



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ERYKSON MARCONNY DA SILVA COSTA

**Análise Exergética de Painéis Fotovoltaicos
com Ênfase na Investigação e Otimização
Térmica**

SÃO LUIS/MA

2017

ERYKSON MARCONNY DA SILVA COSTA

Análise Exergética de Painéis Fotovoltaicos com Ênfase na Investigação e Otimização Térmica

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

SÃO LUIS/MA

2017

Costa, Erykson Marconny da Silva.

Análise exergética de painéis fotovoltaicos com ênfase na investigação e otimização térmica. / Erykson Marconny da Silva Costa. – São Luís, 2017.

95f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho.

1. Análise experimental. 2. Eficiência exergética. 3. Efeito da inclinação da Placa. 4. Influência do arrefecimento do painel. 5. PVT.
I. Título.

CDU 621:697

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PRODUÇÃO

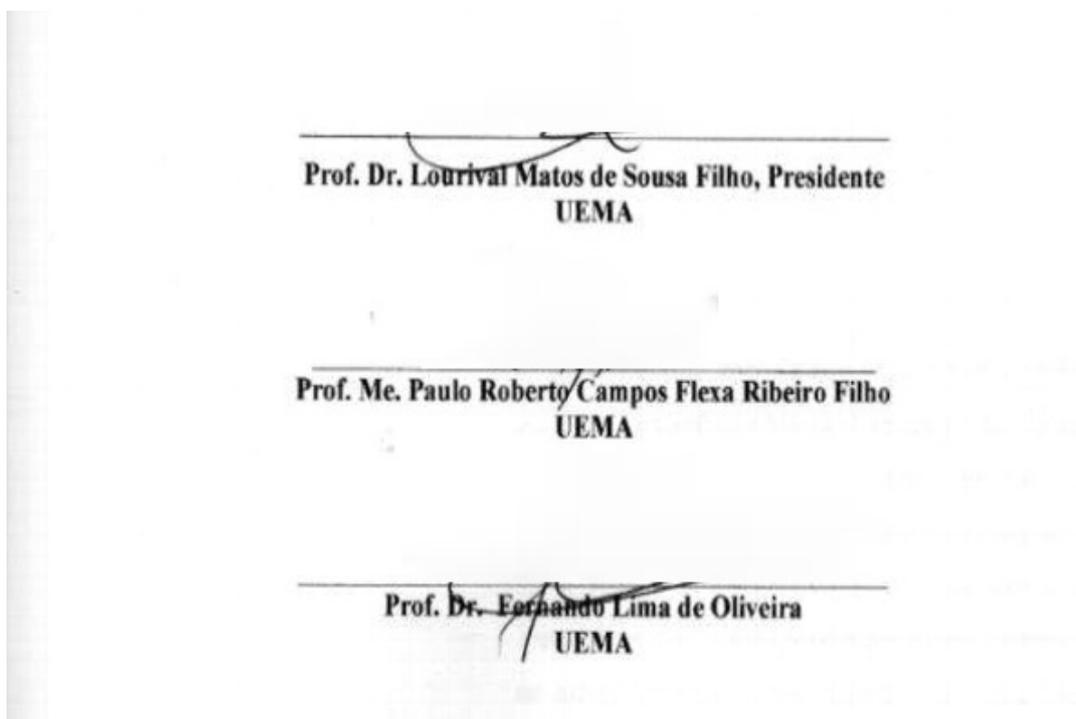
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise Exergética de Painéis Fotovoltaicos com Ênfase na Investigação e Otimização Térmica

Autor: Erykson Marconny da Silva Costa

Orientador: Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



São Luís/MA, 01 de dezembro de 2017.

Dedico a Deus detentor de toda honra e toda a glória, aos meus pais Eufranor Manoel Fonseca Costa e Maria do Carmo da Silva, pois sempre apoiaram e acreditaram em meus sonhos acadêmicos, à minha irmã Erika Suenny da Silva Costa e aos meus sobrinhos Josué Levi e Julia Vitória por me alegrarem e contribuir na minha formação como pessoa, e a todos meus familiares e amigos que estiveram sempre comigo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS por ter me guiado hoje e sempre, e permitido que eu encontrasse a fé através da Santa Igreja Católica Apostólica Romana. Agradeço também por ter me dado força e sabedoria, além dos dons necessários para a realização da pesquisa e da graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual do Maranhão. Por isso e por outras inúmeras coisas reconheço o SENHOR DEUS como o único digno de toda honra e toda glória por tudo na minha vida. Nada é meu tudo foi me emprestado por DEUS.

Agradeço também aos meus pais Maria do Carmo da Silva e Eufranor Manuel Fonseca Costa por terem acreditado e apoiado nos meus sonhos acadêmicos. Fornecendo todo apoio financeiro e acima de tudo, apoio pessoal, pois, nos momentos que fraquejei eles me levantaram com o seu AMOR, e quando estava fraco, quase parando em meio a caminhada ouvia a voz dos meus pais dizendo para correr, e como filho obediente voltava com mais força do que antes, não representando só a mim mais correndo junto com os meus pais. Estes ocupam posição de destaque na minha vida, e devo muito a eles o profissional que venho me tornando e a pessoa de bem que quero me tornar, reflexo da criação e educação que recebi dos meus pais.

Agradeço ao orientador dessa pesquisa Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho pelo convite para participação na pesquisa em energia renovável, pela confiança depositada para este projeto de conclusão de curso e pelos dois anos como bolsista de iniciação científica financiado pela FAPEMA.

Agradeço à minha namorada Ana Patrícia Fontes da Silva pelos conselhos, pelo companheirismo, amizade e amor proporcionados nesses últimos dois anos. E acima de tudo, por me alegrar/fazer sorrir mediante os problemas da pesquisa, ensinando-me a confiar mais no SENHOR, e nos seus planos, que são maiores do que os nossos. Agradeço a DEUS por nossos caminhos terem se cruzados, pois além de namorada você vem se tornando, juntamente com a minha mãe, as minhas duas melhores amigas.

Agradeço a todos meus familiares, em especial, a minha irmã Erika Suenny da Silva Costa e meus sobrinhos Josué Levi e Julia Vitória por fazerem parte da minha vida e me trazerem muita alegria.

Agradeço aos meus amigos da minha turma da UEMA, que ao longo desses anos estiveram comigo participando das batalhas acadêmicas, que acabaram por fortalecer os laços

formando assim uma família, a família “Patota”. Meus agradecimentos aos meus amigos Diego Pereira Silva, Wesley Candeira, André Felipe Mendes, Lucas de Lima Pereira, Wanderson Cintra Galdino, Kescijones Brito e Rhillame Valéria.

Agradeço ao laboratório MSiLAB por oferecer a estrutura necessária para realização dessa pesquisa, agradeço também a todos os alunos que participaram comigo das pesquisas realizadas no MSiLAB, especialmente ao meu grande amigo Pedro Lavra por sua amizade.

Agradeço a UEMA por todos esses anos de aprendizados e vitórias conquistadas. Com o passar dos anos quero sempre lembrar da “minha” universidade com grande carinho e emoção.

Agradeço também a alguns trabalhadores do Nutenge, por se disponibilizarem a ajudar em muitos pontos do projeto, principalmente vigiando o aparato experimental quando eu estava impossibilitado. Meus mais sinceros agradecimentos ao Sr. Reginaldo, Sr. Jade, e outros vigias do Nutenge.

Agradeço a todos que me ajudaram de forma direta ou indireta a alcançar os meus objetivos. Serei sempre grato a todos vocês.

“Não existe algo tão complexo que não possa ser resolvido e algo tão simples que não mereça ser pensado, pois toda sabedoria vem de DEUS se for da vontade DELE tudo nos será revelado”.

Erykson Marconny guiado Pelo
Espírito da Verdade.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a análise experimental da eficiência exergética e as perdas exergéticas na utilização de uma placa fotovoltaica para captação e transformação de energia solar em energia elétrica em diferentes inclinações. O intuito desse trabalho é coletar dados em período ensolarado, característico de meses de agosto a dezembro na cidade de São Luís-MA, onde o projeto foi realizado. Primeiramente o projeto voltou-se para a revisão bibliográfica e a montagem do aparato experimental. Nesse trabalho experimental será investigado o efeito da inclinação da placa na conversão da energia solar em elétrica e a possibilidade de melhorias através de uma análise exergética nos diversos ângulos. A investigação será feita referente as variáveis de entrada (exergia solar) e saída de exergia (exergia elétrica e perda de exergia térmica) do painel fotovoltaico. Tendo como variáveis do sistema Temperatura Ambiente (T_o); Irradiação Solar (I_{solar}); Voltagem e Corrente Produzidas (V_{pro} e I_{pro}); Velocidade do Vento (v); Temperatura da Placa (T_{pl}); sendo montado aparato experimental para adquirir diversas dessas variáveis, as outras foram obtidas através do site meteorológico INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), dessa forma o projeto está apto para realizar os experimentos em busca da exergia de uma placa fotovoltaica e sua eficiência exergética em São Luís-MA. Nesse trabalho, investigou-se também a influência do arrefecimento do painel através da construção de um painel fotovoltaico/térmico com dois modelos, um com circulação por meio do efeito termossifão e outro por circulação forçada, com a inserção de uma bomba submersa no sistema. Notou-se no estudo da inclinação do painel que, entre as inclinações investigadas (20° , 15° , 10° e 5°), a de 5° apresentou melhor eficiência e maior estabilidade da eficiência nos diversos horários do turno matutino, mostrando-se a mais adequada para a região de São Luís do Maranhão. No estudo do arrefecimento do painel observou-se que entre os modelos de PVT, o modelo com circulação forçada apresentou melhores resultados tanto no resfriamento do painel fotovoltaico, quanto na elevação da voltagem gerada pelo sistema. Evidenciando dessa forma, que a utilização de painéis fotovoltaicos/térmicos elevam a conversão de energia solar em energia elétrica.

Palavras-chave: Análise Experimental. Eficiência Exergética. Efeito da Inclinação da Placa. Influência do Arrefecimento do Painel. PVT.

ABSTRACT

The present work presents the experimental analysis of the exergetic efficiency and the exergética losses in the use of a photovoltaic plate for capture and transformation of solar energy in electric energy in different inclinations of the plate. The purpose of this work is to collect data for sunny periods, characteristic of months from August to December year in the city of São Luís, where the project is being performed. Firstly, the project turned to the bibliographical revision and the assembly of the experimental apparatus. In this experimental work will be investigated the effect of plate slope on the conversion of solar energy to electric and the possibility of improvements through an exergetic analysis at different angles. The research will be done referring to the input variables (solar exergy) and exergy output (electrical exergy and loss of thermal exergy) of the photovoltaic panel. Having as variables of the system Ambient Temperature (T_o); Solar irradiation (I_{solar}); Voltage and Current Produced (V_{pro} e I_{pro}); Wind Speed (v); Plate Temperature (T_{pl}); being the experimental apparatus set up to acquire several of these variables, the others were obtained through the INMET (National Meteorological Institute) meteorological site, in this way the project is able to carry out the experiments in search of the exergy of a photovoltaic plate and its exergetic efficiency in São Luís-MA. In this work, the influence of the cooling of the panel was also investigated by the construction of a photovoltaic / thermal panel, with two models one with circulation by means of the thermosyphon effect and the other by forced circulation, with the insertion of a pump submerged in the system. It was noted for the study of the inclination of the panel that between the investigated slopes (20 °, 15 °, 10 ° and 5 °) the one of 5 ° presented better efficiency, also presented greater stability of the efficiency in the different schedules of the morning shift. Evidence that this slope is the most efficient for the region of São Luís do Maranhão. For the study of the cooling of the panel, it was observed that among the PVT models the forced circulation model presented better results both in the cooling of the photovoltaic panel and in the increase of the voltage generated by the system. In this way, the use of photovoltaic / thermal panels increases the conversion of solar energy to electric energy.

Keywords: Experimental Analysis. Exergetic Efficiency. Effect of Plate Slope. Influence of Panel Cooling. PVT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura das bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolante.	24
Figura 2: silício dopado com impurezas do tipo n e p.....	25
Figura 3: Difusão entre elétrons e lacunas.....	26
Figura 4: Funcionamento de uma placa fotovoltaica de silício.	26
Figura 5: Efeito da irradiação na voltagem e na corrente de painéis fotovoltaicos.....	28
Figura 6: Redução na transformação de energia do painel com o aumento da temperatura. ...	29
Figura 7: Distribuição da radiação solar.....	30
Figura 8: Órbita da Terra em torno do Sol, indicando as estações do ano.	30
Figura 9: Órbita da Terra em torno do Sol, indicando o periélio e o afélio.	31
Figura 10: Identificação dos ângulos do posicionamento solar.....	32
Figura 11: Modelo de um PVT, efeito termossifão.	34
Figura 12: Entrada e saída de energia em uma placa fotovoltaica.	40
Figura 13: Mostra uma esquematização das exergias envolvidas em uma placa solar.	43
Figura 14: Painel Fotovoltaico YL140P-17B da Yingli.....	49
Figura 15: Radiação e Descrição da Equação da Radiação no Dia 25.07.2017.....	51
Figura 16: Controlador de Carga da EP SOLAR VS4524BN.....	52
Figura 17: Termistor no painel fotovoltaico. (A) e (B).....	53
Figura 18: Montagem do circuito do sensor.....	54
Figura 19: Montagem do sensor.....	54
Figura 20: Arduino Uno.....	55
Figura 21: Suporte. (A) e (B).....	57
Figura 22: Suporte no SolidWorks.....	57
Figura 23: Bancada de instrumentos experimentais.....	58
Figura 24: Inversor Unitron. Fonte: NeoSolar.....	59
Figura 25: Bateria DF 300 Fonte: NeoSolar.....	60
Figura 26: Painel fotovoltaico modelo ST-M10.....	61
Figura 27: Dimensões do painel fotovoltaico modelo ST-M10.....	62
Figura 28: Figura 8: Idealização dos supostos do PVT no SolidWorks.....	63
Figura 29: Suporte da placa solar (A), (B), (C).....	63
Figura 30: Suporte do Reservatório. (A), (B).....	64

Figura 31: Suporte da placa pintado. (A), (B).	64
Figura 32: Suporte do reservatório pintado	65
Figura 33: Reservatório de água	65
Figura 34: Reservatório de água pintado	66
Figura 35: Montagem do arrefecedor da placa. (A) Chapa de alumínio (B) Chapa de alumínio e tubo de cobre.	67
Figura 36: Isolamento do sistema com folha de isopor. (A) folha de isopor (B) Isolamento do painel	68
Figura 37: conjunto suporte-painel	68
Figura 38: Conjunto suporte-reservatório	69
Figura 39: Versão final do protótipo montado	69
Figura 40: Circuito de aquisição de dados de voltagem e corrente com Arduino.	71
Figura 41: Circuito de aquisição completo	72
Figura 42: Relação entre a radiação e a eficiência exergética para o dia 13.07	73
Figura 43: Relação entre a radiação e a eficiência exergética para o dia 14.07	74
Figura 44: Relação entre a radiação e a eficiência exergética para o dia 24.07	74
Figura 45: Relação entre a radiação e eficiência exergética para o dia 25.07	75
Figura 46: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exergética para o dia 13.07	76
Figura 47: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exergética para o dia 14.07	76
Figura 48: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exergética para o dia 24.07	77
Figura 49: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exergética para o dia 25.07	77
Figura 50: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 13.07	78
Figura 51: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 14.07	79
Figura 52: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 24.07	79
Figura 53: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 25.07	80
Figura 54: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 13.07	81
Figura 55: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 14.07	81
Figura 56: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 24.07	82
Figura 57: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 25.07	82
Figura 58: Exergia produzida nos dias 13, 14, 24 e 25.	83
Figura 59: Exergia solar nos dias 13, 14, 24 e 25	83
Figura 60: Comparação entre as conversões.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do Painel Fotovoltaico	49
Tabela 2: Características do microcontrolador Arduino Uno.....	56
Tabela 3:Característica do controlador. Fonte: www.minhacasasolar.com.br	59
Tabela 4:Características do inversor. Fonte: www.neosolar.com.br	59
Tabela 5:Características da bateria. Fonte: www.neosolar.com.br	60
Tabela 6:Características do painel fotovoltaico modelo ST-M10.	62
Tabela 7: Condutividade térmica do cobre e do alumínio.	67
Tabela 8: Dias de aquisição com suas respectivas inclinações.....	73

LISTA DE SIGLAS

AMDA	Associação Mineira de Defesa do Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MME	Ministério de Minas e Energia
PV	Painéis Fotovoltaicos
PVT	Painéis Fotovoltaicos e Térmicos
STC	<i>Standard Test Conditions</i> - Condições Padrões de Teste

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área da Placa Fotovoltaica
Q	Calor
h	Coefficiente Convectivo
I_{ab}	Corrente de Circuito Aberto
$I_{máx}$	Corrente Máxima
I_{pro}	Corrente Produzida pelo Painel
E_d	Destruição de Exergia.
ψ_{exer}	Eficiência Exergética
E_{solar}	Energia da Radiação Solar
E_{elet}	Energia Elétrica
Ex_{term}	Exergia Associada ao Calor
Ex_{solar}	Exergia Solar
FF	Fator de Enchimento
I_{solar}	Intensidade da Radiação Solar
T	Pressão no Estado Morto
T_b	Temperatura da Fronteira
T_{pl}	Temperatura do Painel Fotovoltaico
T_{sol}	Temperatura do Sol.
T_o	Temperatura no Estado Morto/Estado de Referência
w	Trabalho
ΔE_x	Varição de Exergia
$(V_2 - V_1)$	Varição Volumétrica do Sistema
v	Velocidade do Vento
V_{ab}	Voltagem de Circuito Aberto
$V_{máx}$	Voltagem Máxima
V_{pro}	Voltagem Produzida pelo Painel
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
Objetivos.....	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 Justificativa	21
2. Painéis fotovoltaicos	23
2.1. Princípio de Funcionamento.....	23
2.2 Parâmetros Elétricos	27
2.3 Fatores que Influenciam no Painel Fotovoltaico	27
2.3.1 Irradiação Solar Incidente.....	27
2.3.2 Temperatura de Operação da Placa	28
3. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA PLACA NA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS FOTVOLTAICOS.....	29
4. PAINÉIS FOTOVOLTAICO-TÉRMICOS.....	33
5. ANÁLISE EXERGÉTICA	35
5.1 Histórico	35
5.2 Conceitos	37
5.3 Formulação Exergia	39
5.4 Energia e Exergia de Placas Fotovoltaicas	40
5.4.1 Energia da Placa	40
5.4.2 Exergia da Placa	42
5.4.3 Eficiência Exergética.....	44
5.5 PESQUISAS EXERGÉTICAS PV E PVT.....	44
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
6.1 Análise da Inclinação	49

6.1.1	Variáveis do Projeto	50
6.1.1.1	Temperatura Ambiente (T_o)	50
6.1.1.2	Irradiação Solar (I_{solar}).....	50
6.1.1.3	Voltagem e Corrente Produzidas (V_{pro} e I_{pro});	51
6.1.1.4	Velocidade do Vento (v)	52
6.1.1.5	Temperatura da Placa (T_{pl})	52
6.1.2	Construções do Projeto.....	56
6.1.2.1	Suporte da Placa Fotovoltaica	56
6.1.2.2	Bancada de Instrumentos Experimentais	58
6.2	Painel Fotovoltaico/Térmico.....	61
6.2.1	Montagem do Protótipo	61
6.2.2	Aquisição de Dados do PVT	70
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
7.1	Estudo da Inclinação da Placa.....	73
7.2	Estudo do Painel Fotovoltaico/ Térmico.....	85
8.	CONCLUSÃO	88
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICA	90

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as atividades humanas que tem impacto negativo no meio ambiente é cada vez mais discutido na sociedade atual. Dentre essas atividades estão a agropecuária, expansão urbana, falta de saneamento básico, garimpo e mineração, geração de energia, indústria de ferro gusa e curtumes. (Associação Mineira de Defesa do Ambiente – AMDA, 2006).

Ainda segundo a AMDA, a atividade de geração energética brasileira é bastante baseada em hidroelétricas que destroem a biodiversidade das espécies de peixe dependentes de água corrente para sobreviver, além do impacto causado pela mudança da flora nas áreas inundadas. Outra forma de produção energética bastante expressiva é baseada no consumo de biomassa vegetal, proveniente principalmente de florestas nativas, que aliado a demanda energética crescente no Brasil e no mundo tem provocado graves prejuízos às áreas nativas do Brasil. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê que entre os anos de 2014-2023 a média anual do crescimento da demanda energética será de 4,3%.

Diante da necessidade de novos meios de energia que supram as necessidades e minimizem os danos ambientais, encontramos as formas de energia “limpa”, são elas: energia eólica, energia solar, energia maremotriz, energia geotérmica, energia hidráulica, e energia nuclear.

O Sol é visto como uma fonte inesgotável de energia, estima-se que ele nos privilegiará por mais 5 bilhões de anos. Anualmente, o Sol incide sobre a Terra mais de 10 mil vezes o consumo energético do planeta O Brasil é um país continental que tem uma grande área de exposição ao Sol no ano inteiro, isso viabiliza a utilização da energia solar como fonte de energia para o país (CRESESB, 2004).

Porém observou que apesar das vantagens apresentadas, a matriz energética solar corresponde 0,01% da matriz energética nacional, dados de 2015 segundo a EPE. Esse fator deve-se a falta de tecnologia nacional nesse ramo.

Outra desvantagem é a tecnologia atual de conversão direta de energia solar em elétrica que apresenta baixa eficiência. As mais eficientes comercialmente apresentam cerca de 20% compostas de Arseneto de Gálio, sendo comum as placas fotovoltaicas de Silício monocristalino e policristalino apresentarem comercialmente eficiência de 12% a 16%. Devido

a essa realidade e ao potencial energético que podemos extrair do Sol, o avanço em tecnologia solar e formas para aumentar a eficiência dessas tecnologias são cada vez mais investigadas. (Fadigas, s. d.)

Dentre as formas de análise de sistemas encontra-se a análise exergetica, que identifica a disponibilidade de trabalho de um sistema, sendo assim localiza as perdas e irreversibilidades do sistema objetivando a otimização deste. Logo, a análise exergetica de um painel fotovoltaico objetiva a identificação das perdas e irreversibilidades que ocorrem no painel, a fim de maximizar a transformação de energia solar em energia elétrica. (Calderón et al, s.d)

Segundo Dincer e Rosen (2007) a análise exergetica é importante para aumentar a eficiência. Os autores relatam a relação entre energia e exergia e entre exergia e ambiente, deixando claro como a exergia está relacionada ao desenvolvimento sustentável. Tal comportamento pode ser comprovada pela relação inversamente proporcional entre o aproveitamento das fontes e a degradação do meio.

O estudo da exergia é razoavelmente antigo, tendo início em 1824 quando Carnot apresentou o conceito de trabalho máximo. E em 1876 William Gibbs começou a estudar uma propriedade termodinâmica definida como trabalho disponível de um corpo e seu meio. O objetivo da investigação é analisar o trabalho máximo que pode ser obtido, essa é a definição de exergia (Moran e Shapiro, 2002). Investigando a destruição de exergia podemos avaliar de que forma ela acontece e qual seria uma possibilidade de melhoria e se essa melhoria seria viável através de uma análise do preço da destruição da exergia.

