

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

IGOR OMORI MORITA

**DESEMPENHO DE PAINÉIS SOLARES DE MÚLTIPLAS
TECNOLOGIAS FRENTE À RADIAÇÃO SOLAR DA REGIÃO DE
CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

IGOR OMORI MORITA

**DESEMPENHO DE PAINÉIS SOLARES DE MÚLTIPLAS
TECNOLOGIAS FRENTE À RADIAÇÃO SOLAR DA REGIÃO DE
CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Celso Fabrício de Melo Júnior

CURITIBA

2018

Igor Omori Morita

Desempenho de Painéis Solares de Múltiplas Tecnologias Frente à Radiação Solar da Região de Curitiba

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 23 de novembro de 2018.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Dra.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Celso Fabrício de Melo Júnior, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Celso Fabrício de Melo Júnior, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

César Eduardo Figueroa Castaneda, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciane Brandalise, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Mauro e Roselly, por terem me proporcionado todos esses anos de aprendizado em uma ótima universidade, sem eles isso não seria possível.

Ao meu Orientador, Professor Mestre Celso Fabrício de Melo Júnior, pela atenção e comprometimento para a realização deste trabalho do começo ao fim.

Ao Instituto de Tecnologia do Paraná - TECPAR por ter fornecido todos os dados necessários para que este trabalho fosse realizado.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que de alguma forma, compartilharam seus conhecimentos comigo.

Por fim, aos meus amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado incentivando para que esta jornada fosse concluída.

RESUMO

MORITA, Igor O. **Desempenho de Painéis Solares de Múltiplas Tecnologias Frente à Radiação Solar da Região de Curitiba.** 2018. 32 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2018.

O contínuo avanço tecnológico vem acompanhado do considerável aumento da demanda de energia elétrica, tornando-a de extrema importância para a humanidade. Atualmente, as fontes de energia predominantes no mundo são finitas e não são ambientalmente sustentáveis. Desta forma, a energia solar fotovoltaica por ser limpa e infinita é muito promissora. O objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho de três conjuntos de painéis solares fotovoltaicos diferentes com relação às radiações solares. Os dados da energia gerada pelos painéis e das radiações incidentes sobre os mesmos foram fornecidos pelo Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), localizado em Curitiba. Nesse estudo foram realizadas comparações da energia elétrica gerada por cada conjunto de painéis, silício amorfo, silício policristalino e silício monocristalino em relação à radiação direta e difusa. Portanto, concluiu-se que o conjunto que gerou mais energia foi o de silício policristalino, seguido do silício monocristalino e silício amorfo, respectivamente.

Palavras-chave: Energia Sustentável, Energia Solar Fotovoltaica, Sistema Fotovoltaico, Painel Solar Fotovoltaico.

ABSTRACT

MORITA, Igor O. **Performance of Multiple Technologies Solar Panels Faced with the Solar Radiation of the Curitiba Region.** 2018. 32 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2018.

O contínuo avanço tecnológico vem acompanhado do considerável aumento da demanda de energia elétrica, tornando-a de extrema importância para a humanidade. Atualmente, as fontes de energia predominantes no mundo são finitas e não são ambientalmente sustentáveis. Desta forma, a energia solar fotovoltaica por ser limpa e infinita é muito promissora. O objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho de três conjuntos de painéis solares fotovoltaicos diferentes com relação às radiações solares. Os dados da energia gerada pelos painéis e das radiações incidentes sobre os mesmos foram fornecidos pelo Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), localizado em Curitiba. Nesse estudo foram realizadas comparações da energia elétrica gerada por cada conjunto de painéis, silício amorfo, silício policristalino e silício monocristalino em relação à radiação direta e difusa. Portanto, concluiu-se que o conjunto que gerou mais energia foi o de silício policristalino, seguido do silício monocristalino e silício amorfo, respectivamente.

Keywords: Sustainable Energy, Photovoltaic Solar Energy, Photovoltaic System, Photovoltaic Solar Panel.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MATERIAL SEMICONDUTOR	14
FIGURA 2 - PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	16
FIGURA 3 - PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO	17
FIGURA 4 - PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO AMORFO.....	18
FIGURA 5 - ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	19
FIGURA 6 - SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	21
FIGURA 7 - PIRÂNOMETRO DIFUSO COM ESFERA DE SOMBREAMENTO E RASTREADOR SOLAR.....	23
FIGURA 8 - PIRÂNOMETRO DIFUSO COM ANEL DE SOMBREAMENTO	23
FIGURA 9 - PIRELIÔMETRO NA TECPAR	24
FIGURA 10 - PIRÂNOMETRO COM ESFERA DE SOMBREAMENTO E RASTREADOR SOLAR NA TECPAR.....	25
FIGURA 11 - GRÁFICO DA IRRADIÂNCIA DIRETA E DIFUSA COM PREDOMINÂNCIA DE DIRETA.....	29
FIGURA 12 - GRÁFICO DA IRRADIÂNCIA DIRETA E DIFUSA COM PREDOMINÂNCIA DE DIFUSA.....	29
FIGURA 13 - GRÁFICO DE IRRADIÂNCIA DIRETA E DIFUSA COM VARIAÇÕES	30
FIGURA 14 - GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM IRRADIÂNCIA DIRETA MAIOR QUE DIFUSA.....	33
FIGURA 15 - GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM IRRADIÂNCIA DIRETA MENOR QUE DIFUSA.....	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO PAINEL SOLAR REFERENTE AO MÊS DE SETEMBRO DE 2017	27
TABELA 2 - DADOS DE IRRADIÂNCIA DIRETA E DIFUSA.....	28
TABELA 3 - GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E IRRADIÂNCIA SOLAR.....	31
TABELA 4 - GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E IRRADIÂNCIA DIRETA MENOS DIFUSA	32

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
d.d.p.	Diferença de Potencial
eV	Elétron-volt
GPS	<i>Global Positioning System</i>
h	Horas
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
nm	Nanômetros
TECPAR	Instituto de Tecnologia do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WMO	<i>World Metereological Organization</i>
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh/m ²	Watt hora por metro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA.....	10
1.1.1	Delimitação do Tema.....	11
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral.....	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.4	JUSTIFICATIVA	12
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	14
2.1	PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO.....	14
2.1.1	Tipos de Módulos Fotovoltaicos	15
2.1.2	Estruturas de Fixação.....	18
2.2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	19
2.2.1	Sistema Isolado (Off-Grid)	20
2.2.2	Sistema Conectado à Rede (On-Grid)	20
2.3	RADIAÇÃO SOLAR.....	21
2.3.1	Instrumentos de Medição	22
3	METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	25
3.1	ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS	25
3.2	TRATAMENTO DOS DADOS.....	26
3.3	COMPARAÇÕES E RESULTADOS.....	30
4	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Com o contínuo avanço tecnológico, é inevitável o aumento do consumo de energia elétrica. Desta forma, a geração de energia elétrica é um dos setores mais importantes a ser estudado pela humanidade (SILVESTRI; TAKASAKI, 2014).

O Brasil, por sua vez, é muito dependente da geração de energia hidráulica e térmica. A hidráulica, apesar de pouco poluente, causa considerável impacto ambiental, e a térmica contribui para a geração do efeito estufa. Além desses fatos prejudiciais, elas são fontes finitas de energia tornando-se necessário o estudo de outras fontes de energia (SILVESTRI; TAKASAKI, 2014).

A energia solar fotovoltaica pode ser a melhor alternativa para geração de energia no país, a transformação direta da energia solar em elétrica através do efeito fotovoltaico é considerada uma fonte limpa de energia sem impactos ao meio ambiente durante seu período de operação. Além disso, o Brasil é potencialmente favorável para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos, sendo viável em praticamente todo seu território (OGATA, 2015).

