

LUCAS AUGUSTO DE SOUZA SANTOS

**AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO APÓS
DEZ ANOS DE USO**

Guaratinguetá
2015

LUCAS AUGUSTO DE SOUZA SANTOS

AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO
APÓS DEZ ANOS DE USO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Co-orientador: Me. Justo José Roberts

Guaratinguetá
2015

S237a	Santos, Lucas Augusto de Souza Avaliação de rendimento do painel fotovoltaico após dez anos de uso / Lucas Augusto de Souza Santos – Guaratinguetá, 2015. 53 f. : il. Bibliografia : f. 53 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza Coorientador: Prof. Me. Justo José Roberts 1. Energia solar 2. Energia - Fontes alternativas 3. Geração de energia fotovoltaica I. Título CDU 620.91
-------	---

LUCAS AUGUSTO DE SOUZA SANTOS

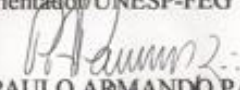
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCEL SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador UNESP-FEG


Prof. Me. PAULO ARMANDO PANUNZIO
UNESP-FEG


Prof. Me. THAIS SANTOS CASTRO
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por jamais desistir de mim e por me dar forças suficientes para superar e crescer nas dificuldades.

Aos meus pais Luís e Maria, pela educação que me deram, pelos valores que me ensinaram, por serem exemplos de pessoas trabalhadoras e honestas, e pelo amor e carinho que me dedicam no meu dia a dia.

Aos meus familiares, que de perto ou de longe, sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nesta caminhada.

A minha namorada Sylvia, pela amizade e companheirismo maravilhoso que construímos. Pela compreensão, incentivo e apoio nesta caminhada, e pela força nos momentos difíceis, nos quais muito precisei.

Aos meus amigos, que contribuíram para o meu crescimento em todos os sentidos. Fazem parte da minha formação e jamais sairão da minha vida. São irmãos na amizade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza, pela orientação e apoio na elaboração deste trabalho. E à oportunidade de trabalhar nesta área maravilhosa do conhecimento.

Ao meu co-orientador Me. Justo José Roberts, que desde o início se mostrou disposto a me ajudar na realização deste trabalho. Obrigado pelos conselhos e pela confiança que a mim foi dada.

A UNESP-FEG, pelas oportunidades que a mim foram dadas e pelos ensinamentos que obtive durante todo o curso.

SANTOS, L. A.S. **Avaliação de rendimento do painel fotovoltaico após dez anos de uso.** 2015. 53 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Este trabalho apresentou uma análise de rendimento de dois painéis fotovoltaicos com células de silício policristalino modelo SUNTECH STP022-12/D. OS painéis têm dez anos de uso. Realizando-se experimentos no Centro de Energias Renováveis da Universidade Estadual de Guaratinguetá – SP e efetuando-se os cálculos com os dados obtidos, obteve - se valores de rendimento elétrico-solar para os painéis.

Para coleta de dados os experimentos foram desenvolvidos utilizando seis coolers como carga dos painéis fotovoltaicos. Foram levantadas medidas de tensão, com e sem carga, e de corrente com carga, nos terminais do painel, e medidas de incidência de radiação solar na direção perpendicular à face do painel. Estas medidas foram realizadas para o cálculo do rendimento elétrico-solar dos painéis. Também foram medida temperaturas ambiente e dos painéis fotovoltaicos.

Para auxiliar a melhor orientação dos painéis fotovoltaicos foram utilizados um inclinômetro e uma bússola. Os testes foram realizados em quatro situações climáticas diferentes: dia parcialmente nublado, dia com poucas nuvens, dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas e dia ensolarado com temperaturas ambiente elevadas.

Os resultados indicaram que houve tendências de maior potência gerada com maior incidência solar. A temperatura ambiente não apresentou uma variação proporcional com a incidência solar.

Para valores de incidência maiores que 700W/m^2 , o rendimento do painel apresentou uma pequena diminuição de valor com o aumento de incidência, enquanto que para valores de incidência solar menores que 300W/m^2 , o valor do rendimento diminuiu muito.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Célula Policristalina. Energia Renovável.

SANTOS, L. A.S. **Photovoltaic panel performance evaluation after ten years of use.** 2015. 53 f. Graduation work (Graduation in Mechanical Engineering) – College of Engineering of Guaratinguetá campus, São Paulo state university. Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This paper presented a performance analysis of two photovoltaic modules with polycrystalline cells model SUNTECH STP022-12/D. The panels has ten years of use. Making up the experiments on Renewable Energy Center, State University of Guaratinguetá – SP and making up the calculations with data obtained, the panel electric-solar performance values are also obtained.

For data collection, the experiments were developed using six coolers as cargo of photovoltaic panels. Voltage measurements were raised, with and without load, and of current with load, of the panel terminals, and solar radiation incidence measured in the direction perpendicular to the face of the panel. These measurements were performed to calculate the electric-solar performance of the panels. There were also measured environmental and photovoltaic panels temperatures.

To assist the best orientation of photovoltaic panels were used an inclinometer and a compass. The tests were performed in four different climatic conditions: partly cloudy day, day with few clouds, sunny day with ambient temperatures mild and sunny day with high ambient temperatures.

The results indicated a trend of higher power generated with higher solar incidence. The environment temperature did not show a proportional variation with solar incidence.

For values of incidence higher than 700 W / m^2 , the performance of panel showed a small value decrease with the incidence increases, while for solar incidence values smaller than 300 W / m^2 the performance value decreased a lot.

KEYWORDS: Solar Energy. Polycrystalline cells. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Investimento global em energias renováveis, 2004 - 2014.....	11
Figura 2 - Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo	13
Figura 3 - Preço médio dos painéis fotovoltaicos em U\$/watt.....	14
Figura 4 - Mapa mundial de irradiação solar em média anual	15
Figura 5 - Componentes de um painel fotovoltaico	16
Figura 6 – Estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica	17
Figura 7 - Etapas de transformação do lingote de silício policristalino para célula fotovoltaica	18
Figura 8 - Curvas características I-V e P-V do módulo fotovoltaico	20
Figura 9 - Influência da variação da irradiação solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C.....	21
Figura 10 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiação de 1000W/m ² , espectro AM 1,5	22
Figura 11 - Módulo fotovoltaico com sombra – convertendo eletricidade em calor	23
Figura 12 - Módulo fotovoltaico com sombra - Com diodo <i>bypass</i>	23
Figura 13 - Equipamentos auxiliares: (a) Inclinômetro, (b) Bússola	26
Figura 14 - Carga utilizada: Cooler	27
Figura 15 - Medidor de incidência de radiação solar MES-100.....	28
Figura 16– Multímetro digital Brasfort (8522).....	28
Figura 17 - Medidor de Temperatura: termômetro digital de tipo espeto	29
Figura 18 – Painel fotovoltaico policristalino fabricado pela Suntech modelo STP022-12/D	30
Figura 19 – Situação 1 - Pannel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar	34
Figura 20 - Situação 1 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	35
Figura 21 - Situação 1 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	35
Figura 22 - Situação 1 – Pannel 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar	36
Figura 23 - Situação 1 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	36
Figura 24 - Situação 1 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	37
Figura 25 - Situação 2 - Pannel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar.....	39

Figura 26 - Situação 2 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	39
Figura 27 - Situação 2 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	40
Figura 28 - Situação 2 - Pannel 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar.....	40
Figura 29 - Situação 2 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	40
Figura 30 - Situação 2 - Pannel 2: Gráfico Rendimento X Temperatura do Pannel	41
Figura 31 - Situação 3 - Pannel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar.....	43
Figura 32 - Situação 3 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	43
Figura 33 - Situação 3 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	44
Figura 34 - Situação 3 - Pannel 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar.....	44
Figura 35 - Situação 3 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	44
Figura 36 - Situação 3 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	45
Figura 37 - Situação 4 – Pannel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar	47
Figura 38 - Situação 4 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar.....	47
Figura 39 - Situação 4 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	48
Figura 40 - Situação 4 - Pannel 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar.....	48
Figura 41 - Situação 4 - Pannel 2: Curva Rendimento x Incidência de radiação solar	48
Figura 42 - Situação 4 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico	49
Figura 43 - Pannel 1: Curvas Horário x Rendimento	50
Figura 44 - Pannel 2: Curvas Horário x Rendimento	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características elétricas em STC do módulo fotovoltaico STP022-12/D	30
Tabela 2 - Dados obtidos em um dia parcialmente nublado para o painel 1	33
Tabela 3 - Dados obtidos em um dia parcialmente nublado para o painel 2	34
Tabela 4 - Dados obtidos em um dia com poucas nuvens para o painel 1	38
Tabela 5 - Dados obtidos em um dia com poucas nuvens para o painel 2	38
Tabela 6 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas para o painel 1	42
Tabela 7 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas para o painel 2	42
Tabela 8 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente elevadas para o painel 1	46
Tabela 9 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente elevadas para o painel 2	46

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	10
1.1CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	10
1.2 MOTIVAÇÃO.....	10
1.3 ENERGIA SOLAR	12
1.4 IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR.....	14
1.5 CÉLULAS E MODULOS FOTOVOLTAICOS.....	16
1.6 OBJETIVO	24
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
2.1 MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	26
2.2 ESPECIFICAÇÕES DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÕES	27
2.2.1 Medidor de incidência de radiação solar MES-100	27
2.2.2 Multímetro Digital 8522	28
2.2.3 Termômetro digital tipo espeto	29
2.3 OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	29
2.4 OS EXPERIMENTOS.....	31
2.5 CÁLCULOS DO RENDIMENTO ELÉTRICO - SOLAR	31
3 RESULTADOS	33
3.1 DIA PARCIALMENTE NUBLADO.....	33
3.2 DIA COM POUCAS NUVENS	37
3.3 DIA ENSOLARADO COM TEMPERATURAS AMBIENTE AMENAS.....	41
3.4 DIA ENSOLARADO COM TEMPERATURAS AMBIENTE ELEVADAS	45
3.5 GRÁFICO HORÁRIO X INCIDÊNCIA	49
3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho apresenta o estudo de dois painéis fotovoltaicos de células de silício policristalino da empresa Suntech, modelos STP022-12/D, localizados no Centro de Energias Renováveis do Campus da UNESP de Guaratinguetá. Ambos os painéis têm 10 anos de uso.

Com os equipamentos de medições adequados forem levantados os dados necessários para verificar o rendimento dos painéis solares. Os parâmetros abordados foram tensão em circuito aberto e com carga nos terminais dos painéis, assim como sua corrente com carga, intensidade de radiação recebida e temperaturas ambiente e do painel.

A partir de uma análise, pós-obtenção dos dados, foi possível fazer uma comparação de rendimento entre os painéis com 10 anos de uso e com os mesmos novos, os quais os valores são encontrados na literatura.

1.2 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento da sociedade sempre esteve diretamente ligado à quantidade de energia possuída e ao seu consumo. Até o século XX, por conta da revolução industrial e do jogo de poderes entre as grandes nações, o homem vivera em torno do ideal de crescimento econômico a todo custo, sem uma preocupação bem definida acerca da natureza e dos recursos naturais, utilizados apenas com o objetivo de desenvolvimento industrial (REVISTA ELETRÔNICA DIREITO E-ENERGIA, 2012).

Neste contexto, vários desastres naturais, como a intensificação de furacões, o aumento de chuvas em algumas regiões e de seca em outras, e o derretimento das geleiras polares começam a serem conseqüências diretas das mudanças climáticas, sendo as atividades antrópicas as maiores agravadoras pela mudança do clima e pelo rumo da degradação ambiental (REVISTA ELETRÔNICA DIREITO E-ENERGIA, 2012). Estas mudanças climáticas estão diretamente ligadas ao agravamento do aquecimento global.

A fim de mudar o ideal de crescimento até meados do século XX, um dos assuntos que se tornou evidente nas últimas décadas do século passado, principalmente após a Crise do Petróleo, é a busca por um desenvolvimento econômico sustentável e a criação de novos métodos de conservação do meio ambiente.

A partir deste ponto, a busca por fontes renováveis de energia é uma realidade mundial. As fontes renováveis de energia são aquelas consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização: podem ser utilizadas continuamente e nunca se acabam, pois sempre se renovam (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Com uma saída para minimizar a emissão de gases poluentes, mudar a matriz energética e aumentar a produção de energia, os países têm cada vez mais investido em pesquisas relacionadas às fontes de energia renováveis, como pode ser visto na Figura 1:

Figura 1 - Investimento global em energias renováveis, 2004 - 2014.



Fonte: (Greenpeace)

Dentre as principais fontes de energias renováveis se encontram a energia hidrelétrica, eólica, biomassa, solar térmica e solar fotovoltaica. Este trabalho aborda a fonte de energia solar, em especial, a solar fotovoltaica, que tem a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir corrente elétrica.

1.3 ENERGIA SOLAR

Responsável pelo desenvolvimento e sobrevivência da vida na Terra, o sol é a maior fonte de energia para a humanidade, sendo responsável pela maior parte da energia disponível da Terra.

É a partir da energia do sol, que aquece a atmosfera de forma desigual, gerando a circulação atmosférica em larga escala e o ciclo das águas, que é possível a geração de energia eólica e hidrelétrica. A energia solar também é responsável pela energia da biomassa, pois ela é diretamente absorvida e armazenada nas ligações químicas de moléculas orgânicas, pelo processo de fotossíntese. Conseqüentemente, os combustíveis fósseis também estão relacionados à energia solar, pois vêm da deterioração da matéria orgânica (resíduos de plantas e animais)(GALDINO et al., 2004).

Entre os vários processos de aproveitamento direto da energia solar que vêm sendo estudados, deve-se destacar a arquitetura bioclimática, a conversão térmica e a conversão fotovoltaica, sendo as duas últimas mais utilizadas.

A arquitetura bioclimática consiste em utilizar materiais e soluções construtivas e arquitetônicas nas edificações de forma a reduzir o consumo de energia elétrica para a iluminação e para o conforto térmico (GALDINO et al., 2004).

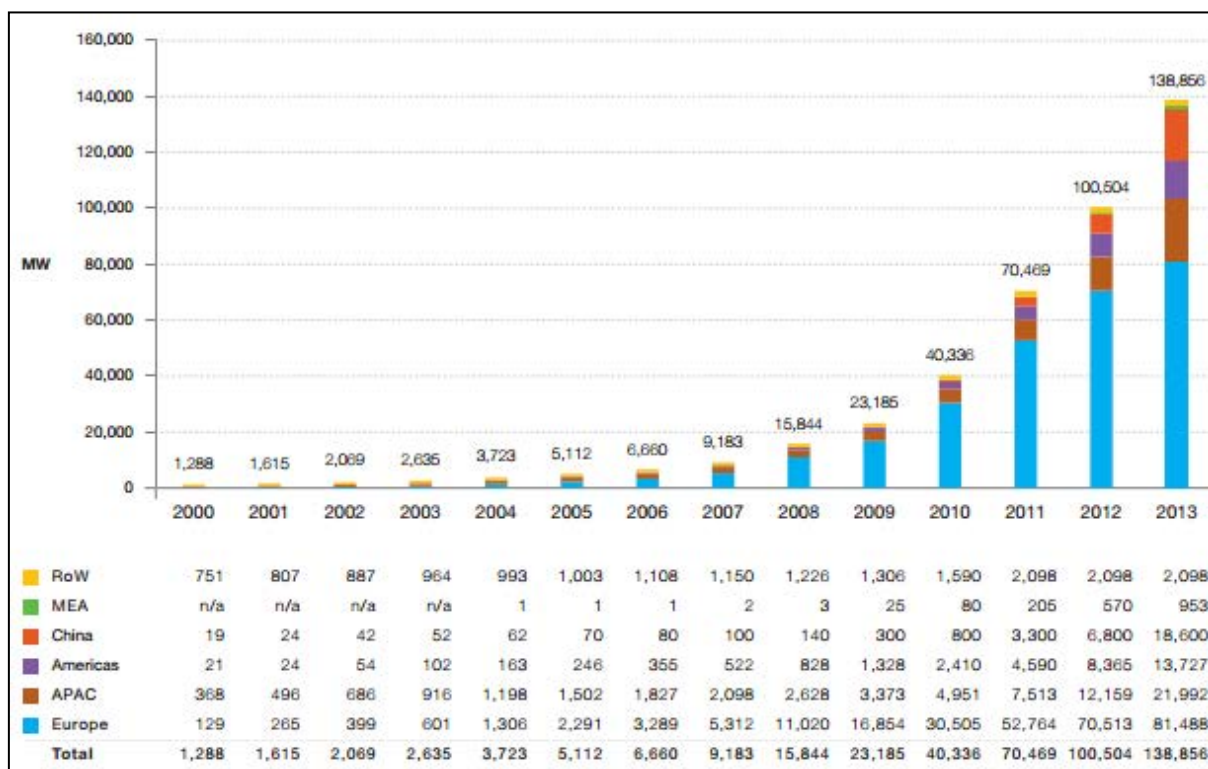
A conversão térmica aproveita a energia do sol como fonte de calor para aquecimento ou para a produção de energia. A principal aplicação da energia solar térmica consiste no aquecimento de água pela utilização de coletores solares, dentro dos quais se encontram tubos por onde circula a água que é aquecida e depois armazenada em um reservatório (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A energia solar ainda pode ser utilizada para produzir eletricidade pelo efeito fotovoltaico, que em síntese, consiste na conversão direta da luz solar em energia elétrica, através de células fotovoltaicas. Essa energia pode ser armazenada em baterias ou ser utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica. O efeito fotovoltaico, o funcionamento e as características das células e das placas solares serão apresentados no item 1.5.

