na fabricação das células fotovoltaicas deve-se ao fato de ser a tecnologia mais difundida e aperfeiçoada no mercado. Além disso, a abundância de silício na natureza faz desse material a tecnologia principal para fabricação das células fotovoltaicas (MIRANDA, 2014).

2.6 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica é a responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. São fabricadas, em sua maioria, com lâminas de silício cristalino, mono e multicristalino, com a área entre 50 cm² e 150 cm² e espessura entre 0,2mm e 0,3 mm. Tem aparência externa de uma lâmina circular ou quadrada, com tonalidade entre azul- escuro ou preta. (ZILLES *et al*., 2012).

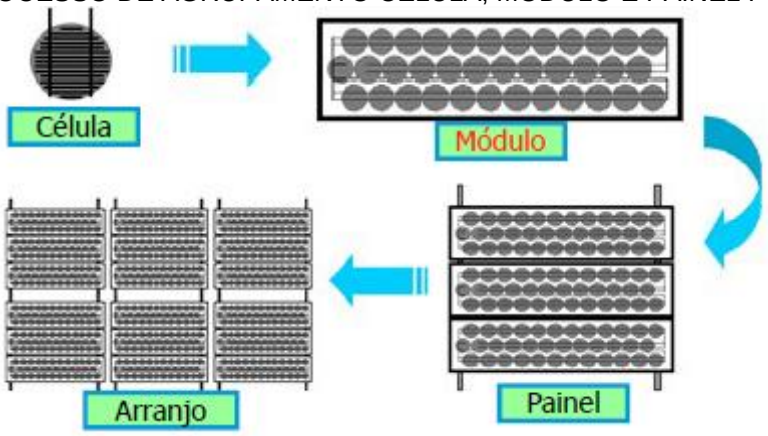
As células fotovoltaicas são capazes de gerar numa máxima potência, quando em condições de sol de 1000 w/m², uma temperatura de 25º, e uma corrente da ordem de 32 mA/cm², uma tensão de 0,46 V e 0,48 V (ZILLES *et al*., 2012).

2.6.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são compostos de um agrupamento de células solares, interligadas e encapsuladas, para a geração de eletricidade. As células fotovoltaicas que formam os módulos são agrupado em associações série e paralelo (CRESESB, 2008).

O encapsulamento é feito com materiais especiais de forma a proteger as células fotovoltaicas contra possíveis danos externos e fornecer rigidez mecânica ao conjunto. Os módulos têm estrutura composta com pequenas tiras metálicas que tem como objetivo interligar as células e fornecer contatos externos de saída. O material de encapsulamento é normalmente um polímero transparente e isolante (EVA – acetato de vinil-etila) e por vidro temperado e antirreflexivo na cobertura frontal. A parte posterior é feita de polifluoreto de vinila, contendo caixas de conexões na parte posterior do módulo e por fim a estrutura metálica para sustentar todo o equipamento, sendo assim os módulos interligados eletricamente e montados de modo a formar uma única estrutura (ZILLES *et al*., 2012). A Figura 5 ilustra o processo de agrupamento de célula que forma o painel fotovoltaico.

FIGURA 5 - PROCESSO DE AGRUPAMENTO CÉLULA, MÓDULO E PAINEL FOTOVOLTAICO



FONTE: URBANETZ JUNIOR (2014).

Para qualquer sistema de geração fotovoltaica o módulo solar fotovoltaico é o elemento básico do gerador fotovoltaico. Sendo que a tensão de operação do sistema em CC é determinada através da quantidade de módulos conectados em série. Já a corrente do sistema gerador é dada em função do agrupamento em série dos painéis individuais ou *strings* (são os módulos conectados em série).

2.6.2 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

As características elétricas dos módulos são de suma importância para um dimensionamento correto de sistemas fotovoltaicos.

As condições padrões de (STC)- "*Standard Test Conditions*" Temperatura de junção da célula: 25ºC, Irradiância total: 1.000W/m², normal à superfície de ensaio e Espectro solar para AM 1,5. Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência

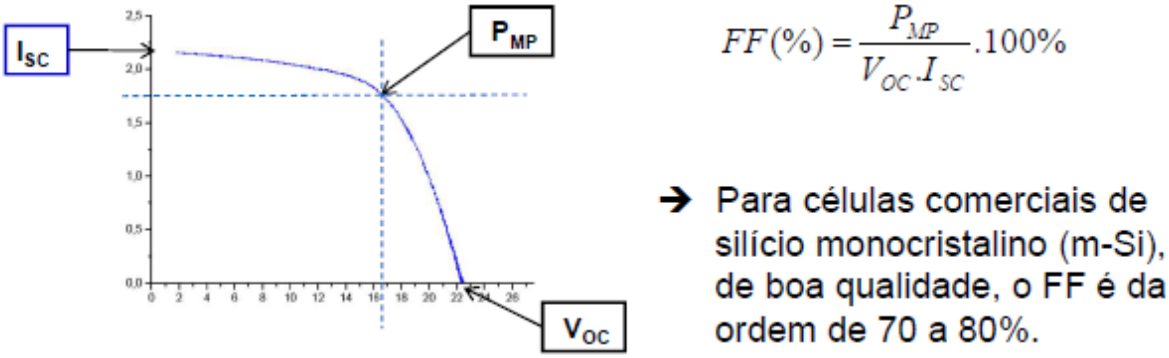
de pico. Atinge-se a potência de pico quando se obtém corrente e tensão potência máxima. Tão necessário quanto este parâmetro, existe outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo (CRESESB, 2008) (PINHO E GALDINHO, 2014).

As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Tensão de Circuito Aberto (Voc)
- Corrente de Curto Circuito (Isc)
- Potência Máxima (Pm)
- Tensão de Potência Máxima (Vmp)
- Corrente de Potência Máxima (Imp)

- ✓ A Tensão de Circuito Aberto (Voc) (*open circuit voltage*) - tensão gerada por um conversor fotovoltaico, quando não há carga conectada a célula.
- ✓ Corrente de Curto-Circuito (ISC) (*short circuit current*) - corrente de saída de um conversor fotovoltaico, quando os terminais estão no mesmo nível de referência, ou seja, curto-circuitadas.
- ✓ Curva característica ou Curva I-V é a representação dos valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico, em função da sua tensão de saída, para condições preestabelecidas de temperatura e de irradiância total, exposta na Figura 6.
- ✓ O ponto de máxima potência Pmp, é o ponto na curva em que ocorre a máxima transferência de potência da célula para a carga.
- ✓ Fator de Forma (FF, *Fill Factor*) é a razão entre a potência máxima (PMP) e o produto da tensão de circuito aberto (Voc) pela corrente de curto-circuito Isc), especificada na forma de porcentagem.

FIGURA 6 - CURVA I-V COM PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: URBANETZ JUNIOR (2014).

2.7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE ELÉTRICA (SFVCR)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede não utilizam sistemas de armazenamento de energia, pois toda eletricidade gerada é entregue a rede elétrica. As primeiras aplicações da tecnologia fotovoltaica para geração de eletricidade ocorreram em sistemas isolados, com objetivo de abastecer cargas distantes da rede de distribuição de eletricidade. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica só passaram a ter uso a partir da década de 1990 (ZILLES *et al*., 2012).

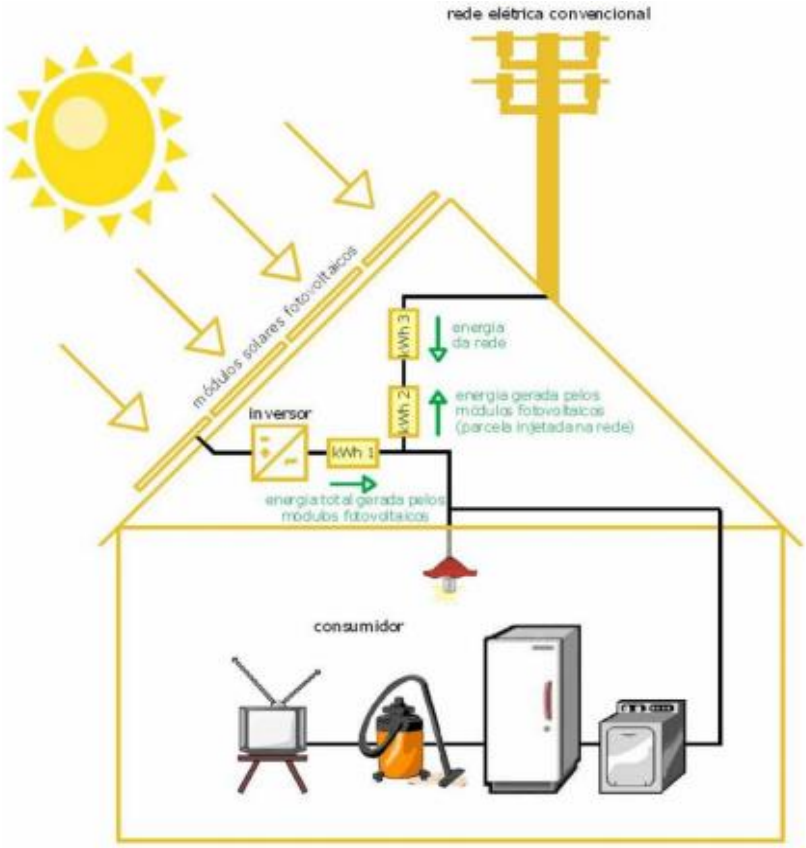
Os sistemas SFVCR dependem de uma fonte primária de energia que, até certo ponto pode ser considerada previsível, mas não controlada. Desta maneira dependendo da disponibilidade do sol e da capacidade de geração disponíveis no local, a energia gerada pode ser entregue tanto a rede elétrica como utilizada em qualquer equipamento elétrico instalado na edificação, ou por ambos. Logo, essas edificações além de consumidores passam a ser produtores de eletricidade.

Rüther (2004) destaca os principais aspectos dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Quando o gerador fotovoltaico fornece mais energia do que consome a unidade consumidora, o excedente é injetado na rede elétrica. Sendo assim, a unidade consumidora acumula um crédito energético, que neste caso é utilizado um contador bidirecional, relógio que registra a energia injetada à rede. Do mesmo modo, quando a energia gerada pelo gerador fotovoltaico não for necessária para suprir o consumo da unidade consumidora, esse déficit é suprido pela rede elétrica.

As perdas nesse tipo de sistema são minimizadas, devido à instalação ser integrada ao local da carga. Outra vantagem é que para a produção não é necessária

a ocupação de uma área extra, pois é integrada à edificação. O sistema também pode ser ampliado, dependendo da necessidade e disponibilidade de espaço na edificação. A Figura 7 apresenta o funcionamento do sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica convencional.

FIGURA 7 - SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A UMA EDIFICAÇÃO E INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA



FONTE: RÜTHER (2004).

Um SFVCR é composto basicamente pelos painéis fotovoltaicos, sistema de fixação dos painéis a edificação, sistema conversor CC-CA (inversor), diodos de bypass e diodos de bloqueio, fusíveis e disjuntores, cabos elétricos, terminais, proteções contra sobretensões e descargas atmosféricas e caixas de conexão (RÜTHER, 2004).

2.7.1 Fatores que Influenciam no Rendimento do Gerador Fotovoltaico integrado à Edificação

O rendimento dos módulos fotovoltaicos pode ser afetado por vários parâmetros. O fator principal é radiação solar incidente e sua distribuição espectral,

que depende, sobretudo da localização geográfica da instalação, da inclinação e orientação dos módulos. A temperatura é um fator bastante relevante, pois o aumento da temperatura ambiente provoca o aumento da temperatura da célula e, consequentemente reduz a eficiência da célula fotovoltaica. Isto se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. (PINHO E GALDINHO, 2014).