Em termos ambientais, este tipo de energia é inesgotável e não contribui com o aquecimento global, tornando-a uma excelente opção na geração de energia de maneira sustentável. Entretanto, em termos econômicos, verificam-se um dos seus principais problemas devido ao seu custo muito elevado. Porém, o avanço da tecnologia vem trazendo inovações no ramo, tornando mais acessível a aquisição desses produtos (SUZUKI; REZENDE, 2013).

Além disso, um dos assuntos mais questionados e alarmantes no mundo é a proteção ao meio ambiente. Por isso, o desenvolvimento desta tecnologia é uma das vertentes mais importantes a serem estudadas para o futuro. Esse trabalho tem como objetivo apresentar o desempenho de painéis solares fotovoltaicos de diferentes composições frente à incidência da radiação solar direta e difusa.

1.1 TEMA

Analisar o desempenho de painéis fotovoltaicos de três diferentes composições químicas, silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo,

para a incidência de radiação solar direta e difusa no intuito de determinar a melhor tecnologia de painel fotovoltaico para determinado tipo de radiação.

1.1.1 Delimitação do Tema

No século XIX, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel observou o efeito fotovoltaico. Ele verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas em um eletrólito, produziam uma diferença de potencial quando expostas à luz solar, mas somente no século XX, a primeira célula solar fotovoltaica foi formalmente apresentada numa reunião da *National Academy of Sciences*, em Washington. Desde então, o sistema fotovoltaico vem sendo estudado, porém devido ao seu alto custo, torna-o menos acessível em relação aos demais sistemas de geração de energia (Portal Solar, 2018).

O estudo será desenvolvido através de dados fornecidos pela empresa TECPAR – Instituto de Tecnologia do Paraná, onde estão localizados os painéis fotovoltaicos em estudo, com sistemas de armazenamento de dados da radiação solar e geração de energia elétrica dos painéis. Com os dados coletados, será feito o levantamento do desempenho dos mesmos.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Empresas de grande porte consomem consideráveis quantidades de energia e a falta da mesma pode acarretar inúmeros prejuízos, uma vez que, instituições deste porte não podem parar. Visto isso, a energia fotovoltaica pode reduzir o custo das faturas de energia elétrica, como também auxiliar em situações de falta pelo fato de não depender diretamente da rede de distribuição.

Contudo, a emissão de radiação solar é incontrolável, podendo acarretar altos e baixos na geração de energia, necessitando assim de baterias ou da própria rede da concessionária para armazenar a energia quando em excesso para usar quando estiver em baixa, como em dias nublados, chuvosos e no período noturno.

Com este estudo, se espera aprimorar a geração de energia através da radiação solar, como também ajudar a realizar investimentos mais eficazes, a partir da escolha correta de um tipo de painel solar fotovoltaico para as radiações solares presentes na região desejada.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de três tipos de painéis solares fotovoltaicos de diferentes composições químicas em relação à radiação direta e difusa incidentes nas suas superfícies.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Entender o processo de geração fotovoltaica;
- Estudar e elaborar uma revisão teórica sobre os diferentes tipos de painéis fotovoltaicos e radiações solares;
- Analisar os dados fornecidos pelo TECPAR, de radiação solar e geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos.
- Através dos dados obtidos, verificar o desempenho do conjunto de painéis para os tipos de radiação em estudo.

1.4 JUSTIFICATIVA

A matriz energética brasileira é muito homogênea, precisando de diferentes sistemas energéticos para evitar possíveis falta de energia no futuro devido ao decaimento das principais fontes de energia atualmente, que são finitas. Seja pela falta de chuva nas hidrelétricas ou pela falta de ingredientes nas térmicas (SILVESTRI; TAKASAKI, 2014).

O sistema fotovoltaico é uma solução para o problema que os demais sistemas energéticos apresentam em relação a mudanças climáticas e proteção ambiental, contribuindo para redução da emissão de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO₂), que são nocivos à saúde humana e contribuem para o efeito estufa (eCycle, 2017).

Outros fatores favoráveis ao seu grande desenvolvimento são a sua fácil instalação, que não causa grandes impactos nos ambientes onde são instaladas, e também a sua fácil manutenção, sendo que uma simples limpeza do painel com pano e água não muito frequente é suficiente (Portal Solar, 2018).

Devido às diversas vantagens apresentadas para o sistema fotovoltaico, o número de pesquisas relacionadas a este equipamento tem aumentado drasticamente, tornando-o mais eficiente, viável e competitivo em modo geral.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, foi realizado um estudo acerca dos aspectos e fundamentos dos painéis solares fotovoltaicos e das radiações solares.

Após o estudo destes, foi efetuada a coleta de dados da geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos em estudo e das radiações incidentes sobre os mesmos.

Com essas informações reunidas foi realizada uma análise e, então, foi possível obter o desempenho dos painéis fotovoltaicos para cada tipo de radiação solar.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é composto por quatro capítulos, conforme descritos abaixo.

O primeiro capítulo foi referente à introdução onde contém a proposta, o tema abordado, os problemas e premissas, os objetivos, as justificativas e os procedimentos metodológicos.

O segundo capítulo foi a respeito da fundamentação teórica sobre o sistema fotovoltaico, envolvendo os diversos tipos de painéis solares e as radiações incidentes.

O terceiro capítulo foi destinado à análise e tratamento dos dados obtidos e ao desenvolvimento do objetivo do trabalho.

No quarto capítulo foram feitas as considerações finais baseadas no estudo realizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1 Painel Solar Fotovoltaico

Um painel solar fotovoltaico é composto por vários módulos fotovoltaicos que são formados por um conjunto de células fotovoltaicas produzidas por materiais semicondutores, estes possuem uma banda de valência, uma banda de condução e uma banda proibida (gap) que pode atingir até 3 eV, como mostra na Figura 1. No caso do silício, que é o material mais utilizado em suas fabricações por ser um elemento apropriado e em abundância na crosta terrestre, a tensão de gap é de aproximadamente 1,12 eV (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 1 - Material Semicondutor



Fonte: Adaptada de PINHO; GALDINO (2014)

As células fotovoltaicas quando expostas à radiação solar geram uma corrente contínua, esta geração ocorre devido ao fato de os fótons, que são partículas de energia presentes na luz solar, atingirem uma energia superior à tensão de gap. Isto faz com que a energia excedente se dissipe na forma de calor rompendo as ligações dos elétrons estáveis na banda de valência, criando lacunas na mesma e conduzindo-as à banda de condução, o movimento em direções opostas destes gera a corrente elétrica (ARAMIZU, 2010; OGATA, 2015).

A condução desta corrente para fora do painel ocorre através de um campo elétrico formado por uma diferença de potencial criada na área de junção PN dos semicondutores. Esta d.d.p. é criada pela inserção controlada de impurezas no semicondutor, mais conhecida como dopagem, podendo ela ser do tipo-p ou tipo-n.

A dopagem do tipo-p consiste na inserção de uma impureza com falta de elétrons, e a do tipo-n com excesso de elétrons. Estas provocam diferenças na concentração de lacunas e elétrons entre os elementos, gerando um campo elétrico (ARAMIZU, 2010; OGATA, 2015).

2.1.1 Tipos de Módulos Fotovoltaicos

Existem vários tipos de painéis fotovoltaicos sendo estudados, e aqueles com melhores custo-benefício são baseados em alguma variação de silício. Alguns deles são os de silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo. A principal diferença entre eles é a pureza do silício, que quanto mais puro o elemento mais eficiente (SUZUKI; REZENDE, 2013; SILVESTRI; TAKASAKI, 2014; Portal Solar, 2018).