A energia fotovoltaica foi a fonte de energia que apresentou maior crescimento no mundo entre os anos de 2000 a 2013, em uma evolução praticamente exponencial, como

apresentada na Figura 2. A capacidade instalada passou dos 138.000 Mw em 2013, contra pouco menos de 1.300 MWp em 2000. Na Europa encontram-se instalados aproximadamente 59% da produção mundial de módulos fotovoltaicos, sendo a Alemanha o maior mercado, seguida da Itália, onde em 2011 a energia elétrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos correspondeu a ordem de 5% (CRESESB, 2014).

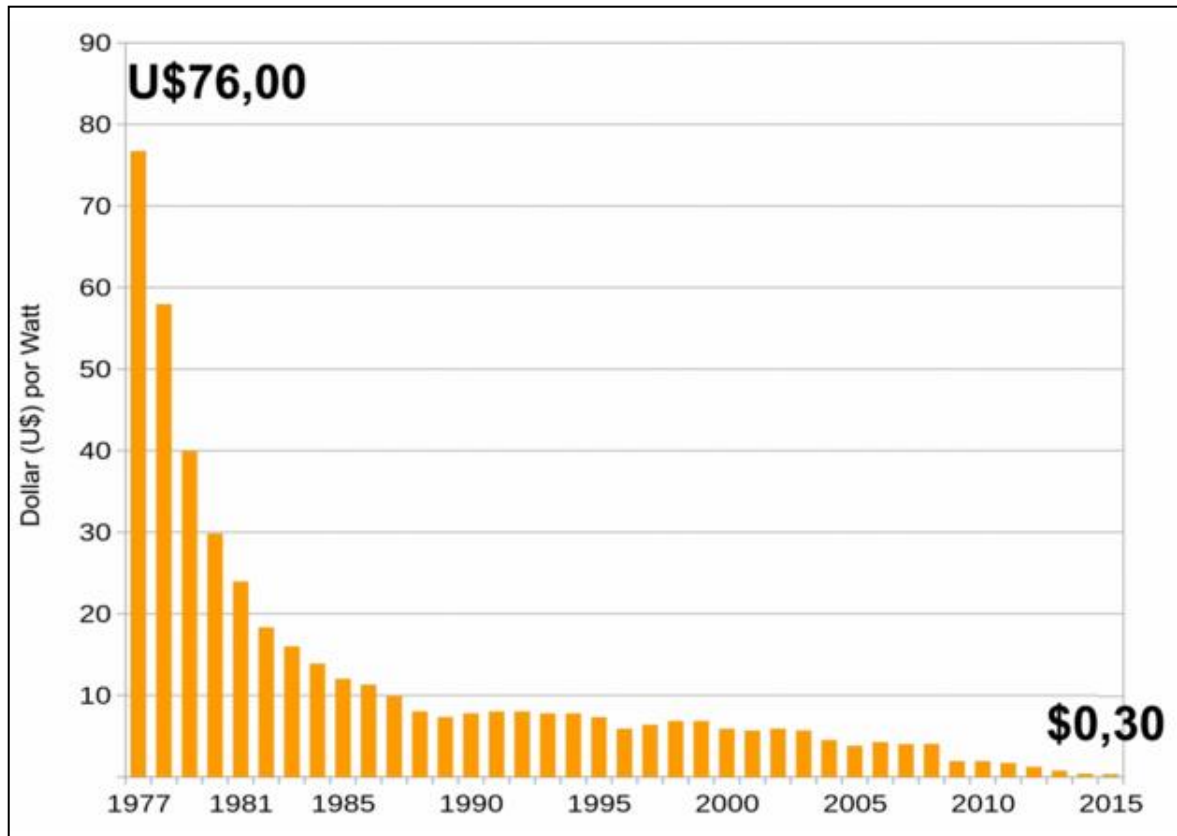
Figura 2 - Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo



Fonte: (EPIA, 2014)

O custo das células fotovoltaicas é, ainda hoje, um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, devido aos seus custos decrescentes, aos custos crescentes das demais formas de produção de energia e em função da internacionalização de fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais (CRESESB, 2014). Em relação aos preços dos módulos fotovoltaicos, estes apresentam uma tendência de queda expressiva, como é ilustrado na Figura 3. O preço médio dos painéis fotovoltaicos no mundo decresce de US\$ 76,67 por watt (W) em 1977 para US\$ 0,30 por watt (W) em 2015.

Figura 3 - Preço médio dos painéis fotovoltaicos em U\$/watt



Fonte: (BLOOMBERG apud PORTAL SOLAR, 2015)

A motivação do trabalho foi de contribuir com as pesquisas na área de energia solar fotovoltaica de forma a incentivar o uso da mesma, salientando que o valor de rendimento dos painéis solares durante sua vida útil não apresentou grande diminuição e, com o cenário atual dos custos de energia, representa uma alternativa rentável a médio e longo prazo

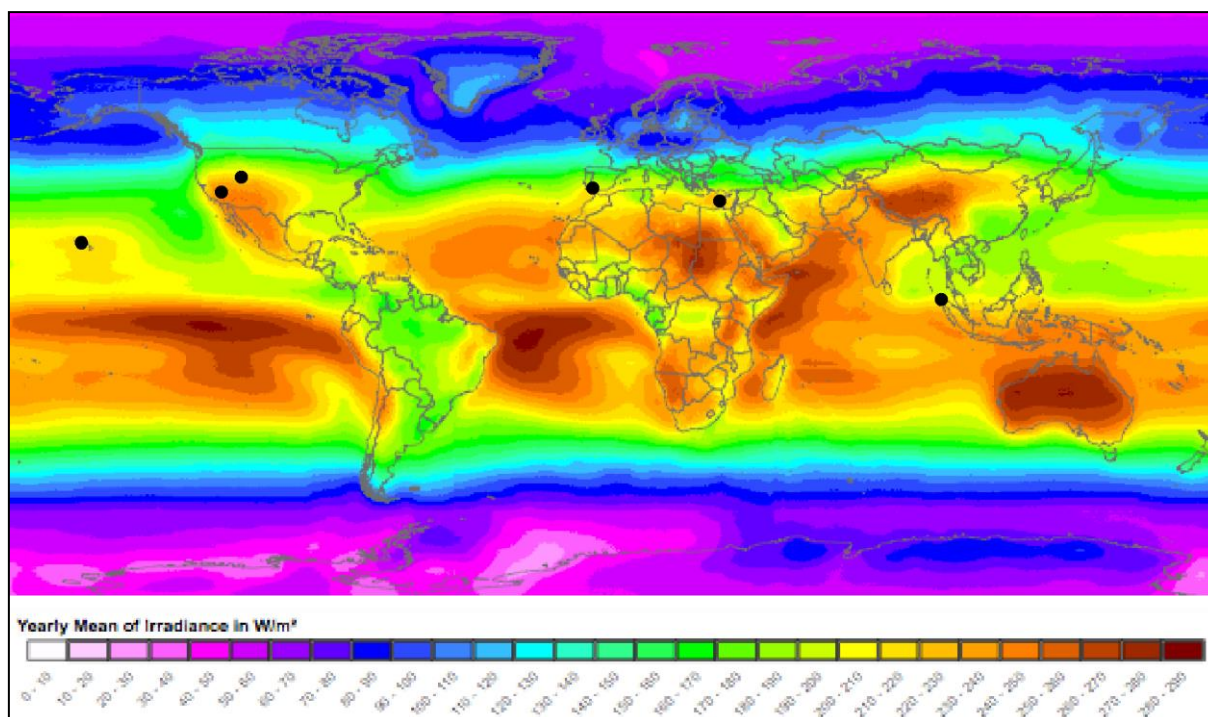
1.4 IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR

Em países em desenvolvimento a energia solar tem tido como agente impulsionador a sua aplicação para suprir pequenas demandas em áreas isoladas. No Brasil e em diversos outros países, uma parcela significativa da população vive na zona rural, e ainda sem acesso à energia elétrica e a serviços sociais básicos (GALDINO et al., 2004). A energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos pode ser utilizada para suprir essa carência, como para iluminação, acionamento de motores ou bombeamento de água.

O Brasil apresenta vantagens significativas para utilização dessa tecnologia perante os países desenvolvidos, devido à grande extensão territorial do país e à sua localização majoritariamente intertropical, possuindo níveis elevados de irradiação solar durante praticamente o ano todo.

A Figura 4 apresenta um mapa mundial de irradiação solar em média anual.

Figura 4 - Mapa mundial de irradiação solar em média anual



Fonte: (Adaptado de CRESESB, 2014).

Observou-se que o Brasil tem ótima disponibilidade de irradiação solar incidente em qualquer região de seu território, apresentando valores superiores aos da maioria dos países da União Européia, como a Alemanha, que, como já mencionado, possui capacidade instalada significativa de sistemas de geração fotovoltaica (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2012).

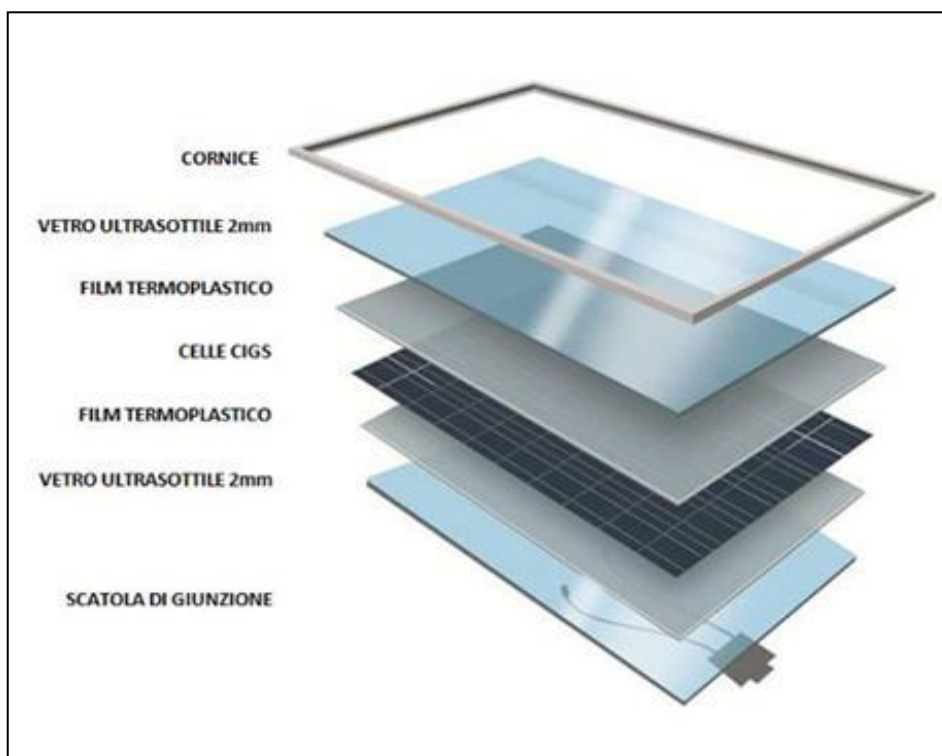
A partir desse contexto foi possível mostrar como a geração de energia fotovoltaica tem uma significativa importância no novo cenário de desenvolvimento, em especial no Brasil, onde ainda ocupa uma pequena parcela na matriz energética, mas que se apresenta como promissora nos próximos anos, com muita possibilidade de crescimento.

1.5 CÉLULAS E MODULOS FOTOVOLTAICOS

É através da célula fotovoltaica que a energia da luz solar pode ser captada e transformada em energia elétrica. Uma única célula produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir os chamados módulos (ou painéis) solares.

A Figura 5 ilustra os componentes de um painel fotovoltaico típico, no qual as células e suas conexões elétricas são envoltas por lâminas plásticas. O módulo é protegido por uma lâmina de vidro transparente contra fatores ambientais, como poeira e água. Por fim, recebe uma moldura de alumínio (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 5 - Componentes de um painel fotovoltaico

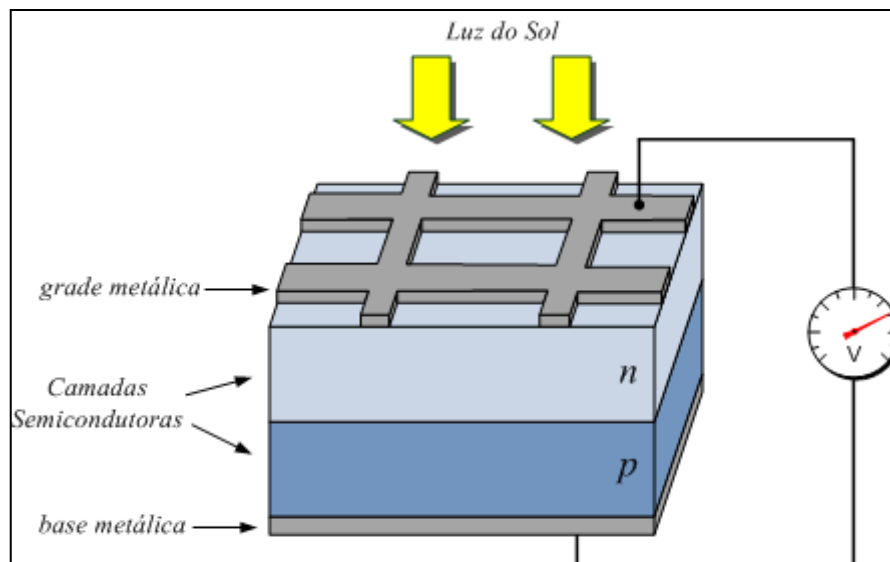


Fonte: <http://www.infobuildenergia.it/prodotti/nuovo-pannello-fotovoltaico-cigs-745.html>

O processo físico em que uma célula fotovoltaica converte a luz solar em eletricidade é conhecido como efeito fotovoltaico. O fenômeno ocorre com o surgimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor quando exposto à luz ou à radiação eletromagnética do Sol.

Uma célula fotovoltaica é composta por duas camadas de materiais semicondutores P e N (Junção “pn”), uma grade metálica superior e uma base metálica inferior, conforme Figura 6:

Figura 6— Estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica



Fonte: (ALMEIDA, 2011)

A grade e a base funcionam como terminais elétricos, fazendo a coleta da corrente elétrica produzida pelo efeito fotovoltaico.

O material mais utilizado na fabricação de células solares é o Silício. Porém, devido à falta de elétrons livres, o Silício puro não é um bom condutor de elétrons. Seguindo a premissa de que as propriedades de um semicondutor podem ser modificadas pela adição de materiais dopantes ou impurezas, costuma-se acrescentar ao silício, por processo de dopagem, certa porcentagem de fósforo e boro.