Além de radiação e temperatura, existem outros fatores que afetam o desempenho um gerador fotovoltaico como: o sombreamento parcial, o descasamento entre painéis de um mesmo string, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam na performance do sistema gerador fotovoltaico (RÜTHER, 2004)

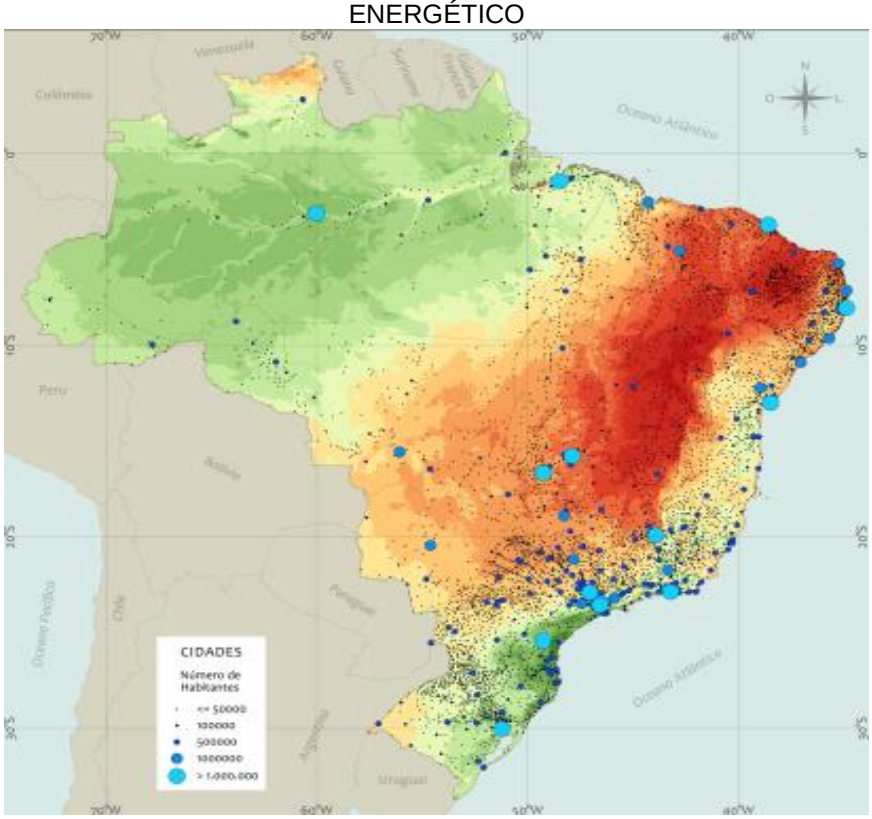
Quanto à inclinação e orientação dos painéis, tem-se como regra geral a inclinação ótima com relação à horizontal para a incidência solar máxima em regime anual dada pela latitude local. A orientação ideal é a de uma superfície voltada para o equador (norte geográfico para instalações no hemisfério sul) (RÜTHER, 2004)

O sombreamento em um sistema fotovoltaico deve ser evitado, pois para que o gerador tenha um desempenho ótimo este deve ter uma iluminação homogênea, caso contrário pode reduzir acentuadamente o rendimento do sistema. Sem contar que uma célula solar parcialmente sombreada pode vir a atuar como uma carga, o que pode levar a um aquecimento excessivo da célula e possivelmente à destruição do módulo (RÜTHER, 2004).

2.8 POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO BRASIL

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), a geração fotovoltaica de energia elétrica tem grande potencial no Brasil, conforme indica o mapa da Figura 8. No local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais energia solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo.

FIGURA 8 - MAPA DO POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO EM TERMOS DE RENDIMENTO ENERGÉTICO



FONTE: PEREIRA *et al*.(2017).

O mapa mostra o rendimento energético anual máximo (medido em kWh de energia elétrica por ano para cada kWp de potência fotovoltaico instalada) em todo território nacional, tanto para usinas de grande porte, como para instalação integradas a edificações. O Atlas também cita que a geração solar fotovoltaica tem grande potencial de contribuição para reduzir os picos de demanda dos sistemas de transmissão do Sistema Interligado Nacional - SIN. E destaca que nos próximos anos a geração de eletricidade próxima ao ponto de consumo, deverá ser reconhecida pelo sistema elétrico como um dos principais atributos desta tecnologia de geração. Isso se dá pelo grande aumento da geração solar fotovoltaica em todo país e pelo custo de implantação que teve uma acentuada redução, fazendo com que o cenário da geração solar fotovoltaica no Brasil seja cada vez mais favorável.

2.8.1 Geração Distribuída

A geração distribuída (GD) caracteriza-se pela a produção de energia de forma descentralizada no próprio local ou próximo de onde essa energia é utilizada, independente da potência, tecnologia e fonte energética. As tecnologias de geração

distribuída têm evoluído para incluir potências cada vez menores, ou seja, criando mini-usinas geradoras (ZOMER, 2010).

As vantagens da geração distribuída, comparando com a geração central de energia, é a redução de custos de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2015).

No Brasil, a geração distribuída obteve avanço após ser mencionada Lei 10.848/04, como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento do Decreto 5.163/04 fornece características que ajudarão as empresas distribuidoras, que até então se opunham a esta forma de geração, a enxergarem na geração distribuída uma das formas de mitigar riscos de planejamento (ZILLES *et al*., 2012).

No entanto, houve-se a popularização da micro e mini geração distribuída, na qual o consumidor passa a gerar sua própria energia, ocupando uma posição ativa no setor elétrico. Porém, essa modalidade de geração só foi regulamentada pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2012, com a Resolução Normativa de nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade (ANEEL, 2015).

Em 2015, o regulamento foi revisado, com o objetivo de tornar mais célere e ampliar o acesso à geração distribuída para um número maior de unidades consumidoras. A Resolução Normativa nº 687/2015, que altera a nº 482/2012 passa a valer a partir em 1º de março de 2016. De acordo com as novas regras é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Além de prolongar de 36 para 60 meses o uso dos créditos excedentes. Sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora (ANEEL, 2015).

Com a alteração também é permitido instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). E o uso de geração compartilhada possibilitando que diversos interessados se unam em um

consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados. Também foram estabelecidas regras que simplificam o processo de tramitação com a distribuidora, padronização de formulários para realização da solicitação de acesso pelo consumidor e, reduzido para 34 dias o prazo para distribuidora conectar usinas de até 75 kW. Sendo que a partir de 2017 a solicitação e acompanhamento de novos pedidos podem ser realizados pela internet. (ANEEL, 2015).

Dentre as tecnologias de geração distribuída de pequeno porte, destacou-se a geração solar fotovoltaica, tipicamente urbana e integrada em telhados e coberturas de edificações. A adoção dessa tecnologia é crescente em todo o país e alcançou em 2016 um crescimento exponencial. Esse crescimento tem a influência de fatores como: a alteração da REN nº 482/2012 alteração da REN 482/2012, que amplia as possibilidades de negócios em geração distribuída, permitindo que maior número de consumidores passe a adquirir a tecnologia; isenções tributárias, de PIS/COFINS e ICMS em todas as unidade federativas sobre a energia compensada pela unidade consumidora, viabilizando economicamente o sistema; reajuste das tarifas de eletricidade acima da inflação nos últimos dois anos e redução no preço dos sistemas fotovoltaicos (PDE, 2026).

De acordo com a ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar, os sistemas de microgeração e minigeração distribuída solar já somam mais 200 MW de potência instalada no Brasil. O Plano Decenal de Energia estima- se que em 2024 terão sido instalados mais de 1,2 milhão de sistemas solares fotovoltaicos dentro da modalidade de micro e minigeração distribuída e com potência máxima de 5MWp. Sendo que a maioria desses geradores será instalada em edificações, com painéis integrados ao telhado ou à fachada da edificação.

Portanto, gerar eletricidade através do recurso solar e integrada ao telhado da residência é cada vez mais competitivo com os preços e tarifas de energia elétrica convencionais. Contudo, é necessário o conhecimento da irradiação solar incidente no plano dos painéis solares fotovoltaicos, para que o dimensionamento do gerador fotovoltaico e a estimativa de quantidade de geração de eletricidade que o sistema pode gerar sejam feitos de forma correta.

2.9 CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE SFVCR

Um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica tem na sua configuração básica, é formado pelos conjuntos gerador fotovoltaico, inversor e a rede elétrica. O gerador fotovoltaico gera a energia em corrente continua, o inversor é responsável pela conversão da energia gerada em corrente continua para corrente alternada, para então ser injetada a rede elétrica (ZILLES *et al*., 2012).

Dentro de cada etapa do processo que compõem o SFVCR, existem as perdas que são relacionadas a diversas causas, como já mencionada anteriormente, essas perdas, por exemplo, são aumento da temperatura de operação do gerador fotovoltaico, perdas ôhmicas no cabeamento e perdas na conversão do inversor, totalizando todas as perdas será contabilizada a eficiência da geração do SFVCR.

O dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, envolve uma série de etapas, no qual destacam-se o processo de cálculo da energia produzida pelo gerador fotovoltaico, para isso é necessário o conhecimento detalhado do SFVCR. O gerador fotovoltaico transforma a radiação solar em energia elétrica, o rendimento deste é determinado pela sua própria eficiência caracterizada pela sua potência em condições padrão e pelas condições de operações que envolvem: a incidência de radiação que envolve a orientação e inclinação dos módulos, temperatura das células, massa de ar e sujeira e sombreamento dos módulos. No qual o desempenho do SFV é medido pela taxa de desempenho (*PR Performance Ratio)* que é a relação entre o desempenho real o sistema e o desempenho máximo teórico possível. Essa relação é um parâmetro que avalia a geração de energia elétrica do sistema FV, levando em conta a potência real do sistema sob condições de operação e todas as perdas envolvidas (ZILLES *et al*., 2012) (PINHO E GALDINHO, 2014).

3 ESTUDO DE CASOS DE SFVCR EM PALMAS – TO E CURITIBA – PR

O estudo tem como intuito realizar levantamento de geração de energia através de SFVCR residencial, em cidades localizadas em duas regiões distintas do país. Com o objetivo de analisar geração de eletricidade e caracterizar fatores que influenciam no desempenho de cada sistema estudado.

i. Sistema de 3,57 kWp - instalado em uma residência particular na cidade de Palmas – TO, com início de operação em setembro de 2015;
ii. Sistema de 3 kWp - instalado em uma residência particular na cidade de Curitiba - PR, com início de operação em janeiro de 2016.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS SFVCR

3.1.1 Sistema Residencial 1

O sistema residencial 1 encontra-se instalado na área da cobertura de uma residência particular situada na quadra 1003 sul, alameda 06, casa 02, plano diretor sul da cidade de Palmas – TO e está em operação desde setembro de 2015. O sistema tem potência instalada de 3,57 kWp e é composto por 14 módulos de silício policristalino, modelo Canadian Solar - CS6P-255, instalados sobre o telhado da residência, possui 8 módulos com orientação de -135° para oeste e 6 com orientação de 45° para leste e ambos inclinação de 16°. O inversor utilizado no sistema é o modelo ABB PVI-3.6-TL-OUTD-S, monofásico, sem transformador. A Figura 9 mostra o inversor instalado no sistema residencial 1.

FIGURA 9 - INVERSOR INSTALADO NO SISTEMA RESIDENCIAL 1

FONTE: Adaptado de ABB (2018).

A disposição dos módulos instalados no telhado do sistema residencial 1 é apresentada na Figura 10.

FIGURA 10 - DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO RESIDENCIAL 1

FONTE: Acervo Próprio.

3.1.2 Sistema Residencial 2

O sistema residencial 2 encontra-se instalado na área da cobertura de uma residência particular situada no bairro Santo Inácio na cidade de Curitiba – PR e, está em operação desde janeiro de 2016. O sistema tem potência instalada de 3 kWp, é composto por 10 módulos de silício policristalino, modelo ELCO A300-P, instalados sobre o telhado da residência, com orientação de 2º leste e inclinação de 22º. O inversor utilizado para esse sistema é modelo SE-TL3kA monofásico. A Figura 11 apresenta o inversor instalado no sistema residencial 2.

FIGURA 11 - INVERSOR INSTALADO NO SISTEMA RESIDENCIAL 2

FONTE: Acervo Próprio

A Figura 12 demonstra a disposição dos módulos fotovoltaicos instalados no sistema residencial 2.

FIGURA 12 - DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO SISTEMA RESIDENCIAL 2

FONTE: Acervo Próprio.