A eficiência destes painéis é referente à quantidade de energia solar recebida pelo painel transformada em energia elétrica, medida em kWh. Esta produtividade depende de vários fatores, em relação à orientação e inclinação, por exemplo, os países situados no hemisfério sul devem posicionar seus painéis orientados para o norte verdadeiro, assim eles recebem diretamente os raios solares durante o ano inteiro, e vice-versa para os países que se situam no hemisfério norte. Na sequência, a inclinação deve estar de acordo com a latitude do local onde será instalada, em Curitiba essa é de aproximadamente 25°. Dessa maneira, se obtém uma incidência de radiação solar mais perpendicular à superfície plana do painel, produzindo mais energia (Portal Solar, 2018).

Ademais, um fator que também interfere no desempenho dos painéis é o nível de radiação, este varia conforme as condições climáticas do dia, em dias nublados e chuvosos a radiação é muito menor do que em dias de sol, o que interfere diretamente na produção de energia elétrica do painel (Portal Solar, 2018).

Silício Monocristalino:

A célula de silício monocristalino possui a eficiência mais alta, entre 15 e 22%, ocupando menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia que as demais células. Porém tem maior custo por requerer uma maior cautela na sua produção pelo fato de conter apenas um único cristal do elemento por célula, seu processo de produção é chamado de Czochralski. Este tipo de módulo tem uma característica mais arredondada e escura, como mostra a Figura 2 (SUZUKI; REZENDE, 2013; SILVESTRI; TAKASAKI, 2014; Portal Solar, 2018).

Figura 2 -Painel Solar Fotovoltaico de Silício Monocristalino



Fonte: eCycle (2017)

Silício Policristalino:

Diferente da anterior, a célula de silício policristalino é formada por vários cristais do elemento e possuem uma eficiência menor, entre 14 e 20%. Suas técnicas de produção são fundição de polisilício e aquecimento em forma. Um exemplo deste painel é visto na Figura 3, com uma forma mais quadrada e clara (SUZUKI; REZENDE, 2013; SILVESTRI; TAKASAKI, 2014; Portal Solar, 2018).

Figura 3 - Painel Solar Fotovoltaico de Silício Policristalino



Fonte: eCycle (2017)

Silício Amorfo:

A de silício amorfo é a que tem menor eficiência, entre 6 e 9% e, conseqüentemente, a mais barata. Ela também é conhecida como de filme fino por ser produzida na forma de diversas camadas finas do elemento depositadas sobre um substrato. Sua aparência é mais lisa, como ilustrada na Figura 4 (SUZUKI; REZENDE, 2013; SILVESTRI; TAKASAKI, 2014; Portal Solar, 2018).

Figura 4 - Painel Solar Fotovoltaico de Silício Amorfo

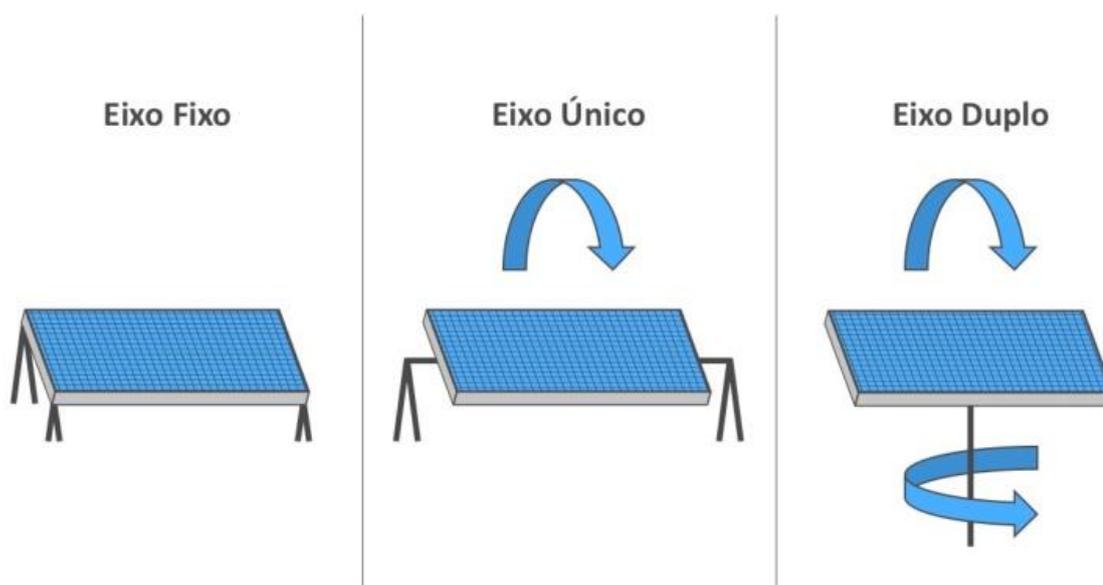


Fonte: eCycle (2017)

2.1.2 Estruturas de Fixação

O painel fotovoltaico pode ser instalado tanto rente ao telhado, quanto rente ao solo. Para a primeira situação, a estrutura de fixação depende do telhado onde será instalado. Já para a segunda, existem 3 tipos de estruturas conforme ilustradas na Figura 5.

Figura 5 -Estruturas de Fixação para Painéis Fotovoltaicos



Fonte: PENICHE; MELLO; PASS (2016)

O de eixo fixo é mais simples e barato, por não acompanhar o movimento do sol e, conseqüentemente, apresentar um rendimento menor. Diferente do anterior, o de eixo único se movimenta em direção ao sol no sentido leste-oeste ou norte-sul com o auxílio de um motor elétrico, obtendo um rendimento maior. Mais sofisticado, o de eixo duplo se movimento nos dois sentidos, apresentando uma melhoria com relação ao de eixo único (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

Dentre os tipos de estruturas de fixação citados, a produtividade proporcionada aos painéis é o aspecto mais significativo, onde um é melhor que outro, porém mais caros. Dessa forma, é importante averiguar o que traz melhor custo-benefício.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

O sistema fotovoltaico envolve desde a transformação da energia solar em elétrica, até o consumidor final. Esse procedimento é composto por módulos fotovoltaicos, inversor de frequência, estruturas de fixação, cabeamentos, conectores e outros materiais elétricos padrões. Basicamente, os painéis fotovoltaicos captam as radiações solares e geram corrente contínua, e o inversor de frequência transforma a corrente contínua em alternada que é transmitida para o

consumidor através de materiais elétricos. Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos, o *off-grid* e o *on-grid* (NorthSun Engenharia, 2018).

2.2.1 Sistema Isolado (*Off-Grid*)

Diferente do sistema conectado à rede, o sistema isolado necessita de uma forma de armazenamento de energia, uma bateria, esta deve ser acoplada a um controlador de carga, de forma a aumentar a vida útil da mesma, evitando uma sobre carga ou sobre descarga do equipamento. Pelo fato de a bateria possuir um alto custo e baixa vida útil, o sistema *off-grid* é mais promissor em lugares remotos e de difícil acesso, pois não necessita de grandes investimentos em linhas de transmissão quando instaladas em pequena escala. Neste tipo de sistema, a bateria é carregada durante o dia para ser usada à noite (Dusol Engenharia Sustentável, 2018; SmartEnergy, 2018; Portal Solar, 2018).

2.2.2 Sistema Conectado à Rede (*On-Grid*)

O sistema *on-grid* passou a ser utilizado no Brasil apenas em 2012 através da resolução 482 publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que visa a instalação de painéis solares fotovoltaicos conectados à rede da concessionária. Dessa forma, ele não necessita de componente para armazenamento da energia excedente produzida. Esta, por sua vez, é injetada na rede e permanece em forma de créditos com validade de 5 anos para ser utilizada quando o consumo de energia for maior do que a geração, como em épocas do ano onde prevalece o baixo nível de radiação. E em casos onde não há créditos disponíveis, apenas será pago a diferença entre a energia consumida e gerada (Dusol Engenharia Sustentável, 2018; SmartEnergy, 2018; Portal Solar, 2018).

