

CENTRO PAULA SOUZA

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SANTO ANDRÉ

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA AUTOMOTIVA

DANIEL SILVA FERREIRA

GUILHERME PERUCI GOMES TORRES DA SILVA

LUIZ FERNANDO SOUZA PEREIRA

**APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DO
SISTEMA FOTOVOLTAICO POR MEIO DE UM SISTEMA DE ARREFECIMENTO.**

SANTO ANDRÉ

2020

DANIEL SILVA FERREIRA

GUILHERME PERUCI GOMES TORRES DA SILVA

LUIZ FERNANDO SOUZA PEREIRA

**APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DO
SISTEMA FOTOVOLTAICO POR MEIO DE UM SISTEMA DE ARREFECIMENTO.**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado a
Faculdade de Tecnologia Fatec Santo André
como requisito parcial para conclusão do curso
de Tecnologia em Eletrônica Automotiva.

Orientador: Prof^o MSc. Adriano Ribolla

SANTO ANDRÉ

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

F383a

Ferreira, Daniel Silva

Aplicação dos conceitos de melhoria de eficiência do sistema fotovoltaico por meio de um sistema de arrefecimento / Daniel Silva Ferreira, Luiz Fernando Souza, Guilherme Peruci Gomes Torres da Silva. - Santo André, 2020. 90f. il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2020.

Orientador: Prof. MSc Adriano Ribolla

1. Eletrônica. 2. Automóveis. 3. Células fotovoltaicas. 4. Sistema de arrefecimento. 5. Eficiência. 6. Resfriamento. 7. Energia solar. 8. Tecnologia. I. Souza, Luiz Fernando. II. Silva, Guilherme Peruci Gomes Torres da. III. Aplicação dos conceitos de melhoria de eficiência do sistema fotovoltaico por meio de um sistema de arrefecimento.

629.2

DANIEL SILVA FERREIRA

GUILHERME PERUCI GOMES TORRES DA SILVA

LUIZ FERNANDO SOUZA PEREIRA

**APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA
DO SISTEMA FOTOVOLTAICO POR MEIO DE UM SISTEMA DE
ARREFECIMENTO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
FATEC SANTO ANDRÉ como requisito parcial à
obtenção de título de Tecnólogo em Eletrônica
automotiva

BANCA EXAMINADORA

Local: Fatec Santo André

Horário: 18:30

Data: 17/07/2020

Prof. MSc Adriano Ribolla
Presidente da Banca
Fatec Santo André

Prof. MSc Alexandre Pazian
Primeiro membro da Banca
Fatec Santo André

Prof. MSc Suely Midori Aoki
Segundo Membro da Banca
Fatec Santo André

SANTO ANDRÉ

2020

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todos que participaram da elaboração do nosso projeto de graduação de curso, entre eles nossos colegas e amigos que contribuíram com ideias e motivação para a realização do trabalho, e principalmente aos professores envolvidos, nos aconselhando, orientando e dando suporte técnico para a realização do trabalho no qual levaremos para o resto de nossas vidas.

Ao professor Adriano Ribolla que nos propôs o tema do trabalho de graduação de curso, pelo passar de conhecimento e suporte técnico ao grupo e pelo apoio e motivação na construção do projeto.

Ao professor Fernando Garup Dalbo pelo apoio e orientação na realização da monografia do trabalho de graduação de curso. A toda equipe da Fatec Santo André-SP.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por finalidade o estudo da aplicação de um sistema de arrefecimento para aumentar a eficiência térmica de um painel fotovoltaico por meio de um protótipo de sistema de arrefecimento, visando um aumento energético para o sistema. Os sistemas atuais têm o objetivo de transformar a radiação solar em energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas feitas de silício. E esses sistemas têm como maior dificuldade não atingir uma grande eficiência energética. O trabalho pretende estudar e apresentar um método que aumente a eficiência das células fotovoltaicas por meio do resfriamento delas, para evitar que o aumento de temperatura devido a incidência da radiação solar prejudique a capacidade de converter a mesma em elétrica. Para se atingir o objetivo da melhoria de eficiência foi escolhido um sistema de resfriamento a base de um líquido de arrefecimento que vai refrigerar a parte inferior da célula fotovoltaica enquanto a parte superior da célula recebe a radiação solar. Com este sistema de arrefecimento, serão levantados dados de comparação com um sistema fotovoltaico sem arrefecimento.

Palavras chave: Energia Solar, melhor eficiência, células fotovoltaicas, resfriamento.

ABSTRACT

This final graduation work aims to study the application of a cooling system to increase the thermal efficiency of a photovoltaic panel through a cooling system prototype, aiming at an energy increase for the system. Current systems aim to transform solar radiation into electrical energy by means of photovoltaic plates made of silicon. And these systems have a major difficulty while not achieving great energy efficiency. This work intends to study and present a method that increases the efficiency of photovoltaic cells by cooling them, in order to avoid that the increasing temperature due to the incidence of solar radiation impairs the capacity to convert it into electrical energy. To achieve the objective of improving efficiency, a cooling system based on a simple coolant system was chosen to cool the bottom of the photovoltaic cells while the top of them receives solar radiation. With this cooling system, comparison data will be collected with and without photovoltaic cooling system.

Keywords: Solar energy, better efficiency, photovoltaic cells, cooling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01- COLETOR SOLAR	20
FIGURA 02 - PAINEL SOLAR COM LENTES ÓPTICAS.....	23
FIGURA 03 – HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	26
FIGURA 04 - PAINEL SOLAR.....	28
FIGURA 05 - EFEITO FOTOVOLTAICO	30
FIGURA 06 - EFEITO DO EXPERIMENTO DE FENDA DUPLA	31
FIGURA 07 - COMPRIMENTO DE ONDA.....	33
FIGURA 08 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	33
FIGURA 09 - LUMINÂNCIA.....	35
FIGURA 10 - ILUMINÂNCIA.....	36
FIGURA 11 - CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	39
FIGURA 12 - CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINAS	41
FIGURA 13 - CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO	43
FIGURA 14 - PAINÉIS SOLARES SÉRIE-PARALELO.....	44
FIGURA 15 - DOIS PAINÉIS IGUAIS EM SÉRIE	44
FIGURA 16 - TAB WIRE.....	45
FIGURA 17 - CÉLULAS POLICRISTALINAS	47
FIGURA 18 - CANETA DE FLUXO	47

FIGURA 19 - PLACA DE ALUMÍNIO	48
FIGURA 20 - DISSIPADORES	48
FIGURA 21 - LÂMPADAS HALÓGENAS	49
FIGURA 22 - TERMOPARES TIPO K	49
FIGURA 23 - MULTÍMETROS	50
FIGURA 24 - LUXÍMETRO	50
FIGURA 25 - CHAVE SELETORA	51
FIGURA 26 - MISTURA FRIGORÍFICA	51
FIGURA 27 - PLACA BASEFONTE: AUTOR	52
FIGURA 28 - MEDINDO A FITA DE ESTANHO.....	52
FIGURA 29- APLICANDO FLUXO	53
FIGURA 30 - LIGANDO A FITA COM AS CÉLULAS.....	54
FIGURA 31 - COLANDO AS CÉLULAS Á UMA PLACA DE APOIO.....	54
FIGURA 32 - SOLDANDO PARTE POSITIVA E NEGATIVA.....	55
FIGURA 33 - LIGANDO O BUS WIRE	55
FIGURA 34 - LIGAÇÃO DAS FILEIRAS	56
FIGURA 35 - LIGAÇÃO CIRCUITO SÉRIE DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	56
FIGURA 36 - CIRCUITO ELÉTRICO DO PAINEL.....	57
FIGURA 37 - TESTE DE BANCADA (FONTE DE LUMINOSIDADE)	58
FIGURA 38 – LUXÍMETRO	59