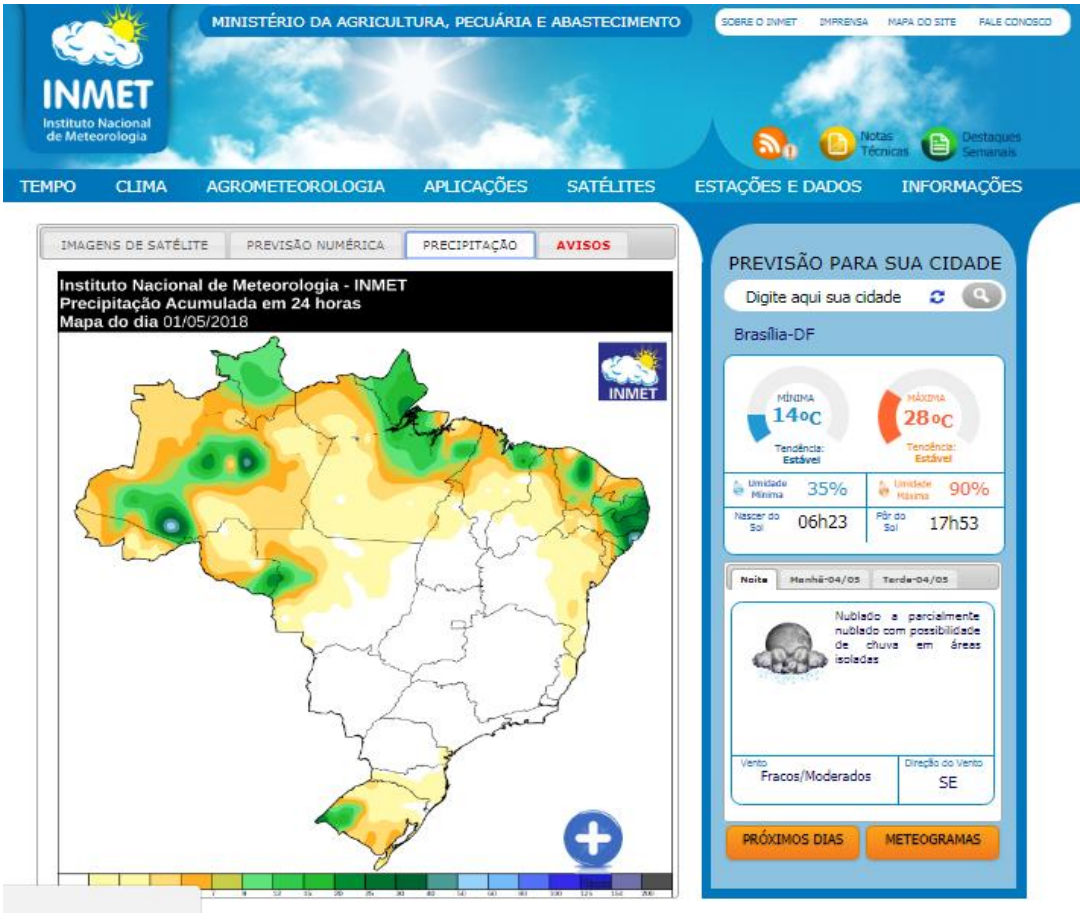
3.2 DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

A coleta de dados da irradiação solar nas cidades em que os sistemas SFVCR serão analisados são necessários para o desenvolvimento dessa pesquisa. Os dados de irradiação foram colhidos no período de janeiro de 2017 a dezembro de 2017, disponibilizados pelo INMET.

O INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) é um órgão do Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento e, disponibiliza por meio do seu portal informações meteorológicas de forma gratuita e digital. O órgão tem diversas atribuições e dentre elas estão as de elaborar e divulgar, diariamente, em nível nacional, a previsão do tempo, avisos e boletins meteorológicos especiais; promover a execução de estudos e levantamentos meteorológicos e climatológicos aplicados à agricultura e outras atividades correlatas; coordenar, elaborar e executar programas e projetos de pesquisas agrometeorológicas e de acompanhamento das modificações climáticas e ambientais; estabelecer, coordenar e operar as redes de observações meteorológicas e de transmissão de dados (INMET, 2018).

O sistema de coleta dados é equipado por uma rede de estações de sondagem de ar superior (radiossonda); estações meteorológicas de superfície, operadas manualmente. Dessa forma, os dados coletados por essa rede são disseminados, de forma democrática e gratuita, em tempo real, na página http://www.inmet.gov.br, e têm aplicação em todos os setores da economia, de modo especial no agropecuário e em apoio à Defesa Civil (INMET, 2018). A Figura 13 apresenta a tela inicial no site do INMET.

FIGURA 13 - PORTAL DO INMET



FONTE: INMET (2018).

Através do portal, é possível coletar diversos dados meteorológicos como: temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras variáveis.

Para fim de análise desta pesquisa os dados coletados foram apenas de irradiação solar. Estes foram colhidos das estações automáticas: Estação Palmas - A009, esta aberta em 17 de dezembro de 2004, tem latitude de -10,190744º e longitude -48,301811º e, estação Curitiba - A807, esta aberta em 28 de janeiro de 2003, tem uma latitude de -25,448688º e longitude de -49,230602º.

3.2.1 Dados de irradiação Atlas de Energia Solar

A segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar foi lançada no segundo semestre de 2017. Após uma década da primeira edição o Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),

através do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), publicaram a segunda edição, ampliada e revisada.

Para a nova edição, foram empregados mais de 17 anos de dados satelitais e implementados vários avanços nas parametrizações do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. O modelo BRASIL-SR, utiliza dados de cobertura de nuvens obtidos a partir de imagens digitais do satélite geoestacionário GOES posicionado sobre a América do Sul (Pereira *et al*. (2017).

De acordo com Pereira *et al*. (2017), a variabilidade do recurso solar tem impactos em aspectos técnicos de qualidade e de segurança do sistema elétrico. Logo, além do potencial disponível, informações confiáveis sobre a variabilidade do recurso solar são imprescindíveis para dar suporte ao desenvolvimento de projetos para aproveitamento dessa fonte de energia.

A edição conta com uma base de dados de radiação solar, nas suas várias componentes, no qual foram produzidas a partir de dados de imagens de satélites desde 1999 até 2015. Os aprimoramentos realizados permitem reduzir as incertezas das estimativas de irradiância solar na superfície e, por conseguinte, avaliar de forma mais fiel a variabilidade espacial e temporal da radiação solar incidente.

Assim, como a primeira edição, os dados disponibilizados pelo Atlas referem-se aos valores médios das estimativas do total diário de irradiação global horizontal, total diário da irradiação direta normal e também disponibilizam a irradiação incidente sobre um plano inclinado igual à latitude. A base de dados completa contém, além das componentes citadas acima, a irradiação difusa e a fotossinteticamente ativa (PAR). Os dados estão disponibilizados em planilhas do Excel, no qual é necessário o auxilio do programa *Google Earth Pro*, para localizar as coordenadas geográficas, latitude e longitude dos locais onde será feito o estudo. A Figura 14 mostra a interface inicial do programa *Google Earth Pro.*

FIGURA 14 - INTERFACE INICIAL DO PROGRAMA GOOGLE EARTH PRO

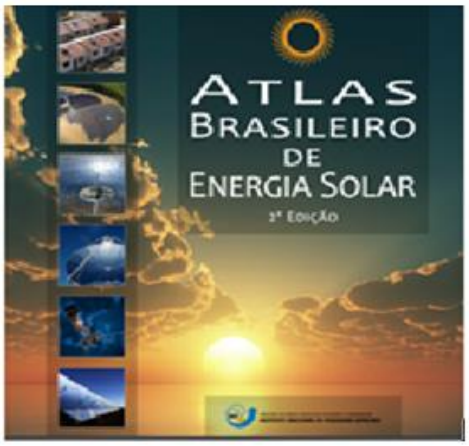
FONTE: *Google Earth Pro (2018).*

As informações das coordenadas de cada local serão inseridas na caixa de entrada do *menu* iniciar, pesquisa e em seguida será fixado o marcador no local escolhido, onde serão encontrados os dados precisos das coordenadas geográficas, latitude e longitude local.

De posse das coordenadas, localiza-se os dados de irradiação global horizontal para os determinados locais de estudo, que são disponibilizados em planilhas do *excel* do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Na Figura 15 mostra-se a imagem do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição e dados de irradiação solar no plano horizontal para as cidades de Palmas e Curitiba e suas respectivas latitudes e longitudes.

FIGURA 15 - ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E DADOS DE IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL PARA AS CIDADES DE PALMAS – TO E CURITIBA – PR



LON	LAT	00_ANNUA	01_JAN	02_FEB	03_MAR	04_APR	05_MAY	06_JUN	07_JUL	08_AUG	09_SEP	10_OCT	11_NOV	12_DEZ
-48,3490000000	-10,2005000000	5218	5143	5133	4857	4954	4967	5035	5244	5942	5715	5401	5137	5089
-48,2490000000	-10,2005000000	5172	4973	4959	4642	4800	4982	5126	5377	6096	5794	5313	4991	5016
-48,3490000000	-10,1005000000	5209	5160	5108	4860	4909	4968	5066	5252	5954	5686	5372	5119	5057
-48,2490000000	-10,1005000000	5173	4985	4953	4676	4779	4970	5136	5403	6101	5791	5283	5004	4999

*Irradiação solar global horizontal Palmas - TO

LON	LAT	00_ANNUAL	01_JAN	02_FEB	03_MAR	04_APR	05_MAY	06_JUN	07_JUL	08_AUG	09_SEP	10_OCT	11_NOV	12_DEZ
-49,2490000000	-25,5005000000	4201	5342	5151	4497	3793	3062	2748	2895	3852	3840	4408	5264	5557
-49,1490000000	-25,5005000000	4176	5314	5142	4499	3757	3041	2708	2894	3809	3810	4377	5226	5529
-49,2490000000	-25,4005000000	4194	5318	5158	4538	3782	3047	2758	2892	3864	3830	4359	5230	5557
-49,1490000000	-25,4005000000	4176	5309	5149	4499	3771	3039	2728	2890	3830	3794	4341	5208	5559

*Irradiação solar global horizontal Curitiba - PR

FONTE: A autora (2018).

Entretanto, os dados de irradiação encontrados na Figura 15, são na posição horizontal, sendo assim, para o estudo em caso é necessário encontrar os dados de irradiação solar em um plano de inclinação igual à latitude local, conforme os casos em estudo.