No entanto, por mais que a produção de energia seja maior que o consumo, não é possível quitar a conta de luz, existe uma tarifa mínima a ser paga correspondente à alimentação, sendo 30 kWh para monofásica, 50 kWh para bifásica e 100 kWh para trifásica. Porém, mesmo com essas tarifas, há uma drástica economia, reduzindo com cerca de 85% na fatura da conta de luz (Dusol Engenharia Sustentável, 2018; SmartEnergy, 2018; Portal Solar, 2018).

Em 2015, a ANEEL publicou a resolução 687 que sobrepõe a 482 e concede três novas modalidades para este tipo de sistema, autoconsumo remoto, geração

compartilhada e empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, todas beneficiárias aos consumidores de energia fotovoltaica. Estas categorias permitem que unidades em diferentes localidades utilizem uma mesma estação de sistema fotovoltaico para geração e consumo de energia, desde que pertençam à mesma concessionária. Dependendo de cada modalidade, basta que as unidades estejam na mesma titularidade, ou que seja criado um consórcio ou cooperativa entre os integrantes interessados na associação. Uma imagem ilustrativa de como funciona o sistema *on-grid* está representado na Figura 5 (Dusol Engenharia Sustentável, 2018; SmartEnergy, 2018; Portal Solar, 2018).

Figura 6 - Sistema Solar Fotovoltaico



Fonte: Adaptada de Portal Solar (2018)

2.3 Radiação Solar

O sol fornece para a atmosfera terrestre cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, porém nem toda essa energia chega à superfície do planeta Terra. Dessa radiação solar, também conhecida como radiação eletromagnética, responsável pela vida na Terra, mais ou menos metade é emitida na forma de luz visível e a outra metade na forma de infravermelho e radiação ultravioleta (eCycle, 2017).

Derivadas da radiação solar existem a irradiância solar medida em W/m^2 e a irradiação solar em Wh/m^2 que é a integral da irradiância em um dado intervalo de

tempo. A irradiação solar média que incide sobre a superfície do Brasil é de até 2300 kWh/m², conforme o Atlas Solarimétrico da Cepel (eCycle, 2017).

A radiação solar pode ser dividida em radiação direta, difusa e global. A radiação direta corresponde àquela que não sofre nenhum desvio pela atmosfera, ela produz sombras nítidas e é nula quando o céu está coberto por nuvens. A difusa representa toda a radiação dispersada por moléculas e partículas presentes na atmosfera, como também a refletida por nuvens, parede, chão, etc. A global é a soma da difusa e direta, ou seja, é toda radiação que chega ao solo (SUZUKI; REZENDE, 2013).

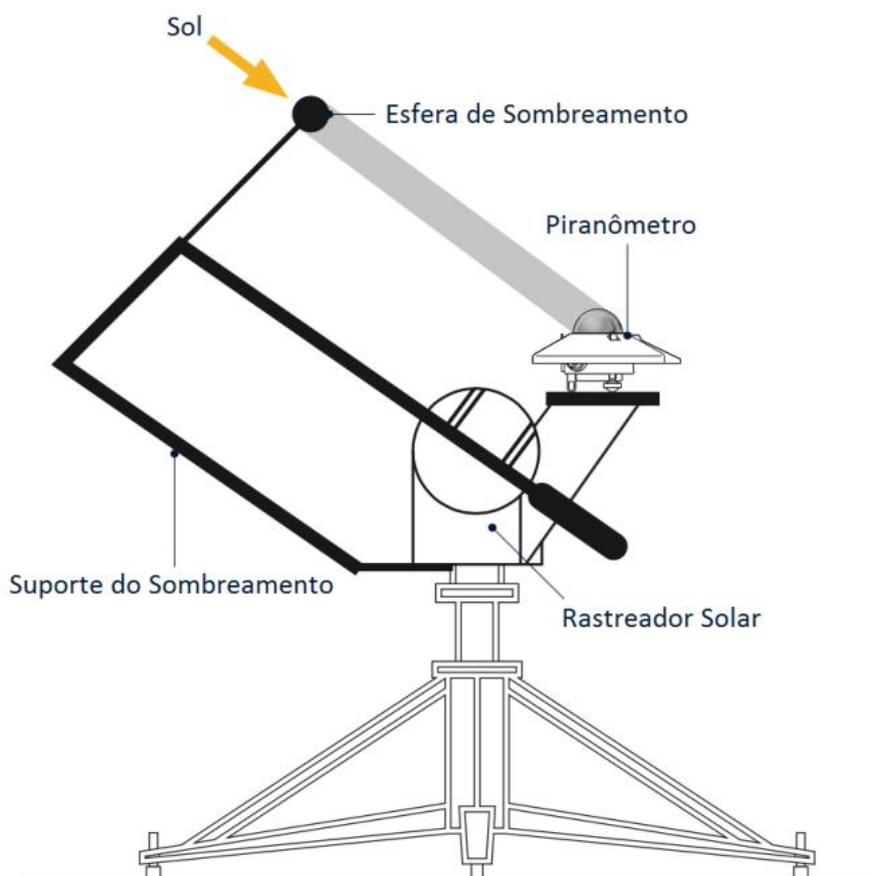
2.3.1 Instrumentos de Medição

Os instrumentos de medição utilizados para medir a radiação solar são o pirânometro e o pireliômetro. Estes quando expostos à energia solar geram sinais elétricos analógicos que são transformados pelo sistema em irradiância solar (W/m²) (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

O pirânometro mede a radiação solar global sobre o plano horizontal e seus tipos mais comuns são o fotovoltaico e termoeletrico. O fotovoltaico é formado por uma célula fotovoltaica de silício monocristalino que converte a radiação incidente em uma corrente elétrica proporcional à mesma. O termoeletrico é composto por dois sensores de temperatura (termopares) ligados em série, onde um é pintado de preto e outro de branco. Como são iluminados igualmente, devido à diferença de cores, apresentam uma diferença de temperatura entre eles relacionada linearmente com uma diferença de potencial (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

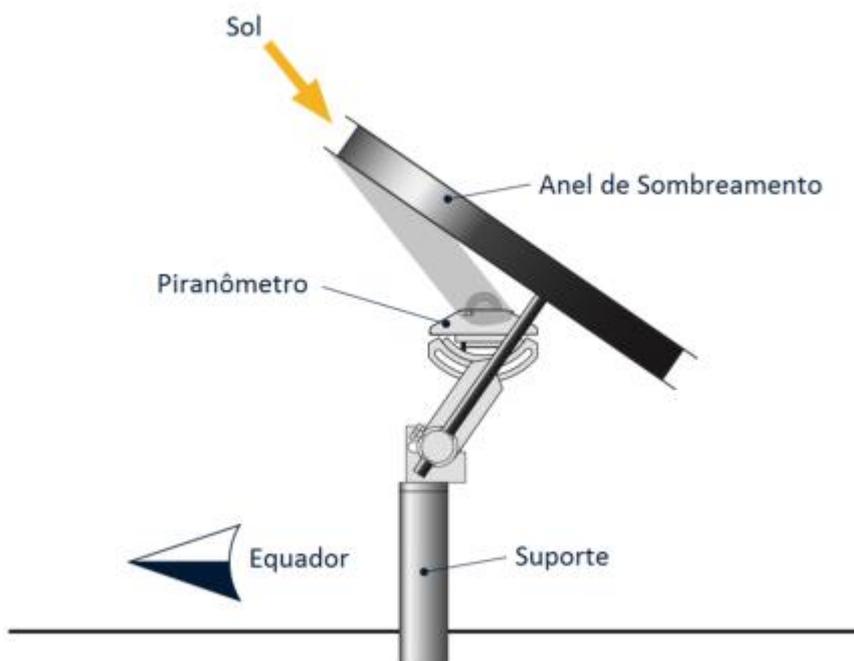
Além de mensurar a radiação global, o pirânometro também pode determinar a difusa com a adição de um anteparo acoplado a ele. Este anteparo pode ser uma esfera de sombreamento com rastreador solar, como ilustrado na Figura 7, ou um anel de sombreamento, na Figura 8, ambos de forma a bloquear apenas a radiação direta, para que remanesça a difusa (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