FIGURA 39 - QUANTIDADE DE LUX EM 1 LÂMPADA HALÓGENA	60
FIGURA 40 - QUANTIDADE DE LUX DA FONTE DE LUMINOSIDADE	60
FIGURA 41 - ESPECTRO DE RADIAÇÃO SOLAR	62
FIGURA 42 - ESPECTRO LÂMPADA HALÓGENA.....	63
FIGURA 43 - FONTE DE LUMINOSIDADE.....	64
FIGURA 44 - MEDIÇÃO DO TERMOPAR.....	64
FIGURA 45- MEDIÇÃO TENSÃO E CORRENTE	65
FIGURA 46 - CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM CONTATO COM O LÍQUIDO ARREFECIMENTO.....	65
FIGURA 47 - PLACA DE ALUMÍNIO COM OS DISSIPADORES.....	66
FIGURA 48 - MISTURA FRIGORÍFICA	67
FIGURA 49 - CHAVE SELETORA	68
FIGURA 50 - ESQUEMA ELÉTRICO DAS CHAVES SELETORAS.....	69
FIGURA 51 - CHAVE SELETORA COM O CIRCUITO FABRICADO	69
FIGURA 52 - DISTÂNCIA DAS LÂMPADAS COM AS CÉLULAS.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 01 - Eficiência energética dos principais tipos de placas fotovoltaica.....24

Tabela 02 - Frequência e Comprimento das Ondas Eletromagnéticas.....34

Lista de Gráficos

Gráfico 01 - Experimento (Temperaturas).....	71
Gráfico 02 - Experimento (Correlação Tensão, Corrente, Potência, Eficiência e Média das temperaturas).....	72

Lista de Símbolos, Abreviações e Unidades

Å = Angstrom;

Cd/m² = candela por metro quadrado;

E_{fóton} = Energia do fóton;

eV = Elétron Volt;

f = frequência da radiação eletromagnética (Hz);

FEM = Força eletromotriz;

ħ = Constante de Plank;

h = hora;

IV = infravermelho;

Lm = lúmen;

Lx = lux;

η = Eficiência;

m = metro;

nm = nanômetros;

V = ultravioleta;

W = Watt;

V = Tensão;

VMP = tensão em máxima potência;

λ = Comprimento de onda da luz;

μV = microvolts;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. CENÁRIO ENERGÉTICO ATUAL	19
1.2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	21
1.3. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO.....	22
1.4. BAIXA EFICIÊNCIA E CUSTOS.....	22
1.4.1 AUMENTAR A EFICIÊNCIA E REDUZIR CUSTOS	23
1.4.2. COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS POR CÉLULAS	24
2. OBJETIVO DO PROJETO.....	25
2.1. JUSTIFICATIVA	25
2.2. RESULTADOS ESPERADOS	25
3. INTRODUÇÃO CONCEITUAL.....	25
3.1. A HISTÓRIA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.	25
3.2. PLACAS FOTOVOLTAICAS	27
3.3. COMPOSIÇÃO DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS	28
3.3.1. PROCESSO DE DOPAGEM ELETRÔNICA.....	28
3.4. EFEITO FOTOVOLTAICO	29
3.5. O QUE É FÓTON?	30
3.6. FUNCIONAMENTO DA PLACA FOTOVOLTAICA EM EXPOSIÇÃO A LUZ... 	32
3.7. COMPRIMENTOS DE ONDA	32

3.8. GRANDEZAS E UNIDADES DE FOTOMETRIA	34
3.8.1. INTENSIDADE LUMINOSA	34
3.8.2. LUMINÂNCIA	35
3.8.3. ILUMINÂNCIA	35
3.8.4. LUX.....	36
3.8.5. RADIAÇÃO SOLAR	36
3.8.6. IRRADIAÇÃO SOLAR	37
3.9. SÍLÍCIO NAS PLACAS FOTOVOLTAICAS.....	37
3.9.1. PUREZA DO SILÍCIO	37
3.9.2. EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR	37
3.9.3. SOBRE E EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR MONOCRISTALINO OU POLICRISTALINO:.....	38
3.10. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	39
3.10.1. CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	39
3.10.1.1. VANTAGENS DAS CÉLULAS MONOCRISTALINAS DE SILÍCIO	40
3.10.1.2. DESVANTAGENS DAS CÉLULAS MONOCRISTALINAS DE SILÍCIO ...	40
3.10.2. CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO.....	40
3.10.2.1. VANTAGENS DAS CÉLULAS POLICRISTALINAS DE SILÍCIO	42
3.10.2.2. DESVANTAGENS DAS CÉLULAS POLICRISTALINAS DE SILÍCIO	42
3.10.3. CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO	42
3.10.3.1. VANTAGENS DAS CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO	43

3.10.3.2. DESVANTAGENS DAS CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO	43
3.11. LIGAÇÃO SÉRIE E PARALELA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	43
3.12. FIO DE LIGAÇÃO E FIO DE BARRAMENTO (TAB WIRE E BUS WIRE)	45
3.13. TERMOPAR.....	46
3.13.1. COMO FUNCIONA O TERMOPAR	46
4. METODOLOGIA E MATERIAIS	46
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS PARA FAZER OS TESTES.....	46
4.2. PROCEDIMENTO DE MONTAGEM	51
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	57
5.1. CIRCUITO ELÉTRICO DO PAINEL.....	57
5.2. TESTE DE BANCADA.....	58
5.3. LUMINOSIDADE DAS LÂMPADAS HALOGÊNEA	58
5.4. ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA LUZ EM RELAÇÃO AO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DAS LÂMPADAS HALÓGENAS.	61
5.4.1. ESPECTRO DA LUZ SOLAR	61
5.4.2. ESPECTRO DA LÂMPADA HALÓGENA	62
5.5. ROTEIRO EXPERIMENTAL	63
5.6. SISTEMA DE ARREFECIMENTO	66
5.6.1. MISTURA FRIGORÍFICA.....	66
5.6.2. CHAVE SELETORA	67
5.7. EFICIÊNCIA DO SISTEMA.....	70

6. RESULTADOS ATINGIDOS.....	70
6.1.1. EXPERIMENTO	71
7. CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A- TEMPERATURAS DOS TERMOPARES E TEMPERATURA DA ÁGUA DE ARREFECIMENTO	81
APÊNDICE B- MÉDIA DAS TEMPERATURAS, TENSÃO, CORRENTE, POTÊNCIA E EFICIÊNCIA.	86

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais características da nossa sociedade é a dependência crescente da energia elétrica em nosso cotidiano e conseqüente aumento de consumo de energia elétrica, principalmente nas regiões metropolitanas do Brasil. Uma das principais e atuais alternativas energéticas promissoras é a energia solar. O sol é uma fonte de energia renovável, e seu aproveitamento pode ser feito como fonte de calor ou por luz.

“A importância desse tipo de aproveitamento está alinhada com a preservação do meio ambiente, pois é fonte de energia limpa, livre de poluição. Essa seria uma condição sustentável para nossa Indústria e para a sociedade.” (PALZ, 1981)

São muitas vantagens sobre outras fontes de energia, tais como: não ser poluente, não contribuir para o efeito estufa e não precisar de geradores para a produção de energia elétrica, porém tem como desvantagem a exigência de altos investimentos para o seu aproveitamento, como por exemplo: placas fotovoltaicas e componentes usados para converter a radiação solar em energia elétrica padrão AC, como por exemplo inversores de frequência para residências e indústrias. Frente a esta realidade, seria irracional não buscar e aproveitar esta fonte de energia limpa, inesgotável e gratuita. "Isso significa uma só coisa: fontes renováveis terão um papel muito maior, mas o mundo vai continuar a usar quantidades maciças de todos os combustíveis fósseis" (RICHARDSON, 2000).