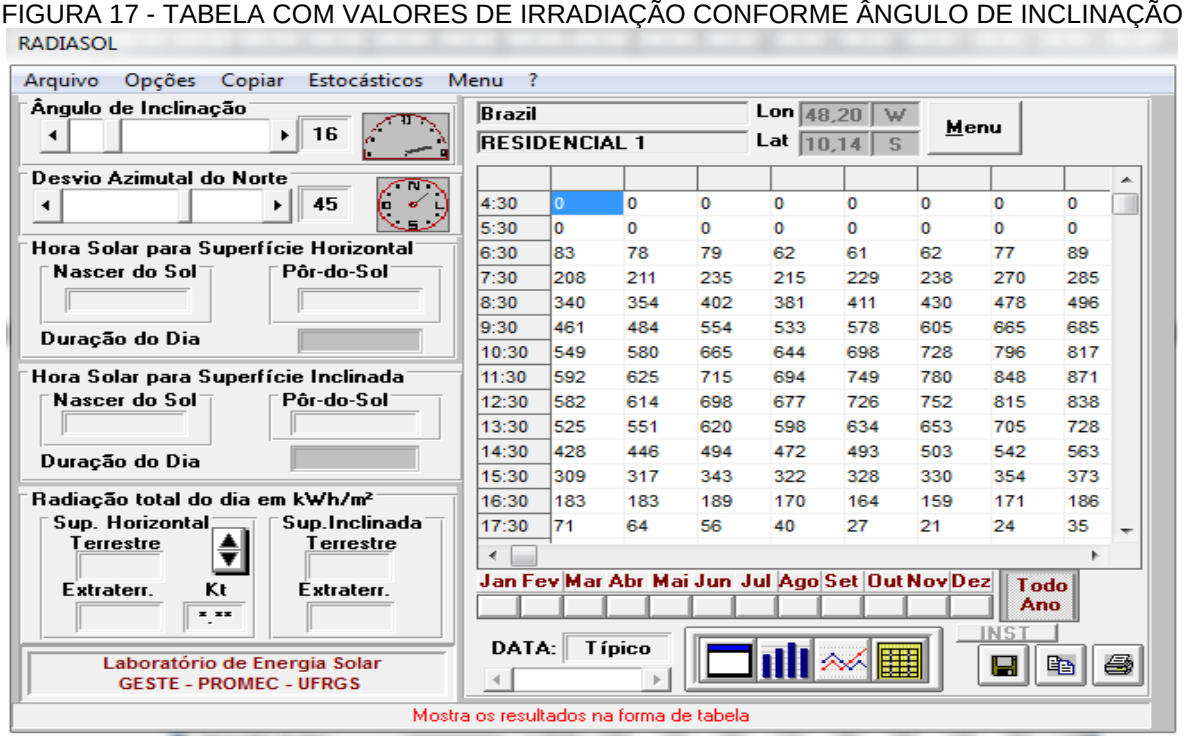
Para encontrar a irradiação no plano inclinado para cada cenário a ser estudado, será usado o *software* RADIASOL, este disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Através do programa RADIASOL é possível identificar a irradiação solar para qualquer plano inclinado, isso se dá com a inserção de dados de coordenadas geográficas, irradiação local, inclinação e desvio azimutal. A Figura 16 demostra a tela inicial do RADIASOL.

FIGURA 16 - TELA INICIAL DO PROGRAMA RADIASOL, COM VALORES DE IRRADIAÇÃO SOLAR

FONTE: A autora (2018).

Conforme demonstrado na Figura 16 à tela inicial do programa RADIASOL, no qual são inseridos os dados de localização da estação, as coordenadas latitude e longitude, dados de irradiação global horizontal para cada mês. Sendo assim, com a inserção dos dados citados o programa passa para outra tela, onde é possível incluir a variação do ângulo de inclinação e o desvio azimutal em relação ao Norte apresentado na Figura 17.

FIGURA 17 - TABELA COM VALORES DE IRRADIAÇÃO CONFORME ÂNGULO DE INCLINAÇÃO



FONTE: A autora (2018).

Conforme a Figura 17 demonstra, os valores de irradiação são dispostos em forma de gráficos de barras, linhas ou em forma de tabela. Estes ainda tem a opção de ampliar a visualização para melhor ser a impressão dados.

3.3 PRODUTIVIDADE E DESEMPENHO

Com a finalidade de comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos, no qual operam sobre diferentes localidades e com configurações distintas, utiliza- se indicadores de produtividade conhecidos como índices de mérito. Esses índices permitem verificar se um determinado sistema fotovoltaico está produzindo energia de forma otimizada ou se deve ser reconfigurado para aproveitar ao máximo o recurso solar disponível (BENEDITO, 2009).

No que se refere ao aproveitamento da radiação solar, a produção de energia e os efeitos das perdas do sistema, aplica-se os seguintes índices: o fator de capacidade, a produtividade anual de um sistema ou *Yield* e o desempenho global de um sistema (*Performance Ratio*) (BENEDITO, 2009).

Fator de capacidade – é a razão entre a energia de fato entregue pelo sistema, no período considerado, e a energia que entregaria se caso operasse em potência

nominal durante o número de dias analisado, 24 horas por dia. Seu valor é expresso em porcentagem e é definido de acordo com a Equação 1.

$$FC = \frac{Energia\ Gerada}{Potência\ FV * 24 * dias}\ (\%) \qquad \text{Equação (1)}$$

Tal índice pode ser afetado por fatores que ocasionam perdas no sistema, como por exemplo acúmulo de sujeira no painel FV e índices de irradiação solar. Os SFVCR no Brasil tem fator de capacidade entre 13% e 18%, dependendo do recurso solar disponível, das tecnologias utilizadas e das formas de dimensionamento adotadas (URBANETZ; et. al., 2014a) (BENEDITO, 2009).

Produtividade anual (*Yield*) - correspondente à energia gerada em kWh pela potência instalada do sistema em kWp, normalmente vinculada a um ano de operação, yield anual, porém pode ser também considerado o yield mensal. A grandeza em questão encontra-se expressa na Equação 2.

$$Y = \frac{Enegia\ Gerada}{Potêcia\ FV}\ \left(\frac{kWh}{kWp}\right) \qquad \text{Equação (2)}$$

Desempenho global ou *Performance Ratio* - É a relação entre a produtividade (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1.000W/m² incidentes no painel FV, também normalmente vinculada a um ano de operação, *performance ratio* anual, porém, pode ser também considerada a *performance ratio* mensal. A grandeza em questão é expressa pela Equação 3.

$$PR = \frac{Yeild}{Irradiação/1000}\ (\%) \qquad \text{Equação (3)}$$

3.3.1 Desempenho e Produtividade Sistema Residencial 1

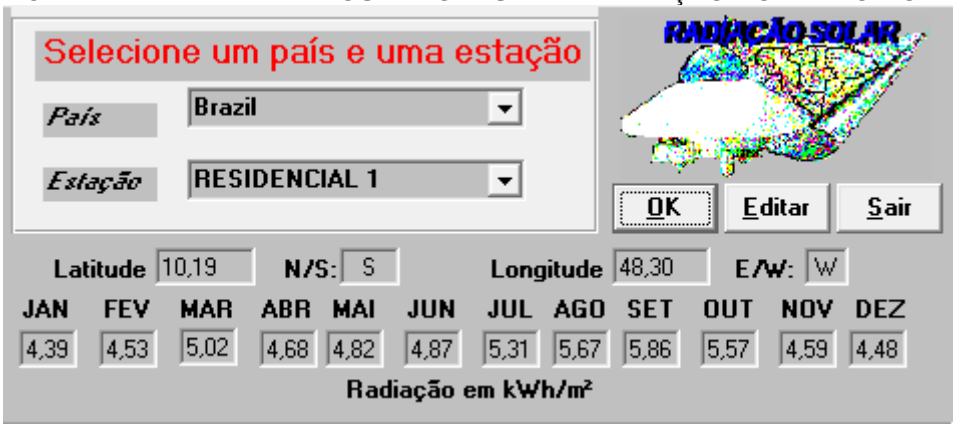
Para realizar a análise de desempenho do Sistema Residencial 1, são considerados valores de energia gerada durante o período de janeiro a dezembro de 2017 e valores de irradiação incidentes no painel FV. Para determinar os índices de irradiação solar para o local onde o sistema residencial 1 encontra-se instalado, foram utilizados dados informados em estação meteorológica do INMET. Para o caso em análise tem-se a cidade de Palmas – TO, localizada na região Norte do país sua latitude é -10,190744º e longitude -48,301811º.

Através da estação Palmas A009 do INMET, a média mensal diária para o plano horizontal de acordo com a coordenada referida é da ordem de 4,98 kWh/m²/dia.

Como os dados de irradiação encontrados com as informações disponibilizadas pela estação do INMET são na posição horizontal, logo é necessário o cálculo da irradiação que efetivamente incide no painel fotovoltaico do sistema residencial 1, no plano inclinado. Para tal cálculo utiliza-se o programa RADIASOL que determina a irradiação no plano inclinado do painel FV, sendo que este encontram-se 8 módulos com desvio de -135° oeste em relação ao norte, e 6 módulos desvio de 45° graus para leste em relação ao norte e ambos com inclinação de 16°. Com a inserção dos valores de irradiação solar no plano horizontal no programa RADIASOL, identifica-se valores de irradiação para qualquer plano, diferentes inclinações e desvio azimutal (UFRGS, 2012).

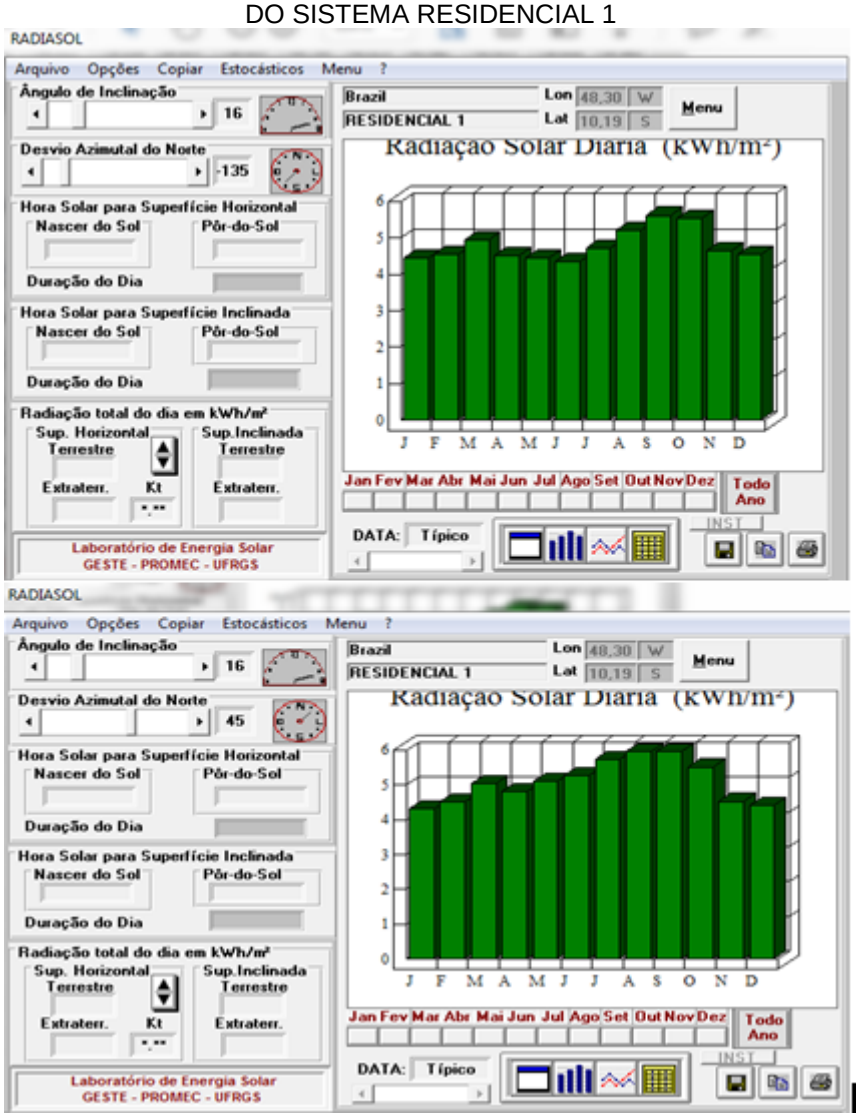
No programa RADIASOL foi criada a estação “RESIDENCIAL 1”, conforme a Figura 18 que apresenta a tela inicial onde foram inseridos os valores de irradiação no plano horizontal do ano de 2017 para o local onde o sistema Residencial 1 estar instalado. Ajustando-se a inclinação para 16º, e os respectivos desvios azimutais, obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 19. Para o período de estudo, a Tabela 1 apresenta valores de irradiação solar tanto para o plano horizontal, quanto para o plano do painel FV do sistema Residencial 1.

FIGURA 18 - TELA DE ENTRADA DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 19 - TELA DO RADIASOL COM VALORES DE IRRADIAÇÃO INCIDENTE NO PAINEL FV DO SISTEMA RESIDENCIAL 1



FONTE: A autora (2018).