Figura 7 - Pirânometro Difuso com Esfera de Sombreamento e Rastreador Solar



Fonte: PENICHE; MELLO; PASS (2016)

Figura 8 - Pirânometro Difuso com Anel de Sombreamento



Fonte: PENICHE; MELLO; PASS (2016)

Já o pireliômetro mede apenas a irradiância direta e seu princípio de funcionamento é semelhante ao do pirânometro termoelétrico. A diferença é o acréscimo de um tubo de colimação com paredes enegrecidas que comporta o sensor termoelétrico, este tubo tem a função de bloquear a radiação difusa e está sempre direcionado diretamente para o sol através de um rastreador solar, como pode ser observado na Figura 9 (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

Figura 9 - Pireliômetro na TECPAR



Fonte: PENICHE; MELLO; PASS (2016)

3 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Especificações dos Equipamentos

Os três painéis solares fotovoltaicos em estudo são os de silício amorfo, silício policristalino e silício monocristalino, todos com a mesma especificação de 2kWp de potência.

A estação solarimétrica para coleta dos dados de radiação conta com equipamentos da marca holandesa *Kipp & Zonen*, sendo um pirânometro termoelétrico CMP11 com esfera de sombreamento para captação da irradiância difusa, ilustrado na Figura 10, e um pireliômetro CHP1 para irradiância direta, como mostrado anteriormente na Figura 9. Ambos aparelhos são acompanhados de um rastreador solar SOLYS 2, com rastreamento passivo por GPS e ativo por sensor fotodiodo (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

Figura 10 - Pirânometro com Esfera de Sombreamento e Rastreador Solar na TECPAR



Fonte: PENICHE; MELLO; PASS (2016)

Segundo suas informações técnicas, o pirâmetro apresenta um erro menor que 2% e o pireliômetro um erro menor que 1%, sendo classificados como de alta qualidade e boa qualidade, respectivamente, pela WMO (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

Todos esses instrumentos estão localizados dentro do TECPAR na cidade de Curitiba, latitude 25° e longitude 49°, e altitude 891 metros com relação ao nível do mar (PENICHE; MELLO; PASS, 2016).

3.2 Tratamento dos Dados

Os dados de geração de energia elétrica dos painéis solares fotovoltaicos e da radiação solar incidente sobre eles foram fornecidos pelo próprio instituto em formato digital, como duas planilhas distintas no software *Excel*.

Com relação à planilha de geração de energia dos painéis, englobava três medições por dia para cada tipo de painel, a primeira era feita no intervalo das 8 às 9h, a segunda das 12 às 13h e a terceira das 16 às 17h, sendo que o valor coletado corresponde à geração em kWh desde a última medição até a atual. Os dados fornecidos são referente aos meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro de 2017. Porém, há dias e horários em que não foram realizadas as medições, totalizando apenas um período de 64 dias. Um exemplo desta planilha pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 -Dados de Geração de Energia Elétrica do Pannel Solar referente ao mês de Setembro de 2017

Geração de energia elétrica do painel solar									
Dia	Amorfo (kWh)			Policristalino (kWh)			Monocristalino (kWh)		
	8-9h	12-13h	16-17h	8-9h	12-13h	16-17h	8-9h	12-13h	16-17h
1	0,17	1,45	6,2	0,22	1,76	7,02	0,2	1,62	6,38
2									
3									
4	0,55	9,11	11,37	0,71	9,86	12,07	0,64	9,21	11,31
5	0,65	7,37	11,17	0,75	7,88	11,96	0,7	7,39	11,22
6	0,2	5,03	10,25	0,26	5,44	10,93	0,23	5,11	10,23
7									
8									
9									
10									
11	0,54	5,18	9,43	0,67	5,28	10,1	0,62	5,59	9,55
12	0,52	5,37	10,79	0,63	5,7	11,37	0,59	5,37	10,71
13	0,68	5,86	11,52	0,81	6,24	12,13	0,75	5,91	11,49
14	0,62	5,86	11,74	0,73	6,27	12,4	0,68	5,9	11,8
15	0,53	5,31	10,07	0,67	5,79	10,74	0,62	5,4	10,14
16									
17									
18	0,18	3,13	8,27	0,22	3,4	8,8	0,2	3,22	8,25
19	0,19	4,75	10,15	0,24	4,96	10,57	0,22	4,7	9,93
20	0,56	5,74	11,46	0,67	6,08	12,08	0,62	5,73	11,32
21	0,93	6,24	11,85	1,1	6,19	12,36	1,02	6,59	11,62
22	0,78	5,85	11,19	0,91	6,13	11,6	0,86	5,81	10,95
23									
24									
25	0,4	4,87	9,92	0,48	5,23	10,48	0,45	4,89	9,87
26	0,51	4,95	10,23	0,61	5,38	10,85	0,56	5,02	10,16
27	0,15	4,49	*	0,18	4,65	*	0,17	4,42	*
28	0,3	4,29	6,33	0,36	4,56	6,77	0,34	4,32	6,36
29	0,18	1,02	2	0,21	1,16	2,28	0,2	1,11	2,19
30									

Fonte: Autoria própria (2018)

A respeito da planilha de radiação solar, continha uma série de informações como velocidade do vento, umidade, pressão, etc. No entanto, foram selecionadas apenas as informações relevantes ao estudo, a radiação direta e difusa. Estas são apresentadas como irradiância (W/m^2) medidas de 5 em 5 minutos, contendo dados de 01/07/2017 até 11/05/2018 com algumas interrupções de medições assim como a de geração de energia. Um modelo desta após a exclusão das informações irrelevantes está ilustrado na Tabela 2.

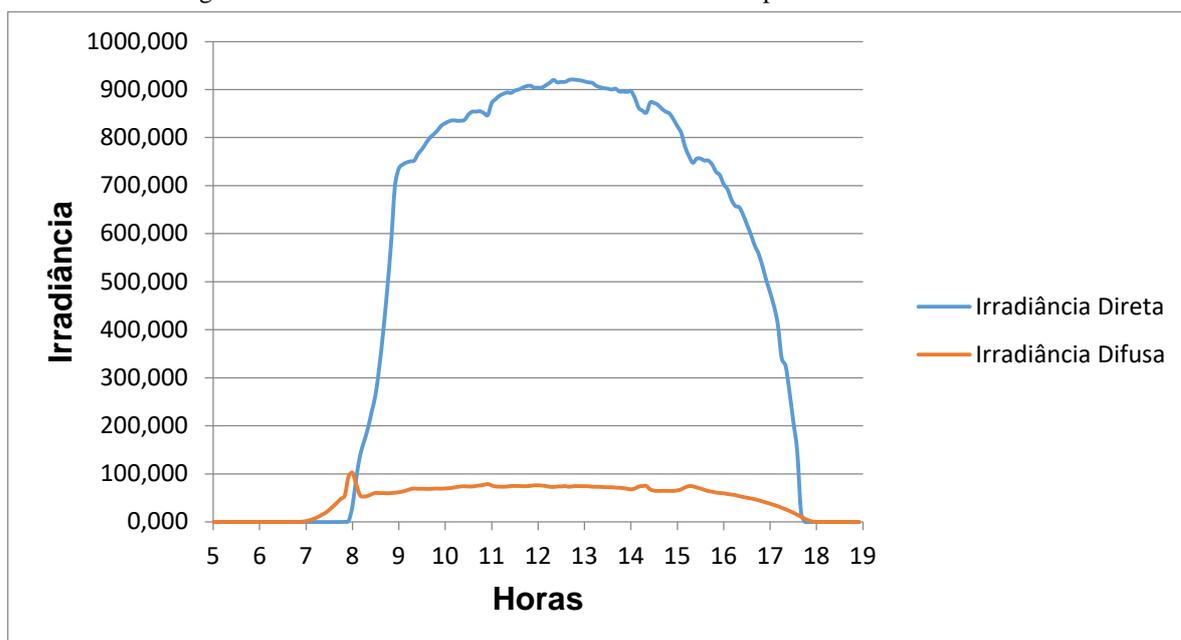
Tabela 2 - Dados de Irradiância Direta e Difusa