Sabemos que a forma como a placa é posicionada em relação ao Sol, influencia na captação de radiação solar, e conseqüentemente na transformação da energia solar em elétrica (Solar Brasil, 2017). Uma análise exergetica da posição da placa leva em consideração tanto a energia captada e transformada, quanto o aquecimento da placa e o seu potencial para a realização de trabalho. Dessa forma para cada angulação ocorre perdas exergeticas devido ao modo como a placa é posicionada, com isso vem a possibilidade de aproveitamento da posição exergeticamente mais favorável, ou seja, aquela que possibilita um maior aproveitamento exergetico.

Portanto, essa pesquisa avaliará ângulos de inclinação e suas respectivas eficiências exergéticas, buscando a angulação ótima de um painel fotovoltaico para a cidade de São Luís do Maranhão, onde a placa transforme mais energia elétrica e tenha menores perdas do sistema.

Um fator bastante relevante é a perda da eficiência com o aquecimento do painel fotovoltaico, devido ao fato da voltagem diminuir com o aumento da temperatura enquanto a corrente aumenta. Porém, o aumento da corrente não é tão significativo como a diminuição da voltagem, sendo assim, a potência do painel diminui com o aumento da temperatura, bem como a sua eficiência. (Pinho e Galdino,2014).

Com o intuito de evitar a perda da eficiência do painel fotovoltaico causado pelo aumento da temperatura e aproveitar a disponibilidade de exergia térmica, existem hoje os chamados PVT's (painéis fotovoltaicos e térmicos). Esses painéis podem ser arrefecidos a ar e água, sendo geralmente o último mais comum.

Vários autores pesquisaram sobre a otimização de painéis fotovoltaicos por meio de PVT e mostraram bons resultados. Seguindo essa linha de estudo, pretende-se construir um protótipo de um PVT em pequenas dimensões, e analisar o comportamento deste na cidade de São Luís do Maranhão.

Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a eficiência de painéis fotovoltaicos usando os métodos da análise exérgica em diversas inclinações do painel. E construir um modelo de painel fotovoltaico e térmico (PVT) para aproveitamento da exergia associada ao calor e analisando este como otimização de um sistema fotovoltaico comum.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Analisar a influência da radiação solar para diversos horários (matutino e vespertino);
- II. Verificar eficiência exérgica em dias ensolarados;
- III. Construir sensores de temperatura tipo NTC.
- IV. Descobrir a inclinação exergeticamente mais favorável;
- V. Construir o modelo de um PVT;
- VI. Verificar a viabilidade da utilização do PVT em substituição ao PV.

1.2 Justificativa

O uso de painéis fotovoltaicos é visto como uma solução alternativa para o crescimento da demanda energética, caracterizada como forma de produção de energia limpa, para países com altos níveis de insolação em grande parte do ano, como o Brasil.

Porém, observa-se que o aproveitamento desse modo de produção de energia ainda é pouco utilizado no Brasil mesmo em comparação à países que apresentam potencial de geração inferior ao do país. Podemos perceber esse fato pelo Wp(Watt-pico) instalado no Brasil em comparação a outros países, onde tanto os sistemas isolados como conectados à rede são de 30 a 40 MWp (Abinee,2012). Enquanto que na Alemanha é cerca 32,2 GWp e na Itália 16GWp, para o mesmo período de 2012 (Pinho e Galdino,2014).

Logo, percebe-se que o potencial do Brasil ainda é pouco explorado, provavelmente pelo pouco desenvolvimento tecnológico do país nesse ramo. A Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee) em 2012, apontou os seguintes motivos para o ritmo lento na exploração desse mercado:

1. Custo de geração não competitivo;
2. Investimento para instalações residenciais elevado;
3. Restrições a micro e mini geração por meio das distribuidoras de energia, com receio de perda de mercado;
4. Falta de políticas específicas de financiamento e modelo de comercialização para instalações fotovoltaicas;
5. Falta de conhecimento por parte dos consumidores.

Portanto o aprofundamento acerca da geração fotovoltaica é necessário para garantir melhorias nos sistemas, além de diminuir os desperdícios e custos, tornando o ramo competitivo e de melhor qualidade.

Dentro do contexto de melhoria de sistemas, encontramos a análise exergética que têm como objetivo identificar o potencial máximo de geração de trabalho de um sistema. Sabendo o potencial máximo de geração e o quanto o sistema gera realmente, localizamos uma

lacuna existente que separa a geração real do ponto máximo, essa lacuna representa as perdas e irreversibilidades que ocorrem no sistema. Quantificando as perdas podemos decidir se esta é significativa ou não, identificando-as podemos focar esforços para diminuir ou aniquilá-las (Calderón et al, s.d).

Por isso, muitas vezes a análise exergética é chamada de análise de disponibilidade, pois identifica uma lacuna de disponibilidade de melhoria do sistema. Pode também ser chamada de análise de perdas, por expor e quantificar as perdas existentes no sistema, essenciais para melhoria do sistema.

Dentre as perdas significativas em PV está a perda térmica, devido ao aquecimento da placa exposta ao Sol. Exergeticamente o aquecimento da placa pode ser usado para geração de trabalho, logo, esse potencial não é aproveitado. Outro fator é a perda da eficiência da placa fotovoltaica com o aumento da temperatura, que é resolvido através da criação de um PVT (painel fotovoltaico/térmico) que terá ganhos tanto no aproveitamento do calor, quanto na geração de energia elétrica por meio do resfriamento do painel fotovoltaico (Saulox et al, 2003).

Esses pontos de melhoria, tanto na inclinação quanto na criação de um PVT, são meios para otimizar o sistema fotovoltaico comum, aumentando assim sua eficiência e a geração de energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos. Desse modo diminuindo o tempo total de retorno do investimento em energia solar, tornando desta forma, o sistema mais rentável.

A confirmação das competências científicas da energia fotovoltaica, conforme apresentada por pesquisas anteriores, constitui um passo para a transformação da matriz energética brasileira, através do melhor aproveitamento do potencial de energia solar. Tornando assim, o sistema mais eficiente e difundido, e acima de tudo reduzindo os danos ao meio ambiente.

2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

2.1. Princípio de Funcionamento

O fenômeno fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839 que percebeu o aparecimento de uma diferença de potencial quando expôs uma placa de prata ou platina imerso em um eletrólito a luz, observando assim, a transformação de energia luminosa em potencial de energia elétrica. (Câmara, 2011)

Alguns anos mais tarde, em 1876 mais precisamente, dois inventores norte-americanos observaram pela primeira vez o efeito fotovoltaico em sólidos, utilizando as propriedades fotocondutoras do selênio para observar o efeito fotovoltaico, essa “célula solar” tinha a eficiência de 0,5%. (Santos et al., s. d.).

Calvin Fuller foi quem desenvolveu um processo para inserção de impurezas na rede cristalina do silício com o objetivo de controlar suas propriedades elétricas (técnica conhecida como dopagem). Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena quantidade de Gálio, que tornou a barra condutora, com cargas positivas. Baseado no processo de Fuller, Gerald Person mergulhou essa barra em um banho quente de lítio, fazendo com que o material criasse uma superfície com excesso de elétrons livres, Person expôs a barra a luz e percebeu o surgimento de corrente elétrica, criando assim a primeira célula solar da forma como conhecemos hoje (Santos et al., s.d.).

Os primeiros equipamentos que podemos chamar de células fotovoltaicas, por se assemelharem com as quais conhecemos hoje, foram fabricadas em 1950 nos laboratórios da Bell nos Estados Unidos. Elas foram fabricadas com lâminas de silício e apresentavam uma eficiência de 6% com potência de 5 mW com uma área de 2 cm^2 (Pinho e Galdino , 2014).

A energia solar fotovoltaica se dá pela transformação direta da luz em energia elétrica (Fadigas, s.d.). Para esse processo utiliza-se células solares constituídas de materiais semicondutores, que são caracterizados por apresentarem a temperatura do zero absoluto (0 K), uma banda de valência completamente preenchida por elétrons (negativamente carregado), e uma banda de condução com muitos vazios, com deficiência de elétrons (positivamente carregado). A temperatura de 0 K, os semicondutores tornam-se isolantes. (Pinho e Galdino, 2014).

A separação da banda de valência e da banda de condução se dá pela existência de uma terceira banda conhecida como banda proibida ou gap de energia que é da ordem de 1 eV (elétron-volt), visto na Fig.1, o que diferencia esses materiais dos materiais isolantes, pois a banda proibida nesses materiais é da ordem de vários eV. Uma das características importante desses materiais é o aumento da condutividade com a temperatura, pois, a excitação térmica faz com que portadores da banda de valência fluam para a banda de condução, assim também ocorre nas células solares quando fótons com energia maior que o gap incidem sobre a célula, ou seja, os fótons excitam os elétrons da banda de valência e esses fluem para a banda de condução. (Fadigas, s.d.).

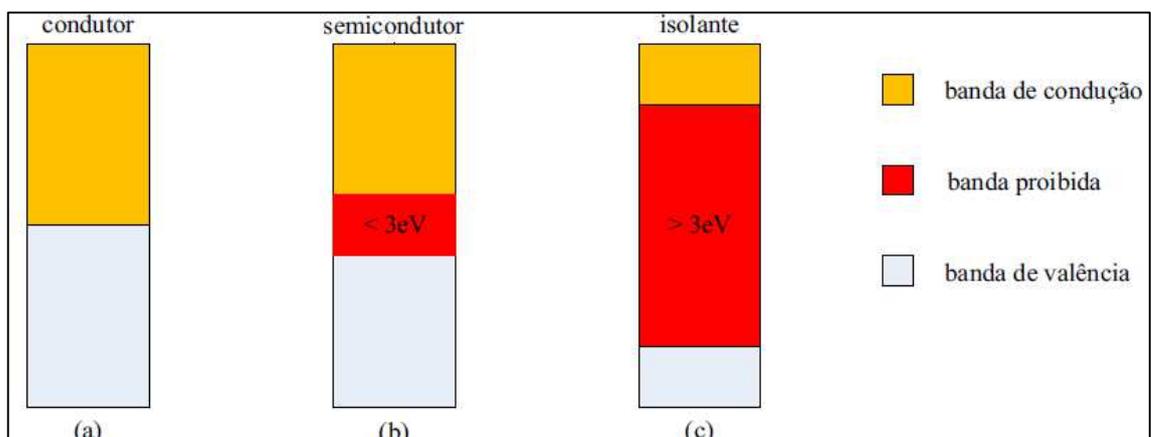


Figura 1: Estrutura das bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolante.

Fonte: Pinho & Galdino, 2014

Entre os semicondutores usados para a fabricação de células fotovoltaicas a célula de silício cristalina é a mais comum, representando cerca de 95% de todas as células solares do mundo. Para que o silício seja usado como célula fotovoltaica é necessário inserir na rede cristalina do material impurezas, para que esse apresente certas características elétricas. Técnica essa conhecida como dopagem, desenvolvido por Fuller, como já relatado (Portal Energia Renovável, 2004).

Se inserirmos na rede cristalina do silício átomos de fósforo, por exemplo, o silício é um átomo tetravalente (apresenta quatro elétrons na camada de valência) e o fósforo é um átomo pentavalente (cinco elétrons na camada de valência), a ligação desses dois elementos gerará um elétron de fósforo fracamente ligado, com pouca energia térmica o elétron sai da ligação indo para a banda de condução. Dessa forma, o átomo de fósforo é um doador de

elétrons, este é denominado dopante doador n ou impureza do tipo n. Como visto na Fig.2 (Câmara, 2011)

Analogamente, se inserirmos na rede cristalina do silício átomos de boro sendo esse um átomo trivalente (apresenta três elétrons na camada de valência), sendo assim, a rede apresenta um buraco, também conhecido como vazio ou lacuna, na rede cristalina, como visto na Fig.2. Com pouca energia térmica elétrons vizinhos podem preencher a lacuna, faltando assim elétrons em outro lugar, deslocando, dessa forma, a lacuna. Diz-se, portanto, que o boro é um aceitador de elétrons, ou ainda, dopante do tipo p (Fadigas, s. d.).

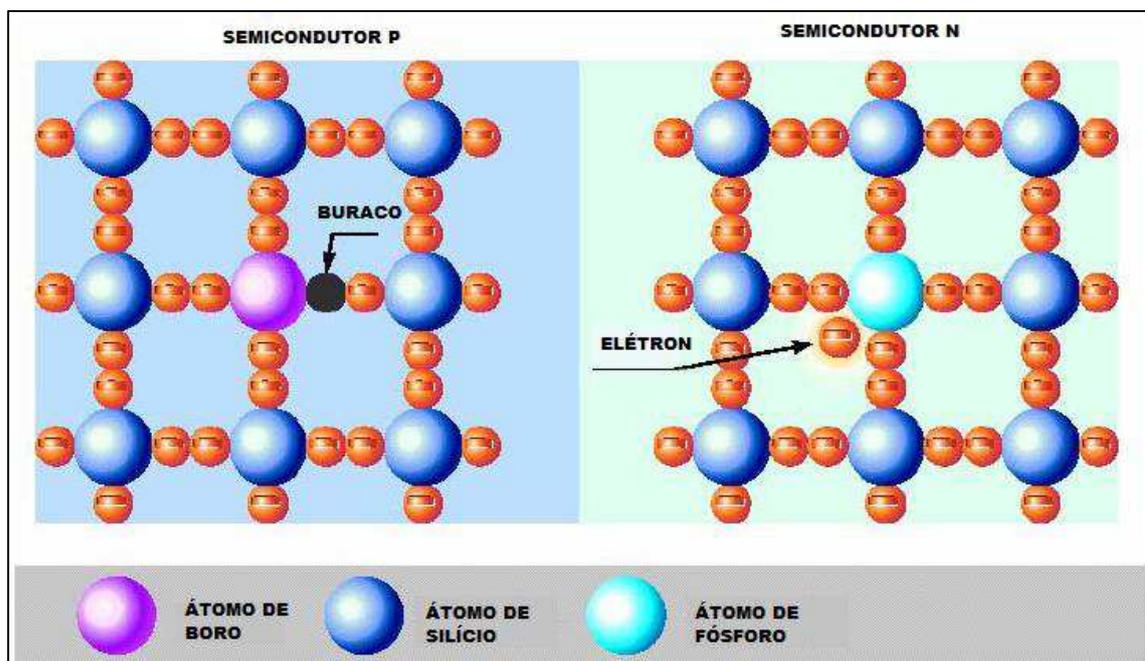


Figura 2: silício dopado com impurezas do tipo n e p.

Fonte: Portal Energia Renovável, 2004. Pag.33.

As células fotovoltaicas de silício são constituídas de junções pn, ou seja, junção da parte com elétrons fracamente ligados com a parte com lacunas, essa junção faz com que na interface entre os dois tipos de dopagem os elétrons em excesso da junção n passe para a junção p, deixando dessa forma a região n positivamente carregada. Os elétrons doados para a parte p encontram-se com as lacunas da região p, logo essa região fica negativamente carregada, visto na Fig. 3 (Pinho e Galdino ,2014).

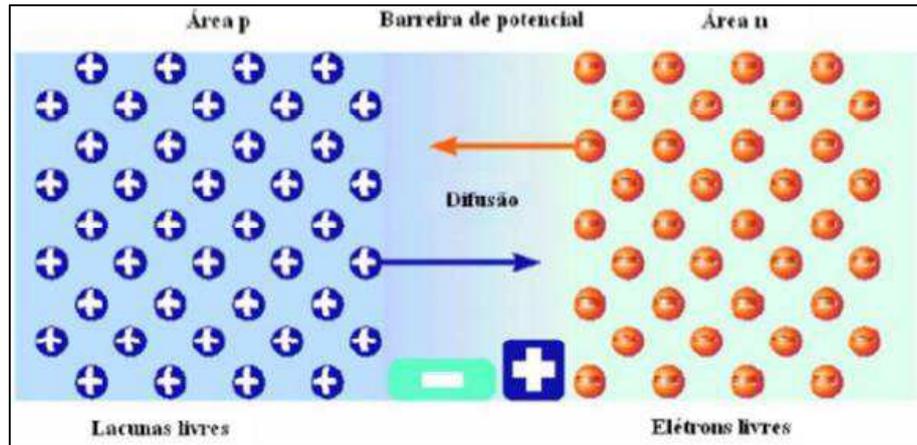


Figura 3: Difusão entre elétrons e lacunas.

Fonte: BARROS, 2011. p. 9.

Porém, esse fluxo não continua permanentemente, pois a passagem de elétrons para a região p, faz com que as regiões criem um campo elétrico positivo no lado n e negativo no lado p, impedindo dessa forma que as cargas negativas (elétrons) fluam para o lado negativo (p) e carga positiva (lacunas) fluam para o lado positivo (n) (Pinho e Galdino ,2014).

Se essa junção for exposta a fótons com energia maior que a energia do gap ($E_{fot} > E_{gap}$) ocorrerá a geração de pares elétrons-lacunas, e se essa formação for feita na região onde o campo elétrico não é nulo as cargas são aceleradas gerando assim corrente elétrica, essas cargas sendo deslocadas dão origem a uma diferença de potencial, fenômeno denominado efeito fotovoltaico, como pode ser visto na Fig.4. (Portal Energia Renovável, 2004).

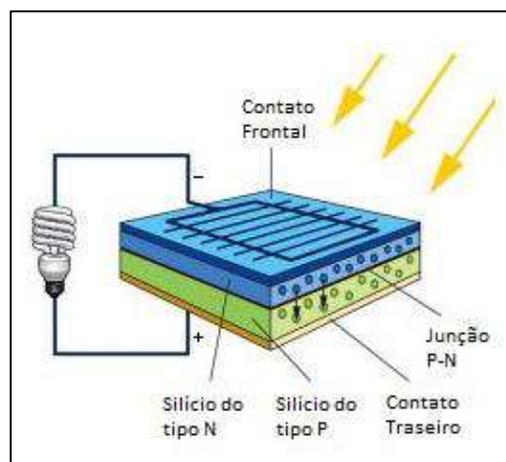


Figura 4: Funcionamento de uma placa fotovoltaica de silício.

Fonte: <http://superenergia.com.br/duvidas/>

2.2 Parâmetros Elétricos

As placas fotovoltaicas são caracterizadas por alguns parâmetros elétricos como:

- Tensão de Circuito Aberto: É a tensão medida no painel quando a corrente deste é nula, pode ser medida por um voltímetro conectado entre os terminais do painel.
- Corrente de Curto circuito: É a corrente medida quando curto circuitamos a ligação do painel, ou seja, a tensão tende a zero. Pode ser medida conectando um multímetro nos terminais, curto circuitando dessa forma o sistema.
- Máxima Potência: É a máxima potência obtida pelo painel nas STC (*Standard Test Conditions*- Condições Padrões de Teste) com o painel a 25°C e irradiância de 1000 W.
- Tensão de Máxima Potência: É a tensão observada no ponto de máxima potência.
- Corrente de Máxima Potência: É a corrente observada no ponto de máxima potência.
- Eficiência Energética: Indica performance do painel informando o percentual de energia solar transformada em elétrica. Dada pela relação abaixo:

$$E_{ener} = \frac{P_{ger}}{I * A} \quad (1)$$

Onde P_{ger} , I , A , são a potência gerada, irradiação solar e área do painel, respectivamente.

2.3 Fatores que Influenciam no Painel Fotovoltaico

Segundo Fadigas (s. d.), existem dois fatores que tem grande influência na operação de um painel fotovoltaico.

- Irradiação Solar Incidente;
- Temperatura de Operação da Placa.

2.3.1 Irradiação Solar Incidente.

Um aumento na intensidade da irradiação solar incidente gera um aumento linear na corrente gerada e um aumento logarítmico da tensão de circuito aberto (V_{aberto}), como pode

ser visto na Fig.5, sendo assim, a intensidade da radiação solar é mais expressiva na corrente gerada pelo painel fotovoltaico. (Pinho e Galdino ,2014)

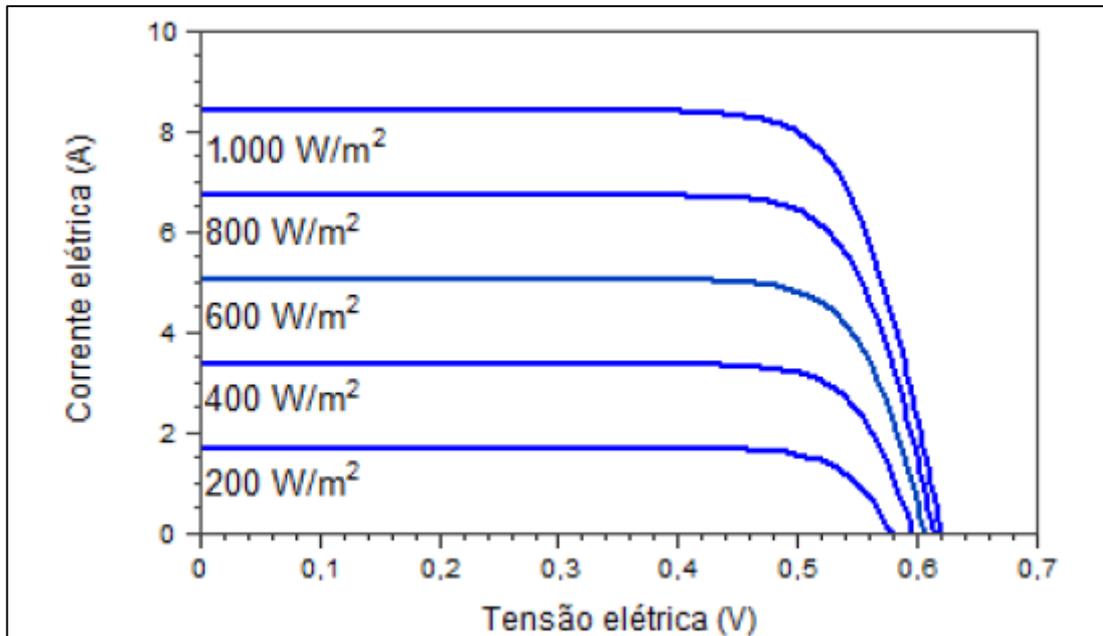


Figura 5: Efeito da irradiação na tensão e na corrente de painéis fotovoltaicos.

Fonte: Pinho & Galdino ,2014

2.3.2 Temperatura de Operação da Placa

Segundo Portal Energia Renovável (2004) a temperatura das células fotovoltaicas tem um efeito negativo principalmente na tensão do módulo, uma placa fotovoltaica ventilada de geração de 50 Wp, tem uma variação de -8 Volts no verão e +10 Volts no inverno. Sendo que a corrente apresenta um ligeiro aumento, porém, a variação da tensão é bem mais significativa.

Ainda segundo o autor a potência de um módulo fotovoltaico pode diminuir cerca de 35% no verão, em comparação com as especificações do módulo. Logo, observa-se uma redução na transformação de energia do painel com o aumento da temperatura, como pode ser visto na Fig. 6, que mostra a queda de produção (barras em azul) com o aumento da temperatura (barras vermelhas) em relação a temperatura ambiente para uma irradiância de 1000 w/m².