1.1. CENÁRIO ENERGÉTICO ATUAL

Em 1997 durante a assinatura do Protocolo de Kioto, foi dado um destaque as mudanças climáticas no mundo e os países assinantes voltaram seus esforços em reduzir suas próprias ações nocivas ao meio ambiente, incluindo, a busca por um desenvolvimento energético sustentável. O documento “Livro Branco das Energias Renováveis” cita como meta para 2010 alcançar uma utilização mínima de 12% das fontes de energia Renováveis na Europa (RIBEIRO, 2006).

Os países Europeus são, há um bom tempo, referência no tema de energia renovável. “A importância da investigação relacionada às fontes de energia renovável e suas interfaces é atualmente maior que nunca, uma vez que a Europa está

comprometida em produzir energia a partir de fontes renováveis não poluentes”.
(TRINDADE, Manuel. et al.)

Uma das alternativas mais promissoras é a Energia Solar. De acordo do o Conselho Mundial de energia, até o final do século, 70% da energia consumida terá origem solar. Como grande parte de nossa tecnologia depende de eletricidade, uma das tecnologias mais usadas para captação de energia proveniente do Sol são as placas fotovoltaicas (PFV). (TOLMASQUIM, 2003)

Em busca de fontes mais limpas, há entre as alternativas, o aproveitamento direto da energia proveniente do Sol. Este se dá, generalizadamente, por duas formas: a captação de energia para o aquecimento direto de ambientes e fluídos (como a água), ou para geração de energia elétrica, seja pelo efeito fotovoltaico, seja pelo efeito termoelétrico.

O aproveitamento térmico consiste em usar o poder calorífico da radiação solar para o aquecimento de fluídos. Os painéis de aquecimento solar são uma opção de reaproveitamento térmico, que são compostos por coletores solares usados em residências, de maneira que os reservatórios térmicos são usados para armazenar a água aquecida. As placas absorvem a radiação solar e o calor é transferido para a água que circula no interior das tubulações de cobre desse coletor e é armazenada no reservatório térmico que conserva a temperatura da água até o momento da utilização, conforme Figura 01. O líquido aquecido chega a temperaturas relativamente baixas, menores que 100°C.

Figura 01- Coletor Solar



Fonte: mundoeducacao (<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/coletor-solar.htm> - Acesso em 07/09/2019)

Já as placas fotovoltaicas convertem diretamente a energia luminosa em elétrica. Este fenômeno ocorre graças ao efeito fotovoltaico, que foi primeiramente observado por Alexandre Edmond Becquerel em 1839 (LUQUE, 2011). A evolução do aperfeiçoamento dos semicondutores começa no século XIX, entretanto nessa época os conceitos de materiais condutores e isolantes eram imprecisos. Um dos cientistas que contribuiu para fazer essa distinção foi Faraday, ao perceber que alguns materiais, como o sulfeto de prata, conduzem corrente elétrica melhor em temperaturas mais altas, comportamento oposto aos metais (ORTON, 2004, p.19).

Em 1784, o físico alemão Karl Ferdinandi Braun (1850-1918) descobriu o fenômeno da retificação. Ele fez vários estudos sobre o comportamento elétrico de metais em contato com alguns cristais, como o sulfeto de chumbo (PbS), e percebeu que este conduzia corrente elétrica apenas se aplicada uma determinada polaridade, isto é, a corrente percorria o condutor apenas em um sentido (SILVA, 2010, p.12).

1.2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Painéis fotovoltaicos em geral são geradores de energia elétrica a partir de luminosidade. Esses painéis são aclamados por serem sinônimo de sustentabilidade e modernidade, e ao mesmo tempo que recebem críticas por seu baixo rendimento na conversão dos fótons, essas críticas são validadas por vários fatores que interferem nos parâmetros elétricos. Tais fatores podem ser citados como a área útil do painel sobre a qual há uma incidência solar que varia conforme o ângulo entre o painel e os raios solares conforme a posição do sol no dia e no ano, ou pelo fato de a insolação direta ser atenuada por uma nuvem, entre outros.

Sobre a baixa eficiência, acredita-se que com um sistema auxiliar que consiga reaproveitar a energia térmica dispensada nesse sistema, aumentaria a sua eficiência, logo gerando mais energia. A energia térmica é uma forma de energia que está atrelada a altas temperaturas e o calor, essa energia é relacionada com a energia cinética, ou seja, movimentação das moléculas de um determinado corpo. Quanto maior o movimento destas partículas, maior será a temperatura e, conseqüentemente, mais intensa será a energia térmica liberada.

1.3. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

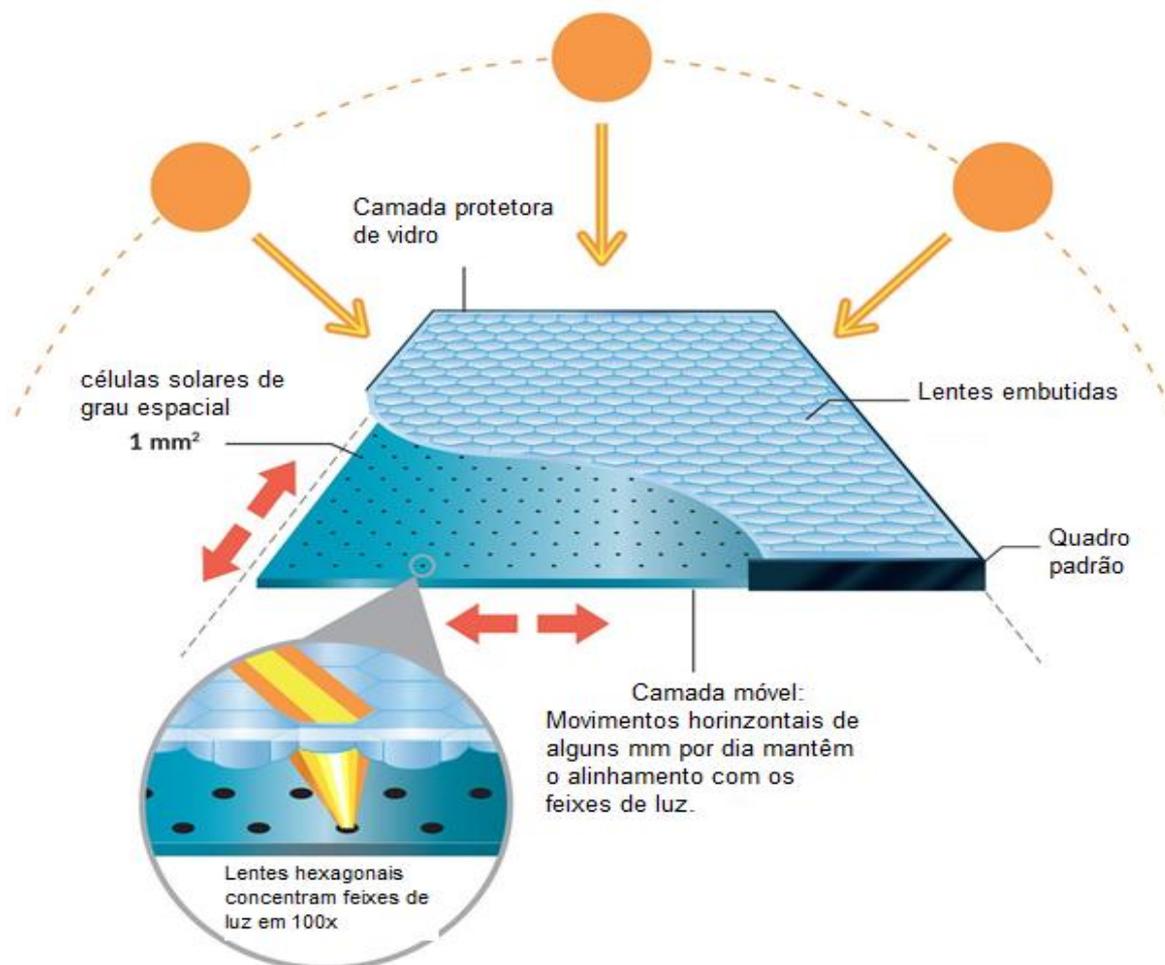
Com o advento das novas tecnologias ecologicamente corretas e renováveis, a obtenção de energia elétrica por meio do sol vem se tornando cada vez mais popular. Um sistema que seja capaz de reaproveitar a energia renovável do sol seria de grande importância para aumentar os parâmetros de rendimento elétrico, pois pode-se gerar nossa própria energia elétrica por meio de um recurso natural.