TIMESTAMP	Irradiância Direta	Irradiância Difusa
TS	W/m ²	W/m ²
05/09/2017 08:00	627,300	67,660
05/09/2017 08:05	641,000	69,580
05/09/2017 08:10	652,800	71,100
05/09/2017 08:15	668,800	72,170
05/09/2017 08:20	680,300	73,100
05/09/2017 08:25	693,400	74,060
05/09/2017 08:30	705,500	75,080
05/09/2017 08:35	717,100	75,830
05/09/2017 08:40	725,500	77,210
05/09/2017 08:45	723,000	79,660
05/09/2017 08:50	724,800	82,400
05/09/2017 08:55	729,800	83,000
05/09/2017 09:00	744,600	82,200
05/09/2017 09:05	766,600	80,600
05/09/2017 09:10	783,000	79,920
05/09/2017 09:15	793,000	79,850
05/09/2017 09:20	801,000	79,990
05/09/2017 09:25	806,000	81,100
05/09/2017 09:30	808,000	82,200
05/09/2017 09:35	811,000	83,300
05/09/2017 09:40	814,000	84,100
05/09/2017 09:45	816,000	85,000
05/09/2017 09:50	819,000	86,100
05/09/2017 09:55	822,000	86,900

Fonte: Autoria própria (2018)

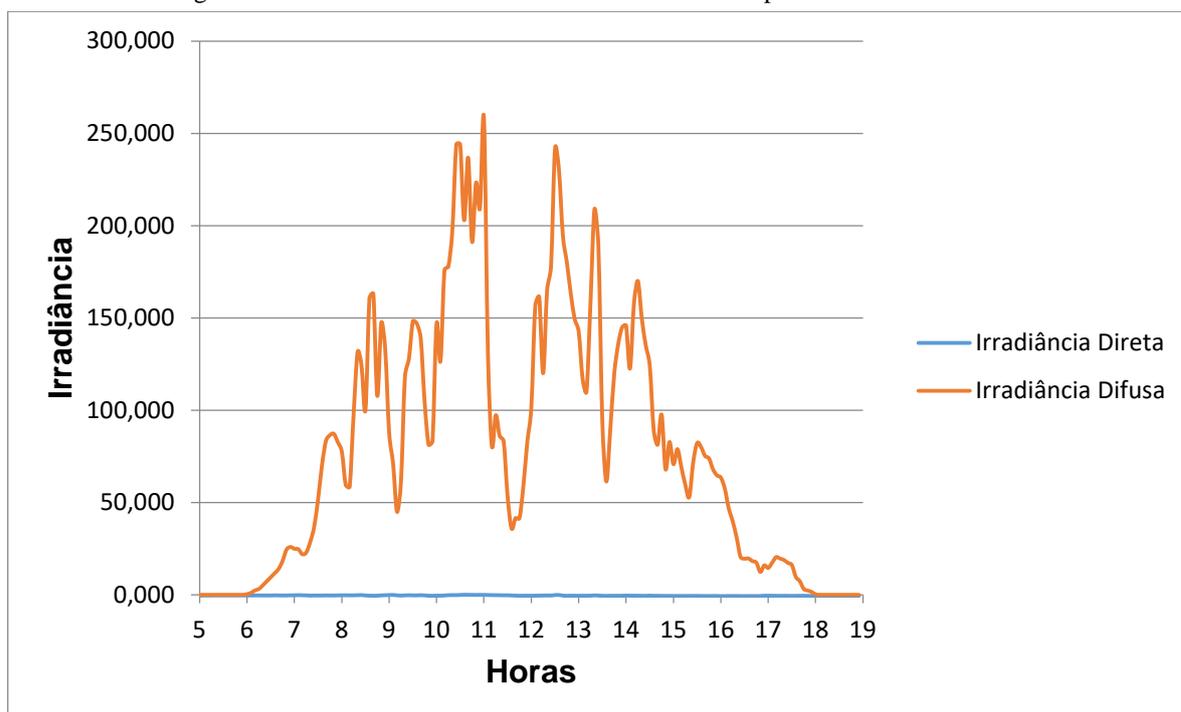
Devido às inconstâncias na coleta de dados tanto de geração de energia elétrica quanto de radiação solar, foi feita uma apuração dos dias de compatibilidade da geração de energia com a irradiância solar, totalizando 53 dias. Na sequência, foram plotados gráficos da irradiância direta e difusa para cada um desses dias, sendo que, para uma melhor análise, o intervalo de tempo utilizado foi das 5 às 19h, pelo fato de não ter tido radiação solar fora deste período. A partir dos gráficos, foram selecionados apenas os dias pertinentes ao estudo, restando apenas 24 dias. Esses dias são aqueles em que houve a considerável predominância de radiação direta ou difusa, ilustrados nas Figuras 11 e 12, respectivamente, em razão de uma análise mais clara do desempenho dos tipos de painéis fotovoltaicos para uma determinada radiação.

Figura 11 -Gráfico da Irradiância Direta e Difusa com predominância de Direta



Fonte: Autoria própria (2018)

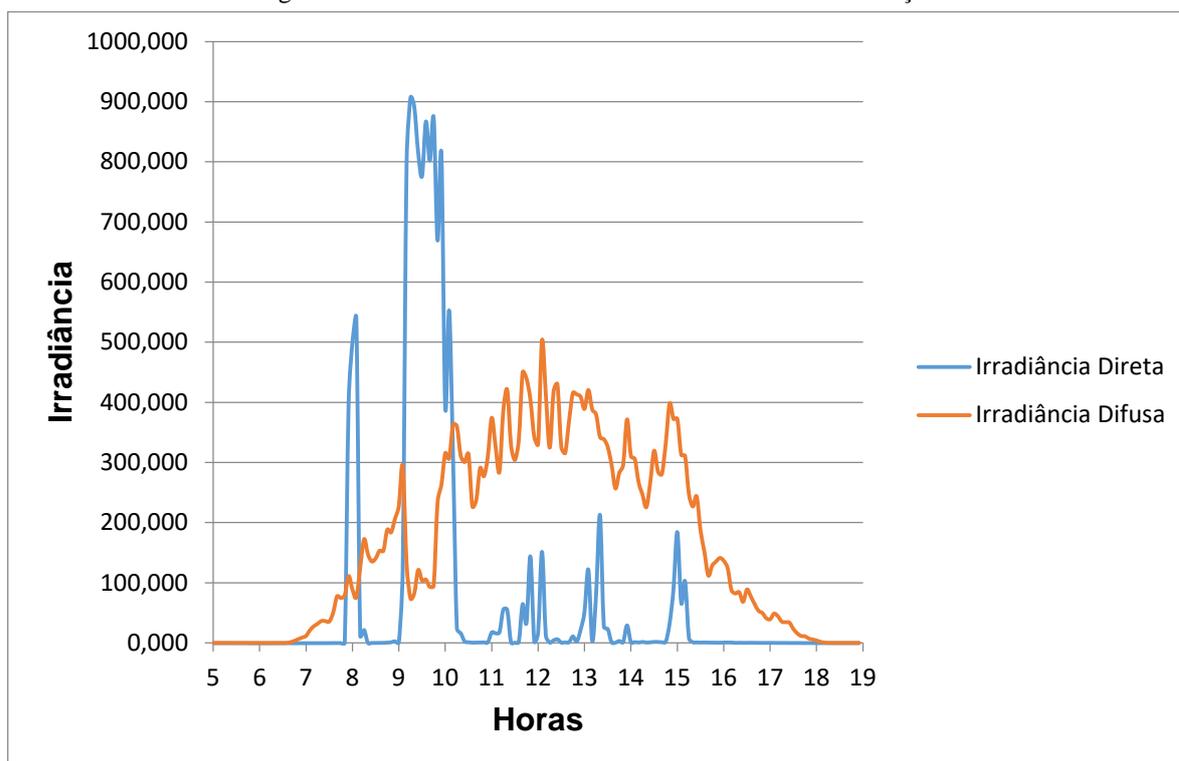
Figura 12 - Gráfico da Irradiância Direta e Difusa com predominância de Difusa