TABELA 1 - VALORES DE IRRADIAÇÃO MENSAL DO SISTEMA RESIDENCIAL 1 NO PLANO HORIZONTAL E NO INCLINADO (kWh/m².DIA)

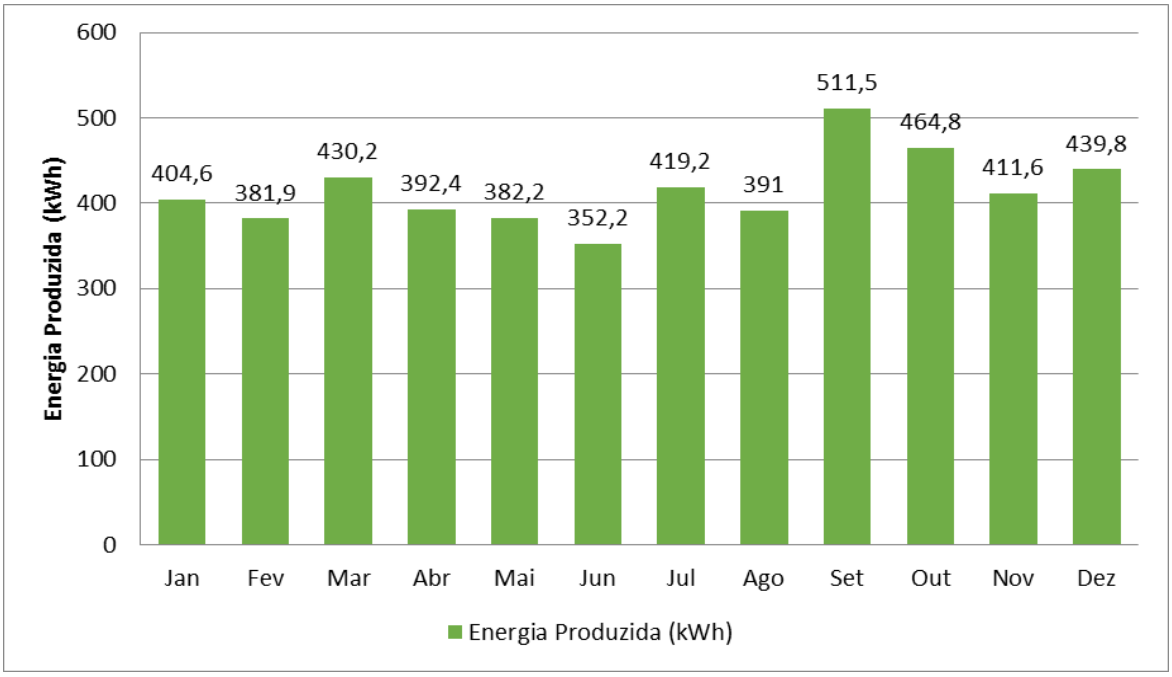
IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO HORIZONTAL E NO PLANO INCLINADO (kWh/m². dia).

	IRRADIAÇÃO			
Mês	**Plano Horizontal**	**Plano Inclinado Oeste**	**Plano Inclinado Leste**	**Média Leste/Oeste**
Janeiro	4,39	4,46	4,33	4,39
Fevereiro	4,53	4,56	4,51	4,53
Março	5,02	4,95	5,05	5,00
Abril	4,68	4,52	4,81	4,66
Maio	4,82	4,45	5,10	4,78
Junho	4,87	4,36	5,26	4,81
Julho	5,31	4,71	5,75	5,23
Agosto	5,67	5,22	5,97	5,60
Setembro	5,86	5,62	5,96	5,79
Outubro	5,57	5,53	5,52	5,53
Novembro	4,59	4,65	4,53	4,59
Dezembro	4,48	4,56	4,40	4,48

FONTE: A autora (2018).

Logo, a energia produzida pelo sistema Residencial 1, ao longo do período analisado (janeiro a dezembro de 2017), apresentou geração total de 4.981,4 kWh neste período. A energia produzida é proporcional à incidência de irradiação no painel FV, sendo que nos meses onde a incidência é menor, a geração de energia elétrica também é menor, de modo que nos meses com maior incidência de irradiação no painel FV a geração de energia também é maior. A Figura 20 apresenta a energia produzida mensalmente no ano de 2017 pelo sistema Residencial 1.

FIGURA 20 - ENERGIA PRODUZIDA MENSALMENTE PELO SISTEMA RESIDENCIAL 1



FONTE: A autora (2018).

- Produtividade

A Tabela 2 apresenta os valores de produtividade mensal e anual para o SFVCR Residencial 1, no ano de 2017.

TABELA 2 - PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 (KWH/KWP)

PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 (kWh/kWp)

Mês	Produtividade
Janeiro	113,33
Fevereiro	106,97
Março	120,5
Abril	109,91
Maio	107,05
Junho	98,65
Julho	117,42
Agosto	109,52
Setembro	143,27
Outubro	130,19
Novembro	115,29
Dezembro	123,19
Anual	1.395,29

FONTE: A autora (2018).

- Desempenho

A Tabela 3 apresenta os valores em porcentagem da taxa de desempenho mensal e anual para o SFVCR Residencial 1, no ano de 2017.

TABELA 3 - TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 1 (%)

TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 1 (%)

Mês	Taxa de Desempenho (%)
Janeiro	83,28%
Fevereiro	84,33%
Março	77,74%
Abril	78,62%
Maio	72,24%
Junho	68,36%
Julho	72,42%
Agosto	63,09%
Setembro	82,48%
Outubro	75,94%
Novembro	83,73%
Dezembro	88,70%
Anual	77,23%

FONTE: A autora (2018).

- Fator de Capacidade

A Tabela 4 mostra as porcentagens do fator de capacidade mensal e anual para o SFVCR Residencial 1, no ano de 2017.

TABELA 4 - FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 1 (%)

FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 1 (%)

Mês	Fator de Capacidade (%)
Janeiro	15,30%
Fevereiro	15,91%
Março	16,19%
Abril	15,26%
Maio	14,38%
Junho	13,70%
Julho	15,78%
Agosto	14,72%

Setembro	19,89%
Outubro	17,49%
Novembro	16,01%
Dezembro	16,55%
Anual	15,93%

FONTE: A autora (2018).

3.3.2 Desempenho e Produtividade Sistema Residencial 2

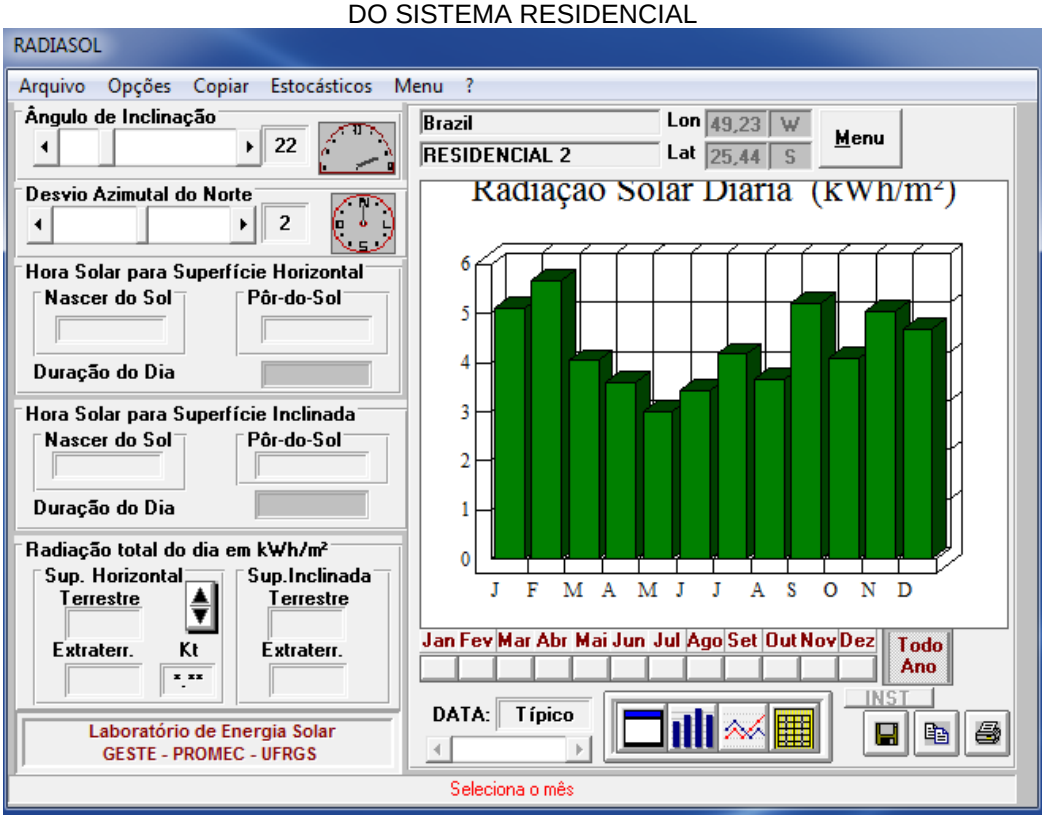
Na análise de desempenho e produtividade do Sistema Residencial 2 foram realizados cálculos de forma análoga aos cálculos do Sistema Residencial 1, foram considerados valores de energia gerada durante o período de janeiro a dezembro de 2017 e valores de irradiação incidentes no painel FV. Para determinar os índices de irradiação solar para o local onde o sistema residencial 2 encontra-se instalado, foram utilizados dados informados em estação meteorológica do INMET. Para tal caso em análise tem-se a cidade de Curitiba – PR, localizada na região Sul do país, com latitude de -25,448688º e longitude de -49,230602º.

Com dados de irradiação solar coletados da estação Curitiba A807 do INMET, obteve-se a irradiação no plano horizontal de 4,1kWh/m²/dia. Logo, com a utilização do programa RADIASOL, calculou-se a irradiação incidente no painel FV do Sistema Residencial 2, no qual encontra-se instalado com orientação de 2º leste e inclinação de 22º, onde foi criada a estação “RESIDENCIAL 2”, conforme a Figura 21 mostra a tela inicial do RADIASOL com dados da irradiação no plano horizontal inseridos. Ajustando-se a inclinação e o desvio azimutal para o leste, obteve-se o gráfico da Figura 22.

FIGURA 21 - TELA DE ENTRADA DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL

FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 22 - TELA DO RADIASOL COM VALORES DE IRRADIAÇÃO INCIDENTE NO PAINEL FV DO SISTEMA RESIDENCIAL



FONTE: A autora (2018).

A Tabela 5 demonstra os valores de irradiação para tanto o plano horizontal quanto para o plano inclinado do painel FV do Sistema Residencial 2.

TABELA 5 - VALORES DE IRRADIAÇÃO MENSAL DO SISTEMA RESIDENCIAL 2 NO PLANO HORIZONTAL E NO INCLINADO (KWH/M².DIA)

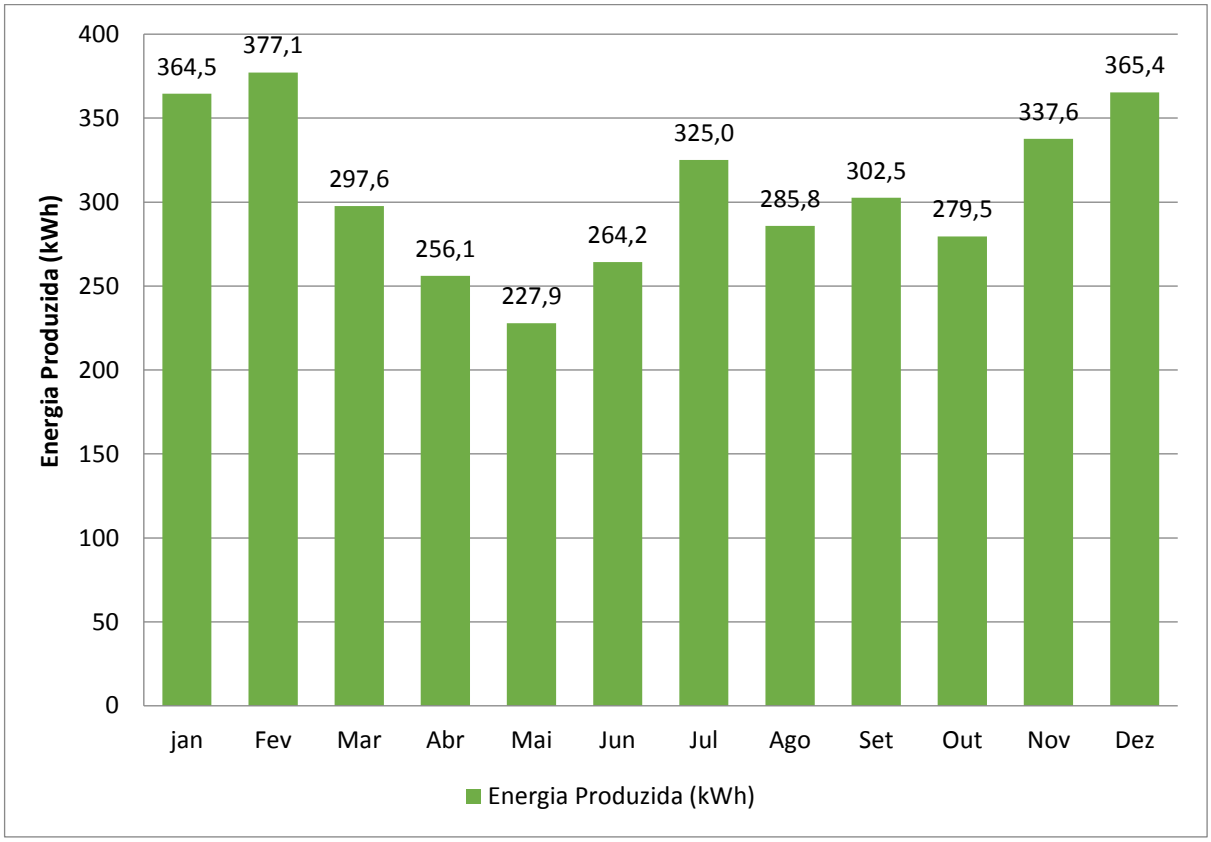
IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO HORIZONTAL E PLANO INCLINADO (kWh/m².dia)