1.4. BAIXA EFICIÊNCIA E CUSTOS

Os painéis solares parecem os mesmos do lado de fora: mesmo tamanho, mesma espessura e até mesmo o mesmo sistema de instalação. Isso porque eles entregam rendimentos de 29% de eficiência. A empresa de energia solar Insolight testou em seu laboratório independente os novos painéis. Eles usam um sistema óptico patenteado que concentra a luz solar em uma espécie de célula fotovoltaica miniatura normalmente usada em satélites, que são cerca de 29% mais eficientes do que um painel solar comum. (Insolight, 2019)

Para manter os custos baixos para o mercado de varejo, foi desenvolvido um vidro protetor, no qual pode ser inserido lentes ópticas, que concentram a luz solar em cerca de 100x e a direcionam para a superfície das células fotovoltaicas, conforme Figura 02. Os fundadores da dessa empresa, Mathieu Ackermann, Laurent Coulot e Florian Gerlich, também projetaram um mecanismo que pode mover as células por um dado ângulo no eixo horizontal por alguns milímetros, a fim de acompanhar a luz do sol ao longo do dia (Insolight, 2019).

Figura 02 - Painel solar com lentes ópticas



Fonte: Ciclo Vivo (<https://ciclovivo.com.br/planeta/energia/suico-recorde-painel-solar-eficiencia/> Acesso em 17/08/2019)

1.4.1 AUMENTAR A EFICIÊNCIA E REDUZIR CUSTOS

O sistema de lentes ópticas tem a mesma aparência e formato que os painéis normais de telhado e pode ser instalado da mesma maneira. “O verdadeiro desafio para o mercado de varejo é aumentar os rendimentos sem elevar os custos, mantendo o equipamento robusto e fácil de instalar”. (Laurent Coulot, 2018)

A tecnologia dessa empresa estabeleceu um recorde em testes de laboratório, quando alcançou uma eficiência de 36%. Desde então, o sistema foi padronizado para produção em massa com uma eficiência de 29%, muito à frente da eficiência de 17% a 19% dos concorrentes como confirmado em testes do Instituto de Energia Solar da Universidade Técnica de Madri em novembro de 2018.

O sistema também foi testado durante o ano inteiro em 2017, em telhados em um local de testes da Escola Politécnica Federal de Lausana (EPFL), na Suíça. “Nossos painéis foram conectados à rede e monitorados continuamente. Eles continuaram trabalhando sem problemas com ondas de calor, tempestades e clima de inverno” (Ackermann, 2018). Segundo os fundadores, os painéis solares oferecem melhor retorno sobre o investimento, uma vez que “pode reduzir as contas de energia das residências em até 30% nas regiões ensolaradas” (Laurent Coulot, 2018).

1.4.2. COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS POR CÉLULAS

Hoje em dia, existem diferentes tipos de células fotovoltaicas. A Tabela 01 faz uma comparação entre essas tecnologias, sendo que as mais comuns encontradas no mercado são as de silício mono e policristalino e as de filmes finos. As de silício monocristalino são as mais eficientes dentre as que são produzidas em maior quantidade e as que estão disponíveis no mercado. Elas alcançam valores de eficiência de 18%, porém, possuem um custo de produção mais elevado do que as dos outros tipos.

Tabela 01: Eficiência energética dos principais tipos de placas fotovoltaicas

MATERIAL	EFICIÊNCIA EM LABORATÓRIO	EFICIÊNCIA DA CÉLULA COMERCIAL	EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS COMERCIAIS
Silício monocristalino	24,70%	18%	14%
Silício policristalino	19,80%	15%	13%
Silício cristalino de filme fino	19,20%	9,50%	7,90%
Silício amorfo	13%	10,50%	7,50%
Silício micromorfo	12%	10,70%	9,10%
Célula solar híbrida	20,10%	17,30%	15,20%
CIS, CIGS	18,80%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,40%	10%	9%

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações, Gradella et al. (Adaptado)

2. OBJETIVO DO PROJETO

Esse projeto tem como objetivo desenvolver um método que seja capaz de demonstrar o aumento do rendimento das células fotovoltaicas por meio de um protótipo com um sistema de resfriamento. Será utilizado um painel solar de pequena escala para captar a eficiência real da célula e aferir seus respectivos dados, que serão comparados com os dados de um protótipo com a solução de resfriamento.

2.1. JUSTIFICATIVA

A demanda por energia tem crescido cada vez mais nos últimos anos e a tendência é crescer cada vez mais. Tendo em vista isto, a busca por fontes de energia renováveis que não degradem o meio ambiente já é um fato consolidado. Uma ótima forma de fonte de energia é a energia solar, que é uma fonte 100% limpa, ou seja, não degrada o meio ambiente. Porém ainda é uma tecnologia que possui baixa eficiência energética, se comparada às demais. Foram encontradas formas possíveis de aumentar essa eficiência dentre elas, por meio do resfriamento das próprias células, onde as células fotovoltaicas trabalham em temperaturas mais baixas, aumentando sua eficiência energética.

2.2. RESULTADOS ESPERADOS

Como resultados esperados para esse projeto estão:

- Gerar um potencial de energia elétrica com a implementação do sistema fotovoltaico que possa realizar o resfriamento;
- Estimar o diferencial de energia obtida com o sistema fotovoltaico com e sem o resfriamento da placa;

3. INTRODUÇÃO CONCEITUAL

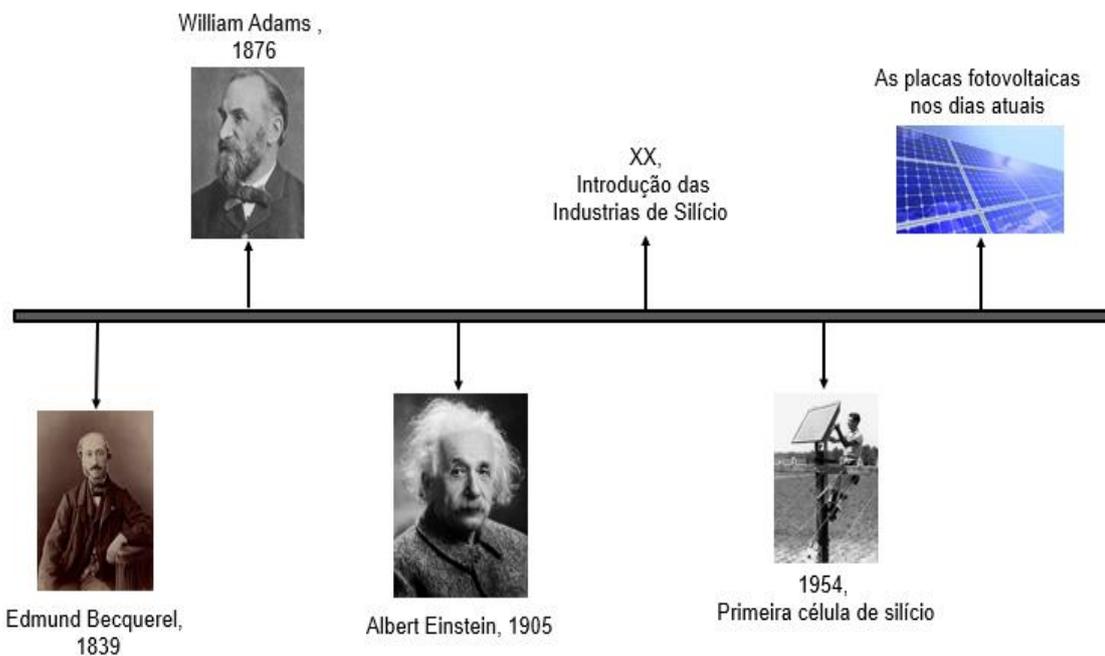
3.1. A HISTÓRIA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.