Fonte: Autoria própria (2018)

Já os dias não utilizados são aqueles em que houve oscilações entre a radiação direta e difusa, dificultando a distinção de qual tipo de radiação está influenciando mais na geração dos painéis. Um exemplo pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Gráfico de Irradiância Direta e Difusa com variações



Fonte: Autoria própria (2018)

3.3 Comparações e Resultados

Com base nos 24 dias selecionados, foi feita uma nova tabela reunindo os dados de geração e radiação, porém de uma forma mais objetiva ao resultado do trabalho. Primeiramente, vale ressaltar que as medidas de geração não foram realizadas em horários exatos, podendo apresentar alguns desvios quando comparadas entre elas, porém como o estudo é amplo, isso não interferiu no resultado.

Considerando que os níveis de radiações solares são mais significativos no meio do dia, o intervalo de tempo do estudo foi das 8 às 17h. Dessa forma, a energia gerada por cada conjunto de painéis equivaleu à soma de sua segunda e terceira medição, e as irradiâncias solares à soma de todos seus valores presentes dentro desse intervalo. Estes novos números podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Geração de Energia Elétrica e Irradiância Solar

Dia	Geração de Energia Elétrica dos Painéis Fotovoltaicos			Irradiância Solar	
	Amorfo	Policristalino	Monocristalino	Direta	Difusa
	8-9h → 16-17h kWh	8-9h → 16-17h kWh	8-9h → 16-17h kWh	8h → 17h W/m ²	8h → 17h W/m ²
24/jul	18,18	20,73	18,65	85135	7926
25/jul	15,49	15,56	15,66	87751	7478
26/jul	15,98	16,60	17,27	87338	8192
27/jul	15,90	16,61	17,48	85370	8126
07/ago	16,74	19,27	17,14	80412	10321
11/ago	16,11	18,56	16,58	58793	16985
14/ago	18,18	20,79	18,72	105109	7216
15/ago	3,08	3,80	3,48	108	13677
17/ago	3,38	4,17	3,80	129	16069
24/ago	16,05	17,36	16,04	77248	12848
29/ago	15,88	16,83	15,64	75205	13322
30/ago	17,50	18,47	17,32	89793	12091
31/ago	3,07	3,75	3,46	35	14606
04/set	20,48	21,93	20,52	91237	10302
05/set	18,54	19,84	18,61	89703	12632
06/set	15,28	16,37	15,34	66369	18461
12/set	16,16	17,07	16,08	72711	17540
13/set	17,38	18,37	17,40	88136	12766
14/set	17,60	18,67	17,70	89273	12305
15/set	15,38	16,53	15,54	59517	20690
19/set	14,90	15,53	14,63	59240	20308
20/set	17,20	18,16	17,05	81894	15524
21/set	18,09	18,55	18,21	91644	12246
22/set	17,04	17,73	16,76	77136	16801
29/set	3,02	3,44	3,30	-77	13144
17/out	6,99	7,98	7,54	1733	38999
25/out	5,16	5,76	5,51	1272	18446
27/out	4,61	5,16	5,02	2883	18189
30/out	6,43	7,20	7,08	7421	34982

Fonte: Autoria própria (2018)

Logo em seguida, para uma distinção mais exata de qual tipo de radiação está interferindo em maior parte na geração dos painéis naquele determinado dia, foi feita uma nova coluna com a diferença entre a irradiância direta e a difusa. Assim, todos os dias foram reorganizados de forma a esta coluna ficar em ordem decrescente, ou seja, dos dias em que a diferença da irradiância direta menos a difusa foi maior para os dias em que ela foi menor. Dessa forma, foi possível realizar uma análise mais precisa do desempenho dos painéis frente às radiações. Os novos valores de irradiância estão ilustrados na Tabela 4.

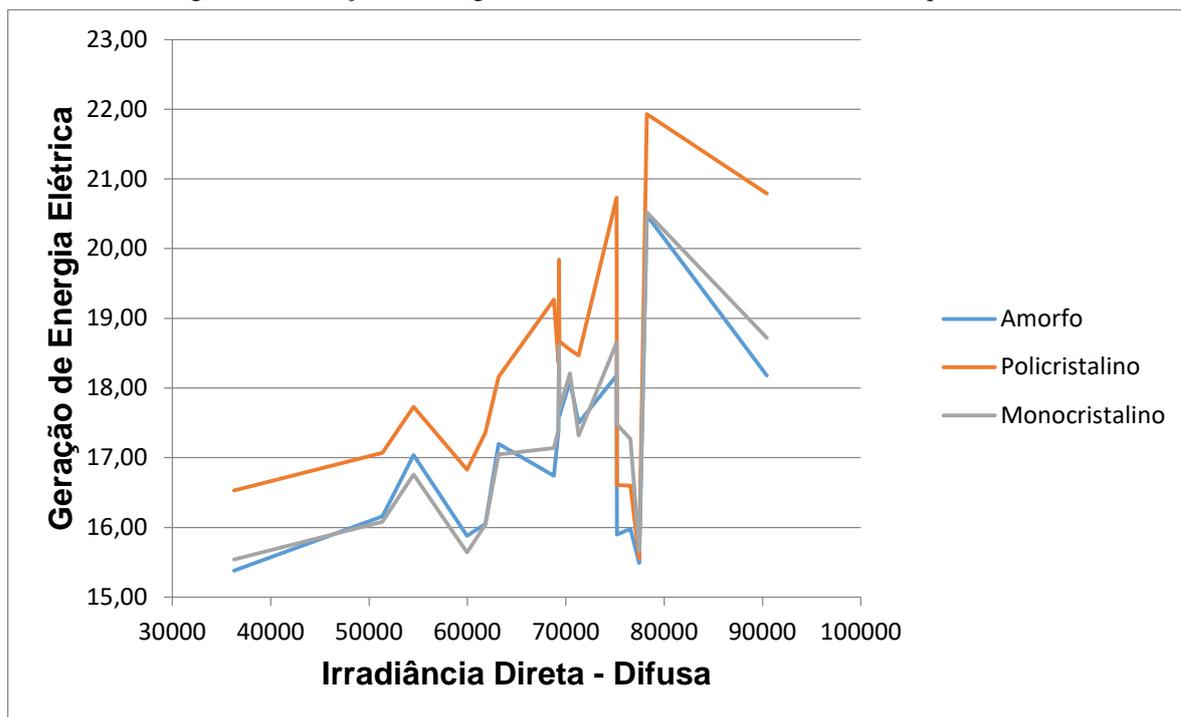
Tabela 4 - Geração de Energia Elétrica e Irradiância Direta menos Difusa