Mês	Irradiação Plano Horizontal	Irradiação Plano Inclinado
Janeiro	5,19	5,10
Fevereiro	5,67	5,68
Março	3,91	4,03
Abril	3,37	3,60
Maio	2,75	3,00
Junho	2,90	3,41
Julho	3,44	4,17
Agosto	3,34	3,66
Setembro	4,83	5,21
Outubro	4,01	4,07
Novembro	5,51	5,04
Dezembro	4,74	4,67

FONTE: A autora (2018).

Posto isto, a Figura 23 apresenta os dados de energia gerada mensalmente pelo Sistema Residencial 2, durante o período analisado (janeiro a dezembro de 2017), observou-se a geração total de 3.683,2 kWh neste período.

FIGURA 23 - ENERGIA PRODUZIDA MENSALMENTE PELO SISTEMA RESIDENCIAL 2



FONTE: A autora (2018).

- Produtividade

A Tabela 6 mostra os valores de produtividade mensal e anual para o SFVCR Residencial 2, no ano de 2017.

TABELA 6 - PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 (KWH/KWP)

PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 2 (kWh/kWp)

Mês	Produtividade
Janeiro	121,5
Fevereiro	125,7
Março	93,2
Abril	85,36
Maio	75,96
Junho	88,06
Julho	108,33
Agosto	95,26
Setembro	100,83

Outubro	93,16
Novembro	112,53
Dezembro	121,8
Anual	1.228,00

FONTE: A autora (2018).

- Desempenho

A Tabela 7 apresenta os valores em porcentagem da taxa de desempenho mensal e anual para o SFVCR Residencial 2, no ano de 2017.

TABELA 7 - TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 2 (%)

TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 2 (%)

Mês	Taxa de Desempenho (%)
Janeiro	76,85%
Fevereiro	79,03%
Março	79,40%
Abril	79,03%
Maio	81,67%
Junho	86,08%
Julho	83,80%
Agosto	83,95%
Setembro	64,51%
Outubro	73,83%
Novembro	74,42%
Dezembro	84,13%
Anual	78,16%

FONTE: A autora (2018).

- Fator de Capacidade

A Tabela 8 apresenta as porcentagens do fator de capacidade mensal e anual para o SFVCR Residencial 2, no ano de 2017.

TABELA 8 - FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 2 (%)

FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 2 (%)

Mês	Fator de Capacidade (%)
Janeiro	16,87%
Fevereiro	18,70%
Março	13,33%
Abril	11,85%
Maio	10,21%
Junho	12,23%
Julho	14,56%
Agosto	12,80%
Setembro	14,00%
Outubro	12,52%
Novembro	15,62%
Dezembro	16,37%
Anual	14,01%

FONTE: A autora (2018)

3.4 COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE OS SISTEMAS ESTUDADOS.

Nesta seção será apresentado o estudo comparativo de desempenho entre os dois sistemas SFVCR analisados, e assim, destacar qual o sistema com melhor resultado na análise de desempenho.

3.4.1 Irradiação no Plano Inclinado

A irradiação média diária no plano inclinado para ambos os sistemas durante os meses de Janeiro/2017 a Dezembro/2017 é apresentado na Tabela 9.

TABELA 9 - IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO INCLINADO (KWH/M².DIA)

IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO INCLINADO (kWh/m².dia)

Mês	Residencial 1	Residencial 2
Janeiro	4,39	5,10
Fevereiro	4,53	5,68
Março	5,00	4,03
Abril	4,66	3,60
Maio	4,78	3,00
Junho	4,81	3,41
Julho	5,23	4,17
Agosto	5,60	3,66
Setembro	5,79	5,21
Outubro	5,53	4,07
Novembro	4,59	5,04
Dezembro	4,48	4,67
Anual	4,39	4,30

FONTE: A autora (2018).

3.4.2 Produtividade

A Tabela 10 demonstra os valores de produtividade dos sistemas Residencial 1 e Residencial 2 durante o período analisado.

TABELA 10 - PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (KWH/KWP)

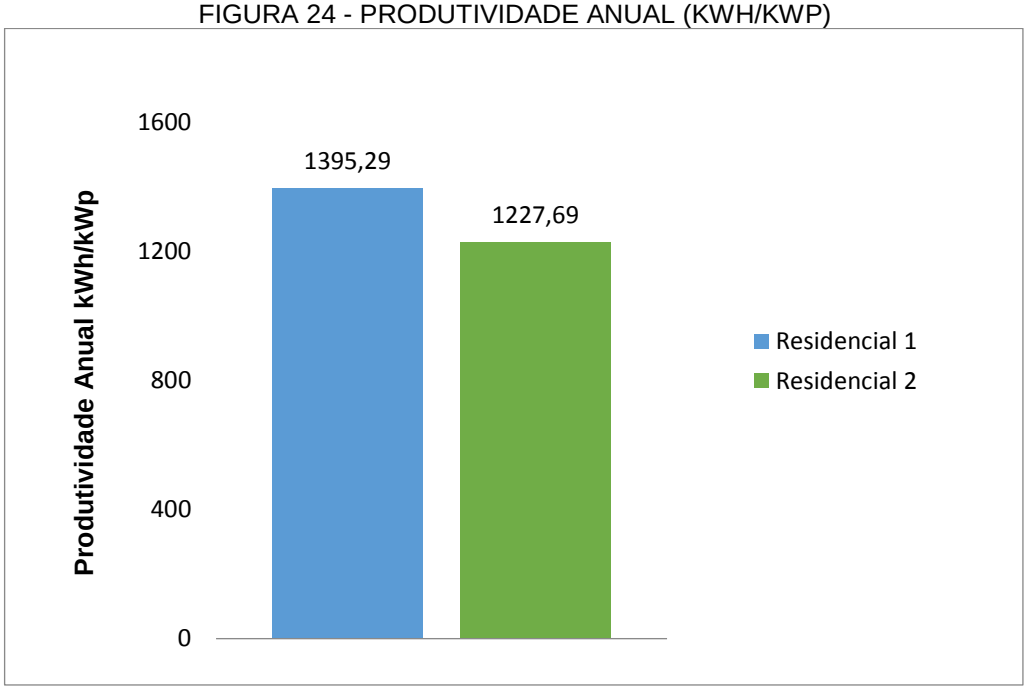
PRODUTIVIDADE RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (kWh/kWp)

Mês	Residencial 1	Residencial 2
Janeiro	113,33	121,50
Fevereiro	106,97	125,70
Março	120,50	99,20
Abril	109,91	85,36
Maio	107,05	75,96
Junho	98,65	88,06
Julho	117,42	108,33
Agosto	109,52	95,26
Setembro	143,27	100,83
Outubro	130,19	93,16
Novembro	115,29	112,53
Dezembro	123,19	121,80
Anual	1.395,29	1.227,69

FONTE: A autora (2018).

A Figura 24 apresenta comparativo de produtividade anual entre os dois sistemas, no qual identificou que o sistema residencial 1 teve uma produtividade de 13,65% superior ao sistema residencial 2. Vê-se que o sistema residencial 1 produziu 167,60 kWh/kWp a mais que o residencial 2.

FIGURA 24 - PRODUTIVIDADE ANUAL (KWH/KWP)



FONTE: A autora (2018).

3.4.3 Desempenho

A taxa de desempenho dos sistemas analisados está descrita na Tabela 11.

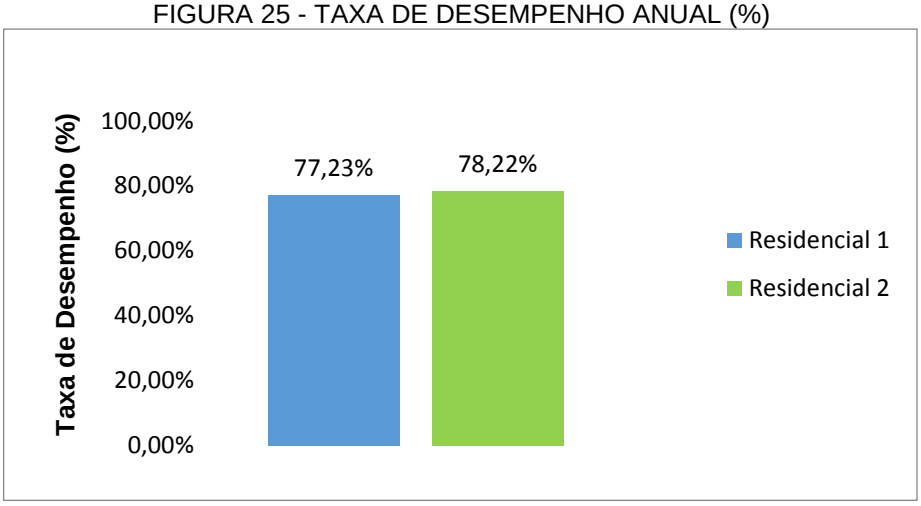
TABELA 11 - TAXA DE DESEMPENHO RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (%)

TAXA DE DESEMPENHO (%)		
Mês	Residencial 1	Residencial 2
Janeiro	83,28%	76,85%
Fevereiro	84,33%	79,03%
Março	77,74%	79,40%
Abril	78,62%	79,03%
Maio	72,24%	81,67%
Junho	68,36%	86,08%
Julho	72,42%	83,80%
Agosto	63,09%	83,95%
Setembro	82,48%	64,51%
Outubro	75,94%	73,83%
Novembro	83,73%	74,42%
Dezembro	88,70%	84,13%
Anual	77,23%	78,16%

FONTE: A autora (2018).

Logo, a Figura 25 apresenta o valor médio da taxa de desempenho para ambos os sistemas. O sistema Residencial 1 apresentou taxa de desempenho em relação ao sistema Residencial 2 de -1,18%, para tal diferença a justificativa é a alta temperatura local para a cidade onde o sistema Residencial 1 se encontra instalado.

FIGURA 25 - TAXA DE DESEMPENHO ANUAL (%)



FONTE: A autora (2018).

3.4.4 Fator de Capacidade

A Tabela 12 demonstra os valores de desempenho mensal para ambos os sistemas estudados.