Conforme a Figura 03, que ilustra uma linha temporal da história da energia solar fotovoltaica, Edmund Bequerel, em 1839 foi o primeiro físico a registrar observação do Efeito Fotovoltaico, ao notar a passagem de corrente entre eletrodos

recobertos com prata em solução eletrolítica expostos a luz. Trinta e sete anos mais tarde, William Adams e Richard Day, estudando a fotocondutância do selênio descobriram que uma placa de Selênio exposta à luz era capaz de produzir energia espontaneamente quando colocada entre dois contatos aquecidos de platina.

Nos anos seguintes, vários dispositivos solares semelhantes surgiram, sempre fazendo uso de *waffers*¹ de semicondutores e metais. Estes *waffers* formavam assim uma *barreira de Schotty*², gerando uma junção assimétrica, responsável pela formação da diferença de potencial. As camadas de metal eram consideravelmente finas, para permitirem a passagem da luz.

Figura 03 – História da energia solar fotovoltaica



Fonte: Autor

Porém, todas estas diferentes combinações feitas até então foram realizadas devido a curiosidade dos cientistas acerca de características de Fotocondutância, e não fotoelétricas. Apenas na segunda metade do século XX, com a ascensão da indústria do Silício, que as células solares ganharam verdadeiro destaque por sua

¹**Waffers:** Composição de camadas geralmente homogêneas sobrepostas (Tradução livre)

²**Schotty:** emissão termiônica de elétrons de campo.

capacidade de fornecer energia alternativa. A indústria descobriu métodos de formar *waffers* entre cristais do tipo (p) e cristais tipo (n). A zona de contato é chamada de junção p-n, muito mais efetiva que as *barreiras de Schottky* na retificação de corrente. A primeira célula solar de silício foi criada pelo engenheiro estadunidense Russell Ohl, em 1954. (DUSOL, 2019)

Naquele ano, o químico Calvin Fuller, da renomada Bell Laboratories, nos EUA, desenvolveu o processo de dopagem do silício, partilhando sua descoberta com o físico Gerald Pearson, que aperfeiçoou a técnica e partilhou esse aperfeiçoamento com o cientista Daryl Chapin.

Foi a primeira vez, em pleno século XX, que uma célula solar conseguiu alimentar por várias horas um aparelho elétrico, essa eficiência chegava a 4% (atualmente, as placas solares apresentam entre 13% e 21% de eficiência, dependendo do modelo). (DUSOL, 2019)

Depois de alguns problemas técnicos superados, muito por conta do trabalho de Fuller, a primeira célula de energia solar foi formalmente apresentada em 25 de abril de 1954, durante a reunião anual da *National Academy of Sciences*, em Washington. A primeira utilização oficial da energia fotovoltaica foi feita quatro anos depois desse anúncio, em 1958, por conta do lançamento do satélite Vanguard I, que utilizava um mini painel solar para alimentar um rádio. (Portal Solar, 2016)

Foi somente na década de 90, que a energia fotovoltaica recebeu atenção especial, devido a necessidade de gerar energia por fontes não-fósseis. Ainda na década de 90 o custo dos fotovoltaicos caiu consideravelmente em resposta ao seu crescimento de 15% a 25% ao ano. (Nelson, 2007)

3.2. PLACAS FOTOVOLTAICAS

Conforme a Figura 04, os módulos fotovoltaicos são formados por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas que geralmente têm conexões série e paralela. As células fotovoltaicas que compõem um painel fotovoltaico são incorporadas e protegidas. O painel fotovoltaico é responsável por transformar diretamente a energia da radiação solar em eletricidade, sob a forma de corrente contínua.

Figura 04 - Paine Solar

Fonte : Elysia (<https://elysia.com.br/painel-solar-em-gravata/>- Acesso em 21/03/2019)

3.3. COMPOSIÇÃO DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS

O material mais comum nas células é o Silício Cristalino, embora haja uma busca por novos materiais, como os filmes finos.

Os monocristalinos são assim chamados por possuírem uma estrutura homogênea em toda a sua estrutura. Para fabricação de uma célula fotovoltaica desse grupo é necessário que o Silício tenha 99,9999% de grau de pureza. A obtenção desse tipo de Silício é mais cara do que a do silício policristalino, porém tem-se maior eficiência na hora da conversão. As técnicas de fabricação de células policristalinas são basicamente as mesmas de fabricação de células monocristalinas. É requerida, porém, menor gasto de energia e menor rigor de controle (CRESESB,1999).

3.3.1. PROCESSO DE DOPAGEM ELETRÔNICA

Os materiais semicondutores intrínsecos (puros) podem ter sua condutividade modificada drasticamente quando a eles são adicionadas pequenas quantidades de átomos de um outro material (impurezas). Esse processo de inserir impurezas em um material semicondutor intrínseco é chamado dopagem. O nível de dopagem é da ordem de um átomo doador para 10 milhões de átomos de cristal de silício ou germânio (Flávio Marcos Alves Juste, 2008).

O material tipo P é formado pela dopagem do semicondutor intrínseco por átomos trivalentes como boro, gálio e índio. A falta de uma ligação é chamada de lacuna (buraco). Como uma lacuna pode ser preenchida por um elétron, as impurezas trivalentes acrescentadas ao silício ou germânio, são chamadas de átomos

aceitadores ou receptores. O material tipo P resultante é eletricamente neutro (Flávio Marcos Alves Juste, 2008).

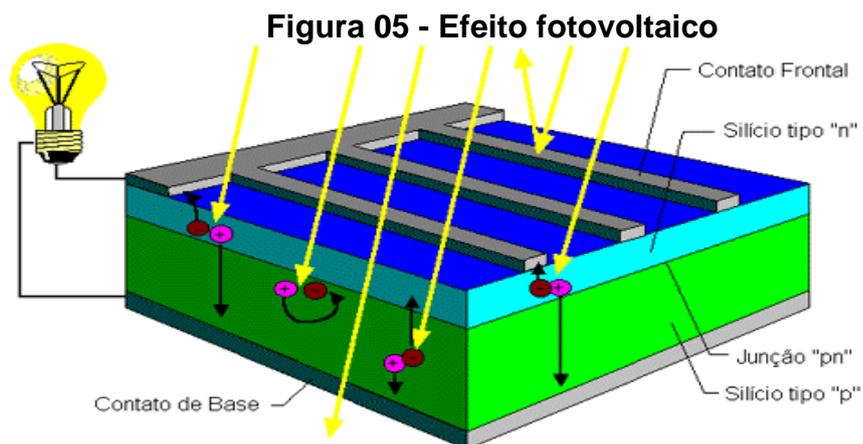
Na dopagem tipo N, o fósforo ou o arsênio é adicionado ao silício em pequenas quantidades. O fósforo e o arsênio possuem cinco elétrons externos cada um, de forma que ficam fora de posição quando entram no reticulado de silício. O quinto elétron não tem a que se ligar, ganhando liberdade de movimento. Apenas uma pequena quantidade de impurezas é necessária para criar elétrons livres o suficiente para permitir que uma corrente elétrica flua pelo silício. O silício tipo N é um bom condutor. Os elétrons possuem uma carga negativa, daí o nome tipo N (Pinto Junior, 2010).