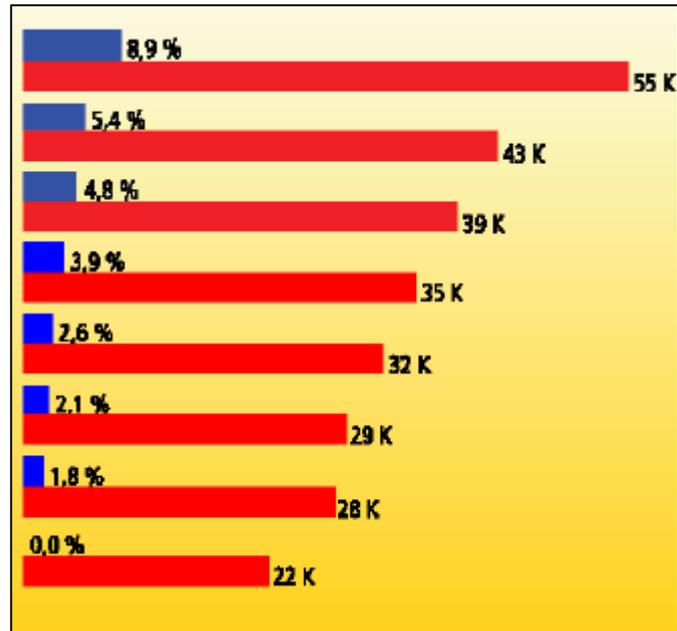


Figura 6: Redução na transformação de energia do painel com o aumento da temperatura.

Fonte: Portal Energia Renovável, 2004

3. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA PLACA NA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A irradiância solar que atinge a Terra é denominada irradiância extraterrestre e tem valor aproximado de 1367 w/m^2 (acordado pelo WRC- World Radiation Center). A mesma é função da latitude local, da hora do dia, data e ângulo de declinação solar do dia (IQBAL, 1983). Porém, não é essa irradiância que atinge a superfície terrestre, pois, parte dessa irradiância é absorvida pela atmosfera. A radiação que atinge a superfície terrestre é uma junção de duas componentes, a parte difusa e parte direta (CRUZ, 2001). A radiação difusa é aquela, como o próprio nome diz sofreu difusão, e carece de direção específica. A fração direta é aquela que vem segundo a direção do Sol sem sofrer difusão, como mostrado na Fig.7.

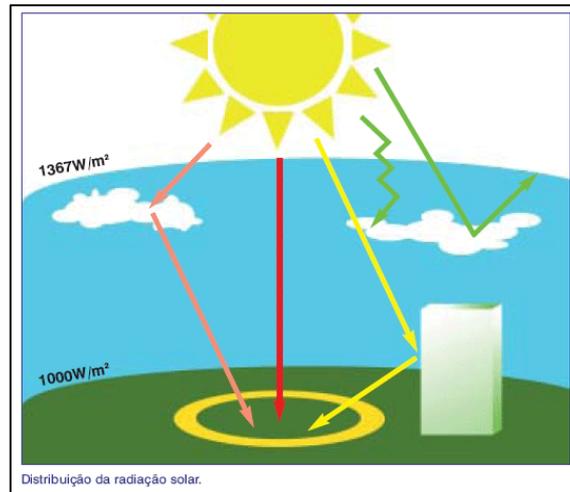


Figura 7: Distribuição da radiação solar.

Fonte: www.enercom.pt

O posicionamento Sol-Terra é necessário para determinar a quantidade de radiação recebida pelos equipamentos solares, sendo assim este posicionamento relaciona-se com a quantidade de energia elétrica produzida por uma placa fotovoltaica. De acordo com o posicionamento Sol-Terra os dias podem ser mais longos ou mais curtos, indicando mais tempo de incidência da radiação solar, isso é resultado da inclinação do eixo da Terra, visto na Fig.8. Observando-se para o hemisfério sul dias mais longos no solstício de verão e mais curtos no solstício de inverno, para o Equador a duração dos dias são sempre iguais, e para regiões próximas as variações são pequenas (Pinho e Galdino ,2014).

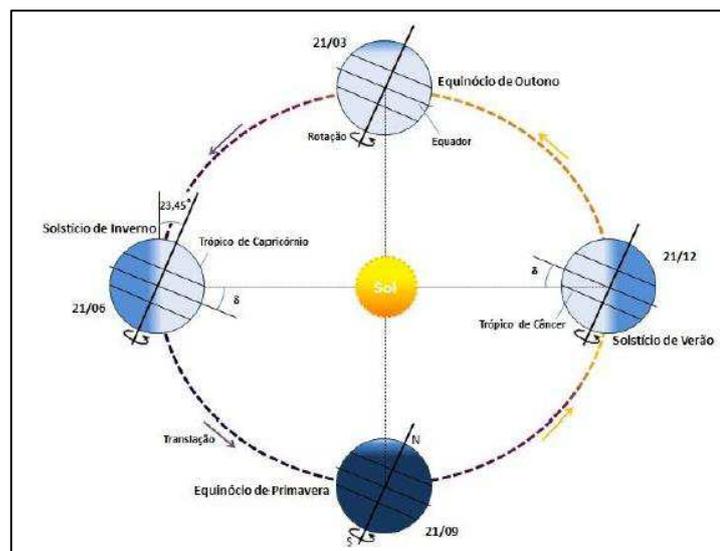


Figura 8: Órbita da Terra em torno do Sol, indicando as estações do ano.

Fonte: Pinho & Galdino ,2014

Pinho e Galdino (2014) afirmam que para o hemisfério sul o valor mínimo da irradiância extraterrestre ocorre no afélio, ver Fig.9, próximo ao solstício de inverno e tem valor aproximado de 1322 w/m^2 e o valor máximo no periélio próximo ao solstício de verão com valor aproximado de 1412 w/m^2 .

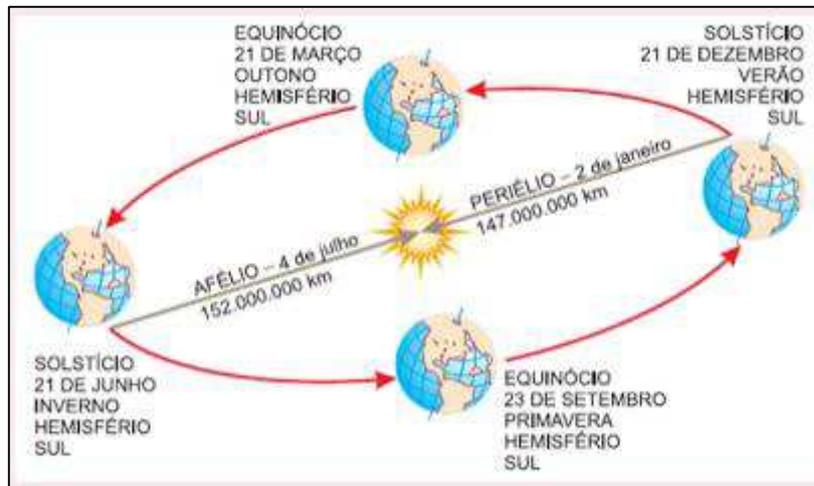


Figura 9: Órbita da Terra em torno do Sol, indicando o periélio e o afélio.

Fonte: www.professorleandronieves.blogspot.com.br/2016/03/movimento-de-rotacao-da-terra.html

A irradiância solar depende do ângulo da altura do Sol, que é o ângulo formado entre o raio solar e sua projeção no plano horizontal, essa altura da posição muda durante o dia, havendo variações também durante o ano; essas variações ocorrem devido ao movimento relativo da Terra e do Sol. Além desse ângulo, o ângulo do azimute solar refere-se à posição em relação ao eixo Norte-Sul da Terra, a variação desse ângulo ocorre devido ao movimento de rotação da Terra, esse movimento pode ser notado pelo que chamamos de movimento aparente do Sol (Marques, 2017).

Outro ângulo que tem influência sobre a irradiância é o ângulo de zênite, esse ângulo é formado pelo raio solar com o eixo de zênite, que é o eixo vertical local. A variação do ângulo zenital é provocada pelo movimento translacional da Terra em torno do Sol. Observa-se que quanto maior o ângulo de zênite, menor será a irradiação solar sobre uma determinada superfície. Esse fenômeno é explicado devido ao percurso através da atmosfera que é mais longo quanto maior o ângulo zenital, dessa forma a incidência solar sofre maior absorção e difusão o que implica em uma menor irradiância (Marques, 2017).

Os diversos ângulos do posicionamento solar podem ser vistos na Fig.10.

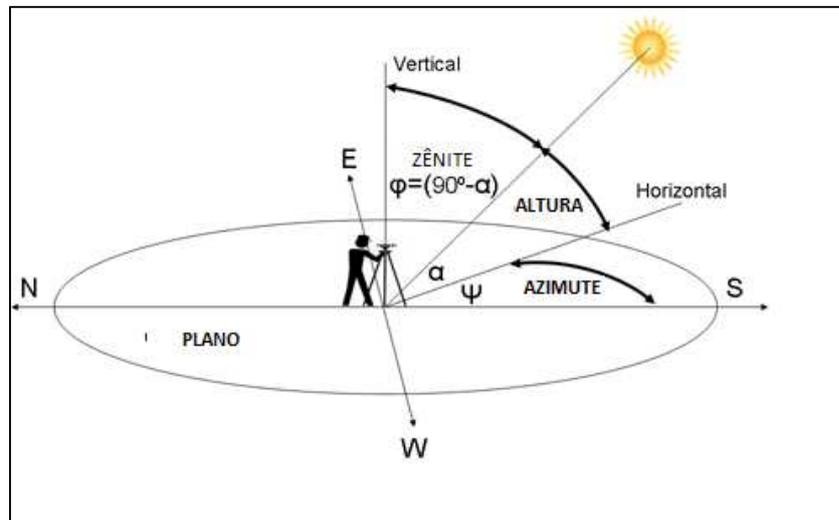


Figura 10: Identificação dos ângulos do posicionamento solar.

Fonte: atrc.net.pk.

Os ângulos mencionados acima não podem ser controlados, pois são razões da natureza, porém, observa-se na literatura que a forma como a placa é disposta em relação a sua inclinação, influencia na captação de radiação solar, dessa forma para os diversos ângulos haverá diferença na captação de energia solar por uma placa fotovoltaica, e conseqüentemente na produção de energia elétrica. Ou seja, de acordo com o posicionamento solar e o posicionamento da placa fotovoltaica obter-se-á resultados distintos de produção de energia elétrica devido aos posicionamentos relativos entre a placa e o Sol. Por isso, no seguinte trabalho pretende-se analisar a influência da inclinação de um painel fotovoltaico na eficiência do mesmo.

4. PAINÉIS FOTOVOLTAICO-TÉRMICOS

Como visto anteriormente, a eficiência de conversão de painéis fotovoltaicos é bastante dependente da temperatura de operação. Marques (2008) sugere a utilização de painéis fotovoltaico-térmicos para a transmissão do calor gerado na placa para um fluido de trabalho melhorando dessa forma a eficiência de conversão em energia elétrica.

De acordo com Chow (2010) os PVT's têm como vantagens, a capacidade de proporcionar maior eficiência de transformação em energia elétrica, além da redução da área necessária para captação de energia solar, bem como o investimento inicial se compararmos com um sistema composto de painel fotovoltaico e térmico separados.

Os PVT's podem ser classificados em três grupos, segundo Teixeira (2009) e confirmado por Guerra (2016), são eles:

- Aquecimento de Ar: utiliza como fluido de trabalho, como o próprio nome sugere, o ar. Pode ser por ventilação forçada ou natural.
- Aquecimento de Água: utiliza como fluido de trabalho a água, a circulação pode ocorrer por variação de densidade do fluido (efeito termossifão) ou por circulação forçada (por bombeamento).
- Aquecimento de Ar e Água: utiliza ar e água para o arrefecimento da placa.

O presente trabalho utilizará o arrefecimento a água por meio do efeito termossifão e através de circulação forçada (por meio da utilização de uma bomba submersa). Segundo Migliavacca et. al. (2014) na circulação por termossifão ocorre a transferência de calor da placa para a água, essa aquece e sua densidade diminui essa água é empurrada pela água mais densa (temperatura menor). Sendo assim, a água aquecida sobe para o reservatório e a água mais fria desce para o painel, para ser aquecida, gerando dessa forma um circuito de aquecimento de água até que a temperatura se estabilize, como visto na Fig.11.

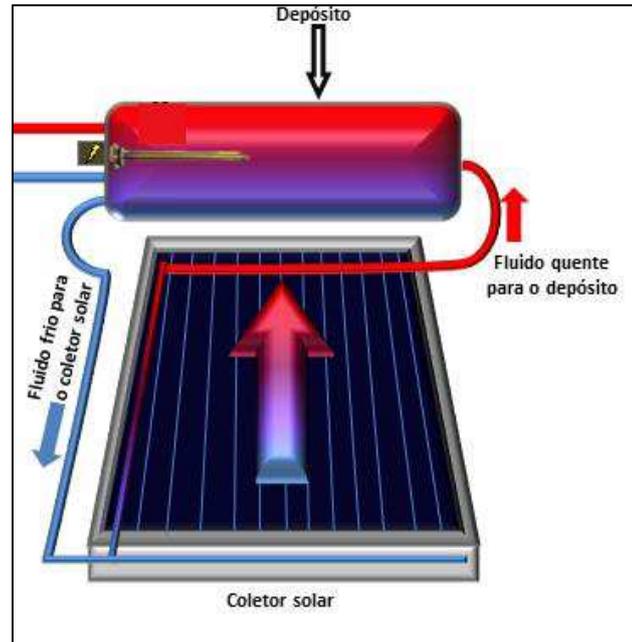


Figura 11: Modelo de um PVT, efeito termossifão.

Fonte: www.sunenergy.eco.br

5. ANALISE EXERGÉTICA

5.1 Histórico

Atualmente a preocupação com a poluição do meio ambiente nos volta para formas mais sustentáveis de desenvolvimento. Com isso, a sociedade busca por vias mais eficientes de produção e consumo de energia. A preocupação com máquinas mais eficientes que produzem mais com menos insumos é constante, porém, observa-se que esta busca não é dos tempos atuais, mas sim ocorre desde que o homem produziu a primeira máquina a vapor (patenteada em 1705).

Por volta do século XIX com a explosão da revolução industrial, houve uma evolução crescente em Ciência e Tecnologia, surgindo diversas teorias e comprovações científicas, evoluindo na forma como as máquinas funcionavam em busca de melhorias. Dentro desse contexto, a Termodinâmica, evoluiu na descrição dos fenômenos observados nas máquinas térmicas, entendendo e maximizando estas.

Apesar do método da exergia se desenvolver paralelamente na Europa e nos Estados Unidos em meados do século XX (Rojas,2007), os primórdios dessa propriedade são muito mais antigos, já que a exergia é o trabalho máximo que podemos obter em um sistema em relação a um estado de referência (Moran e Shapiro,2009).

Sadi Carnot (1796-1832), conhecido como o fundador da Termodinâmica como disciplina teórica, com o objetivo de obter máquinas a vapor mais eficientes, surge com o conceito de trabalho máximo e a tentativa de quantificá-lo. Carnot formulou o trabalho máximo que uma máquina térmica pode obter, ele provou que o trabalho máximo de uma máquina térmica ocorre para o ciclo reversível, e definiu a eficiência máxima de uma máquina térmica denominada como eficiência de Carnot, em homenagem ao estudioso.

William Thomson e Rudolf Clausius desenvolveram de forma simultânea as premissas e enunciados que formulam a base da Segunda Lei da Termodinâmica, entre 1850 a 1851.

Rudolf Clausius (1822-1888) foi um dos primeiros cientistas a aceitar que haviam duas Grandes Leis da Termodinâmica. Suas ideias acerca de irreversibilidades no sistema e sobre a denominação do conceito de entropia são uma das suas contribuições mais importantes. Ele afirmou que embora os princípios dos trabalhos de Carnot, Clayperon e outros cientistas

estivessem corretos, suas suposições da teoria calorífica estavam equivocadas, formulando assim duas leis termodinâmicas para substituir as suposições equivocadas da teoria calorífica. Em 1865, ele declarou o conceito de entropia e as duas leis da termodinâmica pelas seguintes afirmativas “a energia do universo é constante (conservação da energia, Primeira Lei da Termodinâmica) - a entropia do universo tende a aumentar (Segunda Lei da Termodinâmica)”. (Rojas,2007)

Paralelamente ao desenvolvimento da Segunda Lei por Clausius, de maneira simultânea, surge o trabalho do irlandês William Thomson(1824-1907), também conhecido como Lord Kelvin. Thomson afirmou, que se a entropia tende sempre a aumentar, o universo poderia dessa forma alcançar um estado uniforme e de máxima entropia, não sendo possível extrair trabalho algum do universo, denominou esse estado como calor morto do universo. Note à similaridade entre esse conceito com o conceito hoje entendido como estado morto para exergia, que será posteriormente detalhado. Tudo isso informa que as formulações da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica estão intimamente ligados a exergia, pois, a análise exérgica provém dessas duas leis (Rojas,2007).

Josiah Willard Gibbs (1839-1903), físico-químico estadunidense, produziu importantes trabalhos para o desenvolvimento de estudos teóricos em termodinâmica. Segundo Rezac, P, e Metghalchi, H. (2004), Gibbs estudou a quantidade máxima de trabalho mecânico que um corpo realiza sem ter interações de calor e troca de volume, denominando essa quantidade de “trabalho disponível de um corpo”.

Gibbs em sua obra *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances* revelou os fundamentos teóricos do conceito de exergia, propriedade essa que denominou “energia disponível do corpo e do meio”. Expondo a importância para as análises da relação entre corpo-meio, ou como tratamos hoje sistema-ambiente, esse trabalho teve suma importância para o desenvolvimento das bases da análise exérgica como conhecemos hoje (Rojas,2007).

Segundo Cardoso (2008) o início do desenvolvimento da metodologia da análise exérgica ocorreu por volta de 1938, quando F. Bosnjakovic lançou o lema “Lutem contra as irreversibilidades”. Apesar do início do desenvolvimento datar dessa época, os principais desenvolvimentos datam das décadas de 50 e 60 com trabalho de Z. Rant, Keenan.

5.2 Conceitos

Diversos autores conceituaram a exergia e a análise exergética, abaixo são apresentados alguns desses conceitos.

Segundo Dincer e Cengel (2001), a análise energética é baseada na Primeira Lei da Termodinâmica, informa a quantidade de perda de calor, porém, não informa a degradação da energia que ocorre no processo e a qualidade do calor que é resíduo do processo. Já o método da exergia atende as limitações da análise energética, devido a exergia basear-se na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Sendo assim, a análise exergética identifica, localiza e quantifica as perdas reais de exergia.

A exergia é uma ferramenta útil na determinação da eficiência dos processos e equipamentos, que aponta as causas, localização e magnitude das ineficiências e quantificação das perdas e resíduos gerados. (Arredondo,2009).

Rezac e Metghalchi (2004), afirmam que a palavra certa para potência em um sistema não é a energia e sim exergia, pois, essa informa a máxima quantidade de energia útil, que se pode ser obtido do desequilíbrio do sistema com o ambiente de referência.

Alguns autores relacionam o método de análise exergética com o desenvolvimento sustentável, com o uso consciente dos combustíveis. Segundo Wall (1977) a exergia tem três características que tornam uma ferramenta útil na obtenção de indicadores ambientais: indica quantidade, qualidade, e mede desequilíbrio de um sistema com relação ao meio ambiente. E Rosen (2002) afirma que a crise energética pode ser compreendida melhor pela metodologia exergética, pois, a crise é sobre os recursos de qualidade que podem ser usados para satisfazer as necessidades humanas, ou seja, a crise é exergética.

Como a análise exergética identifica a parte da energia que está disponível para realização de trabalho, ela pode ser usada como indicador de qualidade da energia, onde, quanto mais próximo a exergia da energia maior a qualidade, indicando que grande parte da energia está disponível para realização de trabalho (Arredondo,2009). Logo, quanto maior a exergia associado a um recurso maior a qualidade dele, indicando que ele tem menos perdas, conseqüentemente, menor a quantidade de resíduos para o meio.

Ainda Dincer e Rosen (2007) os métodos exergéticos são importantes já que tem um papel importante para aumentar a eficiência de sistemas. As relações entre energia e exergia,

e entre exergia e meio ambiente deixam claro que exergia está diretamente ligado ao desenvolvimento sustentável. Muitos autores concordam que a análise exergética é mais completa que a análise energética, sendo assim afirmam que a análise exergética pode ser usada para melhoria de sistemas.

Dubey e Tiwari (2010) compararam a análise exergética e energética, e afirmaram que o importante é a qualidade e não a quantidade, ou seja, o importante é o quanto podemos extrair de trabalho do sistema (qualidade da energia) e não necessariamente a quantidade de energia.

Podemos entender esse conceito através de um exemplo utilizado por Moran e Shapiro (2009) em que retrata a descoberta de um poço geotérmico, e os autores discutem que economicamente não interessa a quantidade de energia no poço, mas sim o quanto desse potencial podemos utilizar, ou seja, o que importa é quanto dessa energia está disponível para realização de trabalho, portanto, o que interessa é a exergia do poço.

Yazdanpanahi et al (2005) apontaram algumas deficiências da análise energética, dentre elas, o fato da análise realizar apenas um balanço de energia não indicando a direção dos processos. Ainda segundo os autores a análise não diferencia os diversos tipos de energia, sendo assim, 1 J de calor é igual a 1 J de energia elétrica, sabemos que em transformação de trabalho a energia elétrica apresenta uma disponibilidade bem superior à do calor, porém a análise energética não inclui essa diferença. Além disso, a análise energética não expõe as irreversibilidades e perdas do sistema.

Podemos notar que a análise exergética supri grande parte dos percalços da análise energética. Pois, diferencia as diversas formas de energia, para análise exergética a energia de 1J de calor não é igual a 1J de energia elétrica, devido ao fato da disponibilidade para realização de trabalho dessas formas de energia não serem iguais, a energia elétrica é maior em disponibilidade do que a energia em forma de calor, logo, a exergia da energia elétrica é maior que a exergia associada ao calor.

Segundo Sarhaddi et al. (2009) a análise energética não qualifica a energia contrariando outros estudos, por isso, os dados exergéticos são mais realísticos em relação aos dados energéticos. Logo, a análise exergética é mais apta para tratar dos processos reais, pois, essa considera a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica.

Além dessa diferenciação a análise exergética expõe as irreversibilidades e perdas do sistema. Segundo Chamoli (2013) a análise exergética quantifica a coleta e consumo da exergia, indicando as perdas irrecuperáveis para o sistema levando o sistema para o caminho da melhoria.

Segundo esse pensamento de melhoria do sistema Calderón et al (s.d) afirma que a análise exergética é útil para melhorar a eficiência no uso dos recursos energéticos, pois essa localiza, quantifica, e dá a magnitude dos resíduos e perdas do sistema. Podendo assim indicar pontos de melhoria para o maior aproveitamento da exergia disponível.

5.3 Formulação Exergia

Segundo Moran e Shapiro (2002) a variação de exergia de um sistema é formada por três componentes: transferência de exergia associado ao calor, transferência de exergia associado ao trabalho, e destruição de exergia. Como visto na Eq.2:

$$\begin{aligned} \Delta E_x = & [\textit{Transferência de exergia associada ao calor}] \\ & + [\textit{Transferência de exergia associado ao trabalho}] \\ & - [\textit{Destruição de exergia}] \end{aligned} \quad (2)$$

De acordo com Moran e Shapiro (2002) a variação de exergia para sistemas fechados é dada pela Eq.3:

$$\Delta E_x = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right) \delta Q - [w - p_o(V_2 - V_1)] - E_d \quad (3)$$

Onde Q , w , T_b , T_o , p_o , $(V_2 - V_1)$, E_d são transferência de calor entre o sistema e suas vizinhanças, transferência trabalho entre o sistema e suas vizinhanças, a temperatura da fronteira do sistema, temperatura e pressão no estado morto, a variação volumétrica do sistema e a destruição de exergia, respectivamente.