O incremento de fósforo e boro tem por objetivo criar camadas de elétrons livres positivas e negativas, respectivamente, formando a junção pn. Com esta junção os elétrons livres de silício tipo N tendem a preencher os vazios da estrutura de silício formando um campo elétrico. Quando a junção é excitada pela luz solar, os fótons da luz se chocam com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores (NIEDZIALKOSKI, 2013). Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles. E se houver um caminho elétrico entre ambos, surgirá uma corrente elétrica.

Existem atualmente duas principais tecnologias utilizadas para a fabricação de células fotovoltaicas no mercado: célula de silício cristalino e células de filmes finos. O objetivo

maior das pesquisas é obter células que conciliem menor custo de fabricação, alta durabilidade e maior eficiência na conversão da radiação solar em energia elétrica.

Segundo CRESESB (2014), as células fotovoltaicas de silício cristalino, que pode ser mono ou policristalino, corresponderam em 2011 a 87,9% do mercado mundial, enquanto 12% da produção mundial corresponderam a dispositivos fotovoltaicos de filmes finos. A seguir é explicada sucintamente a produção da célula de silício policristalino.

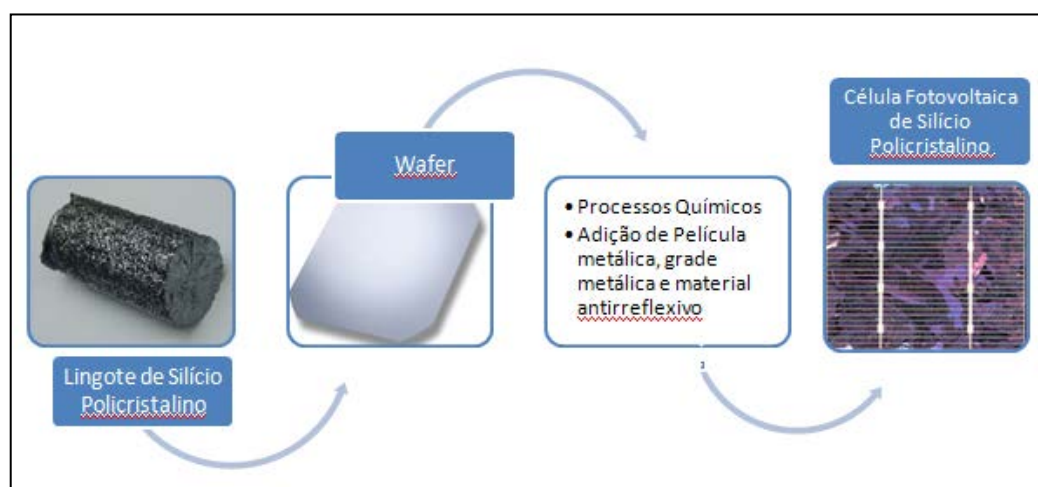
O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de inúmeros cristais, com tamanhos e orientações espaciais diferentes. O lingote é serrado e fatiado para produzir wafers, (finas bolachas de silício), que ainda não possuem propriedades de uma célula fotovoltaica, e posteriormente passam por mais duas etapas para transformarem-se em células fotovoltaicas.

Primeiramente são submetidos a processos químicos para receberem impurezas em ambas as faces, formando as camadas de silício P e N; já semi-acabada, a célula recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra e uma camada de material antirreflexivo (que aumentará a absorção luminosa) na face que vai receber a luz.

Neste momento as células são rígidas e quebradiças. Para adquirir resistência mecânica para o uso prático, elas são montadas em módulos.

A Figura 7 ilustra as etapas de transformação do lingote para a célula fotovoltaica.

Figura 7 - Etapas de transformação do lingote de silício policristalino para célula fotovoltaica



Fonte: (Adaptado de BLUE SOL; SOLARWORLD; NIEDZIALKOSKI, 2013)

Como mostrado na figura 7, a célula policristalina possui aparência heterogênea. Esta apresenta eficiência comercial entre 11% e 15% (MIRANDA, 2014), inferiores às das células monocristalinas, porém, seu custo de fabricação também é menor e ambas as tecnologias coexistem no mercado e apresentam relações custo-benefício muito próximas.

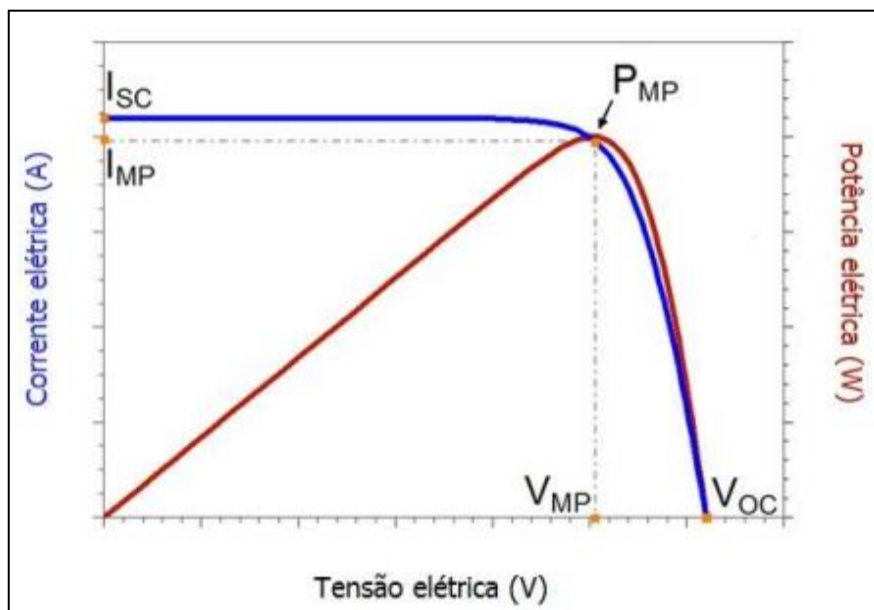
A quantidade de luz que um módulo fotovoltaico recebe está diretamente ligada à disponibilidade de radiação solar, que depende da latitude local e da posição do tempo (momento do dia ou do ano). Isso ocorre devido ao movimento de rotação da Terra e ao movimento de translação que esta faz em torno do sol. Portanto, pode-se maximizar o aproveitamento da radiação solar, ajustando a posição do painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia. Em países do Hemisfério Sul, como o Brasil, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local (ANEEL, 2002).

Uma célula fotovoltaica é capaz de fornecer uma tensão elétrica de até 0,6 V. Para produzir painéis fotovoltaicos com tensões de saída maiores é necessária a conexão de várias células em série.

A corrente elétrica produzida por uma célula depende diretamente da quantidade de luz que recebe, sendo que quanto maior sua área, maior a captação de luz e, conseqüentemente, maior a corrente fornecida. Geralmente os módulos cristalinos comerciais fornecem até 8A de corrente elétrica e os módulos de filmes finos normalmente apresentam correntes menores, em torno de 2A (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Um módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante em seus terminais, mas esta depende de sua corrente e vice-versa. Os valores de corrente e tensão nos terminais dependem do que está conectado nos mesmos. Para cada curva I-V de um módulo existe uma curva P-V correspondente, como pode ser visto da Figura 8:

Figura 8 - Curvas características I-V e P-V do módulo fotovoltaico



Fonte: (Adaptado de CRESESB, 2014)

Conforme pode ser observado na Figura 8, se conectada uma carga que demanda pouca corrente, a tensão de saída do módulo será mais elevada, tendendo à tensão de curto circuito. Por outro lado, se a carga conectada demanda muita corrente, a tensão tem a tendência de diminuir.

Na Figura 8 é ressaltado três pontos característicos dos módulos fotovoltaicos: Ponto de corrente de curto-circuito, ponto de tensão de circuito aberto e ponto de máxima potência.

A corrente de curto-circuito (I_{SC}) ocorre quando a tensão nos terminais do módulo é zero (terminais em curto-circuito). É o valor máximo de corrente do módulo.

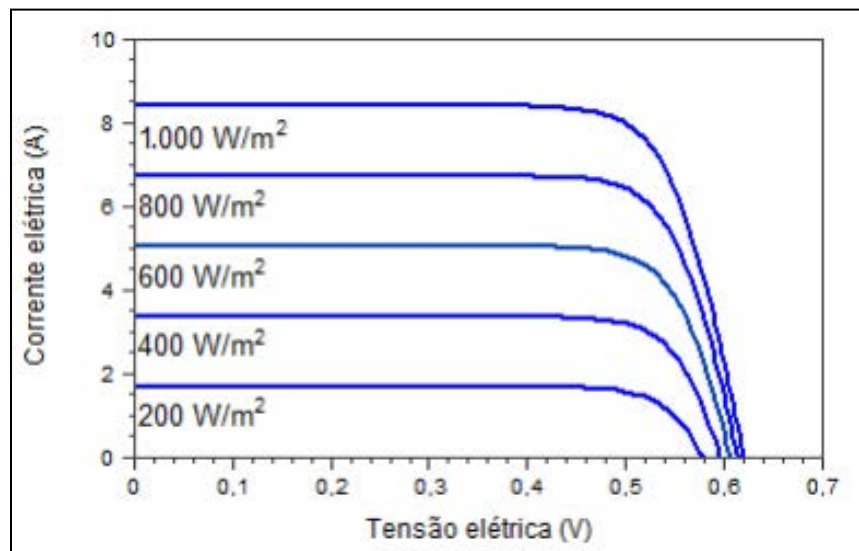
A tensão de circuito aberto (V_{OC}) é medida na saída do módulo quando não existe nada ligado a ele (terminais abertos). É a máxima tensão que o módulo pode fornecer.

O ponto ideal de operação é aquele em que o módulo fornece a potência máxima (P_{MP}), onde a produção de energia é maior.

Diferentemente de outras tecnologias, raramente os sistemas fotovoltaicos operam em condições nominais de funcionamento. Seu desempenho e curvas características dependem da intensidade de radiação incidente e da temperatura das células, ou seja, dependem diretamente das condições climáticas do local de operação do módulo. A seguir, é detalhada a influência desses parâmetros nas principais grandezas elétricas que caracterizam o módulo.

A Figura 9 mostra como a intensidade de radiação incidente influencia a curva I-V do módulo fotovoltaico, para uma mesma temperatura.

Figura 9 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C



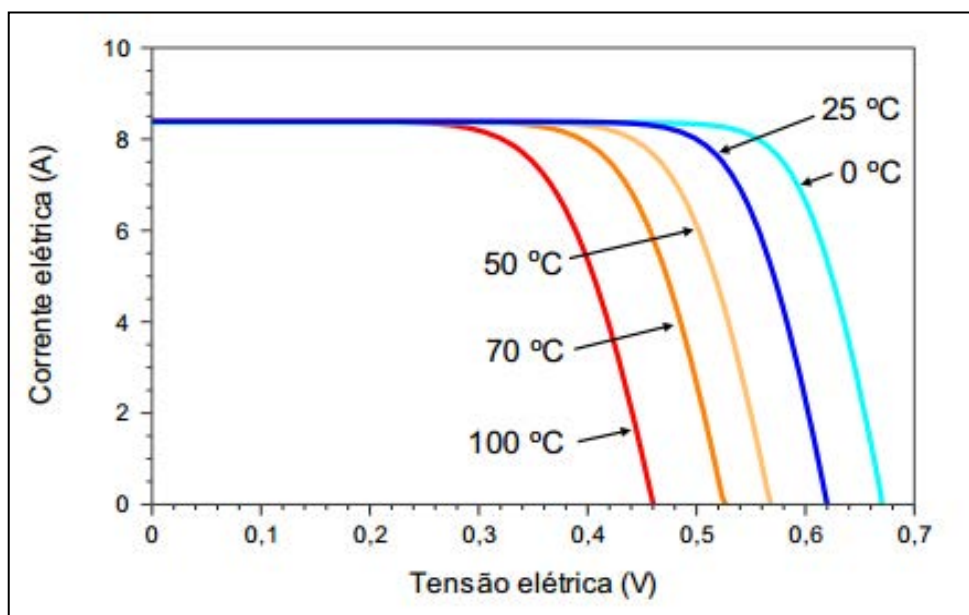
Fonte: (CRESESB, 2014)

Observou-se que a corrente elétrica gerada aumenta linearmente com o aumento da irradiação, enquanto que a tensão de circuito aberto permanece relativamente constante, apresentando um ligeiro aumento. Com uma intensidade de radiação baixa (pouca luz), a capacidade de geração de energia é reduzida.

A variação de temperatura de um módulo fotovoltaico exerce grande influência na tensão fornecida pelo mesmo, conseqüentemente, na potência fornecida. A corrente elétrica gerada sofre uma influência muito pequena.

A Figura 10 ilustra como a temperatura do painel influencia a curva I-V do módulo fotovoltaico, para uma mesma incidência. O aumento da temperatura faz com que a tensão elétrica diminua, embora a corrente permaneça constante.

Figura 10 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiância de 1000W/m^2 , espectro AM 1,5



Fonte: (CRESESB, 2014)

Observa-se que para uma mesma incidência solar, quando a temperatura do módulo aumenta, a potência fornecida diminui.

Para efeito de comparação entre diferentes módulos, foram adotadas condições padronizadas de teste do módulo (STC – Standard Test Conditions). Estas são condições padronizadas por organismos internacionais de certificação, e impostas a todos os fabricantes de módulos fotovoltaicos (HECKTHEUER, 2001).

O STC considera uma irradiância de 1000W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e Distribuição espectral AM 1,5 (comportamento médio da radiação solar ao longo de um ano em países temperados do hemisfério norte). Esta condição é produzida em laboratório.

Porém, geralmente quando em operação, os módulos não se encontram na condição padrão. Deste modo estabeleceu-se outra situação, a condição normal de operação (NOCT – Normal Operation Cell Temperature). Esta condição considera irradiância de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C , velocidade do vento de 1 m/s e distribuição espectral AM 1,5.

Os dados do painel fotovoltaico segundo ambas as condições devem estar contidas em sua folha de dados fornecida pelo fabricante.

O efeito de sombreamento produz consequências negativas no que diz respeito à eficiência e segurança de um módulo fotovoltaico. O sombreamento é, geralmente, de

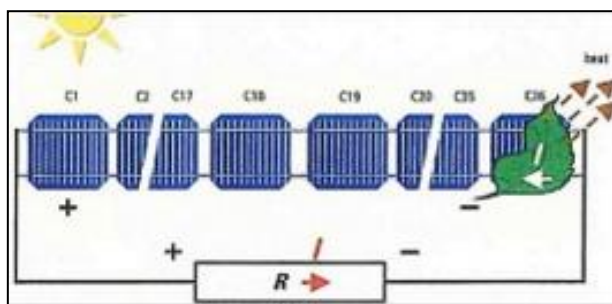
natureza temporária, resultante de fenômenos naturais. O efeito é resultado, por exemplo, de passagem de nuvens, presença de folhas e de sujeira (poeiras, dejetos de pássaros, etc.).

Quando a limpeza do módulo não é realizada naturalmente (devido à inclinação do painel e água de chuva), deve-se realizá-la para o melhor aproveitamento do sistema.

Quando conectadas em série, as células fotovoltaicas de um módulo dependem umas das outras para produzir corrente. O efeito de sombreamento ocorre quando no mínimo uma célula de um conjunto em série recebe menos luz que as demais, limitando a corrente de todo o conjunto e conseqüentemente, o sistema produz quantidade menor de energia.

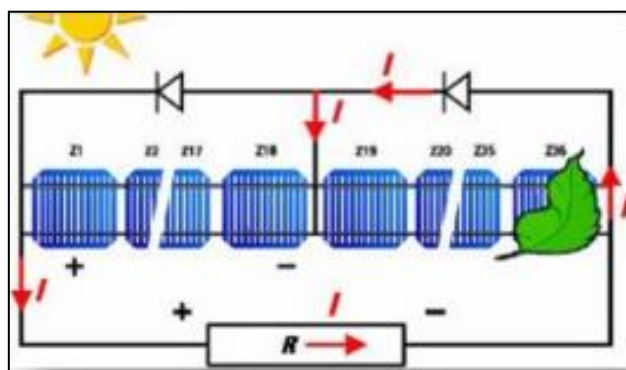
Para minimizar o efeito do sombreamento, os fabricantes adicionam diodos *bypass* ligados em paralelo com as células. Como o custo para adicionar um diodo para cada célula é muito alto, os fabricantes usam um diodo para um grupo com certo número de células. As Figuras 11 e 12 mostram um conjunto de células trabalhando sem o diodo e um trabalhando com o diodo.