3.4. EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é caracterizado pela produção de uma corrente elétrica entre duas partes de material diferente, que estão em contato e expostos a luz ou radiação eletromagnética em geral.

O Efeito Fotoelétrico foi alvo de estudo de Albert Einstein a partir de 1905, o que lhe deu o Prêmio Nobel de Física. Após cerca de 17 anos, na virada do século XIX, Max Planck propôs o comportamento dual (onda-partícula). Segundo Caio Sérgio Calçada e José Luiz Sampaio (Física Volume Único, 2008), alguns materiais, mas em especial os metais, liberam elétrons ao serem expostos a luz. A explicação de Einstein era a de que cada elétron é capaz de absorver um fóton (partícula de luz) por vez. Se a energia contida neste fóton for suficiente para arrancá-lo do átomo, o elétron desprende-se, e o excedente é convertido em energia cinética.

Conforme a Figura 05, o efeito fotovoltaico consiste na transformação da energia proveniente do sol em eletricidade, sendo esta conversão conseguida por meio de células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são capazes de gerar eletricidade DC utilizando radiação solar como fonte. A assimetria da construção das placas permite a formação de corrente elétrica em um circuito. “A energia extra dos elétrons excitados gera uma diferença de potencial, ou força eletromotriz (f.e.m.). Esta força impulsiona os elétrons por meio de uma carga em um circuito externo para realizar um trabalho elétrico.” (NELSON, 2003).



Fonte: CRESEB, 1999

Este efeito fotovoltaico é o princípio de células fotovoltaicas e é, portanto, essencial para a produção de eletricidade solar.

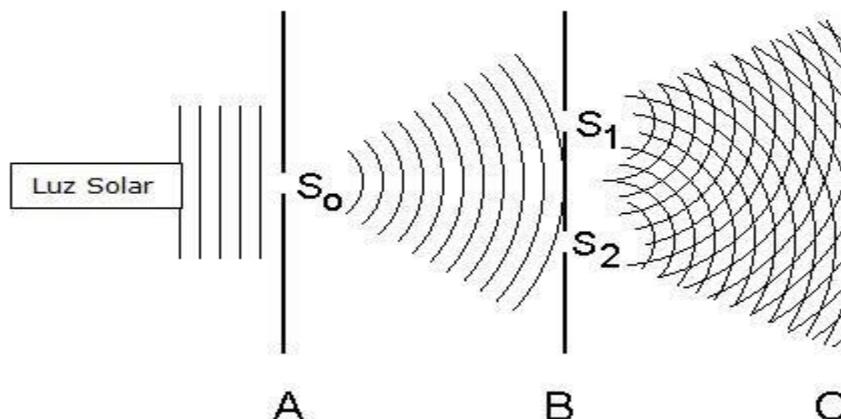
3.5. O QUE É FÓTON?

Após muitos estudos dos cientistas hoje sabe-se que a luz pode ser interpretada como partícula ou como onda, dependendo do fenômeno visível que estamos querendo explicar.

É por isso que é chamada de dualidade onda-partícula: uma hora pode ser vista como onda que explica muitas coisas como a frequência das ondas de rádio, por exemplo; noutra hora pode ser vista como partícula, com fótons que carregam uma certa quantidade de energia e que é entregue ao elétron no caso do efeito fotoelétrico.

Estudos foram feitos para descobrir do que a luz era composta. Experiências como a do físico britânico Thomas Young em 1801, permitiram ao cientista afirmar e provar que a luz era composta por uma onda eletromagnética, tal conclusão foi basicamente fundamentada na experiência onde a luz passava por uma fenda fina e apresentava ondas eletromagnéticas com uma determinada frequência. Tais fenômenos são características de um comportamento ondulatório, representado na Figura 06.

Figura 06 - Efeito do experimento de fenda dupla



Fonte: Infoescola (<https://www.infoescola.com/fisica/foton/> - Acesso em 15/04/2019)

Finalmente, no início do século XX, Louis-Victor de Broglie comprovou a dualidade onda partícula da luz, explicando satisfatoriamente o efeito, dando o nome a partícula luminosa de fóton. Mas foi Albert Einstein, que explicou o efeito fotoelétrico que o rendeu um prêmio Nobel pelo feito. A explicação de Einstein era de cada elétron é capaz de absorver uma partícula da luz por vez em que a energia contida nesta partícula for suficiente para arrancá-lo do átomo, o elétron desprende-se, convertendo em energia cinética. (Carlos Alexandre Cavalheiro, 2015).

Anteriormente, Max Planck já havia realizado pesquisas a respeito também. Max Plank propôs como é o comportamento de uma partícula de luz. O fóton, como qualquer partícula, possui uma certa energia, e a relação entre energia e frequência é proporcional e está relacionada por uma constante chamada de constante de Plank (\hbar), em que esta constante é usada para indicar a energia e a frequência das radiações eletromagnéticas. Ela representa o quantum, que é a quantidade mínima de energia que pode ser absorvida ou emitida por osciladores ou partículas.

$$\text{Constante de Plank: } \hbar = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J. s}$$

Os Fótons são as partículas que compõe a luz e podem ser definidos como pequenos “pacotes” que transportam a energia contida nas radiações eletromagnéticas. Segundo Einstein, um fóton deve possuir uma quantidade fixa de energia, definida pela seguinte equação:

$$\text{Energia do fóton: } E = \hbar \times f$$

Nessa equação, E é a energia pertencente ao fóton, f é a frequência da radiação eletromagnética (Hz) e \hbar é a constante de Plank.

Um fóton surge quando ocorre a transição de um elétron de um átomo entre dois estados de energias diferentes. O elétron ao passar de uma camada mais interna para uma mais externa ao receber energia, ao retornar para o estado inicial, emite a energia correspondente na forma de um fóton (Carlos Alexandre Cavalheiro, 2015).

De acordo com a teoria da relatividade proposta por Einstein, a energia varia em função da massa, segundo a equação $E=m.c^2$.

3.6. FUNCIONAMENTO DA PLACA FOTOVOLTAICA EM EXPOSIÇÃO A LUZ

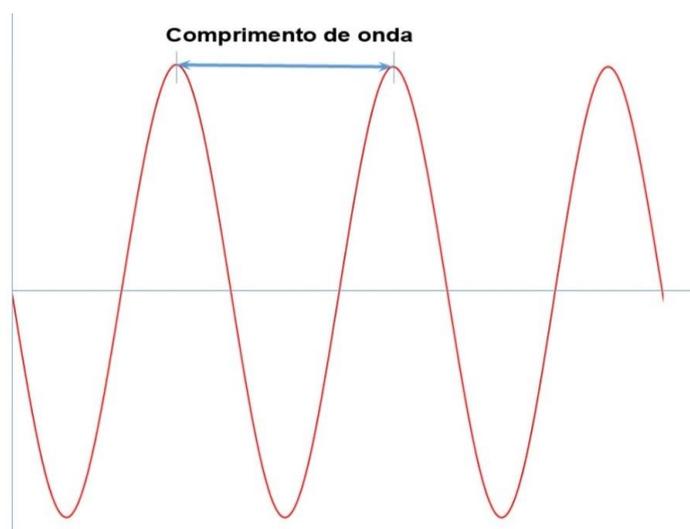
Painéis fotovoltaicos extraem energia apenas de fótons com energia suficiente para excitar elétrons. Como o Sol emite ondas com diversos comprimentos, alguns deles apenas aumentam a energia interna dos átomos da placa, o que reduz o *gap* de energia entre excitados e não-excitados. Por sua vez, isto dificulta a extração dos excitados, o que explica porque o aquecimento reduz a eficiência dos painéis (LUQUE, 2011).