A transferência de exergia associada ao calor refere-se à possibilidade de produção de trabalho por meio da utilização desse calor, note pela formulação que essa hipótese é feita para uma máquina reversível, pois o termo da eficiência de Carnot aparece entre parênteses. Assim, a transferência de exergia de calor é uma medida da transformação do calor em trabalho em uma máquina reversível (Moran e Shapiro, 2002).

A transferência de exergia associada ao trabalho é entendida como o trabalho máximo que poderia ser obtido se o sistema e o ambiente de referência estivessem interagindo. O w é o trabalho produzido pelo sistema que não estaria totalmente disponível pela máquina já que nessa hipótese parte do trabalho é usado para o deslocamento do sistema. Caso não haja variação volumétrica no sistema, a transferência de exergia associada ao trabalho seria igual ao trabalho produzido pelo sistema (Moran e Shapiro, 2002).

A destruição de exergia ocorre devido a irreversibilidades no interior do sistema, ela pode ser positiva ou nula. No caso em que é nula não existem irreversibilidades internas seria o caso ideal.

5.4 Energia e Exergia de Placas Fotovoltaicas

5.4.1 Energia da Placa

A análise de energia de uma placa fotovoltaica considerando-a como um sistema pode ser entendida como a entrada e saída de energia. Como pode ser visto na Fig.3.

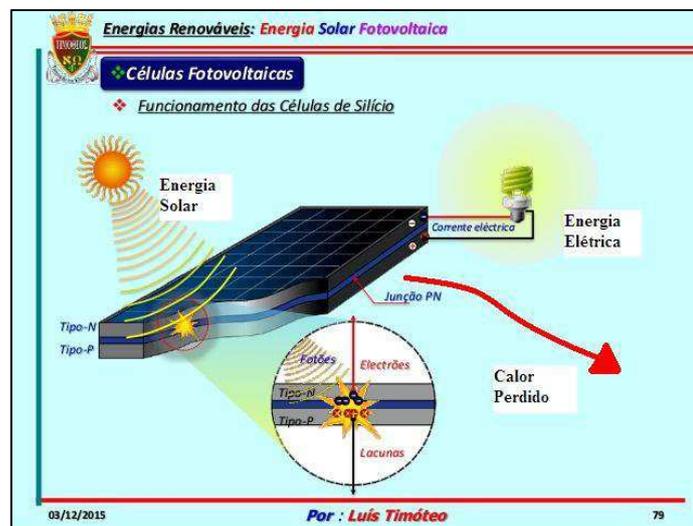


Figura 12: Entrada e saída de energia em uma placa fotovoltaica.

Fonte:pt.slideshare.net, Adaptado.

A entrada de energia da radiação solar pode ser medida através da Eq.4 (Joshi e Pandey, 2009).

$$E_{solar} = I_{solar}A \quad (4)$$

Onde I_{solar} é intensidade da radiação solar e A é a área da placa fotovoltaica.

Joshi e Pandey (2009) afirmam que a saída de energia é dada por dois meios; por energia elétrica (desejável) e calor devido à diferença de temperatura entre a placa e o meio. A saída de energia elétrica pode ser definida como:

$$E_{elet} = V_{ab}I_{ab}FF \quad (5)$$

Onde V_{ab} e I_{ab} são a voltagem e a corrente em circuito aberto. E FF é o fator de enchimento, adimensional, que é a relação entre a potência máxima e a potência do circuito aberto, e pode ser formulada como:

$$FF = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{ab}} = \frac{V_{m\acute{a}x}I_{m\acute{a}x}}{V_{ab}I_{ab}} \quad (6)$$

Substituindo FF na Eq.5.

$$E_{elet} = V_{ab}I_{ab} \frac{V_{m\acute{a}x}I_{m\acute{a}x}}{V_{ab}I_{ab}} \quad (7)$$

Logo:

$$E_{elet} = V_{m\acute{a}x}I_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

A outra forma de saída de energia descrita pelos autores acontece por troca de calor da placa com o meio e é definida na Eq.9:

$$Q_{sai} = hA(T_{pl} - T_o) \quad (9)$$

Onde $(T_{pl} - T_o)$ e h são a diferença de temperatura da placa e a temperatura do estado morto e o coeficiente de transferência de calor que depende da velocidade do vento definida por Pandey et al (2015), como mostrado pela Eq.10:

$$h = 5,7 + 3,8v \quad (10)$$

5.4.2 Exergia da Placa

Para uma análise exergética é preciso ter em mente que essa, além da quantidade de energia no sistema, ela também quantifica a qualidade dessa transformação. Sendo assim, uma análise termodinâmica mais completa do sistema do que aquela fornecida por apenas uma análise energética, pois permite a determinação dos rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipos e valores reais (Moran e Shapiro, 2002).

Diferentemente da energia, a exergia não é conservativa, isto é, ela pode ser destruída na presença de irreversibilidades. Portanto, percebe-se que a exergia quando é destruída, significa que uma possibilidade de obtenção de trabalho está sendo desperdiçado.

No estudo exergético de uma placa fotovoltaica podemos perceber que há transferência de exergia solar para o sistema, onde a placa produz um potencial exergético elétrico e exergia é destruída com o não aproveitamento da exergia térmica e irreversibilidades do sistema.

A exergia solar tem sido estudada por vários pesquisadores, em nossa análise usaremos a equação para exergia solar proposta por Petela, (1964), mostrado na Eq.11:

$$Ex_{solar} = \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_o}{T_{sol}} \right)^4 \right] AI_{solar} \quad (11)$$

Onde T_{sol} e T_o são a temperatura solar que é igual a 5777K e a temperatura do ambiente de referência, respectivamente.

Essa exergia é aquela disponibilizada à placa fotovoltaica, ou seja, quanto mais a exergia elétrica se aproxima dessa quantia mais eficiente é o sistema. Considera-se que a exergia elétrica é totalmente utilizada para gerar o máximo de energia elétrica, produzindo tensão e corrente máximas afirmado por Pandey et al (2015), logo:

$$Ex_{elet} = V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x} \quad (12)$$

Porém, nessa pesquisa foi utilizada a equação que leva em consideração a voltagem e corrente produzidas, logo:

$$Ex_{elet} = V_{pro} I_{pro} \quad (13)$$

A exergia associada ao calor ocorre devido à diferença de temperatura entre a placa fotovoltaica e o ambiente, em consequência dessa diferença ocorre um fluxo de calor da placa para o ambiente que poderia ser utilizado para a realização de trabalho, como já visto. Logo orientados pela parte associada ao calor da Eq.3, temos:

$$Ex_{term} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{pl}}\right) Q_{sai} \quad (14)$$

Lembrando que Q_{sai} foi dado pela Eq.9, assim a Eq.14 assume a forma:

$$Ex_{term} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{pl}}\right) hA(T_{pl} - T_o) \quad (15)$$

O balanço exergético pode ser visto na Fig. 13, abaixo.

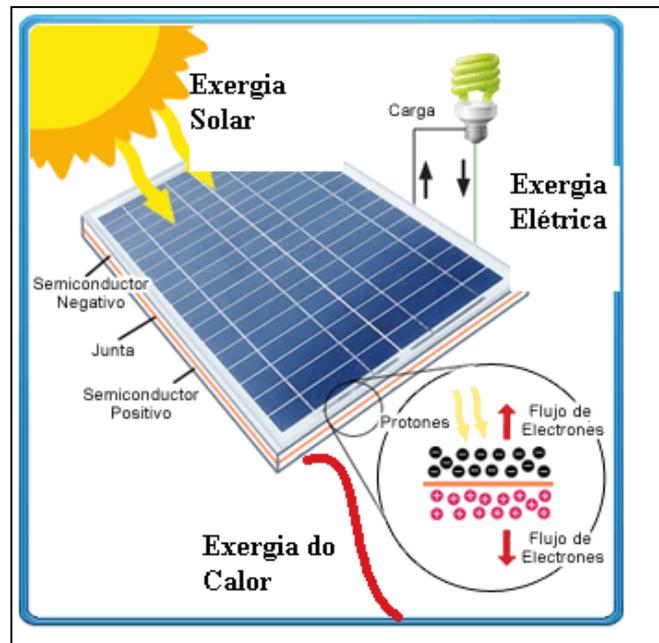


Figura 13:Mostra uma esquematização das exergias envolvidas em uma placa solar.

Fonte:ljandrade.wordpress.com, Adaptado.

5.4.3 Eficiência Exergética

A eficiência de uma máquina de forma geral é entendida como o quanto se “gasta” para realizar um determinado efeito. A eficiência exergética pode ser entendida como a exergia que é produzida na placa, tanto elétrica como térmica (sendo a térmica uma perda do sistema), sobre a exergia de entrada, ou seja, a exergia solar, logo:

$$\psi_{exer} = \frac{[Exergia\ Produzida]}{[Exergia\ de\ Entrada]} \quad (16)$$

Onde [Exergia Produzida] é a exergia elétrica menos a exergia térmica, já que essa não é aproveitada em uma placa fotovoltaica, ou seja, esse potencial de realização de trabalho é destruído. E [Exergia de Entrada] é a exergia solar.

$$\psi_{exer} = \frac{\left[V_{pro} I_{pro} - \left(1 - \frac{T_o}{T_{pl}} \right) hA (T_{pl} - T_o) \right]}{\left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_o}{T_{sol}} \right)^4 \right] AI_{solar}} \quad (17)$$

5.5 PESQUISAS EXERGÉTICAS PV E PVT

Várias pesquisas foram realizadas nas últimas décadas com o objetivo de analisar as perdas, possibilidade de melhoria e eficiência de uma placa fotovoltaica (PV) ou placa fotovoltaica e térmica (PVT).

Saidur et al. (2012) realizaram uma análise bibliográfica sobre análise exergética de vários sistemas solares dentre eles: energia solar fotovoltaica, dispositivos de aquecimento solar dessalinização de água solar, ar condicionado solar e refrigeradores, processo de secagem solar e geração de energia solar. Segundo os autores a análise exergética pode ser usada para melhorar a eficiência de um sistema.

Atentando-se a mudança do estado de referência (estado morto) em determinadas estações do ano, Izgi e Akkaya (2013) analisaram exerconômica um sistema fotovoltaico PV de 750 wp no parque meteorológico da Universidade Técnica de Istambul (41,102° W 29,02°E). Analisa-se dois meses abril (primavera) e agosto (verão). Com eficiência energética de 5,5% a

8,5% e 4,5% à 7,3%, respectivamente. E eficiência exergética de 3,8% a 6,5% e 3% a 5,3%, respectivamente.

Aoun et al. (2014) avaliaram também a mudança do clima na conversão de energia de um painel fotovoltaico, fizeram a validação experimental de diferentes eficiências de energia, conversão de potência e exergia de um módulo PV mono-cristalino. Os testes experimentais realizados na Unidade de Pesquisa de Energia Renovável de Saharan Medium, Adrar, Algeria (0,18 W, 27,82 N), durante os dias 21 março (dia nublado) e 22-23 do mesmo mês (dias ensolarados) em 2013. No o dia nublado (21) a eficiência energética varia entre 22,3%- 17,2%, a eficiência exergética varia entre 5,3%-12% e a eficiência de potência entre 12,3%-16,1%. O dia 22 a variação da eficiência energética foi 10,83%-21,85%; a eficiência exergética foi 7,98%-14,54% e a eficiência potência 8,1%-16,38%. No dia 23 a eficiência energética variou entre 9,28%-22,14%; a eficiência exergética entre 1,8%-15,5% e a eficiência de potência 7,55%-16,83%.

Seguindo a linha de pesquisa da mudança da eficiência com o clima, afinal a propriedade exergia é uma propriedade conjugada dependente do sistema e do ambiente, Khaloei et al. (2015) analisaram a eficiência energética e exergética de uma matriz PV calculada para o clima de Kerman, uma vez que as eficiência energética e exergética dependem das condições climáticas. Além disso também foi analisado a influência do vento, através de um modelo criado para a utilização da matriz fotovoltaica para geração de energia elétrica durante vários meses do ano. Isto é, por não se restringir a utilização em épocas quentes ou frias, foi possível realizar o estudo completo para o clima de Kerman.

Outro trabalho relevante tratando-se de exergia e mudança do estado de referência é Shukla et al. (2015), que avaliaram térmica, elétrica e exergia de saída de um módulo PV solar. O experimento foi feito no Centro de Energia, Manit Bhopal, no dia 12 de maio (nublado). A eficiência variou entre 6-9% durante o dia, a eficiência exergética variou entre 8-10% e a eficiência exergética diminui com a radiação solar e temperatura ambiente devido ao aumento da temperatura da célula e irreversibilidade quando a saída de eletricidade aumenta.

Outra linha de pesquisa bastante utilizada leva em consideração o material do painel fotovoltaico. Como Pandey et al. (2015) apresentam a avaliação do desempenho energético e exergético da heterojunção com módulo fotovoltaico com dez meses de estudo experimental de uma camada fina intrínseca para um determinado dia de diferentes meses do ano de uma zona

climática típica do norte da Índia, avaliou-se as eficiências de conversão de energia, exergia e potência. Descobriu-se que todas as eficiências são mais altas no período da manhã em comparação ao meio dia, que é devido a variação na temperatura do módulo ao longo do dia. Descobriram ainda que desempenho melhor em fevereiro fez-se uma nova estrutura de heterojunção e a eficiência exergética flutua mais frequentemente do que a eficiência energética, devido sua forte dependência à velocidade do vento, e essa varia muito.

Outro trabalho analisando o efeito do material da placa é o de Rusirawan e Farkas (s.d) avaliaram um sistema PV de 10 Kw on grid no sistema de Szent Istvan Universit, Godollo-Hungria, usando duas diferente tecnologia PV policristalina (ASE-100) e amorfas (DS-40) usando dois métodos "parâmetro de energia solar" e "Energia fotônica". A eficiência Características do módulo ASE-100 são superiores ao módulo DS-40.

Uma linha de pesquisa que vem crescendo ao longo dos anos é o da simulação, podemos citar como exemplo o trabalho de Sarhaddi et al. (2009) que desenvolveram uma otimização exergética de um sistema solar fotovoltaico a partir de um programa de computador para estimar os parâmetros elétricos e operacionais com boa concordância com as análises experimentais encontrada na literatura. E concluíram que os modelos elétricos e exergético dos modelos PV estudado obtiveram boa aproximação com o experimental de Saker e Norton. A temperatura do PV tem grande efeito na eficiência exergética e pode ser melhorada se o calor for removido. Em relação à radiação, inicialmente o aumento da radiação ocorre o aumento da eficiência exergética até um máximo ponto após isso ocorre uma diminuição, quando a temperatura ambiente aumenta, a eficiência exergética do PV decresce.

Outro trabalho envolvendo simulação só que para um painel fotovoltaico e térmico (PVT) é o de Chamoli (2013) que analisou o desempenho exergético de um coletor solar de placa plana simulado no Matlab Simulink, foram incrementadas área de 1 a 9 m^2 e fluxo de massa de 0,001 a 0,009 Kg/s. O valor foi 9 m^2 e 0,008 Kg/s e 4% de eficiência exergética e temperatura do fluido de saída 360 K temperatura ambiente entre 300 a 313 K.

Sobhnamayan et al. (2014) é outro trabalho que utiliza simulação como ferramenta de análise, realizaram uma otimização de um coletor solar fotovoltaico (PV/T) baseado em exergia. Foi realizado o balanço energético obtendo-se assim expressões analíticas para parâmetros térmicos (temperatura das células solares, temperatura, taxa útil do calor absorvido, temperatura média da água, eficácia térmica). Um programa de computador foi desenvolvido

para obter a quantidade de energia térmica usando Algoritmo Genético (GA) em comparação com dados experimentais de Huang et al (2001). Encontrou-se uma velocidade de água ótima de 0,09 m/s e diâmetro do tubo 4,8 mm. A máxima eficiência exergética atingida é 11,36%.

Sabemos que a otimização de um painel fotovoltaico através da utilização da energia térmica do PV obtém bons resultados tanto energeticamente como exergeticamente.

Podemos citar o trabalho de Saulox et al (2003) analisou-se sistemas fotovoltaicos e fotovoltaicos/térmicos (PV/T), com base em exergia. Utilizaram modelo térmico e elétrico para avaliação exergética detalhada dos sistemas PV/T. O desempenho do sistema PV/T foi então avaliado como uma função das condições ambientais, ou seja, a intensidade e temperatura ambiente, além dos possíveis efeitos do funcionamento do arrefecimento da entrada fluido. Estes resultados permitiram limitações dos sistemas PV/T (ou seja, a temperatura ambiente), em particular, o benefício de usar sistemas PV/T em vez de PV devido à menor temperatura das células.

Yazdanpanahi et al.(2005) investigaram a eficiência exergética de um coletor de água solar fotovoltaico (PVT) experimentalmente e numericamente. Os vários componentes exergéticos no sistema PVT são introduzidos e uma equação modificada para eficiência exergética em termos das perdas. Os experimentos foram realizados em um dia das 8 às 16 em novembro, no departamento de engenharia mecânica na universidade de Sistan e Baluchestan, Zahardan, Irã. Obteve-se uma ótima vazão mássica em que a eficiência exergética tem um valor máximo de 13,95% e 0,002 Kg/s.

Seguindo a linha de pesquisa em análise de PV/T temos Nayak e Tiwari (2008) realizaram uma análise de energia e exergia para previsão do desempenho de um coletor fotovoltaico/térmico (PVT) integrado com uma estufa em IIT, Delhi, Índia, entre junho de 2006 e maio de 2007. E obtiveram uma eficiência exergética de 4%.

Dubey e Tiwari (2010) avaliaram a energia térmica total e exergia fornecida sob a forma de calor e eletricidade a partir de híbridos fotovoltaicos/térmicos sistema de aquecimento de água, considerando 5 casos, para cinco cidades diferentes da Índia :Nova Deli, Bangalore, Mumbai, Siringar e Jodhpur. Os cinco casos distintos da análise são: I sem retirada do tanque; II retirada contínua taxa de 50 L/h; III duas vezes em um dia taxa de 100L/h; IV retirada 2h à noite a uma velocidade de 100L/h; V retirada 2h na manhã seguinte à razão 100L/h. Verificou-

se que o caso II é o mais eficiente e o caso V o menos eficiente e a cidade de Jodhpur mostrou-se o melhor lugar para se instalar.

Além das pesquisas citadas existem muitas outras relacionada com o tema, demonstrando dessa forma a importância da análise exérgica de uma placa fotovoltaica e de uma placa fotovoltaica/ térmica, atuando assim a análise exérgica como ferramenta para otimização desses sistemas.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Análise da Inclinação

Neste estudo experimental, a análise exérgica de uma placa fotovoltaica é feita sob as condições climáticas de São Luís do Maranhão, que apresenta grande potencial no aproveitamento de energia solar, por se localizar nas proximidades da linha do Equador onde o nível de insolação é alto e a duração dos dias é basicamente constante.

Para análise experimental da inclinação foi usada uma placa fotovoltaica do tipo YL140P-17B da Yingli com 140 W de potência, mostrada na Fig. 14, que converterá energia solar em elétrica. As propriedades do painel fotovoltaico são descritas abaixo:

Tabela 1: Propriedades do Painel Fotovoltaico

Potência Máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	140 W
Voltagem de Máxima Potência ($V_{m\acute{a}x}$)	18 Volts
Corrente de Máxima Potência ($I_{m\acute{a}x}$)	7,77 Amperes.
Voltagem de Circuito Aberto (V_{ab})	22,5 Volts
Corrente de Curto Circuito (I_{ab})	8,4 Amperes

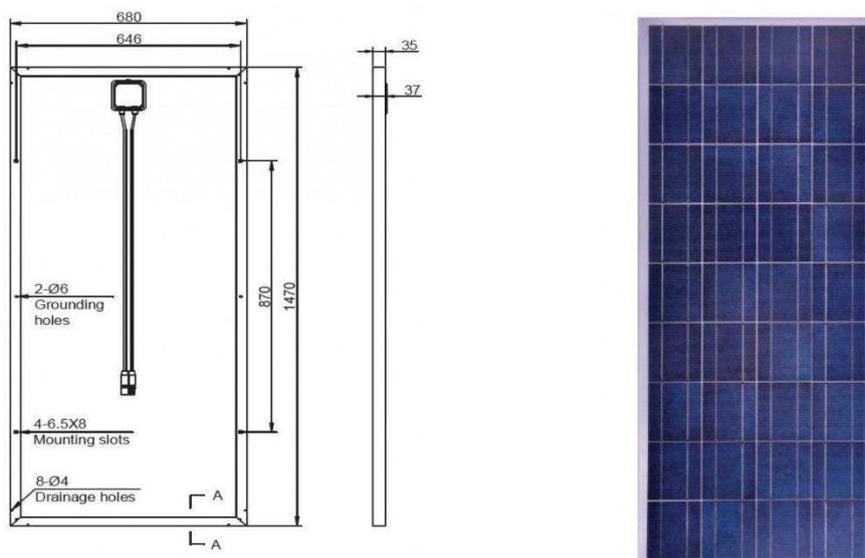


Figura 14: Painel Fotovoltaico YL140P-17B da Yingli.

Fonte: www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl140p-17b-140wp.html

6.1.1 Variáveis do Projeto

Além das propriedades da placa algumas variáveis são necessárias para a descrição da eficiência exergética, como formulado anteriormente. Essas variáveis são:

- Temperatura Ambiente (T_o);
- Irradiação Solar (I_{solar});
- Voltagem e Corrente Produzidas (V_{pro} e I_{pro});
- Velocidade do Vento (v);
- Temperatura da Placa (T_{pl});

6.1.1.1 Temperatura Ambiente (T_o)

A temperatura ambiente é essencial para a análise exergética de qualquer sistema, pois, ela informa uma propriedade do ambiente de referência, e como a exergia pode ser entendida como o desvio do estado de referência; logo, a diferença de temperatura entre um sistema e o ambiente cria um potencial exergético. Por isso, na descrição físico-matemática o termo T_o aparece várias vezes. Veja Eq.11 e 15.

Nessa análise essa propriedade será adquirida através do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), que fornece dados horários dessa variável.

6.1.1.2 Irradiação Solar (I_{solar})

Essa variável é de suma importância para à análise da eficiência exergética, pois, é através dela que iremos mensurar o quanto de exergia o Sol está dispondo para à placa fotovoltaica através da Eq.11. Ou seja, essa variável é uma das quantificadoras da exergia que está disponível para à placa, influenciando assim a eficiência exergética da mesma, veja Eq.17.

Essa variável será obtida através do site do INMET, que fornece a irradiação por hora; através desses dados será gerado uma curva da irradiação, e com o auxílio do *software* Excel é feita a tentativa de descrever a curva por meio de equações. Um exemplo pode ser visto abaixo, onde várias equações descrevem a irradiação entre os horários de 8:00-17:00. Como mostra a Fig.15.