Figura 11 - Módulo fotovoltaico com sombra – convertendo eletricidade em calor



Fonte: (BlueSol)

Figura 12 - Módulo fotovoltaico com sombra - Com diodo *bypass*



Fonte: (BlueSol)

O diodo entra em funcionamento somente quando ocorre o fenômeno de sombreamento, desviando a corrente da célula problemática. Quando não ocorre o efeito, o diodo não tem função.

Outra possível consequência do fenômeno é o aumento de temperatura das células. Sendo uma delas sob efeito de sombreamento, esta passará a estar inversamente polarizada (pode apresentar tensão elevada), agindo como uma “resistência elétrica”. Esta situação gera a elevação de temperatura, devido à conversão de energia elétrica em calor, podendo gerar a destruição do módulo (PORTAL ENERGIA, 2015).

1.6 OBJETIVO

O objetivo do trabalho foi analisar o rendimento elétrico-solar de dois painéis fotovoltaicos de células de silício policristalino da Suntech, com dez anos de uso, e comparar com os valores encontrados na literatura. A partir do levantamento dos dados e do estudo dos mesmos, há possibilidade de analisar a diminuição de rendimento conforme a vida útil dos painéis.

Este trabalho tem como principal objetivo salientar as vantagens de utilizar a energia solar fotovoltaica para produzir eletricidade e mostrar como esta fonte de energia pode e deve gerar mudanças na matriz energética mundial, e em especial, na matriz energética brasileira.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de graduação é apresentado em quatro capítulos.

O primeiro capítulo apresentou a energia fotovoltaica, dando uma breve colocação em um contexto histórico e mundial. Ressalta a importância da energia fotovoltaica nesse contexto e a tendência de crescimento no Brasil nos próximos anos. Este capítulo também cita o funcionamento e as características das células fotovoltaicas, além do objetivo que este trabalho pretende atingir.

O segundo capítulo foi voltado para apresentação do equipamento estudado, dos aparelhos utilizados e do procedimento realizado no estudo. Com os dados, pode ser analisado

o comportamento do equipamento segundo as condições de ensaio, a partir de considerações e cálculos mostrados no final do capítulo.

No terceiro capítulo são colocados os resultados e realizadas as observações devidas para chegar ao objetivo. Nesta etapa foram utilizados gráficos e Tabelas para melhor organização e entendimento dos dados obtidos.

No quarto capítulo apresenta-se a conclusão, sintetizando todo o conteúdo pesquisado, desde a análise inicial até o alcance dos objetivos. Também apresenta sugestões para trabalhos futuros.

O quinto capítulo apresenta a bibliografia utilizada no trabalho.

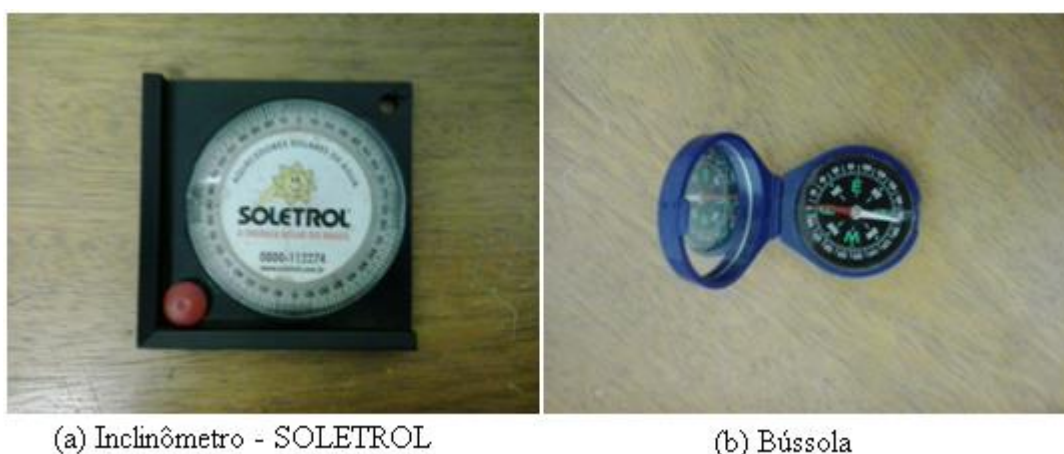
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A pesquisa foi realizada no Centro de Energias Renováveis da Universidade estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá. A cidade apresenta uma latitude de 22°48 Sul, longitude de 45°11 Oeste.

Foram analisados dois painéis fotovoltaicos de silício policristalino fabricados pela Suntech modelo STP022-12/D. Eles foram instalados com face voltada para o norte geográfico e com ângulo de inclinação de 32°. Para auxiliar a instalação e a orientação dos painéis, gerando a melhor captação dos raios solares, foram utilizados um inclinômetro e uma bússola, como pode ser visto na Figura 13.

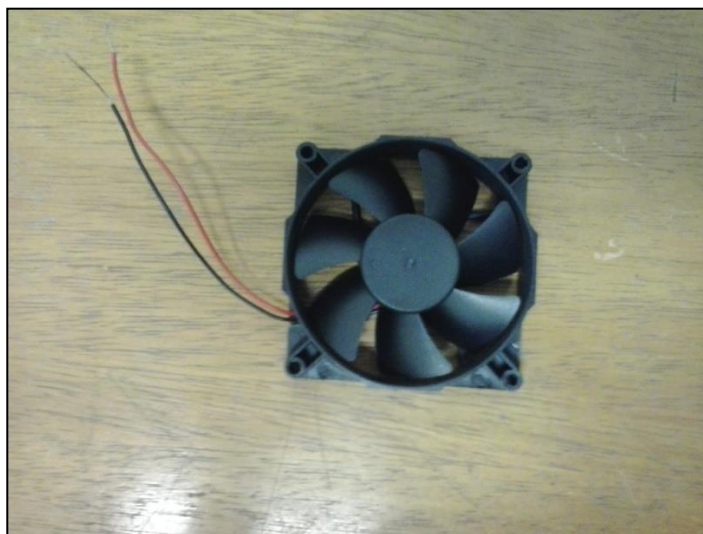
Figura 13 - Equipamentos auxiliares: (a) Inclinômetro, (b) Bússola



Fonte: Autor

Utilizou-se ventiladores (collers) ligados aos painéis como simulador de carga, sendo todos de tensão 12V e conectados em paralelo. Os ventiladores apresentam valores diferentes de corrente: 0,12A; 0,13A; 0,14A; 0,22A; 0,23A; 0,29A. Um dos coolers utilizados é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Carga utilizada: Cooler



Fonte: Autor

O método consiste na coleta de dados em intervalos de 15 minutos, entre às 09h30min e 14h30min. Realizou-se medições de incidência de radiação solar, tensão em aberto e tensão com carga, corrente com carga, temperatura do painel e temperatura ambiente. Utilizou-se como instrumentos de medição um medidor de incidência solar, um multímetro digital e um termômetro.

2.2 ESPECIFICAÇÕES DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÕES

2.2.1 Medidor de incidência de radiação solar MES-100

O medidor de incidência solar (ou medidor de energia solar) MES-100 indica o nível de incidência de radiação solar em determinada direção. O medidor utilizado é ilustrado na Figura 15 e é posicionado perpendicularmente ao painel solar, de forma a fornecer a leitura de incidência recebida pelo painel. O medidor possui display de cristal líquido de quatro dígitos, escala de 2000 W/m², precisão de ± 10 W/m² e opera em temperaturas entre 0 e 50°C.

Figura 15 - Medidor de incidência de radiação solar MES-100



Fonte: Autor

2.2.2 Multímetro Digital 8522

O multímetro digital Brasfort - Ref. 8522(ou multiteste) foi utilizado para medir a tensão dos terminais em aberto e com carga, e medir a corrente dos terminais com carga. A Figura 16 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 16– Multímetro digital Brasfort (8522)



Fonte: Autor

Para as medidas de tensão foi utilizada a escala de tensão contínua de 200V, com precisão de 100mV, e para as medidas de corrente foi utilizada a escala de corrente contínua de 10A. O medidor possui display de cristal líquido de 4 dígitos.

2.2.3 Termômetro digital tipo espeto

O Termômetro digital (Tipo espeto) Instrutherm modelo TE-400 foi utilizado para medir as temperaturas ambiente e da face do painel exposta ao sol. O instrumento é mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Medidor de Temperatura: termômetro digital de tipo espeto



Fonte: Autor

O termômetro possui display de cristal líquido, escala de -50 a 200°C (ou -58 a 392°F), precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre -10 e 100°C (temperaturas do trabalho dentro deste intervalo) e resolução $0,1^{\circ}\text{C}$.

2.3 OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Utilizou-se dois painéis fotovoltaicos de silício policristalino fabricados pela Suntech modelo STP022-12/D, ilustrados na Figura 18.

Figura 18–Painel fotovoltaico policristalino fabricado pela Suntech modelo STP022-12/D



Fonte: Autor

A Tabela 1 apresenta as informações sobre os painéis estudados

Tabela 1 - Características elétricas em STC do módulo fotovoltaico STP022-12/D

P _m [W]	V _{mp} [V]	I _{mp} [A]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]
22	16,8	1,31	21	1,61

Fonte: Autor

Sendo P_m a máxima potência; V_{mp} e I_{mp} , tensão e corrente quando a potência é máxima, respectivamente; V_{oc} a tensão de circuito aberto; e I_{sc} corresponde a corrente de curto-circuito.

2.4 OS EXPERIMENTOS

Para o estudo de rendimento os painéis foram submetido a uma carga fixa com 6 coolers, conforme item 2.1, sob temperaturas ambiente variando de 19°C a 36,8°C. Os experimentos foram realizados entre os dias 11 de junho de 2015 e 17 de setembro de 2015.

Os dados foram obtidos para calcular o rendimento elétrico dos painéis. Foi possível fazer uma análise relacionando a incidência de radiação solar com a potência gerada pelos painéis; com as temperaturas ambiente e do painel; e com o rendimento do painel fotovoltaico.

Os experimentos para cada painel foram realizados em quatro situações diferentes: dia parcialmente nublado, dia com poucas nuvens, dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas (22,4°C – 27°C) e dia ensolarado com temperaturas ambiente elevadas (24,9°C – 34,5°C).

Também foi realizada uma comparação em cima da incidência de radiação solar e do horário da medição, entre as situações estudadas, para cada painel.

2.5 CÁLCULOS DO RENDIMENTO ELÉTRICO - SOLAR

Inicialmente calcula-se a área dos painéis fotovoltaicos que converte a radiação solar em energia. Neste caso houve uma pequena diferença de área, apresentada na equação 1. Portanto os painéis foram denominados Pannel 1 e Pannel 2.

$$A = b \times h(1)$$

onde:

A = Área do painel [m²];

b = Largura do painel [m];

h = Altura do painel [m].

A largura do Pannel 1 é 0,378m e a altura é 0,518m, e a largura do Pannel 2 é 0,38 e a altura é 0,52m. De acordo com a equação 1, a área dos painéis é:

$$A \text{ área do painel 1 } \acute{e} A1 = 0,378 \times 0,518 = 0,195804 \text{ m} .$$

A área do painel 2 é $A_2 = 0,38 \times 0,52 = 0,1976 \text{ m}^2$.

A partir das medições de corrente e tensão dos terminais com carga, calcula-se a potência gerada pelo painel fotovoltaico, de acordo com a equação 2:

$$P = V \times I \quad (2)$$

onde:

P = Potência gerada [W];

V = Tensão [V];

I = Corrente [A].

Divide-se o resultado da equação 2 pela área do painel fotovoltaico, obtendo um valor de potência gerada por metro quadrado de painel.

O valor do rendimento do painel fotovoltaico é definido pela equação 3:

$$\eta = \frac{P}{G \times A} \quad (3)$$

onde:

η = Rendimento elétrico do painel [%];

G = Incidência de Radiação Solar [W/m^2];

P = Potência gerada pelo painel [W];

A = Área do Painel [m^2].

Conforme Tabela 1, em STC, o rendimento do painel 1 é:

$$\eta_1 = \frac{P}{I \times A_1} = \frac{22}{1000 \times 0,195804} \times 100\% = 11,23\%$$

E do painel 2 é:

$$\eta_2 = \frac{P}{I \times A_2} = \frac{22}{1000 \times 0,1976} \times 100\% = 11,13\%$$

3 RESULTADOS

Conforme exposto no capítulo 2, os resultados dos experimentos serão ilustrados em quatro situações distintas. Para cada situação serão expostos os dados obtidos de cada painel e três curvas ilustrando o comportamento do mesmo.

3.1 DIA PARCIALMENTE NUBLADO

O dia parcialmente nublado foi o que mais ocorreu variações de incidência solar. A temperatura ambiente variou entre 27,6 e 33,1°C. Os dados obtidos estão nas tabelas 2 e 3:

Tabela 2 - Dados obtidos em um dia parcialmente nublado para o painel 1

<i>Horário</i>	<i>Incidência (W/m²)</i>	<i>Tensão com carga (V)</i>	<i>Corrente (A)</i>	<i>Tamb (°C)</i>	<i>Tpainel (°C)</i>	<i>Potência gerada (W)</i>	<i>Potência gerada / Área (W/m²)</i>	<i>Rendimento (%)</i>
10:00	793	13,5	1,22	27,6	44,4	16,47	84,11	10,61%
10:15	927	14,7	1,3	28,4	40,7	19,11	97,60	10,53%
10:30	870	13,9	1,26	28,7	47,6	17,514	89,45	10,28%
10:45	937	14,3	1,27	29,7	45,4	18,161	92,75	9,90%
11:00	831	14,3	1,23	29,6	45,2	17,589	89,83	10,81%
11:15	905	14,3	1,23	29,8	48,4	17,589	89,83	9,93%
11:30	960	14,6	1,29	29,8	44,6	18,834	96,19	10,02%
11:45	966	14,5	1,28	31,6	49,8	18,56	94,79	9,81%
12:00	967	14,6	1,27	30,4	54,3	18,542	94,70	9,79%
12:15	994	14,7	1,29	31,7	56,2	18,963	96,85	9,74%
12:30	190	3,4	0,32	31,5	37,7	1,088	5,56	2,92%
12:45	294	4,5	0,44	32	37	1,98	10,11	3,44%
13:00	231	3,9	0,37	32	42,7	1,443	7,37	3,19%
13:15	236	4	0,38	31,4	42	1,52	7,76	3,29%
13:30	942	14,4	1,31	33,1	48,8	18,864	96,34	10,23%
13:45	192	3,4	0,34	32,7	39,4	1,156	5,90	3,07%
14:00	792	12,7	1,13	32,2	44,2	14,351	73,29	9,25%
14:15	121	3,1	0,25	31	36,1	0,775	3,96	3,27%
14:30	729	11,9	1,05	31,7	43,6	12,495	63,81	8,75%

Fonte: Autor

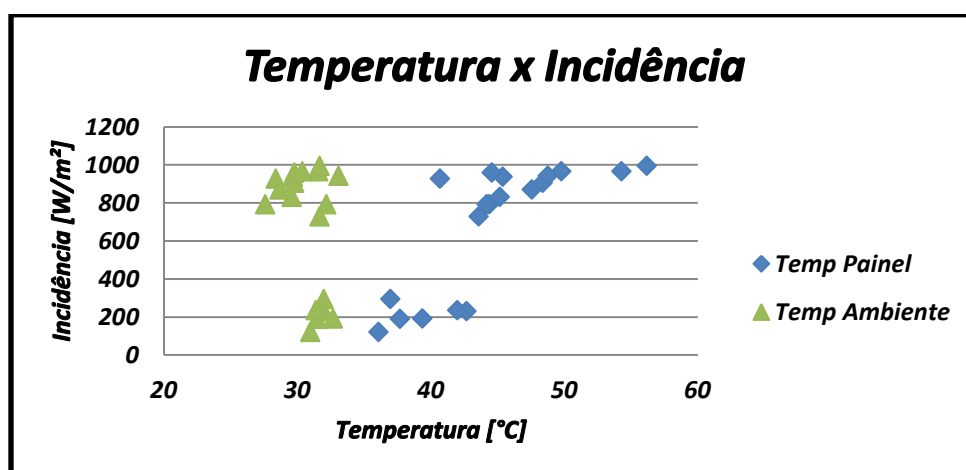
Tabela 3 - Dados obtidos em um dia parcialmente nublado para o painel 2