Por fim deve ocorrer uma canalização dos elétrons excitados. Segundo LUQUE (2011) isso é feito com um par de contatos seletores. A diferença de potencial eletroquímico promove a força eletromotriz (tensão) que faz a corrente fluir pelo circuito externo ligado à placa.

3.7. COMPRIMENTOS DE ONDA

O comprimento de onda é o período que ocorre entre dois picos consecutivos de uma onda, sendo que, quanto maior o comprimento da onda, menor será a frequência e conseqüentemente quanto menor o comprimento de onda, maior será a energia da radiação, conforme a Figura 07.

Figura 07 - Comprimento de onda

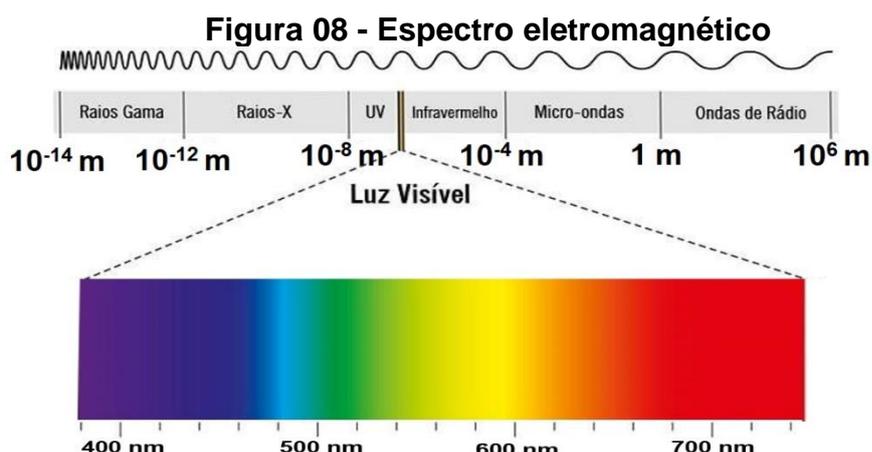


Fonte: Mundo Educação (Adaptado)

<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/luz-solar-radiacao-ultravioleta.htm> - Acesso em 15/07/2020

Tais ondas são radiações eletromagnéticas que ficam na região visível, onde os valores de comprimento de onda (λ) ficam entre 400nm e 700nm. Esses pontos nos ajudam a ver que a luz solar possui diversos tipos de radiação, não só as visíveis, mas também radiações que não conseguimos enxergar, que são os raios infravermelho (IV) e os raios ultravioleta (UV).

O espectro eletromagnético abaixo conforme Figura 08, é uma escala de radiações eletromagnéticas, e pode-se ver que essas duas radiações aparecem nos limites do espectro de luz visível, sendo que a radiação infravermelha possui comprimento de onda acima de 700nm e a ultravioleta abaixo de 400nm.



Fonte: Toda Matéria (adaptado) <https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/> - acesso em 25/092018

O infravermelho coincide com a faixa de energia necessária para movimentar os átomos uns em relação a outros de uma substância sem provocar uma reação. Já a radiação ultravioleta é a radiação mais energética da luz solar, possuindo grande poder de penetração na pele. Ela é capaz de promover reações químicas que envolvem transições eletrônicas.

Tabela 02 - Frequência e Comprimento das Ondas Eletromagnéticas

	Comprimento Onda (Angstroms)	Comprimento Onda (centímetros)	Frequência (Hz)	Energia (eV)
Rádio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Micro-ondas	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infra-vermelho	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visível	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioleta	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raios-X	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Raios Gama	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Fonte: Toda Matéria (<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/> - Acesso em 25/09/2018)

Angstrom é a unidade de comprimento, de símbolo Å usada normalmente para exprimir o comprimento de onda das radiações luminosas ou das partículas subatômicas. Um Angstrom equivale a um centésimo milionésimo de um centímetro, ou seja, 0,00000001 centímetros. Este número tão pequeno também pode ser escrito como 1×10^{-8} centímetros na notação científica ou 1×10^{-10} m com base no SI.

3.8 GRANDEZAS E UNIDADES DE FOTOMETRIA

3.8.1 INTENSIDADE LUMINOSA

Em fotometria, intensidade luminosa é a medida da percepção da potência emitida por uma fonte luminosa em uma dada direção.

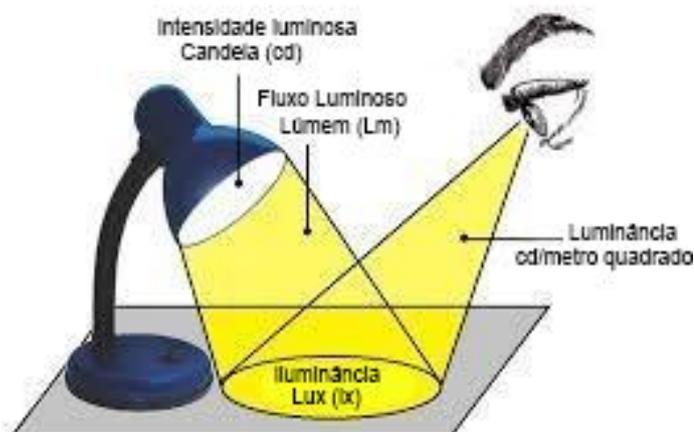
A unidade para medida de Intensidade luminosa é a candela, abreviada como cd. Esse nome é histórico e tem sua origem no método inicial de definição da unidade, utilizando-se uma vela de cera de tamanho e composição padrão para comparação

com outras fontes luminosas. É importante ressaltar que candela é uma unidade de base do SI.

3.8.2 LUMINÂNCIA

Luminância é uma medida da densidade da intensidade de uma luz refletida numa direção, cuja unidade SI é a candela por metro quadrado (cd/m^2). Descreve a quantidade de luz que atravessa ou é emitida de uma superfície em questão, e decai segundo um ângulo sólido, conforme está representado na Figura 09.

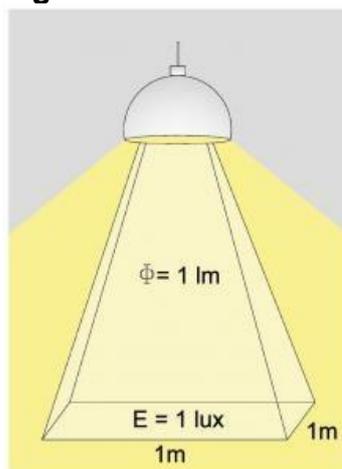
Figura 09 - Luminância



Fonte: Guia da Engenharia (<https://www.guiadaengenharia.com/luminotecnica/> - Acesso em 15/10/2019)

3.8.3 ILUMINÂNCIA

Iluminância é uma grandeza de luminosidade, que faz a relação entre a radiação total emitida em uma direção por uma fonte luminosa ou fonte de luz que pode produzir estímulo visual, que incide na direção perpendicular a uma superfície e a sua área, conforme está representado na Figura 10.

Figura 10 – Iluminância

Fonte: ENGPILHAS (<https://engplanilhas.com.br/nbr-5413/> - Acesso em 15/10/2019)

Na prática, é a quantidade de luz dentro de um ambiente. Da mesma forma que o fluxo luminoso, não é distribuído uniformemente, de maneira que ao ser medida, não terá o mesmo valor em todos os pontos da área em questão.