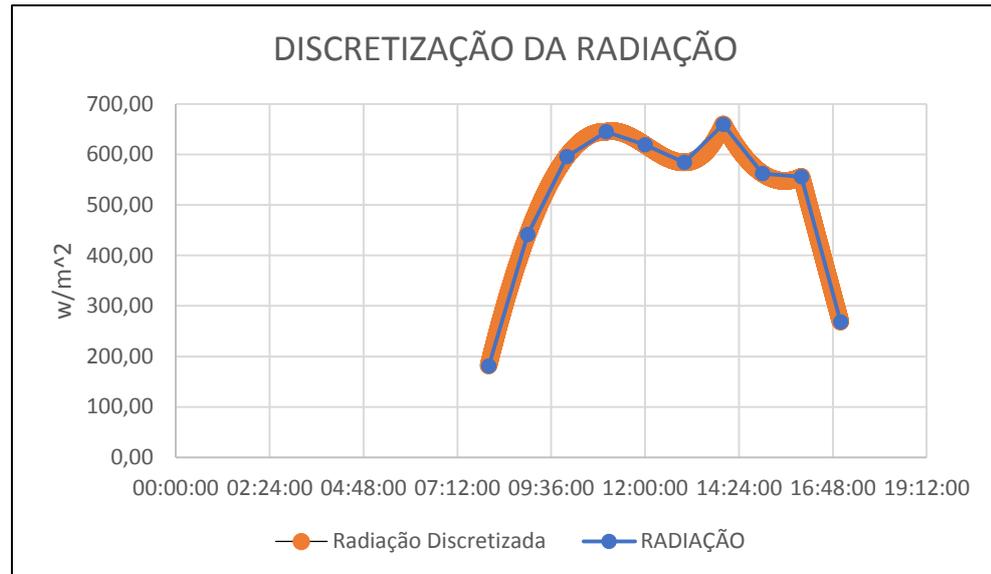


Figura 15: Radiação e Descrição da Equação da Radiação no Dia 25.07.2017.

Fonte: Autor do trabalho

De 8:00 – 11:00

$$\text{Radiação} = -30424 * \text{temp}^2 + 27794 * \text{temp} - 5703,2$$

De 11:00 – 14:00

$$\text{Radiação} = 274780 * \text{temp}^3 - 414732 * \text{temp}^2 + 207442 * \text{temp} - 33767$$

De 14:00 – 16:00

$$\text{Radiação} = 26261 * \text{temp}^2 - 34074 * \text{temp} + 11600$$

De 16:00 – 17:00

$$\text{Radiação} = -6907,5 * \text{temp} + 5160,7$$

Como observado cada equação só descreve parte da radiação no domínio temporal, sendo necessário mais equações para descrever a irradiação diária, ou seja, é necessário a discretização da curva de irradiação, e cada parte discretizada será descrita por uma equação que atue no seu domínio temporal.

6.1.1.3 Voltagem e Corrente Produzidas (V_{pro} e I_{pro});

Essas variáveis estão ligadas a taxa de transformação em energia elétrica, através dela podemos notar quanta exergia elétrica está sendo gerada, e essa informação é de grande

importância em termos de eficiência, tanto energética quanto exergética, já que o objetivo útil da placa fotovoltaica é esse, geração de energia elétrica.

Nessa pesquisa essas variáveis para a análise da inclinação são adquiridas através do controlador de carga da EP SOLAR VS4524BN, que pode ser visualizado abaixo, através da interface desse dispositivo com um computador obtemos dados de corrente, voltagem e potência gerada pelo painel fotovoltaico.



Figura 16:Controlador de Carga da EP SOLAR VS4524BN.

Fonte: <http://store3.sure-electronics.com/dc-te11664>

6.1.1.4 Velocidade do Vento (v)

Essa variável é determinante para medir o coeficiente de calor convectivo (h); dado pela Eq.10. O coeficiente convectivo nos informa a intensidade em que o calor da placa é perdido para o ambiente. Quanto maior o coeficiente convectivo mais calor é perdido, quanto mais calor perdido para o ambiente mais exergia está sendo desperdiçada na forma de calor.

Na pesquisa a velocidade do vento será obtida também através do site do INMET, que fornece a velocidade do vento a cada hora, assim nessa análise o coeficiente convectivo será horário de acordo com a velocidade média dada pelo o site do INMET.

6.1.1.5 Temperatura da Placa (T_{pl})

A variável temperatura da placa é determinante para sabermos o quanto de calor a placa está cedendo para o ambiente, ver Eq. 9. Sabemos que quanto maior a diferença de

temperatura placa-ambiente, maior o potencial exergético associado ao calor perdido, já que maior será a quantidade de calor transferida ao ambiente.

Aliado a este fator sabemos que a eficiência da placa cai com o aumento de temperatura da mesma, ou seja, com o aumento da temperatura o painel fotovoltaico gera uma quantidade menor de energia elétrica, e conseqüentemente, de exergia elétrica. Esses dois fatores fazem dessa variável essencial para a análise exergética realizada nesse projeto.

Essa variável será obtida através de seis termistores inserido na parte de baixo do painel, e espaçados igualmente como mostra a Fig.17.

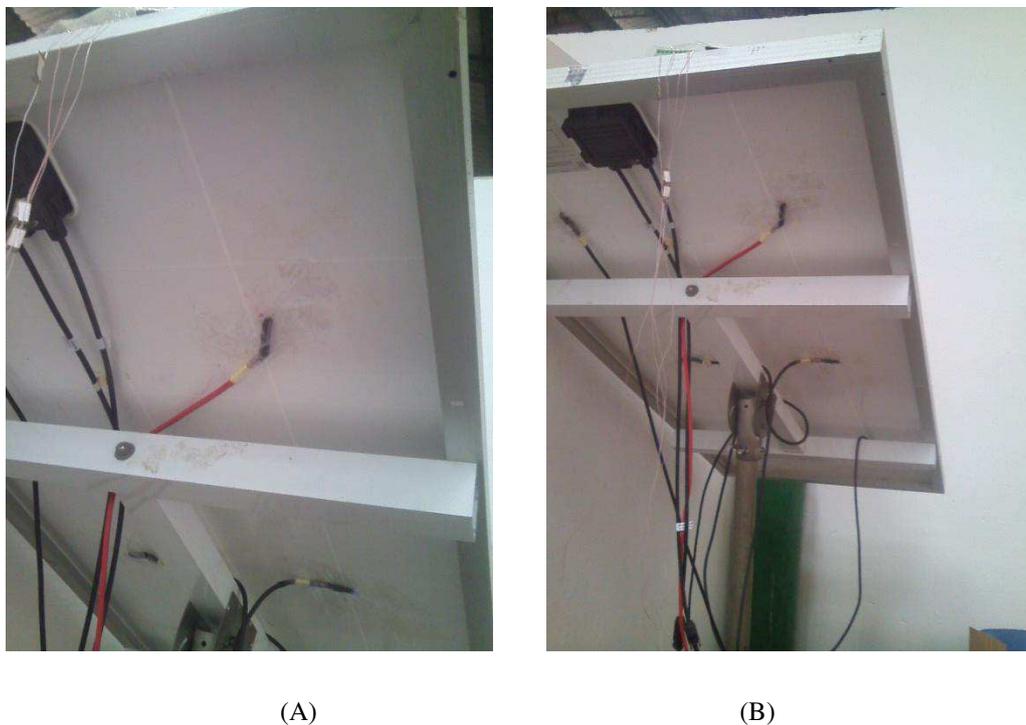


Figura 17: Termistor no painel fotovoltaico. (A) e (B).

Fonte: Autor do trabalho

Foram utilizados termistor NTC de 10k esses sensores variam a sua resistência de acordo com a temperatura a qual são expostos, sendo assim, pode-se medir a temperatura de acordo com a resistência apresentada por esses sensores, eles serão ligados a uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, conhecida como Arduino Uno. Abaixo pode ser visualizada uma esquematização da montagem do circuito para um termistor.



Figura 18: Montagem do circuito do sensor.

Fonte: <http://qqtrading.com.my/ntc-thermistor-10k-temperature-sensor-probe>. Adaptado.

Porém, na montagem do circuito fizemos uma adaptação, deixando o termistor e o resistor juntos na ponta do sensor, e apenas cabos para a conexão com o Arduino Uno, como pode ser visto na Fig. 19.

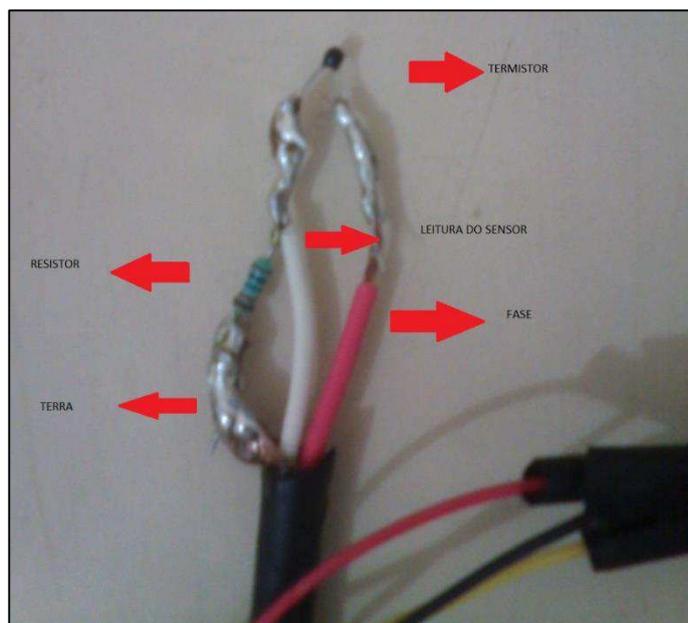


Figura 19: Montagem do sensor.

Fonte: Autor do trabalho.

Esse sensor atua através da variação da resistência do termistor com a variação de temperatura. O circuito montado é um divisor de tensão, onde a entrada é 5 Volts (proveniente do Arduino), e o sinal de saída será injetado no sinal analógico como mostrado na Fig. 18. Esse

valor de voltagem recebido na porta analógica está correlacionado com a resistência que o termistor apresenta (divisor de tensão, veja Eq.18), dessa forma, está também relacionada à temperatura que o termistor apresenta.

$$V_{sai} = \frac{V_{arduino} * R_{10k\Omega}}{R_{10k} + R_{term}} \quad (18)$$

Onde V_{sai} , $V_{arduino}$, $R_{10k\Omega}$, R_{term} são a voltagem de saída lida pela porta analógica do Arduino, a voltagem do Arduino (5 Volts), a resistência de 10KΩ e a resistência do termistor, respectivamente.

O microcontrolador Arduino Uno, como mostrado na Fig. 20, que possui código aberto, e é de fácil acesso e custo relativamente baixo. A escolha deste microcontrolador, além das vantagens já citadas, tem como uma de suas principais características sua fácil comunicação usuário-hardware.

Esse microcontrolador pode ser utilizado em diversos sistemas operacionais (Linux, Windows, MacOs). O Arduino utiliza-se de uma linguagem própria de programação, linguagem Arduino, linguagem esta que é simples e de fácil entendimento. Outras características desse microcontrolador pode ser encontrado na Tab. 2.

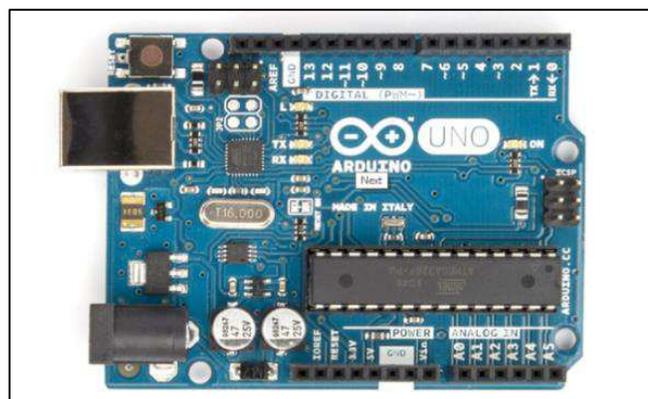


Figura 20: Arduino Uno.

Fonte: www.elektor.com/arduino-uno-r3

Tabela 2: Características do microcontrolador Arduino Uno

Microcontrolador	ATmega328P
Voltagem operacional	5V
Voltagem de alimentação (recomendada)	7-12V
Voltagem de alimentação (limites)	6-20V
Pinos I/O digitais	14 (dos quais 6 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6
Corrente contínua por pino I/O	40 Ma
Corrente contínua para o pino 3.3V	50 Ma
Memória flash	32 KB (2KB usados para o bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB

6.1.2 Construções do Projeto

Para a análise da eficiência exergética em várias angulações fez-se necessário a montagem de aparatos experimentais. As seguintes etapas foram cumpridas:

- Suporte da Placa Fotovoltaica;
- Bancada de Instrumentos Experimentais;

6.1.2.1 Suporte da Placa Fotovoltaica

Como o objetivo é obter dados para as diversas posições da placa, montou-se um suporte, cujo objetivo é promover o movimento de rotação da placa variando seu ângulo de inclinação, para assim obter dados sobre as diferentes angulações. Como pode ser visto na Fig.21. Onde a Fig. 22 é o desenho esquemático no software SolidWorks.



(A)



(B)

Figura 21:Suporte. (A) e (B).

Fonte: Autor do trabalho.

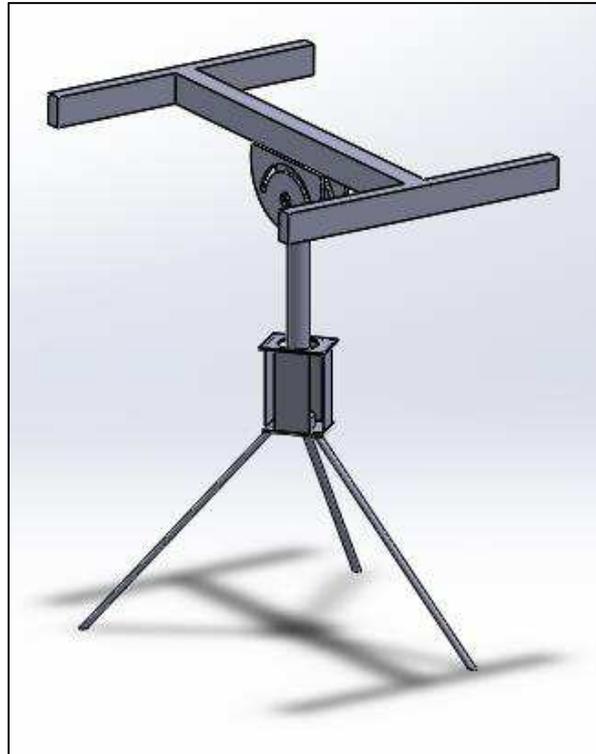


Figura 22:Suporte no SolidWorks.

Fonte: Autor do trabalho.

6.1.2.2 Bancada de Instrumentos Experimentais

Essa bancada foi construída com o objetivo de condicionar os instrumentos de aquisição de dados da placa fotovoltaica, que pode ser visualizado na Fig. 23.



Figura 23: Bancada de instrumentos experimentais.

Fonte: Autor do trabalho

Os dispositivos necessários que encontram-se na bancada da Fig. 23 e necessários para a pesquisa são:

- I. Controlador: componente responsável por controlar a carga gerada pelo painel fotovoltaico, decidindo se a carga vai para a bateria ou ser utilizada. Além dessa função, esse componente tem a função de registrar a corrente, voltagem e potência gerada pela placa através de uma interface com o computador. O controlador utilizado nesse projeto é o VS4524BN da EPSOLAR. Mostrado na Fig. 16. As características do equipamento podem ser vista na Tab. 3.

Tabela 3:Característica do controlador. Fonte: www.minhacasasolar.com.br

Tensão nominal	12V/24V (reconhecimento automático)
Corrente solar máxima	45 A
Corrente máxima das cargas	45 A
Tensão máxima do banco de baterias	32V
Peso	1,2Kg
Dimensões	205 x 119 x 67mm

II. Inversor: componente responsável pela transformação de corrente contínua gerada pela placa em corrente alternada, que é comumente usada nos aparelhos eletrônicos. O inversor utilizado nesse projeto é da UNITRON iVolt DE 1000 W mostrado na Fig. 24. Suas características podem ser encontradas na Tab. 4.



Figura 24: Inversor Unitron.

Fonte: NeoSolar

Tabela 4:Características do inversor. Fonte: www.neosolar.com.br

Tensão de Saída	115Vca +/- 10%
Frequência de Saída	60 +/- 4Hz
Eficiência (Máxima)	90%
Dimensões	273 x 138 x 54 mm
Peso	1,6Kg

III. Bateria: componente responsável por armazenar a carga gerada pela placa que não é utilizada pelos equipamentos, sendo assim, esse componente fornece carga quando o módulo fica impossibilitado de fornecer, por exemplo, em dias muito nublados. A bateria utilizada no projeto é uma bateria estacionária da FREEDOM DF 300, visto abaixo. As suas características podem ser vista na Tab.5.



Figura 25: Bateria DF 300

Fonte: NeoSolar

Tabela 5: Características da bateria. Fonte: www.neosolar.com.br

Modelo	Capacidade Nominal (Ah)			Tensão (V)	Dim. Ext. (mm) Compr. X Larg. X Alt.	Peso (Kg)
	em 100 h	em 20 h	em 10 h			
DF300	30	26	24	12	175 x 175 x 175	8,80

6.2 Painel Fotovoltaico/Térmico

6.2.1 Montagem do Protótipo

Com o intuito de otimizar um painel fotovoltaico comum, idealizou-se sua otimização através da construção de um absorvedor térmico para que a placa fotovoltaica não sofresse com o aumento de temperatura. Sendo assim, construiu-se um painel fotovoltaico/térmico (PV/T) resfriado a água, objetivando o aumento da eficiência de transformação de energia solar em energia elétrica.

O protótipo é resfriado a água e sua circulação do fluido de trabalho ocorre de duas formas pelo efeito termossifão, e por circulação forçada através da utilização de uma bomba. Viabilizando com o resfriamento da placa a maior energia elétrica disponível no sistema. E comparando os dois tipos de resfriamento (pelo efeito termossifão e por circulação forçada).

Para construção do protótipo utilizou-se um painel fotovoltaico de 10W da Sun Home modelo ST-M10, mostrado na Fig. 26 e 27. Assim como suas características podem ser vistas na Tab. 6.

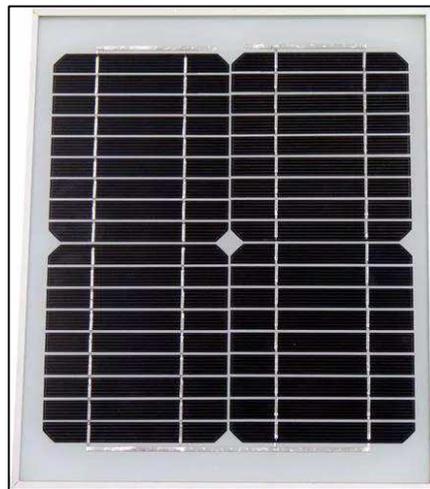


Figura 26: Painel fotovoltaico modelo ST-M10.

Fonte: produto.mercadolivre.com.br/MLB-714651447-modulo-painel-solar-fotovoltaico-10w-inmetro-energia-solar-_JM

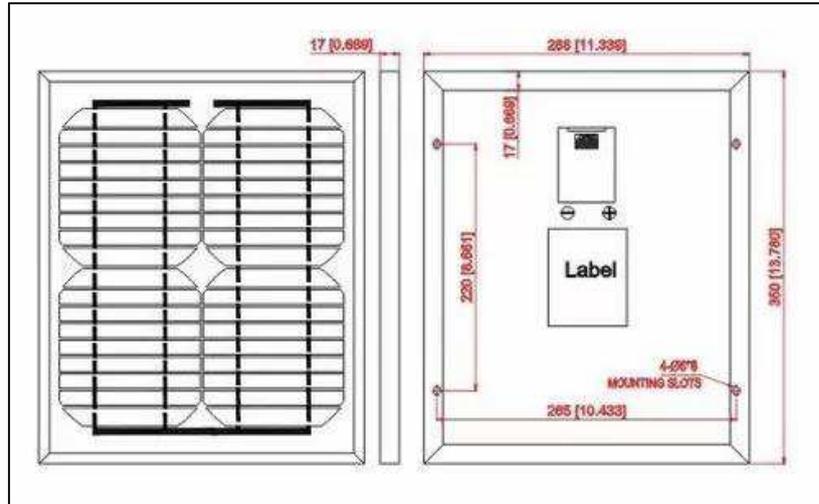


Figura 27:Dimensões do painel fotovoltaico modelo ST-M10.

Fonte: produto.mercadolivre.com.br/MLB-714651447-modulo-painel-solar-fotovoltaico-10w-inmetro-energia-solar

Tabela 6:Características do painel fotovoltaico modelo ST-M10. Fonte: produto.mercadolivre.com.br/MLB-714651447-modulo-painel-solar-fotovoltaico-10w-inmetro-energia-solar

Potência de pico	10W
Tensão máxima (Vmp)	18.00V
Corrente máxima (Imp):	0.556
Tensão circuito aberto (Voc)	21.60V
Coeficiente da temperatura de corrente a(Isc)	0.03%/°C
Coeficiente da temperatura de voltagem B (Voc)	- 0.32%/°C
Coeficiente da temperatura de potência (Pmax)	-0.42%/°C
Dimensões	288mm x 350mm x 17mm
Peso	1.19kg

Para a construção do PV/T fez-se necessário a construção de suporte para a placa e para o reservatório térmico, na Fig. 28 pode ser vista a idealização dos suportes feitas no software SolidWorks.

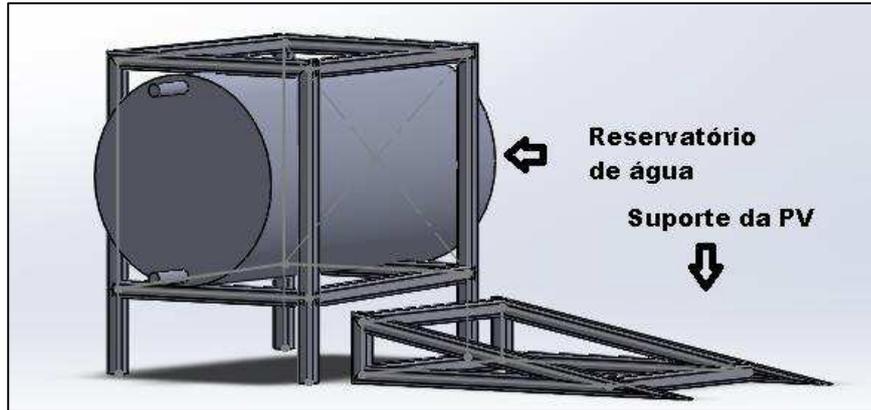


Figura 28: Idealização dos suportes do PVT no SolidWorks.

Fonte: Autor do trabalho

Os suportes foram construídos em madeira, como pode ser visto nas Fig. 29 e 30, a construção em madeira deve-se a facilidade de construção nesse tipo de material e sua disponibilidade.



(A)



(B)



(C)

(B) Figura 29: Suporte da placa solar (A), (B), (C).

Fonte: Autor do trabalho



(A)



(B)

Figura 30: Suporte do Reservatório. (A), (B).

Fonte: Autor do trabalho

Após a confecção dos suportes esses foram pintados para o produto ficar visivelmente mais agradável. Utilizando tinta cromada para conceder a eles aparência metálica, como podem ser vistos nas figuras abaixo:



(A)



(B)

Figura 31: Suporte da placa pintado. (A), (B).

Fonte: Autor do trabalho.



Figura 32: Suporte do reservatório pintado.

Fonte: Autor do trabalho.

O reservatório utilizado pode ser visto na Fig. 33. O reservatório também foi pintado para ficar com aspecto metálico, visto na Fig. 34, nesse caso foi pintado nessa cor para maior reflexão dos raios solares, já que o objetivo não é o aquecimento da água e sim o resfriamento da placa fotovoltaica, o aquecimento da água é uma consequência.



Figura 33: Reservatório de água.