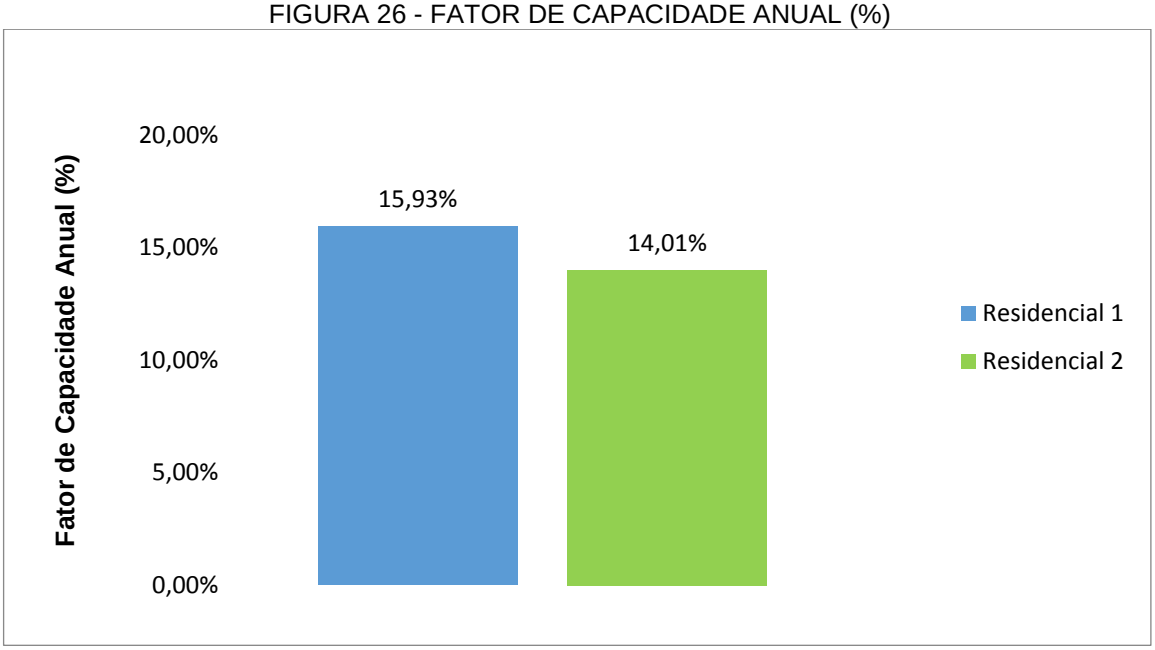
TABELA 12 - FATOR DE CAPACIDADE RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2 (%)

FATOR DE CAPACIDADE (%)		
Mês	Residencial 1	Residencial 2
Janeiro	15,30%	16,87%
Fevereiro	15,91%	18,70%
Março	16,19%	13,33%
Abril	15,26%	11,85%
Maio	14,38%	10,21%
Junho	13,70%	12,23%
Julho	15,78%	14,56%
Agosto	14,72%	12,80%
Setembro	19,89%	14,00%
Outubro	17,49%	12,52%
Novembro	16,01%	15,62%
Dezembro	16,55%	16,37%
Anual	15,93%	14,01%

FONTE: A autora (2018).

A Figura 26 apresenta os fatores de capacidade médios dos sistemas analisados. O sistema Residencial 1 apresenta fator de capacidade de aproximadamente 13,70% superior ao do residencial 2.

FIGURA 26 - FATOR DE CAPACIDADE ANUAL (%)



FONTE: A autora (2018).

3.4.5 Resumo Comparativo Residencial 1 e Residencial 2.

A figura 27 demonstra o resumo comparativo dos índices de mérito realizado entre os sistemas Residencial 1 e o Residencial 2.

FIGURA 27- COMPARATIVO ÍNDICES DE MÉRITO RESIDENCIAL 1 E RESIDENCIAL 2

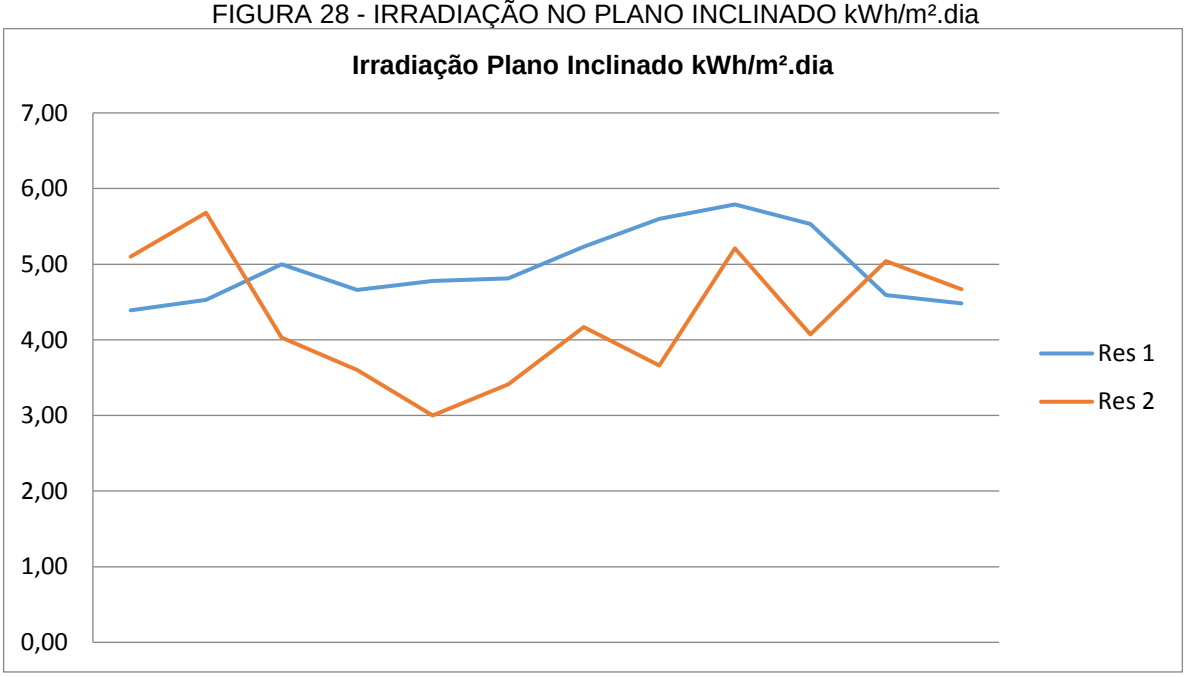
SFVCR	Irradiação no Plano Inclinado		Yield (kWh/kWp)		PR %		FC %	
Mês	Res. 1	Res. 2	Res. 1	Res. 2	Res. 1	Res. 2	Res. 1	Res. 2
Janeiro	4,39	5,10	113,33	121,50	83,28%	76,85%	15,30%	16,87%
Fevereiro	4,53	5,68	106,97	125,70	84,33%	79,03%	15,91%	18,70%
Março	5,00	4,03	120,50	99,20	77,74%	79,40%	16,19%	13,33%
Abril	4,66	3,60	109,91	85,36	78,62%	79,03%	15,26%	11,85%
Maio	4,78	3,00	107,05	75,96	72,24%	81,67%	14,38%	10,21%
Junho	4,81	3,41	98,65	88,06	68,36%	86,08%	13,70%	12,23%
Julho	5,23	4,17	117,42	108,33	72,42%	83,80%	15,78%	14,56%
Agosto	5,60	3,66	109,52	95,26	63,09%	83,95%	14,72%	12,80%
Setembro	5,79	5,21	143,27	100,83	82,48%	64,51%	19,89%	14,00%
Outubro	5,53	4,07	130,19	93,16	75,94%	73,83%	17,49%	12,52%
Novembro	4,59	5,04	115,29	112,53	83,73%	74,42%	16,01%	15,62%
Dezembro	4,48	4,67	123,19	121,80	88,70%	84,13%	16,55%	16,37%

FONTE: A autora (2018).

Logo, identificou-se que os meses de maio, junho, julho e agosto, em destaque na figura apresentam menor desempenho do sistema para o Residencial 1, observa-se que a *Performance Ratio* para esses meses é menor em relação ao Residencial 2, embora o índice de irradiação seja maior no plano do sistema Residencial 1.

A Figura 28 apresenta a irradiação no plano inclinado para os dois sistemas, durante o período de análise. Nota-se que a irradiação no plano inclinado do Residencial 1 tem uma variação mais acentuada ao longo dos doze meses analisados e, que a irradiação no plano inclinado do Residencial 2 tem uma variação mais instável ao longo do período e chega a ter um índice de irradiação superior ao índice do Residencial 1 nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro.

FIGURA 28 - IRRADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO kWh/m².dia



FONTE: A autora (2018).

O resumo comparativo anual entre os dois sistemas é visto na Figura 29, no qual apresenta os valores de irradiação no plano inclinado, a produtividade, desempenho e fator de capacidade de ambos os sistemas.

FIGURA 29 - COMPARATIVO ANUAL

SFVCR	Irradiação Plano Inclinado	Yield (kWh/kWp)	PR %	FC %
Res. 1	4,95	1.395,29	77,23%	15,93%
Res. 2	4,30	1.227,69	78,16%	14,01%
Diferença	15,11%	13,65%	-1,18%	13,70%

FONTE: A autora (2018).

A diferença dos índices de méritos e da irradiação solar entre os dois sistemas também é demostrada na Figura 29, no qual nota-se um índice de irradiação solar no plano inclinado para o Residencial 1 15,11% superior ao residencial 2 e, a produtividade do Residencial 1 foi maior que a do Residencial 2 13,65 % e, o desempenho do Residencial é de -1,18% menor em relação ao desempenho do residencial 2, já o fator de capacidade do Residencial 1 foi de 13,70% maior em relação ao Residencial 2, para o período de janeiro a dezembro de 2017.

3.5 COMPARATIVO DADOS DO INMET E ATLAS DE ENERGIA SOLAR

Com a finalidade de verificar possíveis diferenças entre valores de irradiação solar disponibilizado pelas estações A009 e A807 do INMET e o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), é realizado o comparativo entre dados de irradiação no plano horizontal.

Através do site do INMET, dados mensais de Irradiação solar foram coletados das estações A009 e A807 por um período de doze meses do ano de 2017, para tal comparação foram selecionadas as coordenas do Atlas que mais se aproximam das estações A009 e A807. Para localizar as coordenadas utilizou-se o programa Google Earth Pro, no qual foram encontrados os locais e respectivas coordenadas de latitude e longitude.

Para estação do INMET A009 encontra-se localizada nas seguintes coordenadas -10,190744º e longitude -48,301811º, logo as coordenadas fornecidas pelo Atlas mais próximas as do INMET são: -10, 200500° -48,34900°, com distância entre ambas de 5,21 km, conforme é apresentado na Figura 30.

FIGURA 30 - COORDENADAS INMET E ATLAS

FONTE: Adaptado Google Earth Pro (2018).

Desta forma é possível obter, com auxílio das tabelas do Atlas os valores de irradiação solar no plano horizontal, conforme demonstra a Figura 31.