Horário	Incidência (W/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (W)	Potência gerada / Área (W/m ²)	Rendimento (%)
10:00	790	13,3	1,22	27,6	44,4	16,226	82,12	10,39%
10:15	935	14,1	1,27	28,4	40,7	17,907	90,62	9,69%
10:30	875	13,7	1,25	28,7	47,6	17,125	86,66	9,90%
10:45	931	14,2	1,24	29,7	45,4	17,608	89,11	9,57%
11:00	857	13,9	1,2	29,6	45,2	16,68	84,41	9,85%
11:15	913	14	1,2	29,8	48,4	16,8	85,02	9,31%
11:30	872	14,1	1,27	29,8	44,6	17,907	90,62	10,39%
11:45	972	14,1	1,2	31,6	49,8	16,92	85,63	8,81%
12:00	932	14	1,23	30,4	54,3	17,22	87,15	9,35%
12:15	945	13,8	1,19	31,7	56,2	16,422	83,11	8,79%
12:30	170	3,2	0,32	31,5	37,7	1,024	5,18	3,05%
12:45	287	4,1	0,45	32	37	1,845	9,34	3,25%
13:00	1070	14,9	1,35	32	42,7	20,115	101,80	9,51%
13:15	945	14,2	1,36	31,4	42	19,312	97,73	10,34%
13:30	924	14,2	1,21	33,1	48,8	17,182	86,95	9,41%
13:45	218	4,1	0,37	32,7	39,4	1,517	7,68	3,52%
14:00	785	12,4	1,15	32,2	44,2	14,26	72,17	9,19%
14:15	127	2,8	0,24	31	36,1	0,672	3,40	2,68%
14:30	705	11,9	1,07	31,7	43,6	12,733	64,44	9,14%

Fonte: Autor

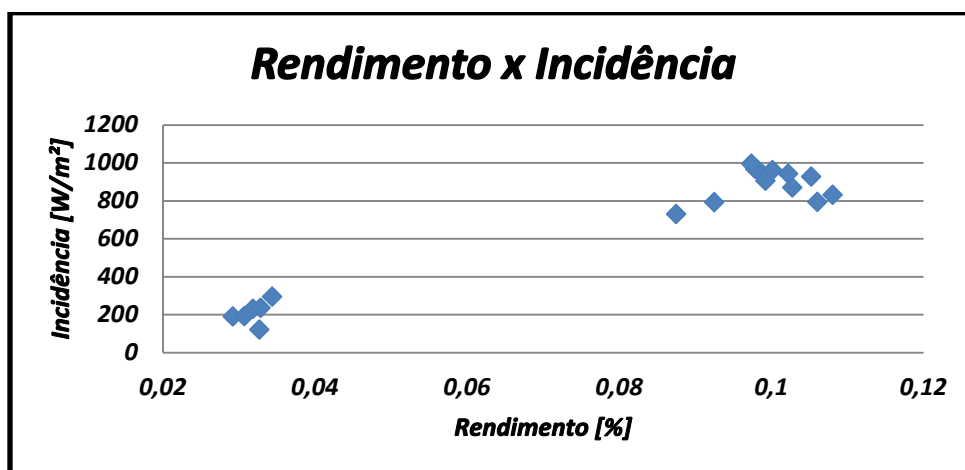
A partir das medições, foi possível calcular a potência gerada pelo painel fotovoltaico, a potência gerada por metro quadrado de painel e o rendimento. A partir das Tabelas 2 e 3 foram levantados os gráficos ilustrados pelas Figuras 19, 20, 21, 22, 23 e 24 relacionando incidência de radiação solar, temperaturas ambiente e do painel e, rendimento do painel.

Figura 19–Situação 1 - Painel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



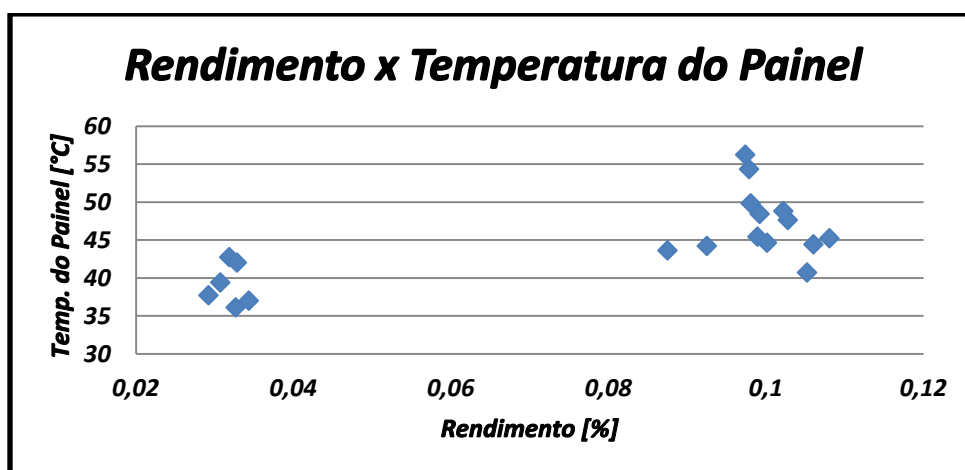
Fonte: Autor

Figura 20 - Situação 1 - Painel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



Fonte: Autor

Figura 21 - Situação 1 - Painel 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico

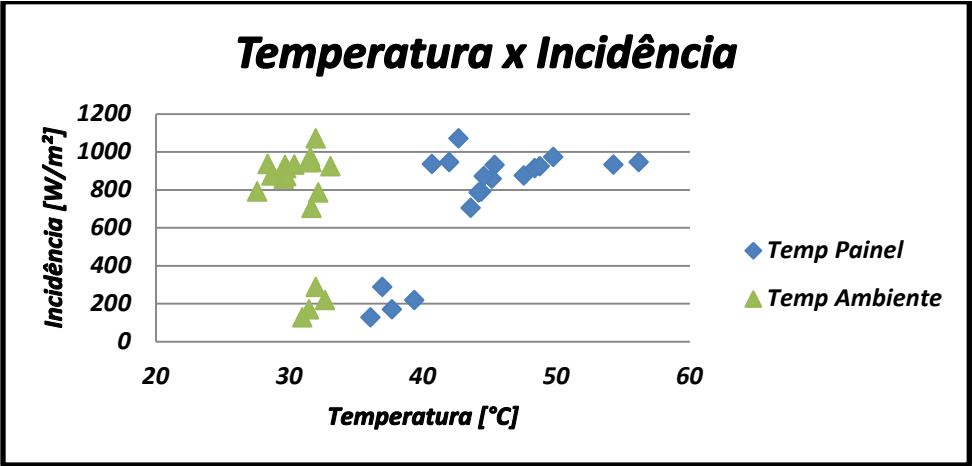


Fonte: Autor

Através da Tabela 2, observa-se valores de potência gerada variando entre 0,775W para incidência de 121W/m² e 19,11W para incidência de 927W/m². Observa-se que a maior temperatura do painel, de 56,2°C, foi atingida quando apresentada a maior incidência, de 994W/m².

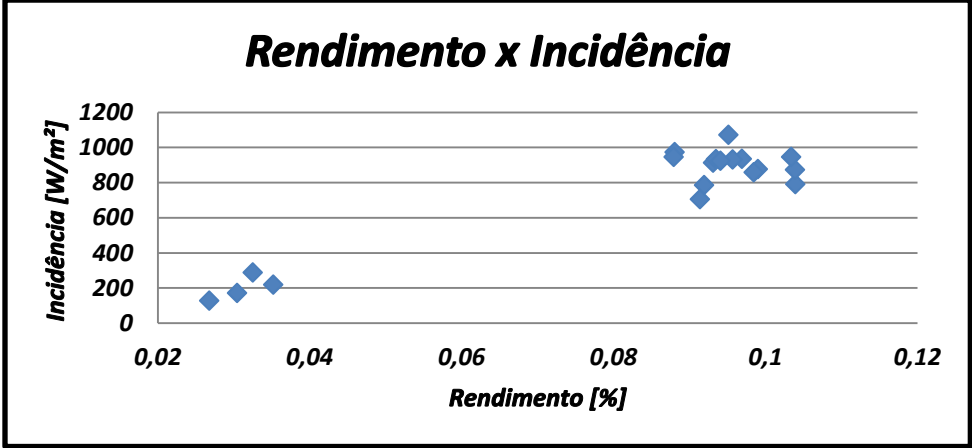
Dividindo-se em duas famílias a Figura 20, observamos que para valores de incidência abaixo de 300W/m², a média de rendimento é de 3,2%, enquanto que para valores de incidência acima de 700W/m², a média de rendimento é de 9,97%.

Figura 22 - Situação 1 – Pannel 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



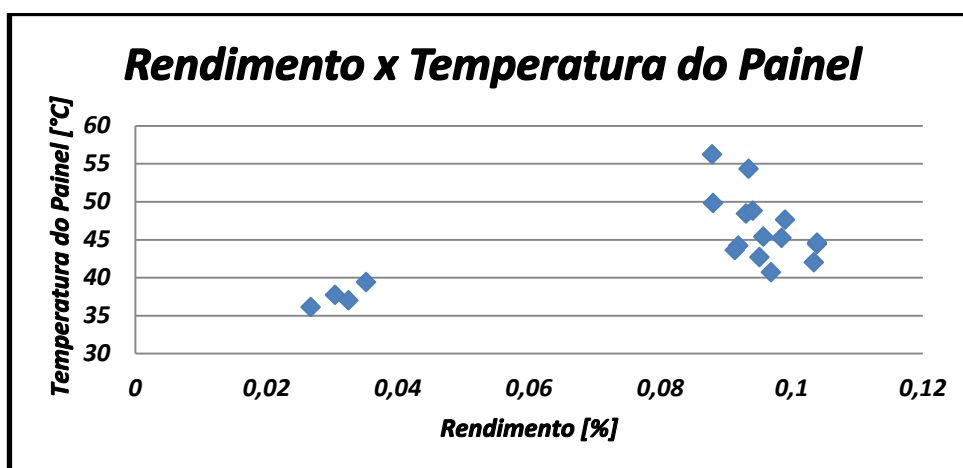
Fonte: Autor

Figura 23 - Situação 1 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



Fonte: Autor

Figura 24 - Situação 1 - Painel 2: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico



Fonte: Autor

Através da Tabela 3, observa-se valores de potência gerada variando entre 0,672W para incidência de 127W/m² e 20,115W para incidência de 1070W/m². Observa-se que a maior temperatura do painel, de 56,2°C, foi atingida quando apresentada a incidência de 945W/m².

Da Figura 23, observamos que para valores de incidência abaixo de 300W/m², a média de rendimento é de 3,13%, enquanto que para valores de incidência acima de 700W/m², a média de rendimento é de 9,58%.

Para os dois painéis, a temperatura ambiente não demonstra uma relação direta com a incidência. No entanto, a temperatura do painel apresenta uma tendência de crescimento na medida em que recebe maior incidência. À medida que aumenta a temperatura do painel fotovoltaico há uma tendência de perda de rendimento do mesmo.

3.2 DIA COM POUCAS NUVENS

O dia com poucas nuvens apresentou temperaturas ambiente elevadas, chegando a 36,8°C. Os dados obtidos estão nas Tabelas 4 e 5:

Tabela 4 - Dados obtidos em um dia com poucas nuvens para o painel 1

Horário	Incidência (w/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (w)	Potência gerada / Área (w/m ²)	Rendimento (%)
09:45	756	12,7	1,19	30,7	44,8	15,113	77,18	10,21%
10:00	792	13,4	1,22	31,6	46	16,348	83,49	10,54%
10:15	820	12,7	1,27	32,2	47,1	16,129	82,37	10,05%
10:30	884	13,9	1,29	33,2	50,6	17,931	91,58	10,36%
10:45	946	14,4	1,31	32,8	50,6	18,864	96,34	10,18%
11:00	964	14,5	1,3	33,4	50,2	18,85	96,27	9,99%
11:15	965	14,4	1,31	34,2	55	18,864	96,34	9,98%
11:30	946	14	1,28	33,8	54,5	17,92	91,52	9,67%
11:45	942	14,2	1,3	34,6	51,2	18,46	94,28	10,01%
12:00	796	13	1,22	34,9	52,6	15,86	81,00	10,18%
12:15	979	14,7	1,31	35	53,6	19,257	98,35	10,05%
12:30	1022	15,5	1,3	36,2	58	20,15	102,91	10,07%
12:45	428	6,4	0,68	35,3	44,6	4,352	22,23	5,19%
13:00	984	15	1,31	36	50,74	19,65	100,36	10,20%
13:15	941	14,4	1,31	35,5	57,2	18,864	96,34	10,24%
13:30	872	13,7	1,26	36,2	52,7	17,262	88,16	10,11%
13:45	836	12,8	1,19	36,8	60	15,232	77,79	9,31%
14:00	786	12,7	1,18	36,2	56	14,986	76,54	9,74%
14:15	738	12,3	1,12	36	53,7	13,776	70,36	9,53%
14:30	720	12,4	1,1	35	52	13,64	69,66	9,68%

Fonte: Autor

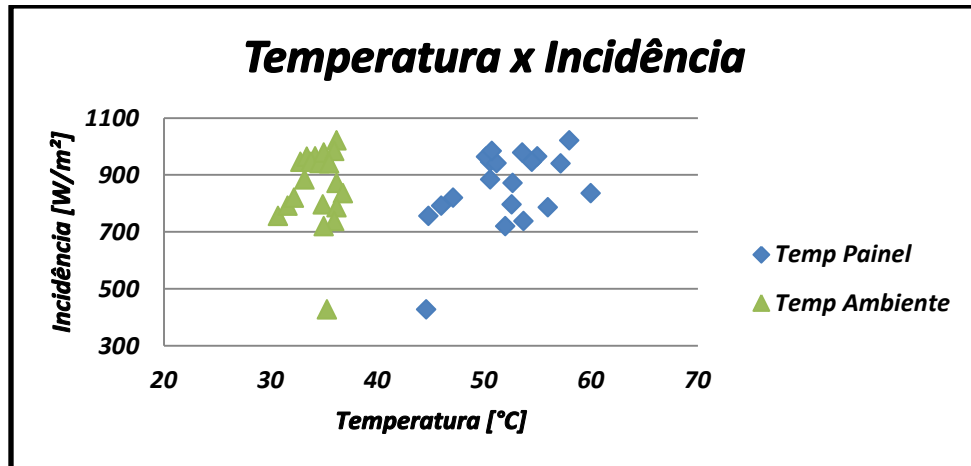
Tabela 5 -Dados obtidos em um dia com poucas nuvens para o painel 2

Horário	Incidência (w/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (w)	Potência gerada / Área (w/m ²)	Rendimento (%)
09:45	780	13,3	1,22	30,7	44,8	16,226	82,12	10,53%
10:00	786	13,2	1,2	31,6	46	15,84	80,16	10,20%
10:15	881	13,4	1,25	32,2	47,1	16,75	84,77	9,62%
10:30	923	13,7	1,26	33,2	50,6	17,262	87,36	9,46%
10:45	845	13	1,27	32,8	50,6	16,51	83,55	9,89%
11:00	936	13,7	1,25	33,4	50,2	17,125	86,66	9,26%
11:15	961	13,9	1,26	34,2	55	17,514	88,63	9,22%
11:30	954	13,7	1,26	33,8	54,5	17,262	87,36	9,16%
11:45	943	13,9	1,26	34,6	51,2	17,514	88,63	9,40%
12:00	894	13,7	1,25	34,9	52,6	17,125	86,66	9,69%
12:15	990	14,2	1,26	35	53,6	17,892	90,55	9,15%
12:30	1030	14,2	1,31	36,2	58	18,602	94,14	9,14%
12:45	468	7,5	0,75	35,3	44,6	5,625	28,47	6,08%
13:00	887	14	1,23	36	50,74	17,22	87,15	9,82%
13:15	932	13,6	1,28	35,5	57,2	17,408	88,10	9,45%
13:30	822	13,3	1,2	36,2	52,7	15,96	80,77	9,83%
13:45	821	13,1	1,21	36,8	60	15,851	80,22	9,77%
14:00	770	12,6	1,17	36,2	56	14,742	74,61	9,69%
14:15	722	12,6	1,12	36	53,7	14,112	71,42	9,89%
14:30	694	12,4	1,1	35	52	13,64	69,03	9,95%

Fonte: Autor

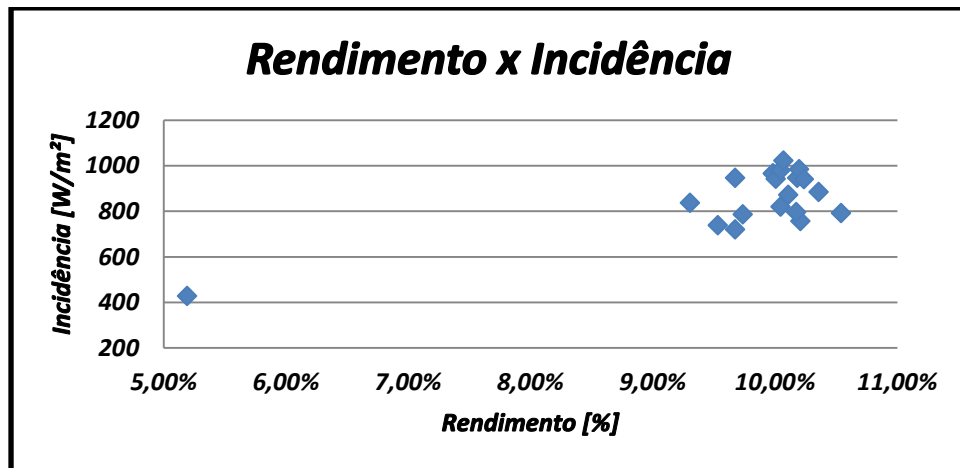
Com as Tabelas 4 e 5 foram traçados os gráficos ilustrados pelas Figuras 25, 26, 27, 28, 29 e 30, relacionando incidência de radiação solar, temperaturas ambiente e do painel e, rendimento do painel fotovoltaico.