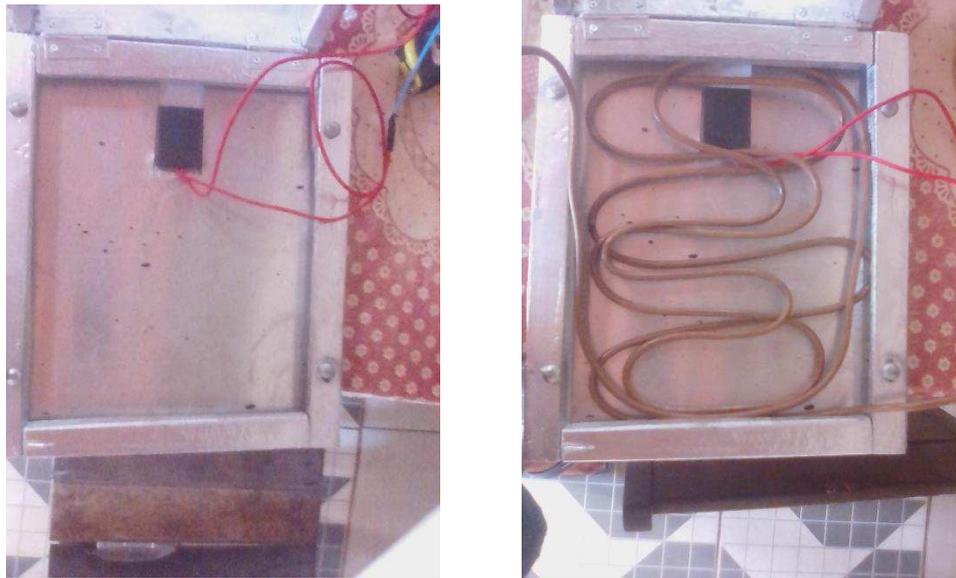
Fonte: Autor do trabalho



Figura 34: Reservatório de água pintado.

Fonte: Autor do trabalho

Para que a água do reservatório possa retirar calor do painel fotovoltaico utilizou-se tubulação de cobre de 1/4 “(um quarto de polegada, equivalência de 6,35 mm). Utilizou-se esse material devido sua alta condutividade térmica, visto na Tab. 7. Foi utilizado também uma chapa de alumínio, para permitir uma melhor adesão da placa fotovoltaica na tubulação de cobre, o alumínio foi escolhido também devido a sua alta condutividade, visto na Tab. 7, a montagem da chapa de alumínio e da tubulação de cobre podem ser vistos na Fig. 35.



(A)

(B)

Figura 35: Montagem do arrefecedor da placa. (A) Chapa de alumínio (B) Chapa de alumínio e tubo de cobre.
Fonte: Autor do trabalho

Tabela 7: Condutividade térmica do cobre e do alumínio.

Fonte: apoionafisica.blogspot.com.br/2013/08/questoes-de-termologia-resolvidas.html

Substância	Coefficiente de Dilatação Linear ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Condutividade Térmica (W/mK)
Alumínio	24	240
Cobre	17	400

Com o objetivo de aumentar a eficiência da troca de calor da placa fotovoltaica para a água, utilizou-se também uma folha de isopor para isolar termicamente o sistema como pode ser visto na Fig. 36.



(A)

(B)

Figura 36: Isolamento do sistema com folha de isopor. (A) folha de isopor (B) Isolamento do painel.

Fonte: Autor do trabalho

Abaixo pode-se ver o protótipo do PV/T montado na sua versão final. Na Fig. 37 observamos o conjunto suporte-painel, na Fig. 38 observa-se o conjunto suporte-reservatório e na Fig. 39 observa-se a versão final do protótipo.



Figura 37: conjunto suporte-painel.

Fonte: Autor do trabalho



Figura 38: Conjunto suporte-reservatório.

Fonte: Autor do trabalho



Figura 39: Versão final do protótipo montado.

Fonte: Autor do trabalho.

A bomba utilizada para o experimento de resfriamento por meio de circulação forçada foi bomba de circulação Top Garden modelo 300, visto na Fig. 40. Suas características são mostradas na Tab. 8. Essa bomba não utilizará energia da placa fotovoltaica, usará energia da concessionária de energia, observando apenas os fenômenos térmicos do sistema.



Figura 40: Bomba de circulação Top Garden modelo 300.

Fonte: www.terrazoo.com.br/produto/2019766/bomba-de-circulacao-top-garden-300-220v

Tabela 8: Característica da bomba de circulação Top Garden modelo 300.

Fonte: www.terrazoo.com.br/produto/2019766/bomba-de-circulacao-top-garden-300-220v

Voltagem	220
Vazão	150L/h
Consumo	2,5 W
Coluna de Água Máxima	0,5 m
Materiais	ABS e nylon plástico, imã e fio de cobre
Dimensões	37x28x36 mm
Peso	0,150 Kg

6.2.2 Aquisição de Dados do PVT

Para a aquisição de dados de tensão e corrente gerado pelo painel fotovoltaico/térmico foi utilizado o microcontrolador Arduino Uno. Para aquisição de dados da tensão gerada, utilizou-se da técnica de divisão de tensão, pois o Arduino Uno em suas portas analógicas suportam tensão de até 5 V, e como o painel produz tensão superiores a esse valor torna-se necessário o divisor de tensão. No divisor de tensão utilizou-se resistências de 100 k Ω e 10 k Ω (R_1 e R_2 , respectivamente), como pode ser visto na Fig. 41 representado pelo divisor de tensão 1. Com o divisor de tensão a porta analógica do arduino recebe valor entre 0 e 5 V e é feita a conversão para a tensão de entrada do circuito (tensão da placa), como pode ser visto no cálculo que se segue.

$$V_{pl} = V_{arduino} * (R_1 + R_2)/R_2 \quad (19)$$

Substituindo os valores das resistências na Eq. 19 resume-se em:

$$V_{pl} = V_{arduino} * 11 \quad (20)$$

Onde V_{pl} , $V_{arduino}$, R_1 e R_2 são a voltagem da placa, voltagem lida no Arduino, resistência de 100 k Ω e resistência de 10 k Ω , respectivamente.

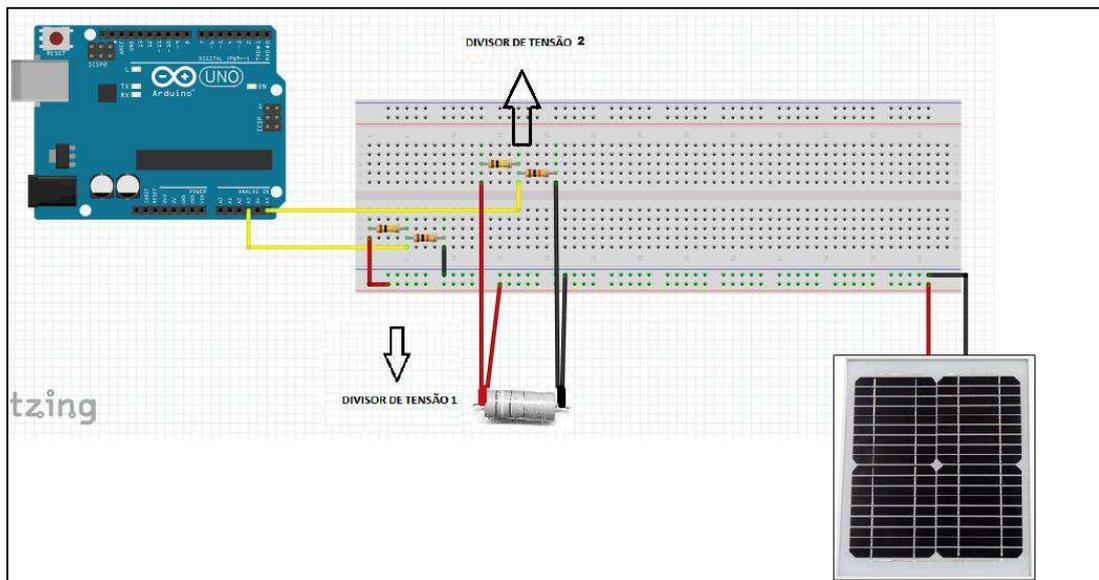


Figura 41: Circuito de aquisição de dados de voltagem e corrente com Arduino.

Fonte: Autor do trabalho

Para medição da corrente gerada pelo PV/T utilizou-se um divisor de tensão no resistor de potência, sabendo a tensão entre o resistor pode-se encontrar a corrente do circuito, como visto na Eq.20. O divisor de tensão utilizado tem as mesmas características do acima relatado, e a corrente pode ser determinada pela Eq.21, e está representado na Fig. 41 como divisor de tensão 2.

$$I_{circ} = V_{circ}/R_{pot} \quad (21)$$

Onde I_{circ} , V_{circ} e R_{pot} são a corrente do circuito, voltagem do circuito e o valor do resistor de potência (60 Ohms).

Para a aquisição de dados de temperatura da placa fotovoltaica/térmica utilizou-se dois sensores de temperatura NTC, os mesmos usados no estudo de inclinação. Utilizou-se também um sensor de temperatura para monitoramento da temperatura do reservatório, na Fig. 42 pode ser visualizado o circuito completo de aquisição de dados (das temperaturas, corrente e voltagem).

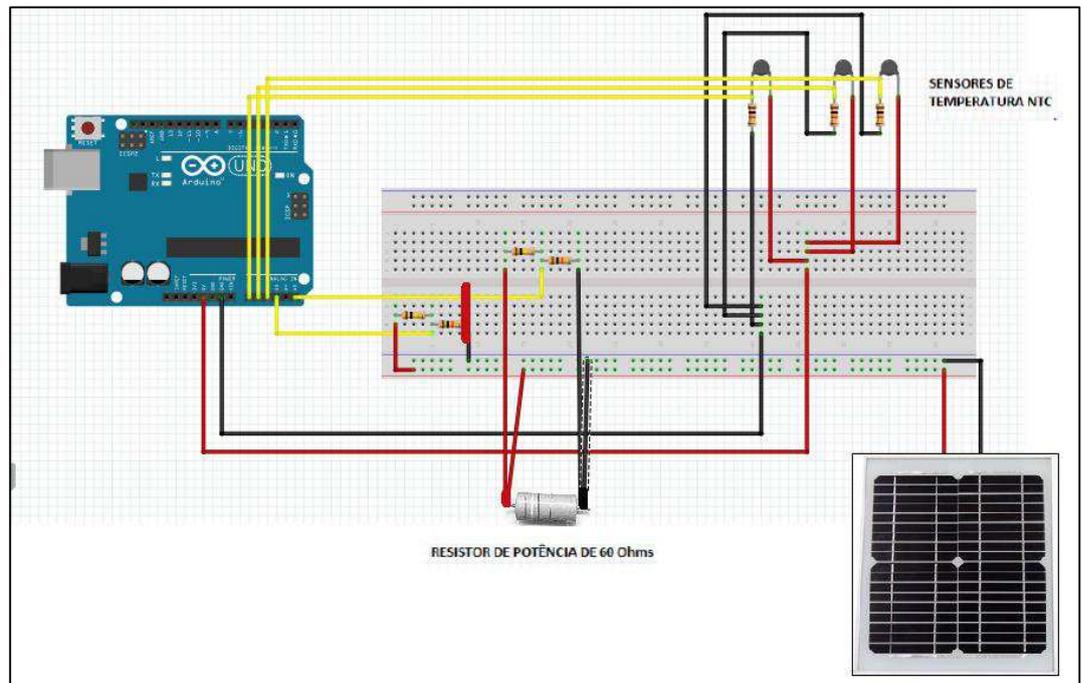


Figura 42: Circuito de aquisição completo

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Estudo da Inclinação da Placa

A aquisição de dados foi feita no campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão. Serão apresentados o estudo de quatro dias em diferentes angulações como mostrado na tabela abaixo.

Tabela 9: Dias de aquisição com suas respectivas inclinações.

Dia (mês 07)	Inclinação
13	20 °
14	15°
24	10°
25	5°

Os gráficos abaixo mostram a relação entre a radiação e a eficiência exergética do painel.

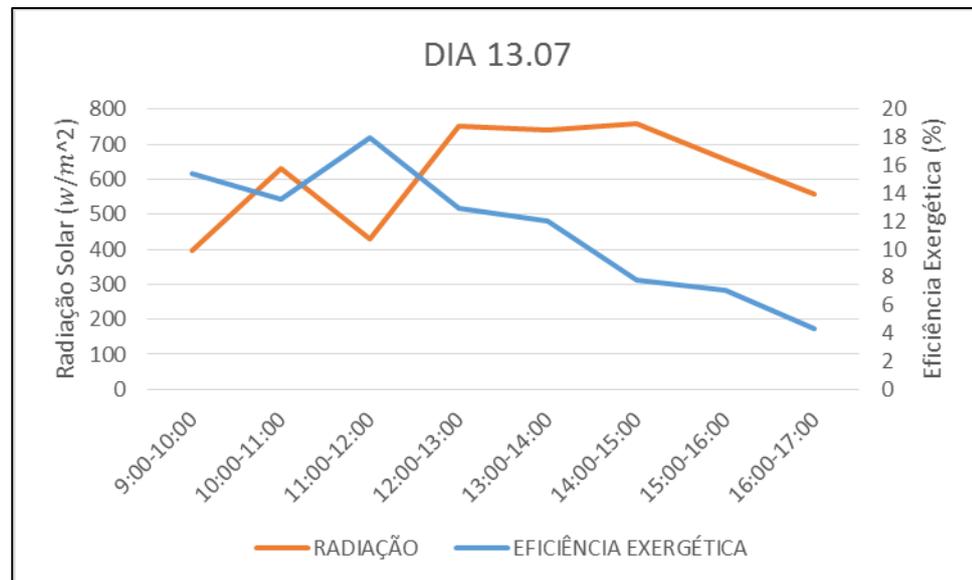


Figura 43: Relação entre a radiação e a eficiência exergética para o dia 13.07.

Fonte: Autor do trabalho

Podemos notar para o dia 13.07 que apesar da radiação solar aumentar para os horários de 12:00-13:00, não ocorre o aumento da eficiência do painel, e sim sua diminuição. Como observado no decréscimo representado da linha em azul.

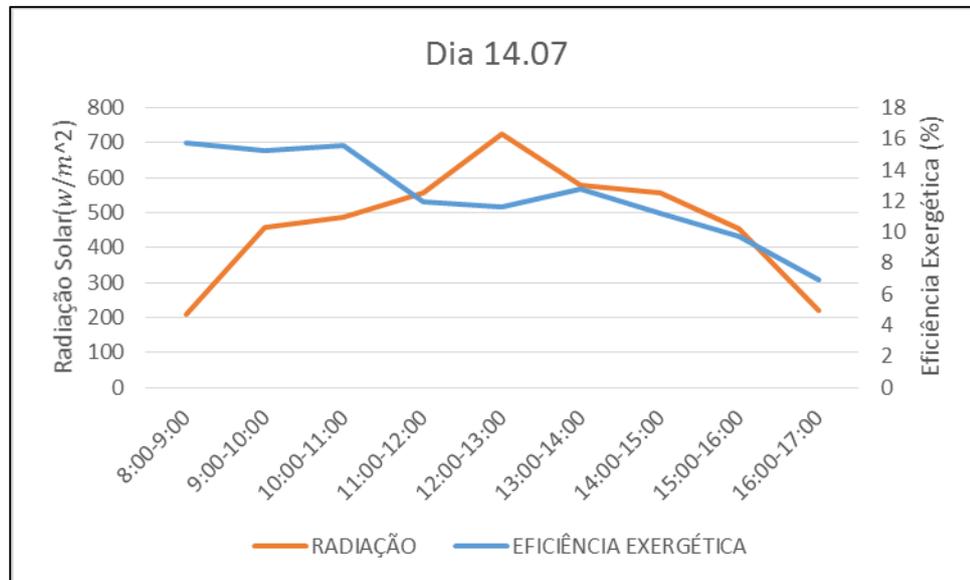


Figura 44: Relação entre a radiação e a eficiência exergética para o dia 14.07.

Fonte: Autor do trabalho

Semelhantemente ao dia 13.07, o dia 14.07 mostra uma diminuição da eficiência com o aumento da radiação. Notamos também que a eficiência do painel é maior durante o turno da manhã do que durante a tarde.

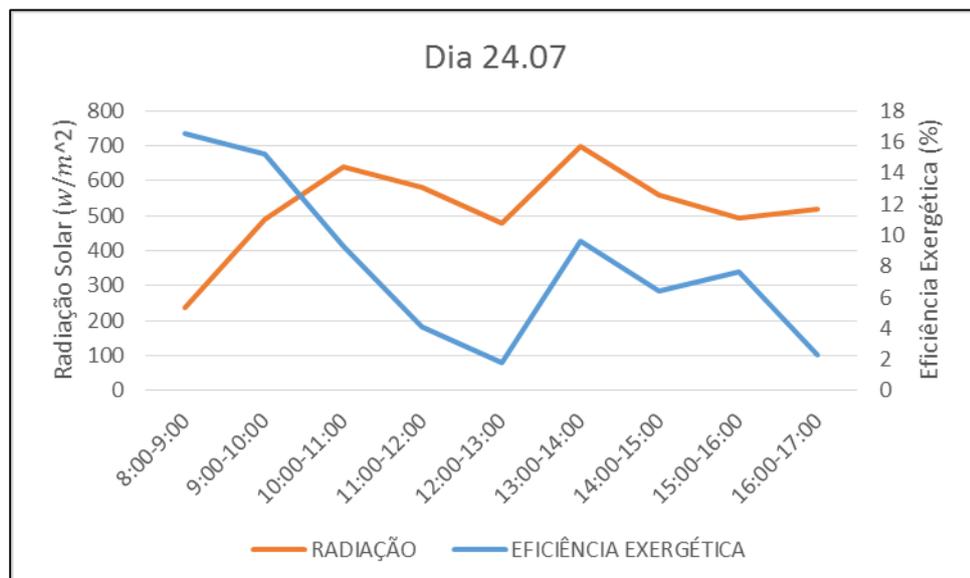


Figura 45: Relação entre a radiação e a eficiência exergética para o dia 24.07.

Fonte: Autor do trabalho

No dia 24.07 notamos que o decréscimo da eficiência do painel diminui a uma proporção maior em comparação aos outros dias. Isso ocorre devido a fatores climáticos, pois, o dia em questão foi parcialmente nublado. O que explica a baixa eficiência do painel.

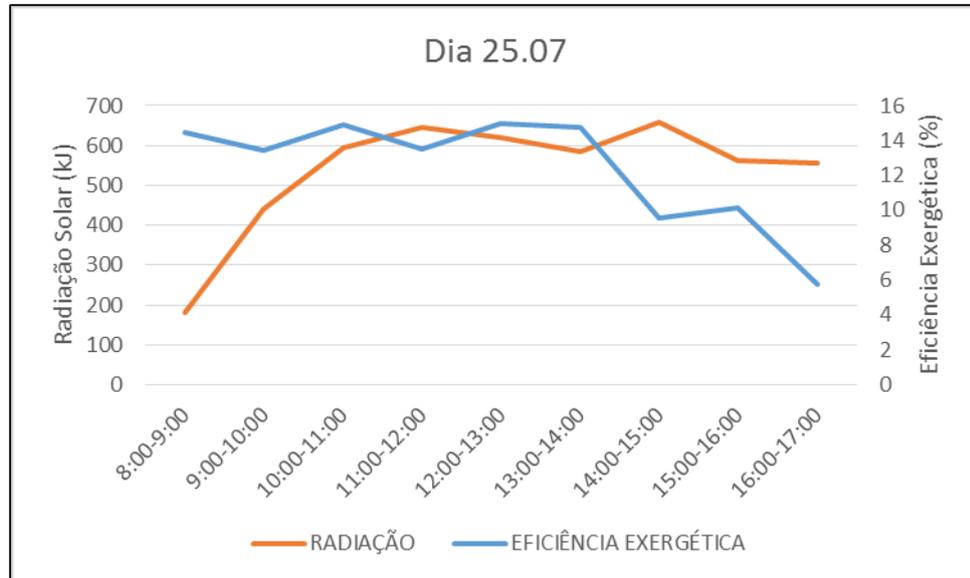


Figura 46: Relação entre a radiação e eficiência exergética para o dia 25.07.

Fonte: Autor do trabalho

Nota-se que ao contrário do que o senso comum acredita, nos horário de 12:00-13:00 não ocorre o aumento da eficiência do painel, fato esse associado aos altos índices de insolação no horário. Tal como afirma Pinho & Galdino (2014) que mostram que o aumento da intensidade de radiação ocorre o aumento da corrente, gerando dessa forma uma maior potência no painel. No entanto, um aumento na potência do painel não garante que necessariamente sua eficiência também estará crescendo, pois, a disponibilidade de geração (intensidade solar) pode ter crescido muito acima do aumento da potência do painel.

Portanto, percebe-se que com o aumento da radiação também ocorre um aumento nas perdas do sistema, já que a eficiência do painel diminui gradativamente a partir de um certo nível de radiação. Muitos autores afirmam que esse fenômeno de diminuição da eficiência pode ser explicado, devido ao painel diminuir sua eficiência com o aumento da temperatura do mesmo. Foi constatado nos experimentos que ao longo do dia a temperatura do painel tende a aumentar e a eficiência exergética tende a cair. Como pode ser visto nas figuras abaixo.

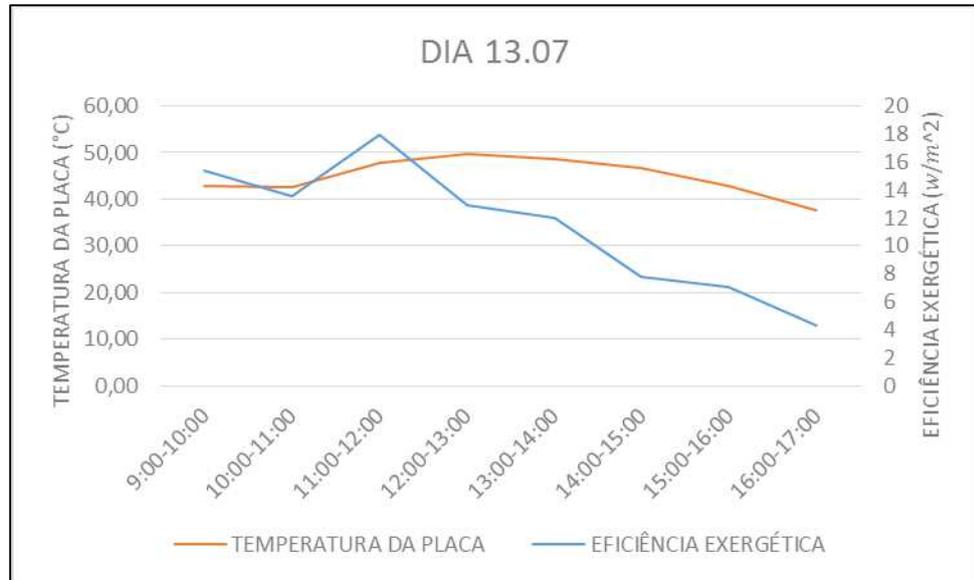


Figura 47: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exérgica para o dia 13.07.

Fonte: Autor do trabalho

Notamos que a uma ligação entre a temperatura do módulo com a eficiência do mesmo. Pois, observa-se que quando o painel atinge temperaturas mais elevadas ocorre o efeito da diminuição da eficiência do painel.