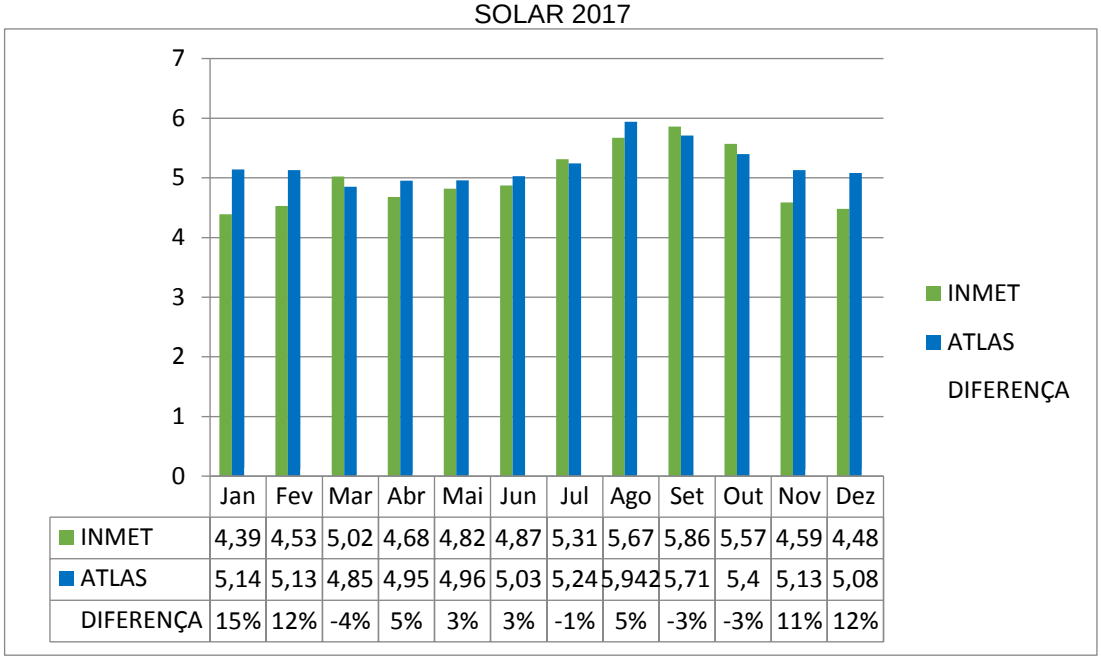
FIGURA 31 - VALORES DE IRRADIAÇÃO FORNECIDA PELO ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

LON	LAT	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
-48,3490000000	-10,2005000000	5218	5143	5133	4857	4954	4967	5035	5244	5942	5715	5401	5137	5089

FONTE: A autora (2018)

De posse dos valores coletados tanto do INMET como do Atlas Brasileiro de Energia Solar, foi realizado o comparativo entre os dados adquiridos, conforme apresentado na Figura 32. Nota-se que os valores disponibilizados pelo Atlas, no período analisado (janeiro a dezembro de 2017) são em média 5% superiores aos valores obtidos pela estação do INMET neste ano. Por outro lado, identificou-se que em alguns meses como março, julho, setembro e outubro os valores de irradiação disponibilizado pelo INMET foram maiores que os coletados pelo Atlas. Isto indica que no ano analisado, com exceção dos meses citados, houve maior nebulosidade que a média histórica (17 anos de dados), porém se fossem analisados vários anos, haveria a tendência de convergência desses valores.

FIGURA 32 - COMPARATIVO DE IRRADIAÇÃO INMET E ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 2017



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INMET	4,39	4,53	5,02	4,68	4,82	4,87	5,31	5,67	5,86	5,57	4,59	4,48
ATLAS	5,14	5,13	4,85	4,95	4,96	5,03	5,24	5,942	5,71	5,4	5,13	5,08
DIFERENÇA	15%	12%	-4%	5%	3%	3%	-1%	5%	-3%	-3%	11%	12%

FONTE: A autora (2018).

Para a estação A807 do INMET, sendo localizada nas coordenadas de latitude de -25,448688º e longitude de -49,230602º e, as coordenadas identificadas pelo Atlas com maior proximidade das coordenadas do INMET são as de latitude de -25,400500° e longitude de -49,249000°, no qual a distância entre ambas é de 5,60 km, conforme identificado na Figura 33.

FIGURA 33 - COORDENADAS INMET E ATLAS

FONTE: Adaptado Google Earth Pro (2018).

Assim, obteve-se os valores de irradiação disponibilizados pelo Atlas, conforme visto na Figura 34.

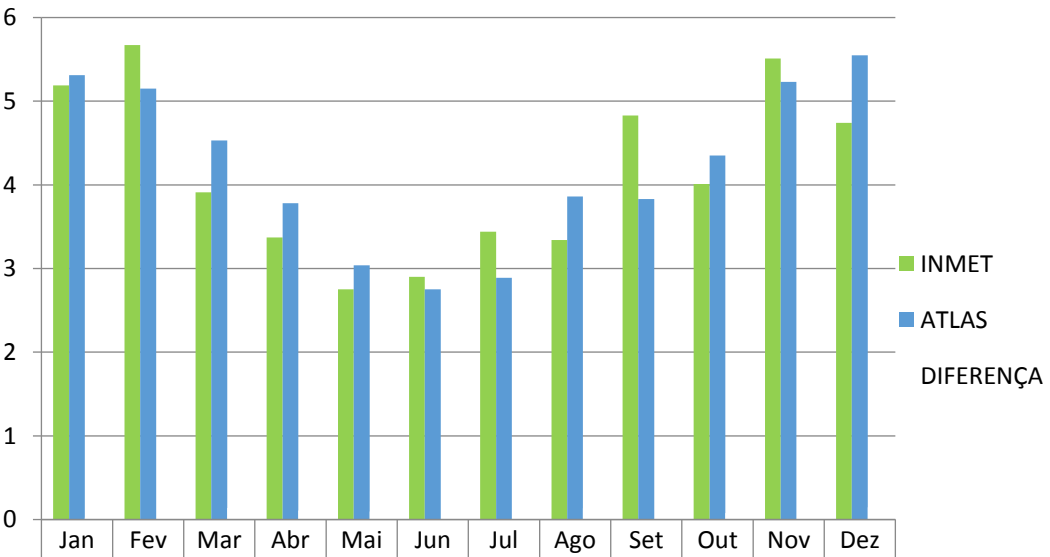
FIGURA 34 - VALORES DE IRRADIAÇÃO FORNECIDA PELO ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

LON	LAT	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
-49,2490000000	-25,4005000000	4194	5318	5158	4538	3782	3047	2758	2892	3864	3830	4359	5230	5557

FONTE: A autora (2018).

De forma análoga à estação A009, foi realizado o comparativo entre os dados adquiridos, conforme apresentado na Figura 35. Nota-se que os valores disponibilizados pelo Atlas, no período analisado (janeiro a dezembro de 2017) são praticamente idênticos, com apenas uma diferença em média de 0,51% superior aos valores disponibilizados pelo INMET no mesmo período. Identificou-se que diferença entre os valores de irradiação mensal ocorre maior variação entre dados do INMET e Atlas.

FIGURA 35 - COMPARATIVO DE IRRADIAÇÃO INMET E ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 2017



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INMET	5,19	5,67	3,91	3,37	2,75	2,9	3,44	3,34	4,83	4,01	5,51	4,74
ATLAS	5,31	5,15	4,53	3,78	3,04	2,75	2,89	3,86	3,83	4,35	5,23	5,55
DIFERENÇA	2,26%	-10,1	13,69	10,85	9,54%	-5,45	-19,0	13,47	-26,1	7,82%	-5,35	14,59

FONTE: A autora (2018).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto que há uma necessidade de diversificação na matriz elétrica brasileira, as fontes alternativas de energia vêm se destacando, como a Solar. Logo tem se aproveitado telhados para aplicabilidade de geração de energia solar fotovoltaica em âmbito urbano, tornando possível o consumidor gerar sua própria eletricidade.

No presente trabalho, foi apresentado a análise de produtividade entre dois SFVCR sendo um instalado em Palmas – TO e outro em Curitiba – PR, levando em conta os aspectos que influenciam na geração de energia de cada sistema. Assim os dados de produtividade, taxa de desempenho e fator de capacidade de ambos os sistemas foram comparados entre si. Em posse desses dados evidenciou-se que a irradiação solar no plano inclinado para o sistema residencial 1 é 15,11% maior que a irradiação incidente no painel do sistema residencial 2. Quanto a produtividade, o sistema residencial 1 ficou 13,65% superior ao sistema residencial 2. Por outro lado, a taxa de desempenho do sistema residencial 1 foi de -1,18% em relação ao sistema residencial 2, já o fator de capacidade do sistema residencial 1, foi de 13,70% superior ao sistema residencial 2. É válido destacar que as células fotovoltaicas de ambos os sistemas são de material de silício policristalino, os inversores são ambos monofásicos sem transformador, que possuem eficiências na ordem de 97 a 98%, além de que as condições de instalação dos dois sistemas serem próximas às condições ideais.

Assim, os fatores pelos quais o sistema residencial 1 apresenta a taxa de desempenho menor que o residencial 2 se dá pela alta temperatura na cidade no qual o sistema encontra-se instalado, o nível de poeira sendo maior e quantidade de chuva menor, fazendo com que acumule mais sujeira no painel fotovoltaico, porém o fator com maior evidência é a temperatura, observando que a temperatura média anual da cidade de Palmas é de 30,8° C, enquanto a temperatura média anual para cidade de Curitiba é de 24,6°C. Os meses do ano com maior temperatura média em Palmas são os meses de maio a outubro, com temperaturas médias de 35,6°C a 39,6°C, já para a cidade de Curitiba os meses com maior temperatura média são os meses de novembro a fevereiro, alcançando uma média mensal entre 24,4°C e 29,1°C, ressaltando que a média das temperaturas é para o ano de 2017, sendo o período da realização da análise entre os sistemas.

Portanto, evidenciou-se por meio deste estudo que os meses com maior temperatura para o sistema residencial 1, foram os meses com pior taxa de desempenho do sistema, pois a alta temperatura causa aquecimentos dos módulos, contribuindo com perdas na geração de energia.

Além disso, o trabalho também demonstrou que ao analisar um anos de dados de irradiação, existirão diferenças entre os dados coletados das estações do INMET com os dados históricos de irradiação solar do Atlas Brasileiro de Energia Solar, no qual percebeu-se, para o ano analisado, a diferença para a cidade de Palmas de média de 5% entre os dados, sendo superior para o Atlas, já para a cidade de Curitiba a diferença foi mínima, com média de 0,51% superior para o Atlas.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - **Potencial de Investimentos da Energia Fotovoltaica em Galpões e Armazéns.** 2017. Disponível em:<**http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar**>. Acesso em 05 jan. 2018.

ABB STRING INVERTERS. **Solar Inverters.** Disponível em < **https://library.e.abb.com/public/10bc5e66068c4f768a1d77fd853a7e4e/PVI-3.0-3.6-4.2_BCD.00374_EN_RevG.pdf**> Acesso em 15 de Jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída, Micro e Minigeração Distribuídas**. Brasília, 2015. Disponível em < **http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida**> Acesso em 18 de Mar. 2018.

ANEEL. **Resolução normativa de nº 482/2012**. Disponível em <**http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida. >** Acesso em: 09 de janeiro 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 10899**: Energia Solar Fotovoltaica, Terminologia. Norma Brasileira, 2006.

BENEDITO, Ricardo Silva. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, No Brasil, Sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal de São Paulo, 2009.

BRITO, H. B. **O futuro da energia sustentável e renovável está na maior estrela do planeta.** Revista CREA Tocantins Ano 02 Ed. 002/2017. 2º sem 2017, pp 10-13. 2017.

CRESESB. Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Radiação Solar**. 2008. Disponível em < **http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301**>. Acesso em 15 de março 2018.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Ministério de Minas e Energia- Brasília - DF. 2017. Disponível em: <**http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf**>. Acesso em 05 jan. 2018.

GOOGLE EARTH PRO. Disponível em <**https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html**> Acesso em 25 de Mai. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações Automáticas**. Disponível em < **www.inmet.gov.br**> Acesso em 15 de Mai. 2018.

MIRANDA, Arthur Biagio Canedo Montesano. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica. Curso de Engenharia Elétrica, 2014.

NASCIMENTO, L. R. **Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa, 2017. Estudo Técnico. Disponível em: <**http://bd.camara.leg.br/bd/handle/bdcamara/32259**>. Acesso em 02 jan. 2018.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos. 2ª edição, 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINHO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**. O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis. Editora: UFSC - LABSOLAR, 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Programa Radiasol**. Laboratório de Energia Solar. Disponível em < **http://www.solar.ufrgs.br/**> Acesso em 19 de Mai. 2018.

URBANETZ JR, J., CASAGRANDE JR, E. F., TIEPOLO, G. M. **Análise de Desempenho de Dois Anos de Operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR**. V Congresso Nacional de Energia Solar – CEBENS- Recife, 2014.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Introdução a Energia Solar Fotovoltaica**. Apostila do Curso de Energias Renováveis. UTFPR, 2014.

VIANA, Trajano de Souza. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ZILLES, Roberto; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros; OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira de. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** São Paulo: Oficina de textos, 2012.

ZOMER, Clarissa Debiazi. **Método de Estimativa da Influência do Sombreamento Parcial na Geração Energética de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados em Edificações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.