Figura 25 - Situação 2 - Pannel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



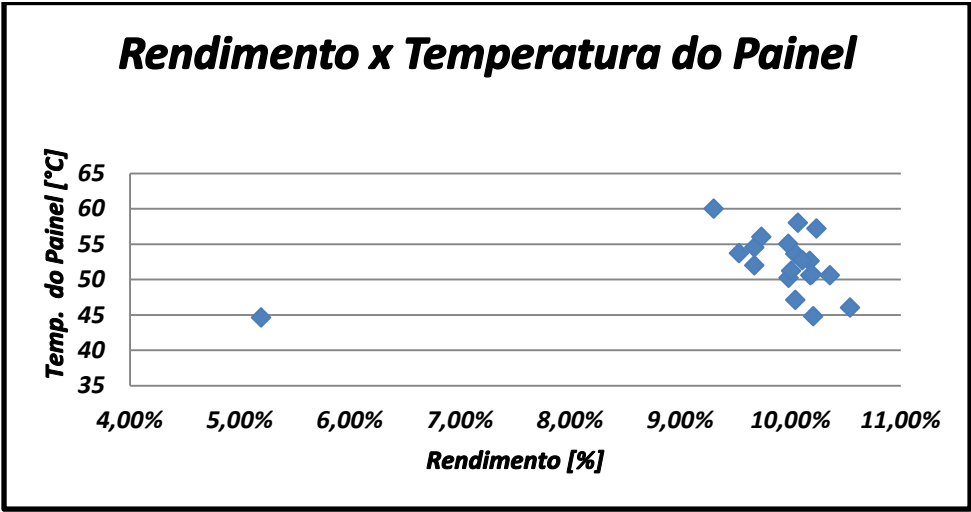
Fonte: Autor

Figura 26 - Situação 2 - Pannel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



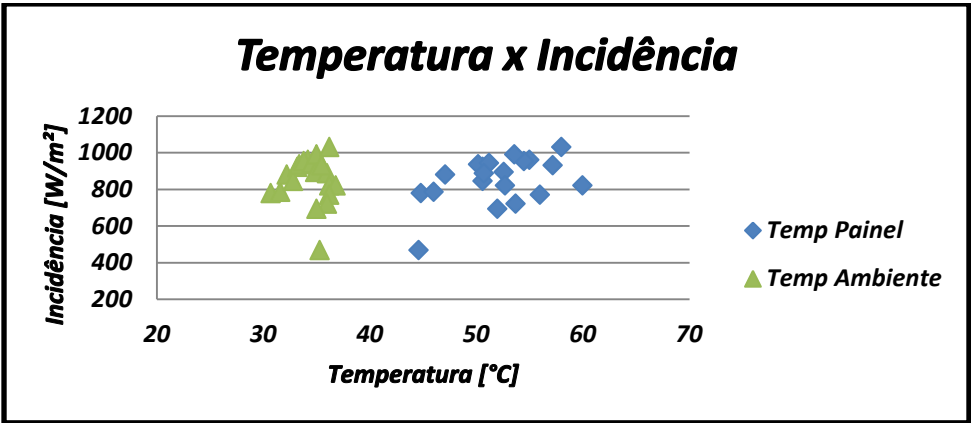
Fonte: Autor

Figura 27 - Situação 2 - Painei 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico



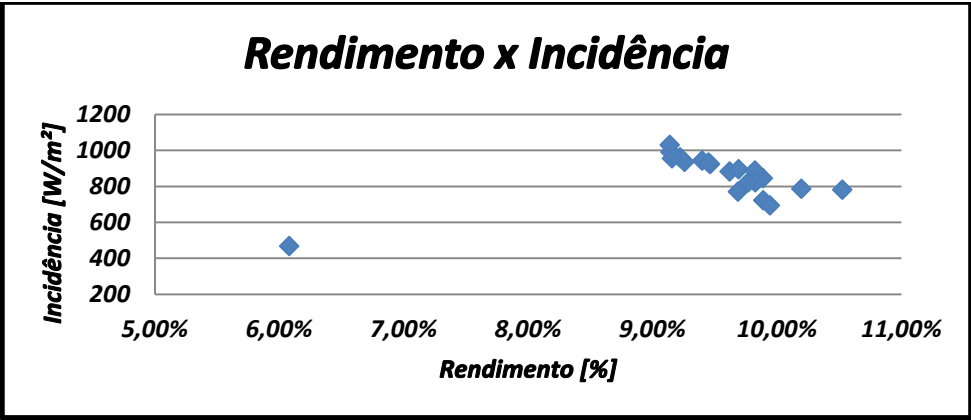
Fonte: Autor

Figura 28 - Situação 2 - Painei 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



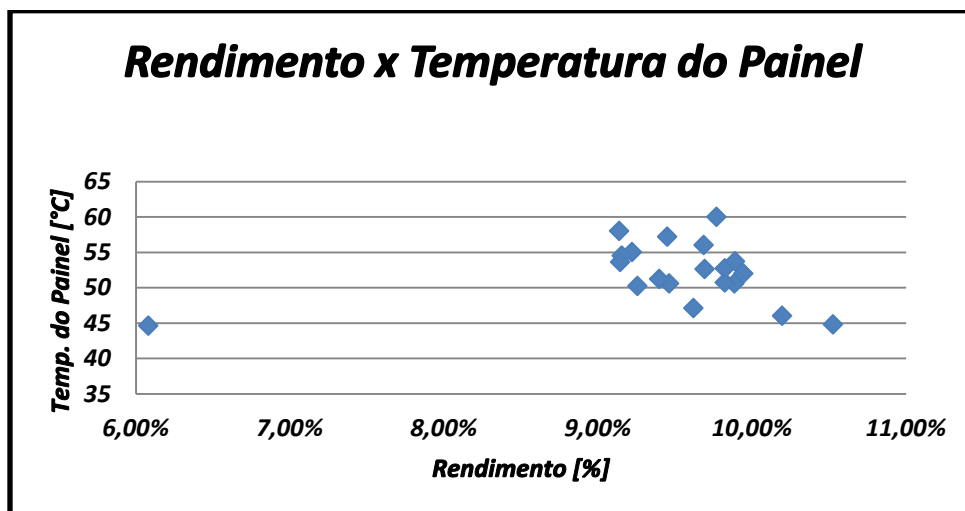
Fonte: Autor

Figura 29 - Situação 2 - Painei 2: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



Fonte: Autor

Figura 30 - Situação 2 - Paineis 2: Gráfico Rendimento X Temperatura do Paineis



Fonte: Autor

Pelas Figuras, observou-se que apenas um ponto apresentou rendimento menor para cada painel, onde a temperatura dos painéis foi a menor, 44,6°C. Neste ponto o rendimento foi 5,19% para o painel 1 e 6,08% para o painel 2. Analisando as tabelas 4 e 5, a potência gerada ficou abaixo de 6W e a incidência abaixo de 500W/m². Excluindo este ponto, a média de rendimento do painel 1 ficou em 10% e do painel 2 em 9,64%.

Novamente a temperatura ambiente não apresentou uma relação direta com a incidência, já a temperatura do painel apresentou a tendência de crescimento na medida em que recebeu maiores incidências. Com o aumento da temperatura do painel, observou-se uma tendência de diminuição do valor de rendimento do mesmo.

3.3 DIA ENSOLARADO COM TEMPERATURAS AMBIENTE AMENAS

Nesta situação, durante o horário de medições, o tempo permaneceu ensolarado e a temperatura ambiente máxima foi de 27°C. Os dados obtidos estão nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas para o painel 1

Horário	Incidência (w/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (w)	Potência gerada / Área (w/m ²)	Rendimento (%)
09:30	720	12,4	1,15	22,4	38,2	14,26	72,83	10,11%
09:45	797	13	1,18	22,7	39,6	15,34	78,34	9,83%
10:00	862	13,8	1,23	23,1	42,7	16,974	86,69	10,06%
10:15	883	13,9	1,25	24,4	43,3	17,375	88,74	10,05%
10:30	984	14,6	1,31	25,1	45,5	19,126	97,68	9,93%
10:45	959	15	1,31	24,3	41	19,65	100,36	10,46%
11:00	1008	15,1	1,31	25,2	50,5	19,781	101,02	10,02%
11:15	1052	16	1,31	25,2	45,7	20,96	107,05	10,18%
11:30	1060	15,6	1,29	26	47,7	20,124	102,78	9,70%
11:45	1076	16,6	1,3	24,6	43,2	21,58	110,21	10,24%
12:00	1044	15,7	1,27	26,7	47,6	19,939	101,83	9,75%
12:15	1002	15,4	1,27	26,2	46,4	19,558	99,89	9,97%
12:30	1001	15,9	1,21	25,6	48	19,239	98,26	9,82%
12:45	956	15,4	1,24	25,5	47,5	19,096	97,53	10,20%
13:00	935	15	1,25	26,5	50,2	18,75	95,76	10,24%
13:15	913	15	1,22	26,2	42,7	18,3	93,46	10,24%
13:30	891	14,2	1,2	26,2	45,2	17,04	87,03	9,77%
13:45	848	14,4	1,19	26,2	42,7	17,136	87,52	10,32%
14:00	809	14,4	1,15	27	43,2	16,56	84,57	10,45%
14:15	755	14,1	1,09	26,2	40,4	15,369	78,49	10,40%
14:30	719	13,5	1,11	25,5	40,6	14,985	76,53	10,64%

Fonte: Autor

Tabela 7 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas para o painel 2

Horário	Incidência (w/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (w)	Potência gerada / Área (w/m ²)	Rendimento (%)
09:30	753	12,8	1,17	22,4	38,2	14,976	75,79	10,07%
09:45	786	13	1,16	22,7	39,6	15,08	76,32	9,71%
10:00	882	13,7	1,21	23,1	42,7	16,577	83,89	9,51%
10:15	890	13,5	1,21	24,4	43,3	16,335	82,67	9,29%
10:30	1016	14,4	1,26	25,1	45,5	18,144	91,82	9,04%
10:45	981	14,4	1,27	24,3	41	18,288	92,55	9,43%
11:00	999	14,5	1,23	25,2	50,5	17,835	90,26	9,03%
11:15	1030	15,2	1,31	25,2	45,7	19,912	100,77	9,78%
11:30	1050	14,7	1,19	26	47,7	17,493	88,53	8,43%
11:45	1040	15,2	1,22	24,6	43,2	18,544	93,85	9,02%
12:00	1071	14,8	1,19	26,7	47,6	17,612	89,13	8,32%
12:15	1000	14,6	1,2	26,2	46,4	17,52	88,66	8,87%
12:30	986	15,2	1,11	25,6	48	16,872	85,38	8,66%
12:45	967	15,5	1,19	25,5	47,5	18,445	93,35	9,65%
13:00	943	14,3	1,19	26,5	50,2	17,017	86,12	9,13%
13:15	900	14,1	1,19	26,2	42,7	16,779	84,91	9,43%
13:30	852	14	1,18	26,2	45,2	16,52	83,60	9,81%

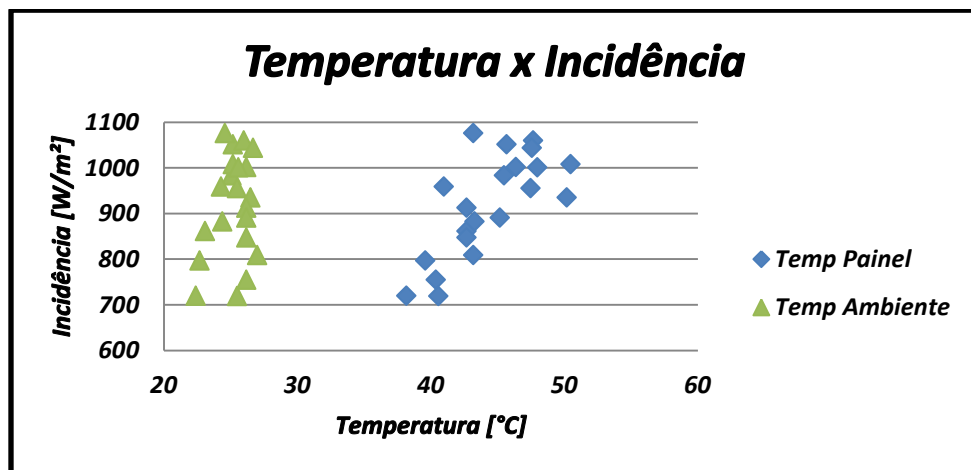
Tabela 8 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas para o painel 2

13:45	843	14	1,16	26,2	42,7	16,24	82,19	9,75%
14:00	781	14,1	1,15	27	43,2	16,215	82,06	10,51%
14:15	732	13,8	1,08	26,2	40,4	14,904	75,43	10,30%
14:30	704	13,6	1,05	25,5	40,6	14,28	72,27	10,27%

Fonte: Autor

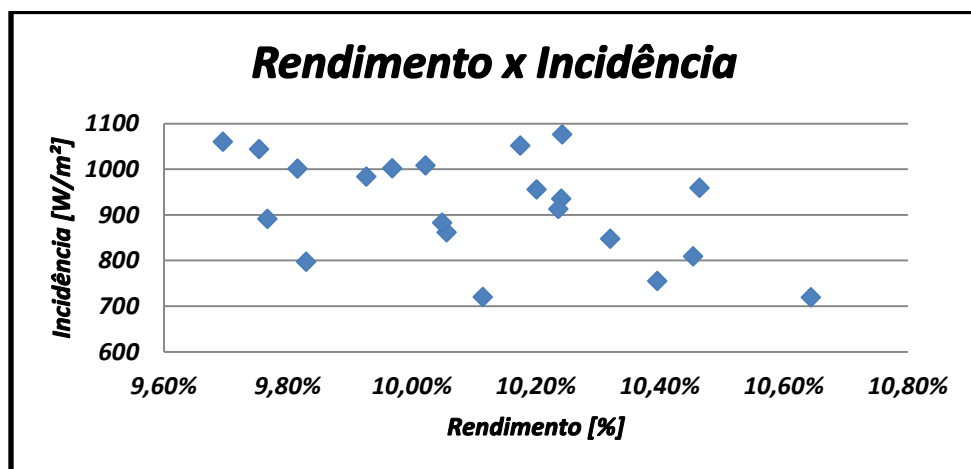
Com as Tabelas 6 e 7 foram levantados os gráficos ilustrados pelas Figuras 30, 31, 32, 33, 34 e 35 relacionando incidência de radiação solar, temperaturas ambiente e do painel e, rendimento do painel fotovoltaico.