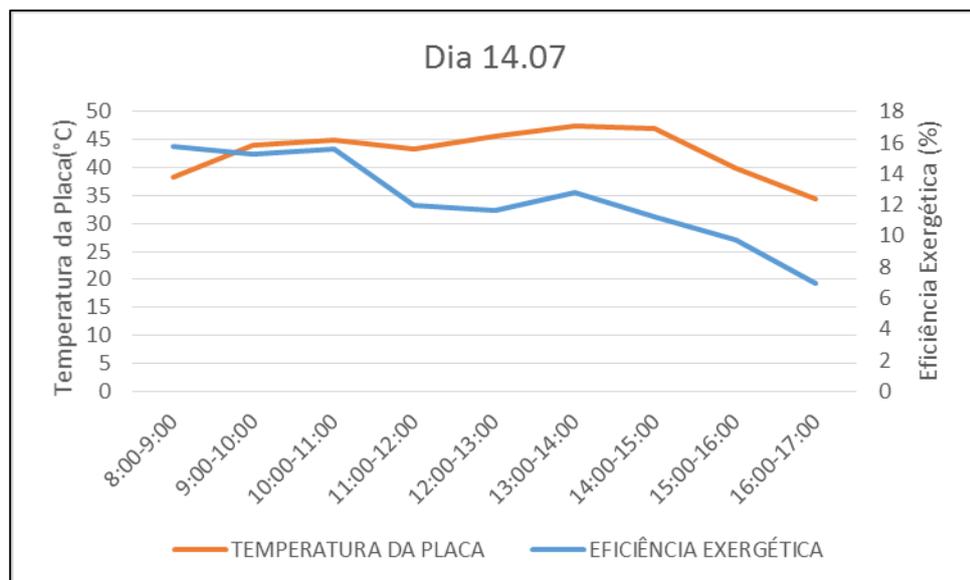


Figura 48: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exérgica para o dia 14.07.

Fonte: Autor do trabalho

Esse fenômeno de diminuição ocorre principalmente entre os horários de 12:00-13:00, onde a intensidade de radiação aumenta, e parte dessa radiação resulta no aumento da temperatura do painel.

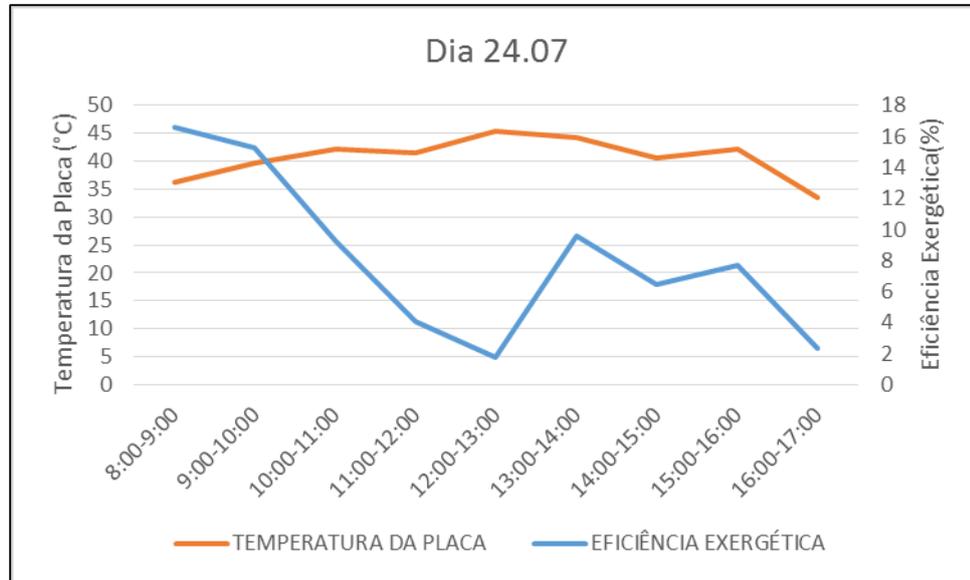


Figura 49: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exergética para o dia 24.07.

Fonte: Autor do trabalho

Observa-se mesmo em um dia com bastante nuvens como o dia 24.07 o painel alcança temperaturas elevadas alcançando um máximo de 45° C, temperatura relativamente alta, e como visto essa temperatura é prejudicial para a eficiência do painel.

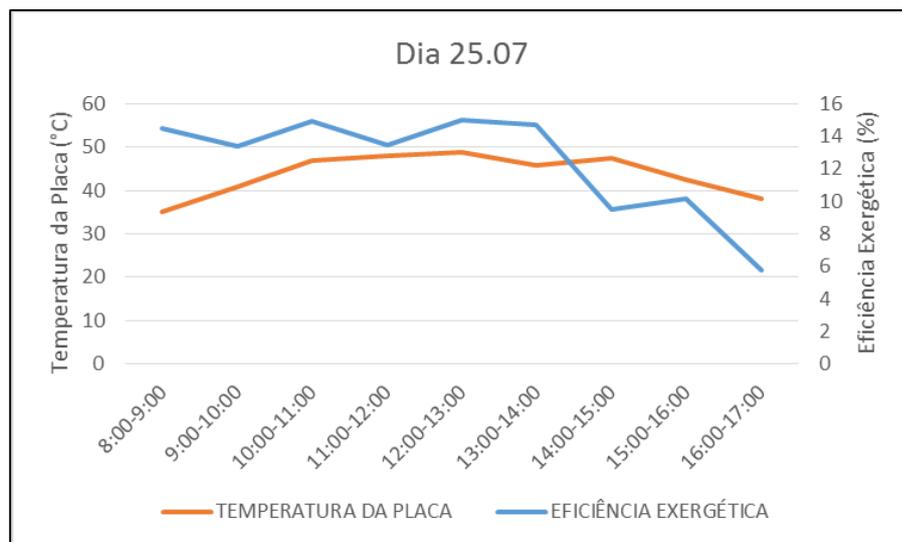


Figura 50: Relação entre a temperatura do painel e a eficiência exergética para o dia 25.07.

Fonte: Autor do trabalho

Percebe-se que o aumento da temperatura é prejudicial para a eficiência exergética do painel, nota-se que quando a placa atinge a temperatura aproximada de 45° C e acima, a uma queda gradativa da eficiência exergética do painel.

Esse fenômeno de diminuição da eficiência exergética pode ser explicado por dois fatores. Primeiro o aumento da perda exergética associada ao calor, pois, como a diferença de temperatura entre o ambiente e a placa fotovoltaica aumenta, logo aumenta também o potencial para realização de trabalho, potencial que não é aproveitado, sendo assim, com o aumento da temperatura aumenta também a perda de exergia associada ao calor. Com o aumento da temperatura o painel perde capacidade de transformação de exergia solar em exergia elétrica, conforme afirmado por Sobhnamayan et al. (2014) em um sistema fotovoltaico, quando a temperatura das células solares aumenta, a tensão elétrica diminui, a eficiência elétrica diminui como resultado da tensão elétrica. E confirmado por Khaloei et al. (2015) ao aumentar a temperatura ambiente, a temperatura da célula sobe e a energia, exergia e eficiências elétricas caem. No trabalho de Pandey et al. (2015) descobriu-se que todas as eficiências são mais altas no período da manhã e à noite em comparação ao meio dia que é devido a variação na temperatura do módulo ao longo do dia.

O aumento da temperatura do painel é o um reflexo do aumento da radiação solar, como pode ser visto nas figuras abaixo, que relacionam o aumento da temperatura com o aumento da radiação solar.

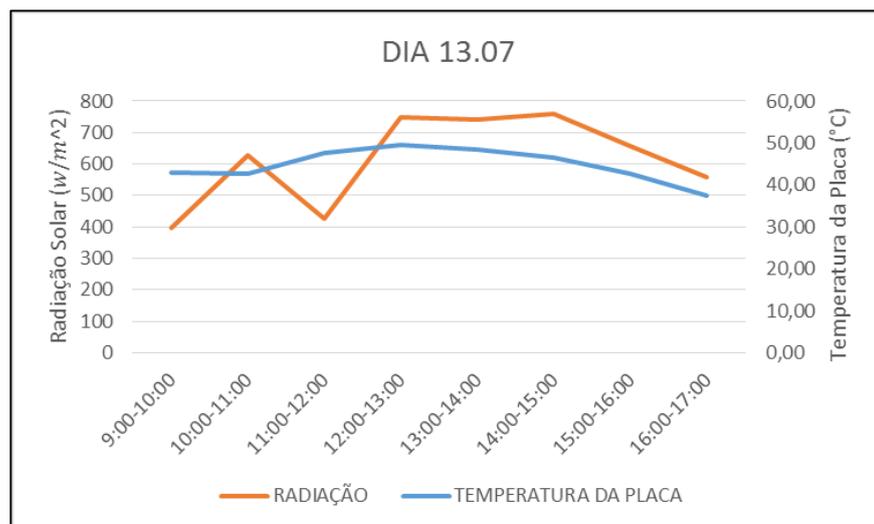


Figura 51:Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 13.07.

Fonte: Autor do trabalho.

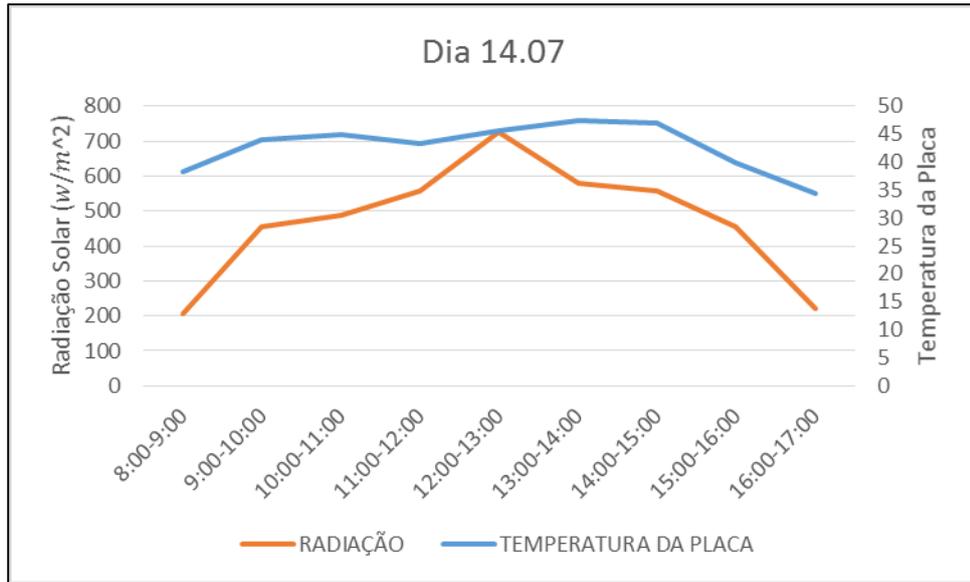


Figura 52: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 14.07.

Fonte: Autor do trabalho

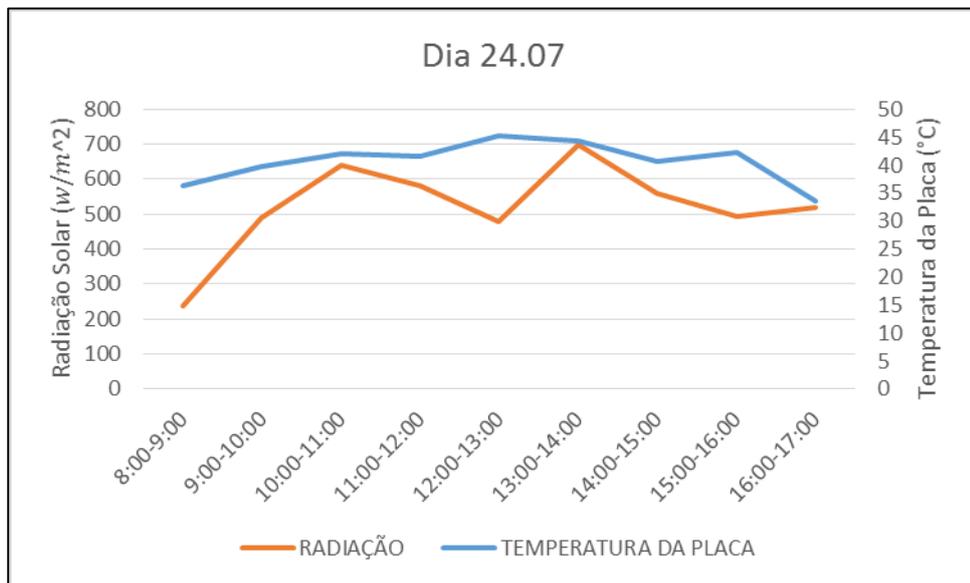


Figura 53: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 24.07.

Fonte: Autor do trabalho

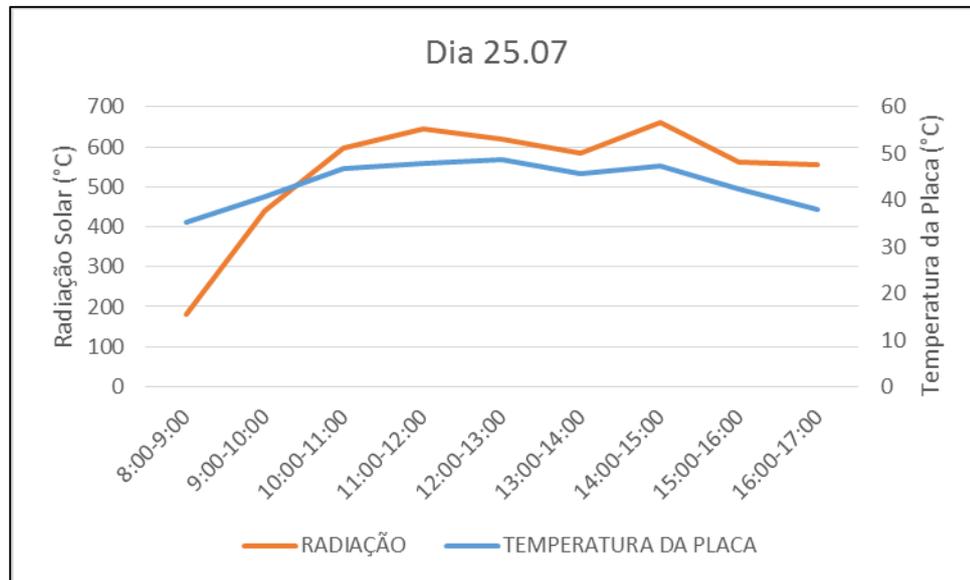


Figura 54: Relação entre a temperatura do painel e a radiação solar para o dia 25.07.

Fonte: Autor do trabalho

Portanto, pode-se notar que o aumento da radiação provoca o maior aquecimento da placa, conseqüentemente diminuindo a eficiência exergetica da mesma. Ou seja, o aumento da disponibilidade (exergia solar) não indica o aumento da transformação em exergia elétrica. Rusirawan e Farkas (s.d) afirmam sobre o fenômeno que grande parte da radiação (energia solar) absorvida em um sistema PV não é convertido em energia elétrica, porém, contribui para o aumento da temperatura do módulo (energia térmica), reduzindo a eficiência elétrica. E Shukla et al. (2015) confirmando esse pensamento afirma que a eficiência exergetica diminui com a radiação solar e temperatura ambiente devido ao aumento da temperatura da célula e irreversibilidade quando a saída de eletricidade aumenta.

Essa afirmação feita por Shukla et al. (2015) pode ser percebido nas figuras abaixo, pois, quando a potência do sistema é alta, geralmente ocorre a partir da 12:00, a eficiência apresenta um decréscimo.

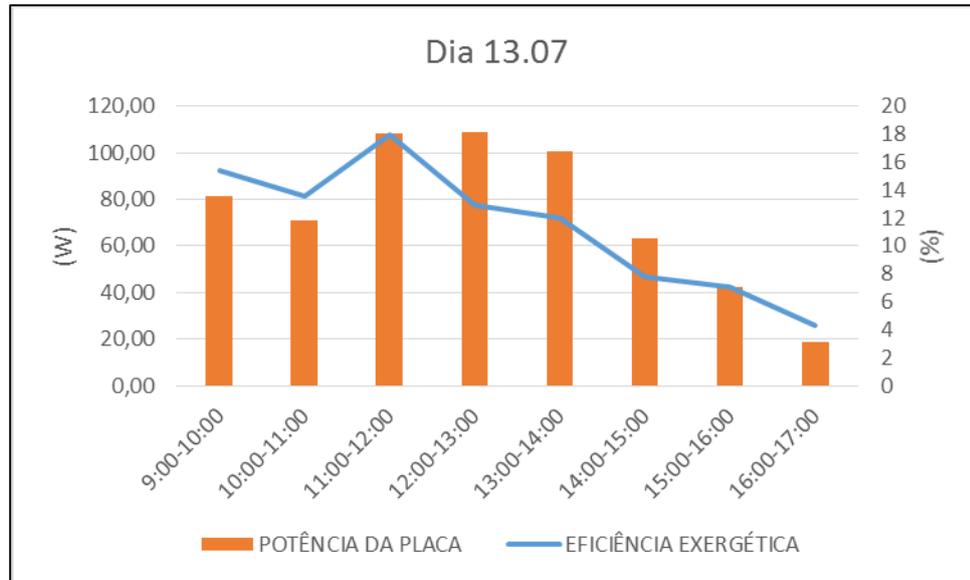


Figura 55: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 13.07.

Fonte: Autor do trabalho

Pode-se notar que o painel para o dia 13.07 apresenta um pico de eficiência, nota-se que para esse pico de eficiência ocorreu o aumento da potência do painel, durante o horário de 11:00-12:00, após isso, ocorre o decréscimo da eficiência enquanto a potência continua elevada (horário 12:00-14:00), evidenciando que o aumento da potência do painel não significa aumento da eficiência do mesmo.

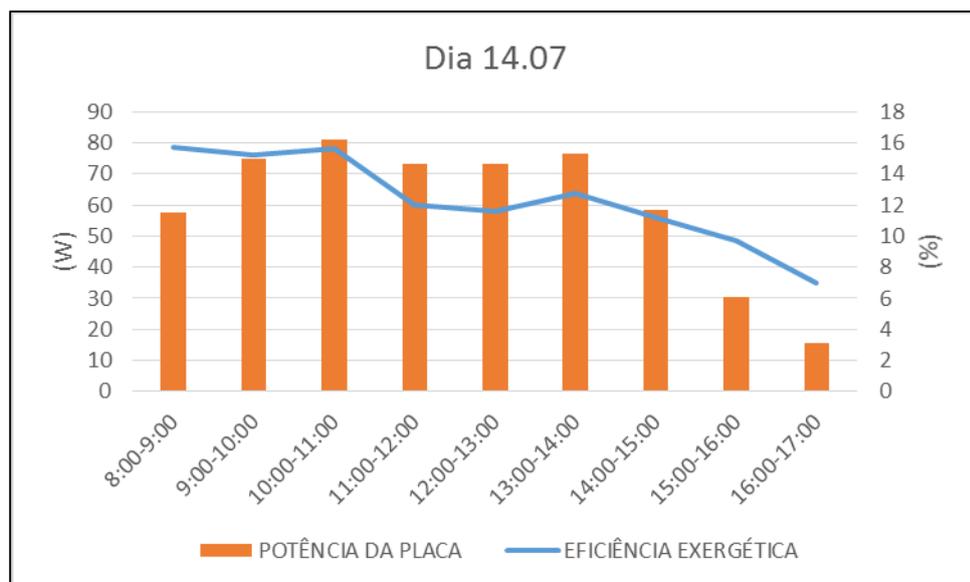


Figura 56: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 14.07.

Fonte: Autor do trabalho

É observado também para o dia 14.07 a diminuição da eficiência com o aumento da potência do mesmo. É observado também que durante os horários de 11:00-13:00 a potência do painel é praticamente constante, assim como a eficiência da placa fotovoltaica, evidenciando assim uma relação entre a potência e a eficiência da placa, apesar que o aumento da potência do painel não significar efetivamente o aumento da eficiência, pois o termo da eficiência considera a disponibilidade (exergia solar) e as perdas térmicas (exergia associada ao calor).

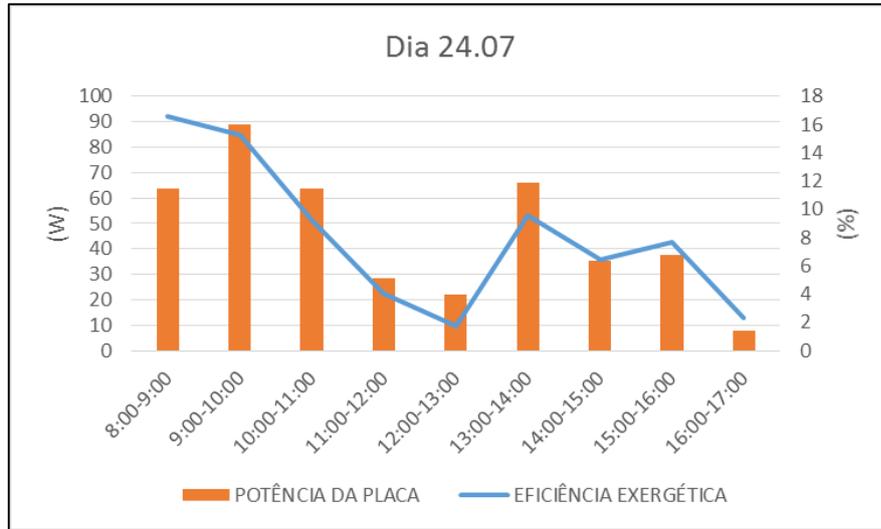


Figura 57: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 24.07.

Fonte: Autor do trabalho

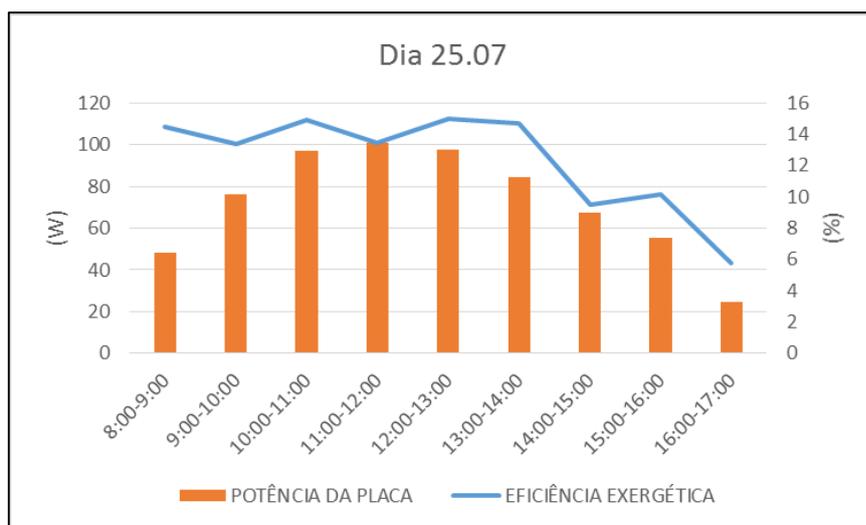


Figura 58: Relação entre a potência e a eficiência exergética para o dia 25.07.

Fonte: Autor do trabalho

Logo, confirma-se a afirmação encontrada por Shukla et al. (2015), pois o aumento da saída de energia, ou seja, o aumento da potência do sistema acompanha uma diminuição da eficiência exergetica. Portanto o aumento da saída de exergia elétrica acompanha um aumento das irreversibilidades do sistema.

A comparação entre as angulações pode ser feita através da exergia elétrica produzida em cada angulação e a exergia solar disponível em cada dia. Os gráficos abaixo mostram essa relação.