Dia	Geração de Energia Elétrica dos Painéis Fotovoltaicos			Irradiância Solar		
	Amorfo	Policristalino	Monocristalino	Direta	Difusa	Direta - Difusa
	8-9h → 16-17h kWh	8-9h → 16-17h kWh	8-9h → 16-17h kWh	8h → 17h W/m ²	8h → 17h W/m ²	8h → 17h W/m ²
14/ago	18,18	20,79	18,72	97062	6623	90439
04/set	20,48	21,93	20,52	87172	8935	78237
25/jul	15,49	15,56	15,66	84418	6981	77437
26/jul	15,98	16,60	17,27	84217	7662	76555
27/jul	15,90	16,61	17,48	82760	7568	75192
24/jul	18,18	20,73	18,65	82511	7338	75173
30/ago	17,50	18,47	17,32	82273	10962	71311
21/set	18,09	18,55	18,21	81073	10662	70410
14/set	17,60	18,67	17,70	80262	10911	69351
05/set	18,54	19,84	18,61	80800	11498	69302
13/set	17,38	18,37	17,40	80502	11249	69254
07/ago	16,74	19,27	17,14	78225	9437	68787
20/set	17,20	18,16	17,05	76246	13092	63154
24/ago	16,05	17,36	16,04	73818	12014	61804
29/ago	15,88	16,83	15,64	72247	12309	59938
22/set	17,04	17,73	16,76	69463	14936	54527
12/set	16,16	17,07	16,08	67196	15843	51353
15/set	15,38	16,53	15,54	55442	19181	36261
29/set	3,02	3,44	3,30	-50	12249	-12300
15/ago	3,08	3,80	3,48	130	13320	-13190
31/ago	3,07	3,75	3,46	51	13725	-13674
25/out	5,16	5,76	5,51	1286	15598	-14312
17/ago	3,38	4,17	3,80	141	15302	-15161
17/out	6,99	7,98	7,54	655	35307	-34652

Fonte: Autoria própria (2018)

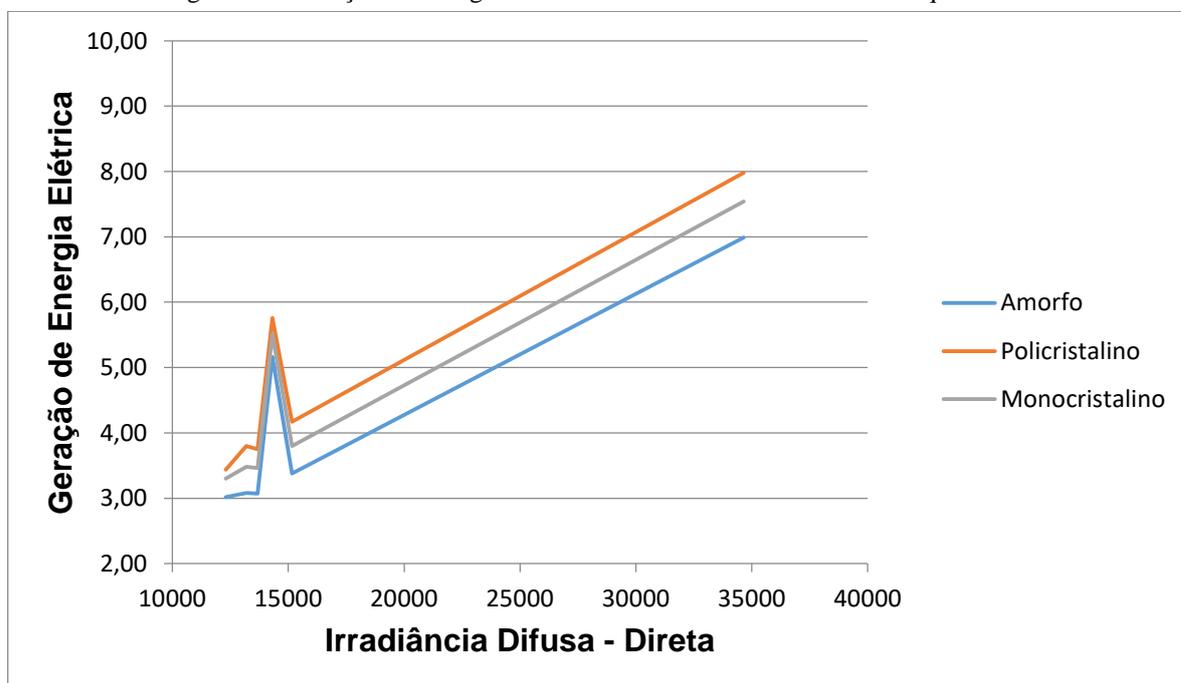
Finalmente, foram plotados dois gráficos incluindo a geração de energia elétrica de cada painel e a irradiância direta menos a difusa, sendo um para quando a direta foi maior que a difusa e outro para quando ela foi menor, ilustrados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 - Geração de Energia Elétrica com Irradiância Direta maior que Difusa



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 15 - Geração de Energia Elétrica com Irradiância Direta menor que Difusa



Fonte: Autoria própria (2018)

Através da análise dos gráficos, fica evidente que o conjunto de painéis de silício policristalino gerou mais energia que os demais em quase todos os dias avaliados, perdendo para o de monocristalino em apenas alguns dias.

Mais uma observação relevante é a aproximação da energia gerada pelos painéis de silício amorfo sobre os de monocristalino quando a irradiância direta é maior que a difusa.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu a comparação da geração de energia elétrica dos conjuntos de painéis solares fotovoltaicos de silício amorfo, silício policristalino e silício monocristalino frente à radiação solar direta e difusa, ou seja, em relação à cobertura de nuvens.

A comparação dos painéis baseou-se em duas situações: dias de sol claro com poucas nuvens e dias com muitas nuvens. Para cada situação foi gerado um gráfico com a energia gerada por cada conjunto de painéis no eixo vertical e a radiação predominante menos a outra no horizontal. Os resultados foram fundamentados na análise desses dois gráficos.

A partir das médias de geração de energia elétrica de cada conjunto de painéis verificou-se que, para os dias ensolarados, o de painéis de silício policristalino gerou 5,25% a mais que o de silício monocristalino e 6,47% a mais que o de silício amorfo. Já para os dias nublados, ele gerou 6,26% a mais que o monocristalino e 14,53% a mais que o amorfo. Certificou-se também que o conjunto de painéis de silício monocristalino produziu 8,82% mais energia que o de silício amorfo para a segunda situação, enquanto que na primeira, ele produziu apenas 1,29% a mais.

REFERÊNCIAS

ARAMIZU, J. **Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo – SP. 2010.

Dusol Engenharia Sustentável. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <<http://www.dusolengenharia.com.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

eCycle. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <http://www.ecycle.com.br>. Acesso em: 18 set. 2017.

Northsun Engenharia. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <<https://www.northsun.com.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

OGATA, H. M. **Análise do Impacto da Geração Solar Fotovoltaica em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo – SP. 2015.

PENICHE, F. F.; MELLO, L.B.; PASS, G.T. **Análise de Dados de Radiação Solar na Região de Curitiba para Aproveitamento Energético.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR. 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, Rio de Janeiro – RJ. 2014.

Portal Solar. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

SILVESTRI, A. F.; TAKASAKI, V. G. **Estudo da Viabilidade para Implantação de Geração Fotovoltaica em Shopping Centers na Região de Curitiba.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR. 2014.

SmartEnergy. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <<https://smartenergy.org.br/portal/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SUZUKI, E. V.; REZENDE, F. D. **Estudo da Utilização da Geração Fotovoltaica para Auxiliar a Suprir a Demanda Crescente de Energia Elétrica no Brasil.** Monografia de Especialização – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR. 2013.

TIRAPELLE, G. A. H.; MURA, L. B.; FRAZÃO, L. **Análise da Viabilidade Técnica de Painéis Solares Fotovoltaicos Conectados à Rede, com Backup de Energia, Instalados em Postos de Combustíveis.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba - PR. 2013.