Figura 31 - Situação 3 - Painel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



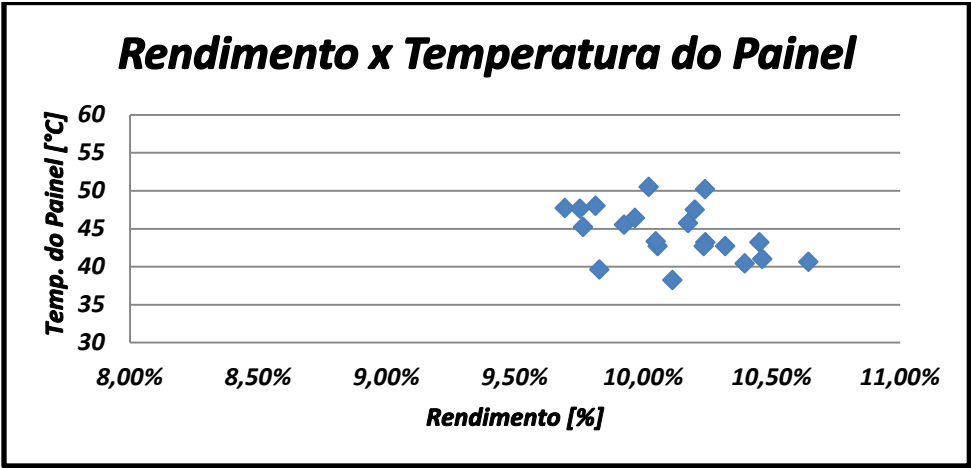
Fonte: Autor

Figura 32 - Situação 3 - Painel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



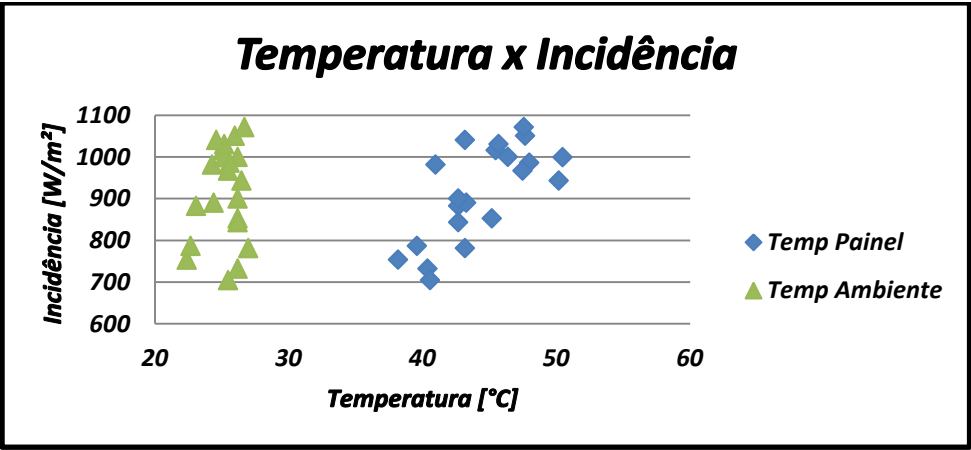
Fonte: Autor

Figura 33 - Situação 3 - Paine1 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do paine1 fotovoltaico



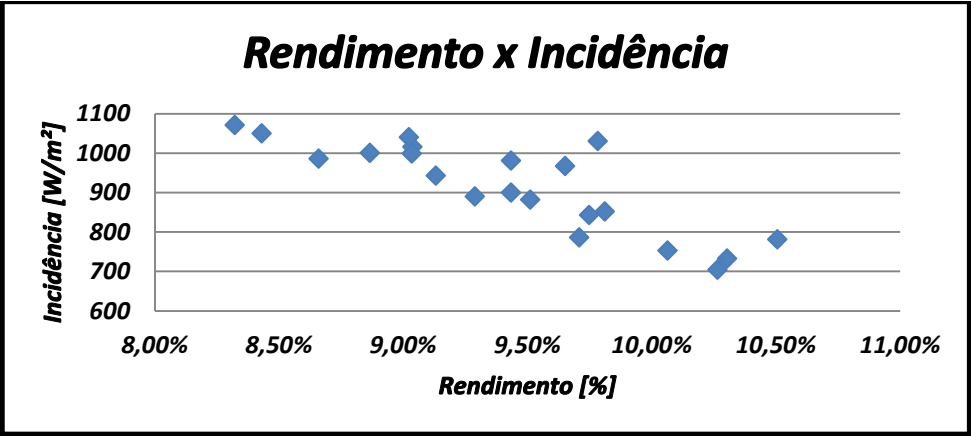
Fonte: Autor

Figura 34 - Situação 3 - Paine1 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



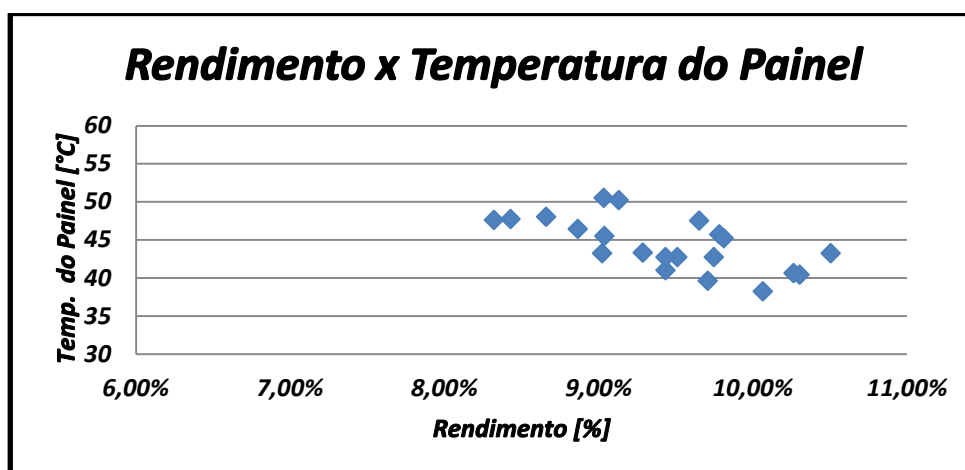
Fonte: Autor

Figura 35 - Situação 3 - Paine1 2: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



Fonte: Autor

Figura 36 - Situação 3 - Pannel 2: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico



Fonte: Autor

Nesta situação o rendimento dos painéis não teve grandes variações como nas situações anteriores, e a incidência se manteve sempre acima de 700W/m². O painel 1 apresentou um rendimento médio de 10,11% e o painel 2 de 9,43%. O painel 1 alcançou uma potência de 21,58W para uma incidência de 1076W/m² e a potência máxima do painel 2 foi de 19,912W para uma incidência de 1030W/m². A temperatura dos painéis alcançou 50,5°C e apresentou média de 44,4°C.

A temperatura ambiente não demonstrou relação direta com a incidência, e sua média foi de 25,3 °C.

3.4 DIA ENSOLARADO COM TEMPERATURAS AMBIENTE ELEVADAS

Durante o horário de medições, o tempo permaneceu ensolarado, porém as temperaturas ambiente estavam mais elevadas que na situação anterior. A temperatura ambiente alcançou 34,4°C. Os dados obtidos estão nas tabelas 8 e 9.

Tabela 9 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente elevadas para o painel 1

Horário	Incidência (w/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (w)	Potência gerada / Área (w/m ²)	Rendimento (%)
09:45	749	12,6	1,17	24,9	42	14,742	75,29	10,05%
10:00	786	13,1	1,18	25,7	41	15,458	78,95	10,04%
10:15	835	13,3	1,23	26	44,7	16,359	83,55	10,01%
10:30	868	13,7	1,26	27	47	17,262	88,16	10,16%
10:45	887	13,9	1,28	27,7	46,7	17,792	90,87	10,24%
11:00	924	14,5	1,28	28,7	48,8	18,56	94,79	10,26%
11:15	945	14,4	1,27	29	48,7	18,288	93,40	9,88%
11:30	976	14,9	1,22	30	48,4	18,178	92,84	9,51%
11:45	984	15,9	1,15	30	49,6	18,285	93,38	9,49%
12:00	1001	15	1,17	31,2	52,2	17,55	89,63	8,95%
12:15	1011	14,9	1,28	31,1	49,3	19,072	97,40	9,63%
12:30	989	15,3	1,26	33	53,6	19,278	98,46	9,96%
12:45	969	15,7	1,14	33,7	52	17,898	91,41	9,43%
13:00	932	14,5	1,23	33,4	58,1	17,835	91,09	9,77%
13:15	926	14,4	1,26	33,2	53,2	18,144	92,66	10,01%
13:30	883	14	1,23	34,4	55,9	17,22	87,95	9,96%
13:45	852	14,2	1,19	34,5	56,5	16,898	86,30	10,13%
14:00	809	14	1,13	33,5	51,6	15,82	80,80	9,99%
14:15	789	13,6	1,11	34	50,5	15,096	77,10	9,77%
14:30	704	12,6	1,09	34,1	51	13,734	70,14	9,96%

Fonte: Autor

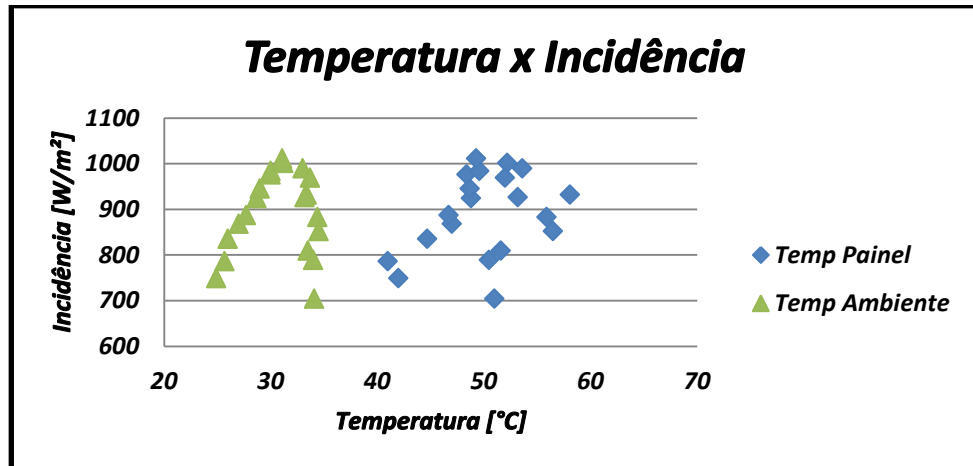
Tabela 10 - Dados obtidos em um dia ensolarado com temperaturas ambiente elevadas para o painel 2

Horário	Incidência (w/m ²)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Tamb (°C)	Tpainel (°C)	Potência gerada (w)	Potência gerada / Área (w/m ²)	Rendimento (%)
09:45	783	12,7	1,23	24,9	42	15,621	79,05	10,10%
10:00	807	12,8	1,21	25,7	41	15,488	78,38	9,71%
10:15	826	13,3	1,23	26	44,7	16,359	82,79	10,02%
10:30	868	13,3	1,24	27	47	16,492	83,46	9,62%
10:45	908	13,7	1,26	27,7	46,7	17,262	87,36	9,62%
11:00	926	13,9	1,24	28,7	48,8	17,236	87,23	9,42%
11:15	958	14,1	1,22	29	48,7	17,202	87,05	9,09%
11:30	963	14,2	1,17	30	48,4	16,614	84,08	8,73%
11:45	989	14,8	1,1	30	49,6	16,28	82,39	8,33%
12:00	994	14,6	1,14	31,2	52,2	16,644	84,23	8,47%
12:15	996	14,3	1,18	31,1	49,3	16,874	85,39	8,57%
12:30	977	14,7	1,17	33	53,6	17,199	87,04	8,91%
12:45	965	14,7	1,11	33,7	52	16,317	82,58	8,56%
13:00	937	13,9	1,15	33,4	58,1	15,985	80,90	8,63%
13:15	914	13,7	1,18	33,2	53,2	16,166	81,81	8,95%
13:30	866	13,4	1,17	34,4	55,9	15,678	79,34	9,16%
13:45	841	13,4	1,15	34,5	56,5	15,41	77,99	9,27%
14:00	799	13,6	1,11	33,5	51,6	15,096	76,40	9,56%
14:15	762	13,4	1,07	34	50,5	14,338	72,56	9,52%
14:30	703	12,7	1,08	34,1	51	13,716	69,41	9,87%

Fonte: Autor

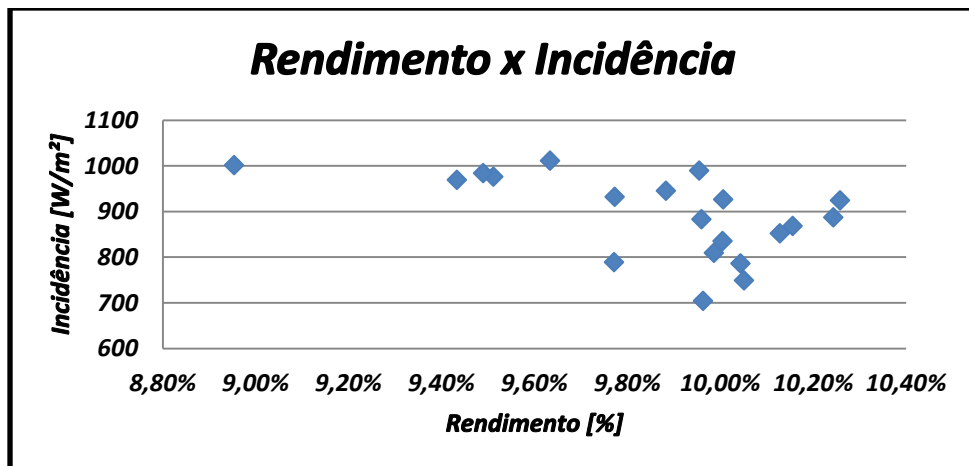
Com as Tabelas 8 e 9 foram construídos os gráficos ilustrados pelas Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42 relacionando incidência de radiação solar, temperaturas ambiente e do painel e, rendimento do painel.