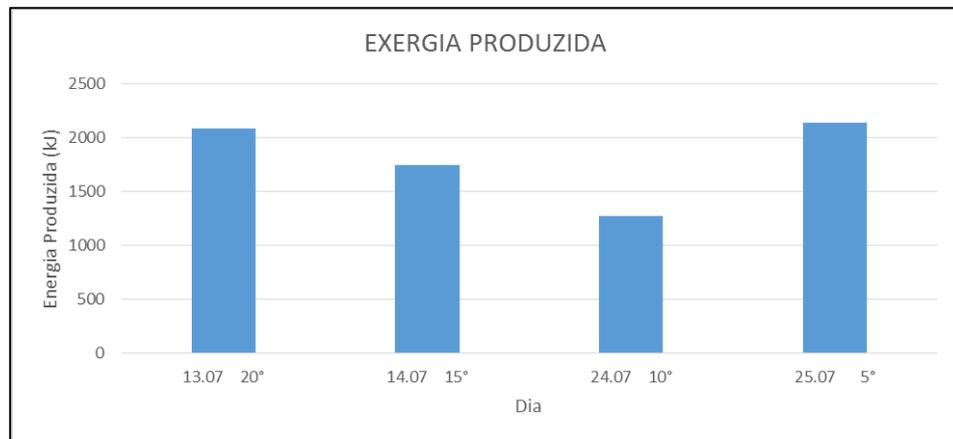


Figura 59: Exergia produzida nos dias 13, 14, 24 e 25.

Fonte: Autor do trabalho

Pode-se afirmar que a inclinação de 5° produziu uma maior quantidade de energia, ou seja, foi a inclinação em que se obteve maior saída de energia elétrica, ou seja, maior exergia elétrica. Porém observando a Fig. 60, observa-se que a maior disponibilidade (exergia solar) ocorreu para o dia 13.07

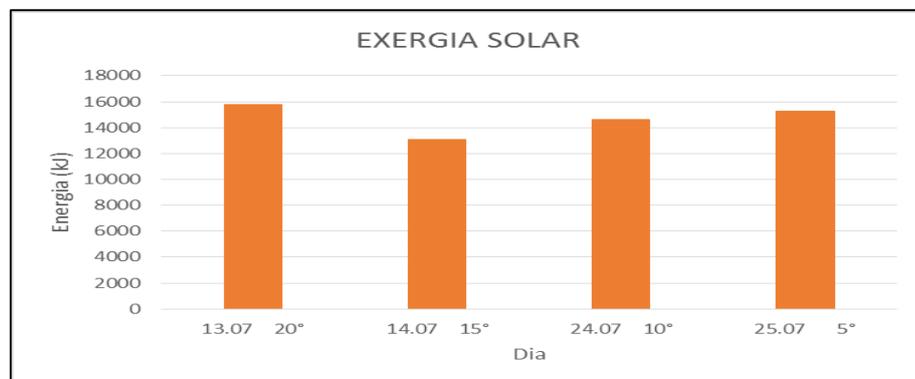


Figura 60: Exergia solar nos dias 13, 14, 24 e 25.

Fonte: Autor do trabalho

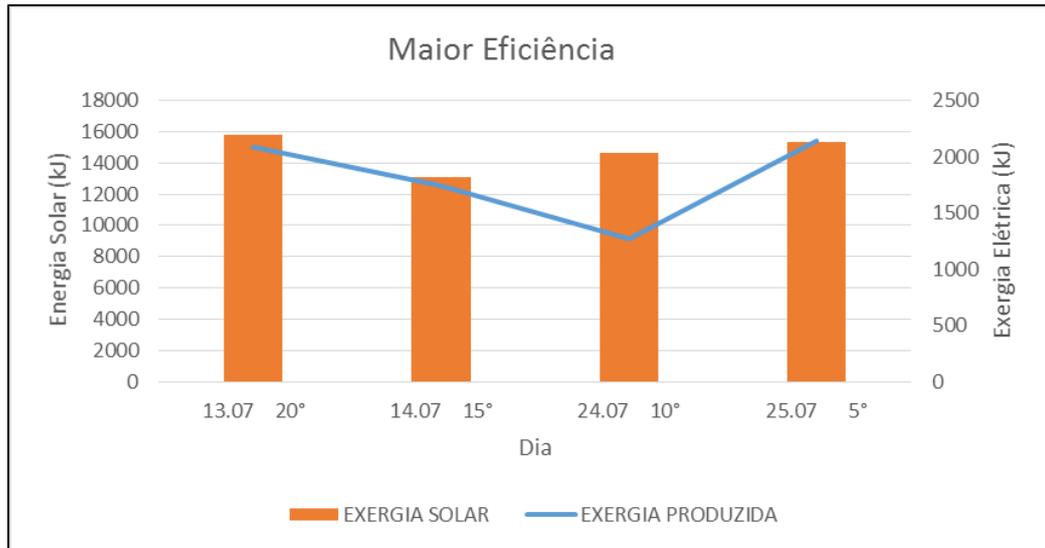


Figura 61: Comparação entre as conversões.

Fonte: Autor do trabalho

Como pode-se notar a inclinação que apresentou maior eficiência foi a de 5°, observa-se que apesar dessa angulação apresentar a maior conversão em exergia elétrica ela não foi a que teve maior disponibilidade para geração (exergia solar); o dia que apresentou maior disponibilidade foi o dia 13.07 (inclinação de 20°), mesmo assim essa inclinação não apresentou maior conversão em exergia elétrica. Portanto, afirmando assim que a angulação de 5° é superior em termos de conversão de exergia elétrica.

Observa-se também através dos gráficos anteriores que a inclinação de 5° apresentou durante o turno matutino eficiência bastante equilibrada, ou seja, apresentou poucas variações (observe as Figs. 45,49 e 57).

7.2 Estudo do Painel Fotovoltaico/ Térmico

A aquisição de dados foi feita no bairro Santa Clara aproximadamente 6 km da Universidade Estadual do Maranhão. Serão apresentados o estudo de três situações diferentes como mostrado na tabela abaixo. A aquisição de dados foi feita para horários onde encontram-se altos níveis de insolação, para justamente analisar o efeito térmico no painel, com isso escolheu-se os horários de 11:00 às 15:00 horas.

Tabela 10: Modelos de experimento

SITUAÇÃO	MODELO
1°	PV
2°	PVT
3°	PVT com Bomba

Fez-se a comparação entre os modelos a partir da voltagem gerada pelo painel fotovoltaico, pelo fato do painel apresentar corrente muito baixa (0.556 A). Segundo Pinho e Galdino (2014) o aumento da temperatura faz a voltagem diminuir enquanto a corrente aumenta, só que o aumento da corrente não é tão significativo como a diminuição da voltagem. Logo, a medição da voltagem nesse caso é um bom indicador da maior ou menor eficiência do painel.

As figuras a seguir mostram a comparação entre os modelos tanto em voltagem como em temperatura do módulo fotovoltaico.

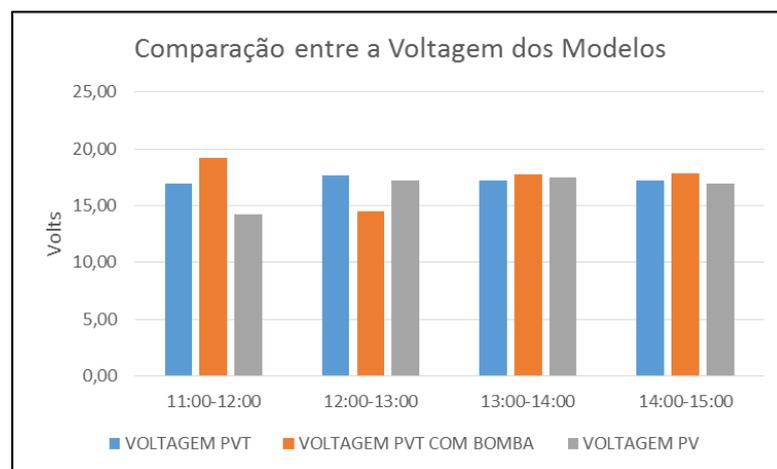


Figura 62: Comparação da Voltagem dos modelos.

Fonte: Autor do trabalho

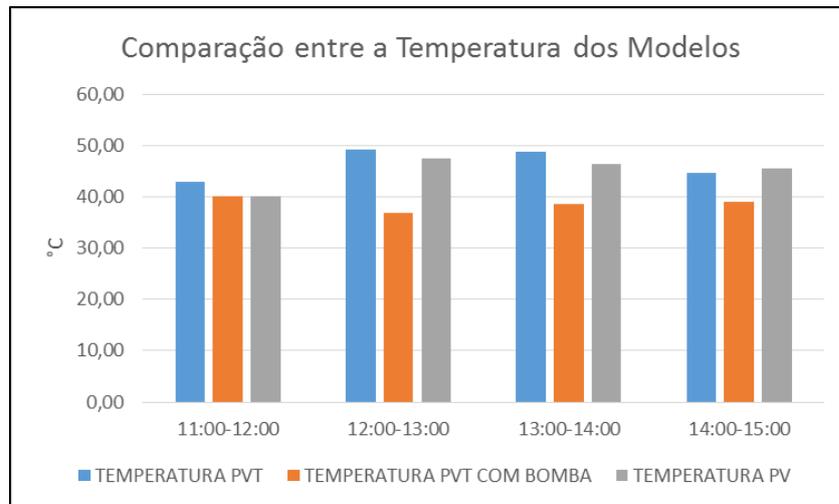


Figura 63: Comparação entre a temperatura do painel fotovoltaico dos modelos.

Fonte: Autor do trabalho

É observado através da Fig. 62 que a voltagem do modelo PVT com bomba é ligeiramente superior ao do dos modelos PV e PVT, somente nos horários de 12:00-13:00 é que essa voltagem torna-se inferior ao dos outros dois modelos, porém nos outros horários foi sempre superior.

O fato da superioridade da voltagem pode ser explicado devido ao arrefecimento do PVT com bomba ser mais eficiente, como pode-se observar por meio da Fig. 63, pois a temperatura do painel foi sempre inferior em comparação aos outros modelos. Sendo o modelo PV que alcança temperaturas mais elevadas, esse fato já era aguardado já que nesse modelo o único arrefecimento que acontece é devido a convecção do ar atmosférico. Como afirma de Saulox et al (2003) o benefício de usar sistemas PV/T em vez de PV é devido à menor temperatura das células.

Observa-se também que o modelo PVT com bomba é superior em questão de arrefecimento e voltagem em comparação ao PVT com circulação por meio do fenômeno termossifão. Observando a Fig. 64, podemos perceber que a troca de calor entre o reservatório e o painel é mais eficiente no PVT com bombeamento.

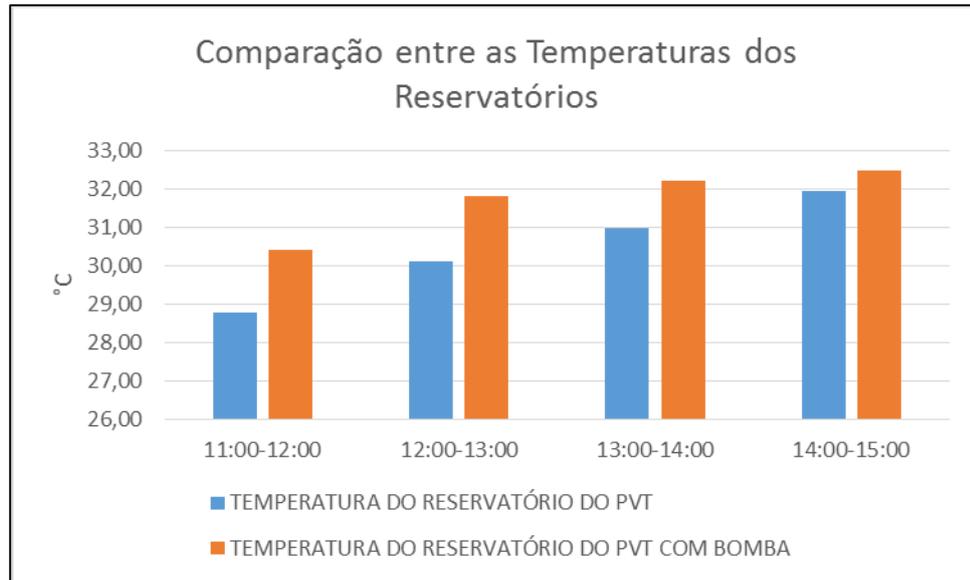


Figura 64: Comparação entre as temperaturas dos reservatórios.

Fonte: Autor do trabalho

Através da observação da Fig. 64, nota-se ambos os modelos PVT's funcionam, pois, a temperatura dos reservatórios elevam-se, evidenciando a retirada de calor do painel fotovoltaico. Porém, o PVT com bombeamento é mais eficiente na retirada de calor do que o PVT por circulação natural. Também confirmado pela Fig. 63, evidenciando que o PVT com bombeamento alcança temperaturas mais baixas, e mostrado na Fig. 62 alcança uma maior eficiência de conversão. Essa relação entre a vazão do fluido refrigerante também foi analisada por Chamoli (2013) que encontrou uma vazão ótima de 0,008 Kg/s. Afirmando a relação entre a vazão da água e refrigeração do painel fotovoltaico/térmico.

8. CONCLUSÃO

Em suma, apesar da energia solar ser vista como uma das soluções para geração de energia limpa, essa forma de produção ainda é pouco eficiente exergeticamente, tendo eficiência exergetica em torno de 15%, nos diversos ângulos, o que nos informa que cerca de 85% do potencial de geração de trabalho útil está sendo desperdiçado por perdas térmicas e por irreversibilidade da placa fotovoltaica.

Essa pesquisa revelou que entre as inclinações investigadas (20°, 15°, 10° e 5°) a de 5° apresentou melhor eficiência, também apresentou maior estabilidade da eficiência nos diversos horários do turno matutino, evidenciando que essa inclinação é a mais eficiente para a região de São Luís do Maranhão.

Uma forma de aumentar a eficiência exergetica seria o aproveitamento da exergia associada ao calor, como ocorre nas placas fotovoltaicas/térmicas, pois assim não seria uma perda exergetica aumentando o valor da eficiência. Além disso, diminuiria a temperatura das células solares aumentando sua capacidade de transformação em energia elétrica.

Sabendo dessa informação, projetou-se e construiu dois modelos de painel fotovoltaico/térmico resfriado a água. O primeiro utilizando circulação pelo efeito termossifão e o segundo utilizando circulação forçada por meio da utilização de uma bomba submersa.

Entre os modelos de PVT o modelo com circulação forçada apresentou melhores resultados tanto no resfriamento do painel fotovoltaico quanto na elevação da voltagem gerada pelo sistema. Evidenciando dessa forma, que a utilização de painéis fotovoltaicos/térmicos elevam a conversão de energia solar em energia elétrica.

Logo, a adaptação de painéis fotovoltaicos em painéis fotovoltaicos/térmicos é uma solução para a elevação da eficiência do painel fotovoltaico. Aumentando a produção de energia, podendo também diminuir o investimento em quantidade de painéis instalados, diminuindo o custo de instalação em energia fotovoltaica, e difundindo essa forma de produção de energia na sociedade.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A eficiência exergética de painéis fotovoltaicos ainda é pouco expressiva perto da disponibilidade exergética do sol, ou seja, ainda tem um potencial enorme sendo desperdiçada, logo, são perdas do sistema.

Pesquisas como concentradores de radiação solar são tentativas de elevar a eficiência de painéis fotovoltaicos. Assim como, seguidores solares, posicionamento azimutal do painel, dentre outras tecnologias.

Portanto, muito tem-se em evoluir em energia solar fotovoltaica, sendo assim muitas pesquisas podem ser realizadas nessa área. Dentre elas as acima citadas como seguidores solar, posicionamento azimutal, e a análise de resfriamento do painel (como a realizada nesse trabalho) que podem ser realizadas pela Universidade Estadual do Maranhão.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICA

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/protov.pdf>>

AMDA- Associação Mineira de Defesa do Ambiente. **Lista Suja 2006**. Belo Horizonte (MG) 2006.

Aoun, N; Nahran, B; Chenni, R. **Study of Experimental Energy and Exergy of mono-crystalline PV Panel in Adrar Region, Algeria**. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol 5, 2014.

Arredondo, H. I. V. **Avaliação Exergética e Exergo-Ambiental da**

Barros, H. A. **Anteprojeto de um sistema de 12KWp conectado à rede**. Escola Politécnica UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M. **Thermal Design and Optimization**. 3ed. New York: Jhon Wiley & Sons, 1996. 542p.

Calderón, M.; Calderón, A.J ;Ramiro, A. González E González, I. **Analysis of the Performance of the Photovoltaic Array through the Exergy Efficiency**. 5 f. Artigo. Department of Electrical Engineering. Department of Applied Physics. E.I.I., Extremadura.

Câmara, C. F. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**. Dissertação (Especialização)- Universidade de Lavras de Minas Gerais, 2011.

Cardoso, J. P. **Optimização Termoeconômica de uma Máquina de Absorção de Pequena Potência Alimentada a Energia Solar**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2013.

Chow, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied*

Cruz, D. **Meio Ambiente e Energia Solar**. São Paulo: Ática, 2001.

Dincer, I. & Rosen, M. A. **Exergy, Energy, Environment and sustainable development**. Elsevier. 1a. Ed. 2007, 454p.

Dincer, I.; Çengel, Y. A. **Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering**. *Entropy*, vol 3, 2001, p 131

Dubey, S; Tiwari. G.N. **Energy and Exergy Analysis of Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Water Heater Considering with and without Withdrawal From Tank**. *Journal of renewable and sustainable energy*, Vol 2. 2010. *Energy*, [S.I.]; n. 87, p 365-379, 2010.

EPE- Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. 2014. Disponível em: < <http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>

http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256600/PDE2023_ConsultaPublica.pdf/f1cba0f0-1287-4d9a-9835-74f276980a43>

EPE- Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional- Relatório Síntese Ano Base 2015**. 2016. Disponível em:

Fadigas, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. GEPEA.

Guerra, M. I. S. **Análise do Desempenho Elétrico de um Gerador Fotovoltaico com o Auxílio da Tecnologia PVT**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal da Paraíba, 2016.

Hepbasli, A. A key on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 593-661.

Iqbal, M. **Introduction to Solar Radiation Academic**. Press, 1983. Pág 390.

Izgi, E; AKKAYA, Y.E. **Exergoeconomic Analysis of a Solar Photovoltaic System in Istanbul, Turkey**. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2013.

Joshi e Pandey, (2009).

Joshi, A. S.; Dincer, I.; Reddy, B.V., **Thermodynamic Assessment of Photovoltaic Systems**. *Solar Energy*, 83 (2009), pp. 1139–1149.

Khaloei, M; Okhovati, H; Bozorgan, N. **Analyzing the Energy and Exergy of Photovoltaic Array for Kerman Climate**. Analele Universității “Eftimie Murgu, 2015.

Marques, A. **Seguidores Solares**. Disponível em:<<http://www.profafonso.com/>>. Acessado em: 25 Abril. 2017..

Marques, R. L. M. R. P. **Avaliação da Viabilidade de Coletores Híbridos Fotovoltaicos e Térmicos para Aplicação ao Aquecimento de Águas e Micro-Geração de Eletricidade**. 2008. 111p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~em00099/ralatorio.pdf>>.

Migliavacca, A.; Sitherenn, C.; Zaki, L. K.; Lorensetti, M. **Placas Fotovoltaicas Refrigeradas a Água e a Possibilidade de Cogeração Elétrica e Térmica**. SEPEI, 2016.

Moran, Michael; Shapiro, Howard N. **Análise de Exergia (Disponibilidade).Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4 ed. Rio de Janeiro: Ltc editora,2002.

Nayak, S; Tiwari, G.N. **Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic/Thermal Integrated with a Solar Greenhouse**. Energy and Buildings 40, 2008.

Pandey, A.K.; Tyagi, V. V.;Tyagi, S.K., Exergetic analysis and parametric study of multi-crystalline Solar Photovoltaic System at a Typical Climatic Zone, Clean Technologies and Environmental Policy, 15(2013), pp. 333–343.2013

Pandey, A.; Pant, P.C.; Sastry, O. S.; Kumar, A.; Tyagi, S. **Energy and Exergy Performance Evaluation of a Typical Solar Photovoltaic Module**. 12 f. Artigo. National Institute of Renewable Energy, Kapurthala, WadalaKalan, Kapurthala 144601 (Punjab) India and Solar Energy Centre, Ministry of New and Renewable Energy, Block-14, CGO Complex, Lodhi Road– 110003 (New Delhi), India. 2015.

Petela, R. **Exergy of heat radiation**. Trans. ASME, J HeatTransfer 2 (1964) 187-192.

Pinho, J.T.; Galdino, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. CEPPEL-CRESESB.2014.

Portal Energia Renovável. **Energia Fotovoltaica: Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalação**. 2004.

Produção de Biocombustíveis. Dissertação (Doutorado)- Escola Politécnica da

Rezac, P; Metghalchi. **A Brief Note on the Historical Evolution and Present State of Exergy Analysis.** JN: Internacional Journal of Exergy (IJEX) 2004, Vol. 1. No. 4, app. 426-437.

Rojas, S. I. P. **Análise Exergética, Termoeconômica e Ambiental de um Sistema de Geração de Energia. Estudo de Caso: Usina Termoelétrica UTE- Rio Madeira.** Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2007.

Rosen, M. A. **Energy Crisis or Exergy Crisis?** Exergy, an International Journal v. 2, p. 125-127, 2002c.

Saidur, R.; BoroumandJazi, G.; Mekhlif, S.; Jammuel, M. **Exergy Analysis of Solar Energy Applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.

Santos, L. P.; Júnior, R. H. P.; Santos, V. C. L. **Geração Distribuída: Sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão.** S.d.

Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A. **Exergetic Optimization of a Solar Photovoltaic Array.** J. Thermodyn, 2009.

Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A. **Exergy Efficiency of a Solar Photovoltaic Array Based on Exergy Destructions.** Proc. Ins. of Mech. Engineers, Part A: J. Power Energy 224 (6), 813–825, 2010.

Saulox, E.; Teyssedou, A.; Sorin, M. **Analysis of Photovoltaic (PV) and Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems Using the Exergy Method.** Energy and Buildings, 2013.

Shukla, A.; Khare, M.; Shukla, K. N. **Experimental Exergetic Performance Evaluation of Solar PV Module.** International Journal of Scientific and Research Publications, Vol 5, 2015.

Solar Brasil. **Conceitos de Energia Solar Fotovoltaica - Geometria Solar – Ângulo de Inclinação do Painel Solar Fotovoltaico.** Disponível em:< www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/131-conceitos-de-energia-solar-fotovoltaica-geometria-solar-angulo-de-inclinacao-do-painel-solar-fotovoltaico > Acesso em: novembro 2017.

Teixeira, T. R. C. **Estudo de um Sistema Híbrido com Colectores Solares Termofotovoltaicos Acoplados a um Termogerador Elétrico.** 2009. 115p. Dissertação

(Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<http://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/58024/1/000137766.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2014. Universidade de São Paulo, 2009

Wall, G. **Exergy - A Useful Concept Within Resource Accounting**: Sweden. Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg. 1977. Disponível em: <http://exergy.se/goran/thesis/paper1/paper1.html>. Acesso em:

Yazdanpanahi, J.; Sarhaddi, F.; Adeli, M.M. **Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses**. Solar Energy, 2015.