Figura 37 - Situação 4 – Painel 1: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



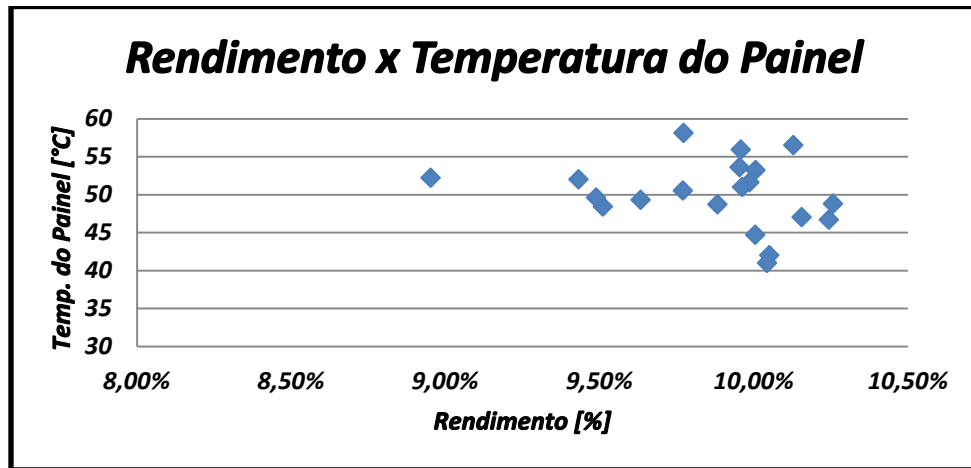
Fonte: Autor

Figura 38 - Situação 4 - Painel 1: Gráfico Rendimento x Incidência de radiação solar



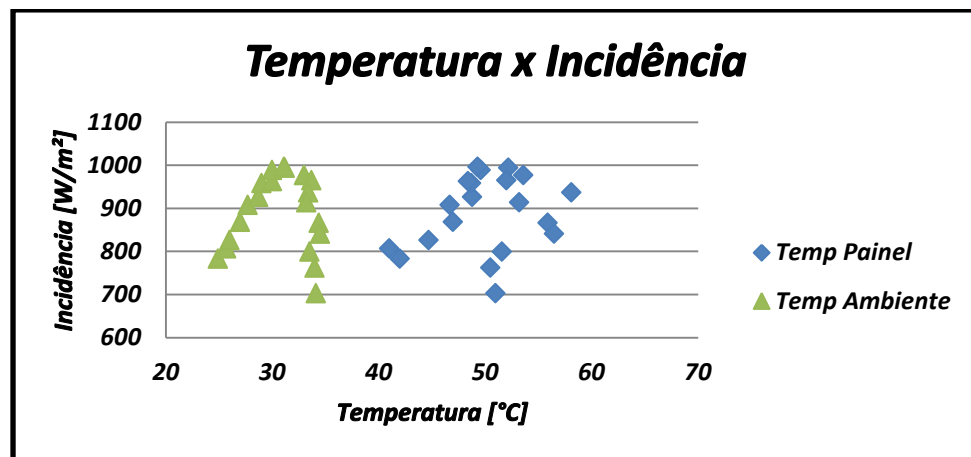
Fonte: Autor

Figura 39 - Situação 4 - Painei 1: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico



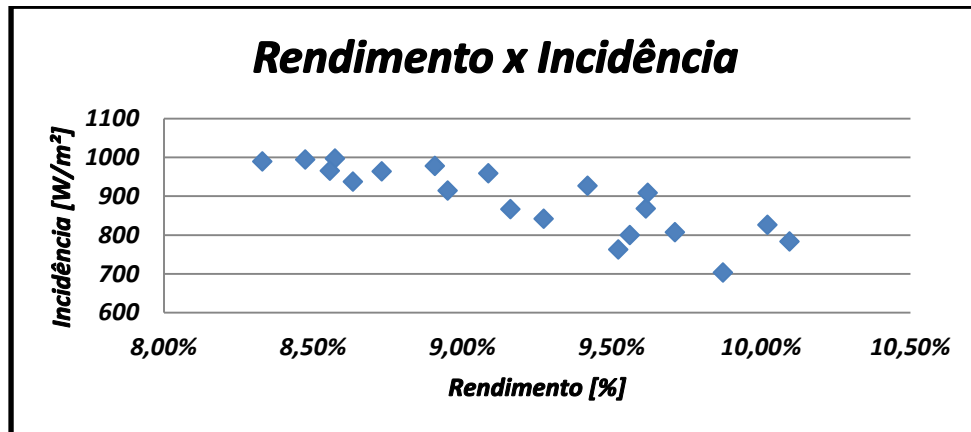
Fonte: Autor

Figura 40 - Situação 4 - Painei 2: Gráfico Temperatura x Incidência de radiação solar



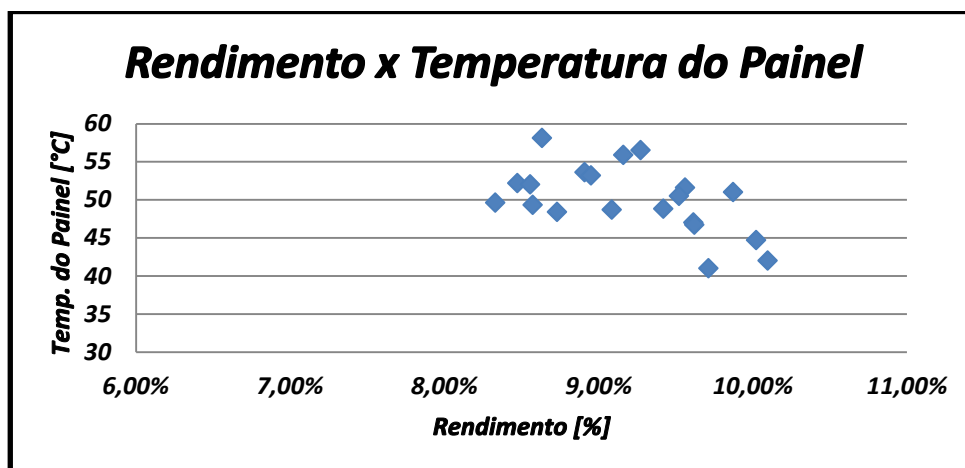
Fonte: Autor

Figura 41 - Situação 4 - Painei 2: Curva Rendimento x Incidência de radiação solar



Fonte: Autor

Figura 42 - Situação 4 - Painel 2: Gráfico Rendimento x Temperatura do painel fotovoltaico



Fonte: Autor

Nesta situação o rendimento dos painéis fotovoltaicos também não apresentou grandes variações como nas situações 1 e 2, e a incidência solar se manteve sempre acima de 700W/m^2 . O painel 1 apresentou um rendimento médio de 9,86% e o painel 2 de 9,21%. O painel 1 alcançou uma potência de 19,278W para uma incidência de 989W/m^2 e a potência máxima do painel 2 foi de 17,262W para uma incidência de 908W/m^2 . A temperatura dos painéis alcançou $58,1^\circ\text{C}$ e sua média foi de $50,0^\circ\text{C}$.

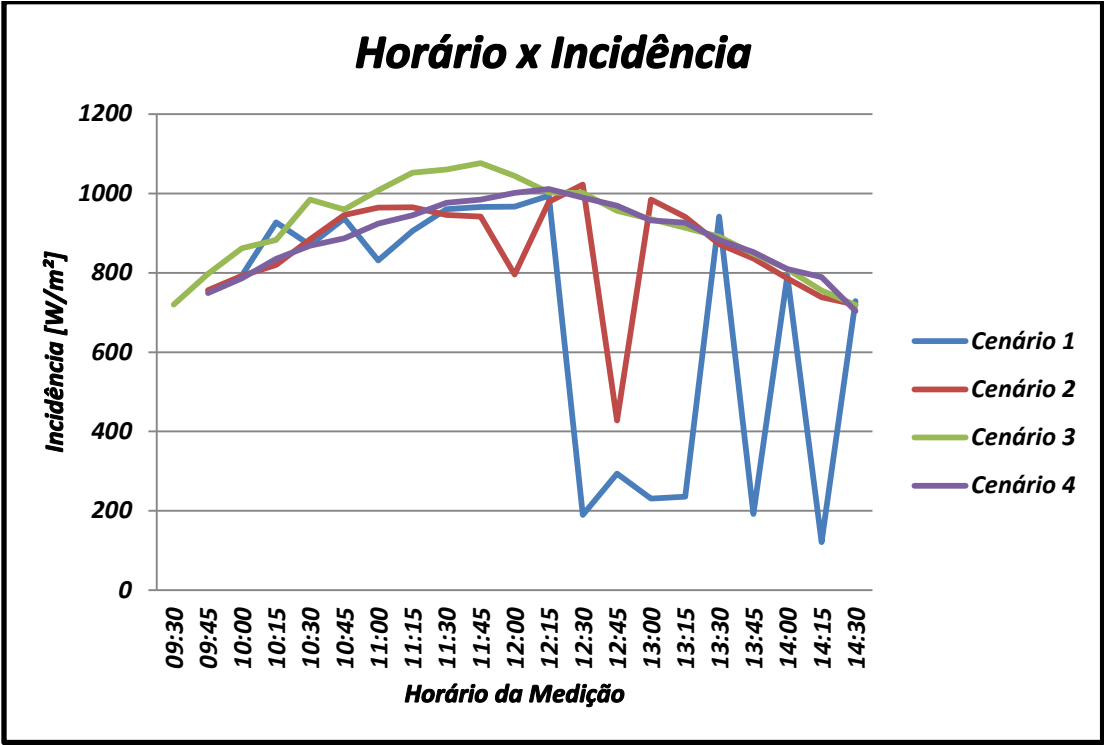
A temperatura ambiente não demonstrou relação direta com a incidência solar, e sua média foi de $30,8^\circ\text{C}$.

3.5 GRÁFICO HORÁRIO X INCIDÊNCIA

Através dos dados obtidos, foi gerado um gráfico com quatro curvas – uma para cada cenário – relacionando o horário de medição e seu respectivo valor de incidência de radiação solar.

A Figura 35 apresenta as curvas Horário x Incidência para o painel 1.

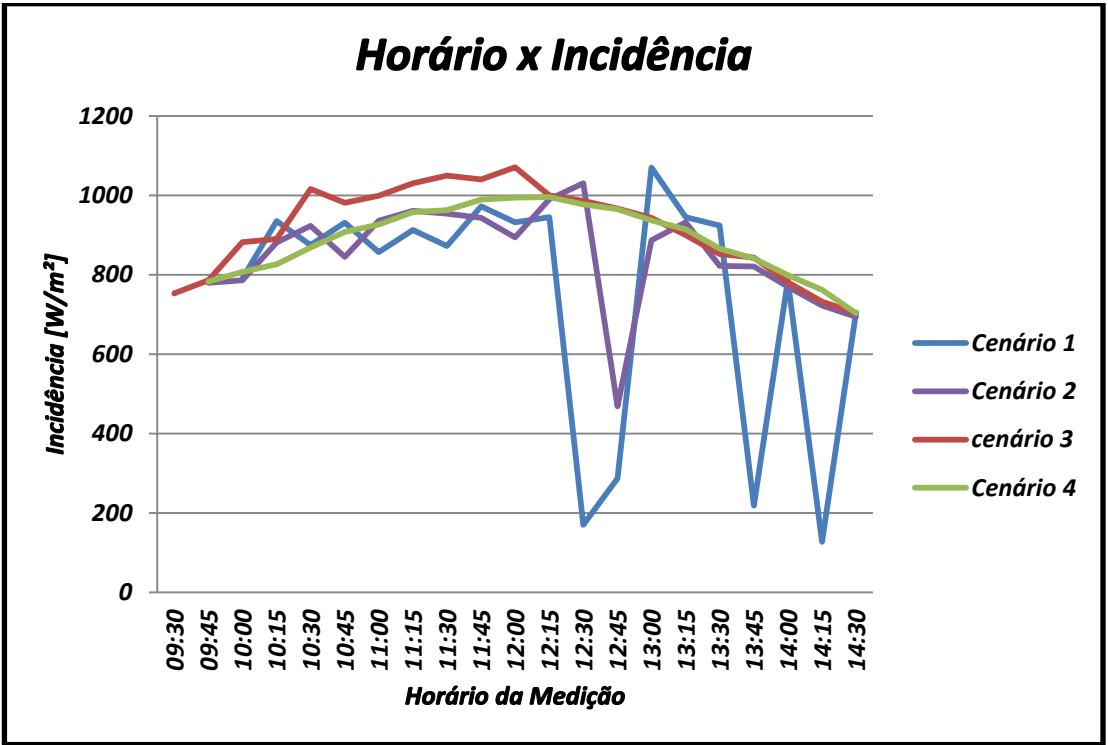
Figura 43 - Painel 1: Curvas Horário x Rendimento



Fonte: Autor

A Figura 36 apresenta as curvas Horário x Incidência para o painel 2.

Figura 44 - Painel 2: Curvas Horário x Rendimento



Fonte: Autor

Para o dia parcialmente nublado observou-se a ocorrência de grandes variações de incidência em períodos curtos de tempo. Em dia com poucas nuvens houve apenas um momento de grande variação de incidência em curto período, e em dias ensolarados, as curvas demonstraram uma suave curvatura, com pequenas variações ao longo do dia, apresentando valores de incidência mais altos no período próximo do meio dia.

Notou-se que o dia em que apresentou as maiores incidências foi o dia ensolarado com temperaturas ambiente amenas.

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos gráficos de Temperatura x Incidência dos dois painéis, independentemente da situação, houve tendência de maiores temperaturas dos painéis quando há maiores níveis de incidência solar. Por outro lado, a temperatura ambiente não apresenta uma relação direta com a incidência solar.

Através dos gráficos de Rendimento x Incidência dos dois painéis, e independentemente da situação, verificou-se que para valores de incidência maiores que 700W/m^2 , o rendimento apresenta uma ligeira queda quando a incidência aumentou. Enquanto que para valores baixos de incidência o rendimento sofreu uma grande queda, apresentando valores inferiores a 4% para incidências menores que 300W/m^2 .

Para valores de incidência maiores que 700W/m^2 , a média de rendimento obtida para o Painel 1, considerando as quatro situações, foi de 9,985%, enquanto que para o painel 2 foi de 9,465%.

Ao analisar valores de rendimento para incidências iguais a $1000\text{W/m}^2 \pm 30\text{W/m}^2$, o painel 1 apresentou um rendimento médio de 9,8% e o painel 2 de 8,94%.

Através dos gráficos de Rendimento x Temperatura do Pannel, observou-se para as quatro situações que o aumento de temperatura do painel causa perda de rendimento para o mesmo.

Analisando os dois casos de dias ensolarados, observou-se que os painéis apresentaram um rendimento maior no dia com temperaturas menores.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados obtidos, conclui-se que os painéis apresentaram uma diminuição de rendimento elétrico-solar quando recebem baixo índice de radiação: chegam a níveis inferiores a 4% para incidências menores que 300W/m^2 .

Por outro lado, para níveis de incidência altos, os painéis apresentaram valores adequados de rendimento. O estudo revela que valores de incidência acima de 700W/m^2 , o valor médio do rendimento chega próximo a 10% para o painel 1 e 9,5% para o painel 2. Para um estudo específico de valores de incidência igual a $1000\text{W/m}^2 \pm 30\text{W/m}^2$, o rendimento médio do painel 1 diminuiu apenas 0,2% e para o painel 2 foi de 0,5%.

Comparando o rendimento do painel 1 dado pelo fabricante, de 11,23% em STC, e os encontrados nas situações estudadas em campo, o painel apresentou diminuição de 11,01% de rendimento elétrico-solar para incidências maiores que 700W/m^2 e de 12,73% para incidências iguais a $1000\text{W/m}^2 \pm 30\text{W/m}^2$.

Comparando o rendimento do painel 2 fornecido pelo fabricante, de 11,13% em STC, e os encontrados nas situações estudadas em campo, o painel apresentou diminuição de 14,65% de rendimento para incidências maiores que 700W/m^2 e de 19,68% para incidências iguais a $1000\text{W/m}^2 \pm 30\text{W/m}^2$.

Para trabalhos futuros sugere-se analisar o rendimento elétrico-solar dos painéis utilizados neste trabalho, em condições STC. Também avaliar a possibilidade de estudar o comportamento dos painéis fotovoltaicos utilizados em conjunto.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. M. **Modelagem e controle fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição**. 2011. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 153p.

BLUE SOL – ENERGIA SOLAR. Disponível em <<http://pt.slideshare.net/LucieneJesusLana/apostila-de-fotovoltaica>>. Acesso em 04 nov. 2015.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Energias renováveis - riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. Brasília: Câmara, 2012. 271p.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIAS SOLAR E EÓLICA – CRESESB, 2014. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Ed. Cresesb, 2014. 530p.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. **Global market outlooks for photovoltaics (2014-2018)**. Brussels. EPIA, 2014. 60 p.

GALDINO, M. A. E.; LIMA, J. H. G.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T. **O contexto das energias renováveis no Brasil**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2015.

GREENPEACE. Disponível em <<http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/Renovaveis-batem-recordes/>>. Acesso em: 27 out. 2015.

HECKTHEUER, L.A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. 2001. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MIRANDA, A. B. C. M. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. 2014. 86f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Eletricista) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

NIEDZIALKOSKI, R. K. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. 2013. 57f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

PORTAL ENERGIA. Disponível em <<http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em 02 nov. 2015.

PORTAL SOLAR. Disponível em <<http://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>>. Acesso em 24 nov. 2015.

SOLARWORLD. Disponível em <<http://la.solarworld.com/>>. Acesso em 04 nov. 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica – conceitos e aplicações**. São Paulo: Ed. Érica, 2012. 224p.