3.8.4 LUX

Lux (símbolo lx) no Sistema Internacional de Unidades é a unidade de medida de iluminamento, ou seja Lux é unidade de luminosidade correspondente à incidência perpendicular de 1 lúmen em uma superfície de 1 metro quadrado. Em que essa densidade pode ser medida por um luxímetro.

3.8.5 RADIAÇÃO SOLAR

É a energia liberada pelo Sol, principalmente sob forma de ondas eletromagnéticas. Parte da radiação é vista em forma de luz, outra parte foge do espectro que conseguimos perceber visualmente, mas sentimos seus efeitos, são os raios infravermelhos (IV) e os ultravioletas (UV). A vida na Terra só é possível graças aos $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia fornecidos pelo Sol anualmente (QUANTUM, 2017).

Parte da radiação emitida pelo Sol é refletida (pelas nuvens, pelo gelo, pelos oceanos), perdida por difusão ou absorvida por moléculas de oxigênio e ozônio da atmosfera. No entanto, mais de 50% chega à superfície, e é essa fração de radiação que chega à superfície que nos interessa (QUANTUM, 2017).

3.8.6 IRRADIAÇÃO SOLAR

É a quantidade de radiação solar em determinado intervalo de tempo. Geralmente, é medida em watt por hora por metro quadrado (Wh/m^2) (QUANTUM, 2017).

3.9 SÍLÍCIO NAS PLACAS FOTOVOLTAICAS

Quase 80% dos painéis fotovoltaicos no mundo, são baseados em alguma variação de silício. Em 2018, cerca de 85% de todos os sistemas de energia solar fotovoltaica instalados em casas e empresas no mundo, utilizaram alguma tecnologia baseada em silício (Si) (Solarvolt, 2018).

3.9.1. PUREZA DO SILÍCIO

A eficiência dos painéis solares é relacionada diretamente com o estado de pureza que se encontra o silício, então quanto mais puro o silício estiver, maior eficiência o painel terá. O nível de pureza se dá por meio do alinhamento das moléculas de silício, ou seja, quanto melhor alinhadas as moléculas de silício estiverem, maior eficiência o painel terá. Porém seu tratamento é caro e afeta diretamente no preço final do painel. Dos painéis solares convencionais e atuais que utilizam da tecnologia de silício cristalino, 55% a 60% do custo de um painel solar convencional de tecnologia de silício cristalino, é referente ao silício bruto purificado e tratado (Portal Solar, 2018).

3.9.2. EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR

Outro fator a ser levado em consideração é a eficiência da célula, que é a razão entre a quantidade de energia que a célula recebe e a quantidade convertida em eletricidade. A eficiência da célula é medida em porcentagem (%) e quanto maior ela for, mais watts por metro quadrado vai produzir. As células fotovoltaicas comerciais costumam ter sua eficiência variando entre 6% e 21%, sendo a média do mercado de 14%. Ou seja, um painel solar com eficiência de 16.5% converte 16.5% da energia que incide sobre o painel, por m^2 , em energia elétrica (Gabriel Guimarães, 2015).

No entanto, em dezembro do ano de 2014 pesquisadores da University of New South Wales, na Austrália, anunciaram o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico com a capacidade para converter mais de 40% de toda a luz solar incidente em energia elétrica, o mais eficiente do seu gênero alcançado. Isso foi resultado da combinação de uma série de tecnologias usadas comercialmente, mas de maneira inovadora (Gabriel Guimarães, 2015).

Essa taxa de conversão foi possível pois esse novo sistema consegue rejeitar determinados componentes do espectro solar e melhorar a captura de outros. O melhor de tudo é que essa nova abordagem, teoricamente, é menos complexa que outras utilizadas em avanços divulgados recentemente, geralmente reproduzidas apenas em laboratório ou dependentes de tecnologias bastante caras. Ela foi alcançada em testes ao ar livre e, depois, confirmada em laboratório. Ou seja, esse é um caminho certo para tornar a utilização de energia solar mais barata e acessível, aumentando sua competitividade.

Ao utilizar um conjunto fixo de condições, todos os painéis solares podem ser comparados e avaliados contra o outro de forma mais precisa. As condições normais para o teste são:

- Temperatura da Célula = 25°C - A temperatura da célula solar em si, não a temperatura do ambiente. (O painel solar todo durante o teste deve estar em 25°C)
- Irradiação solar = 1000 Watts/m². Este número refere-se à quantidade de energia que incide sobre uma determinada área em um determinado momento. (Essa quantidade de energia de 1000W/m² é uma média da quantidade de luz solar que incide na superfície terrestre)

3.9.3. SOBRE A EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR MONOCRISTALINO OU POLICRISTALINO:

- Quanto mais eficiente é o painel solar melhor é a célula que foi usada para construir ele;

- Quanto mais eficiente é um painel solar mais energia solar ele gera por metro quadrado (Wh/m^2);
- Painéis Solares mais eficientes tendem a ser mais caros.

3.10. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

3.10.1. CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

As células de silício monocristalino, representada na Figura 11, são historicamente as mais usadas e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade, e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído.

Figura 11 - Células de Silício Monocristalino



Fonte: Minha casa solar (<https://www.minhacasasolar.com.br/saiba-mais-painel-solar-fotovoltaico> - Acesso em 10/08/2018)

A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício, que é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza entre 98 e 99%, o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custoso. Porém, para este silício conseguir funcionar como células fotovoltaicas, necessita ainda de outros itens semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999% (CRESESB, 2008).

O processo mais utilizado para se chegar as qualificações desejadas é chamado "processo Czochralski", onde o silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro. Com um fragmento do cristal

devidamente orientada e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300mm de diâmetro (CRESESB, 2015).

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas de fósforo, de forma a obter a junção. Este processo é feito por meio da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800°C a 1000°C (CRESESB, 2015).

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios. Os dados foram fornecidos pelo Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sergio S. Brito (CRESESB, 2015).

3.10.1.1. VANTAGENS DAS CÉLULAS MONOCRISTALINAS DE SILÍCIO

- Alta eficiência;
- Ocupa menos espaço físico em relação aos outros tipos de células;
- Gera mais energia elétrica;

3.10.1.2. DESVANTAGENS DAS CÉLULAS MONOCRISTALINAS DE SILÍCIO

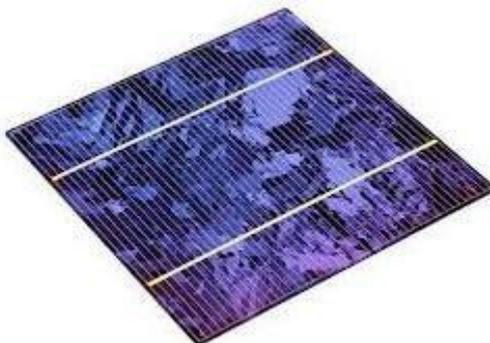
- O preço de fábrica é bem maior, encarecendo o produto final;
- O processo para a produção é uma desvantagem pois no corte, uma parte das células é desperdiçadas, forçando sua reciclagem;

3.10.2. CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO

Ambos, mono e policristalino são feitos de silício, a principal diferença entre as tecnologias é o método utilizado na fundição dos cristais. Nas policristalinas representada na Figura 12, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma preservando a formação de múltiplos cristais. A fundição dos cristais determina a sua

eficiência, quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais.

Figura 12 - Célula de silício policristalinas



Fonte: Strombrasil (<http://www.strombrasil.com.br/celulas-fotovoltaicas/> - Acesso em 10/08/2018)

A célula de silício policristalino é composta de uma lâmina de silício purificado dopada, ao mesmo tempo, com boro e fósforo. A parte dopada com fósforo, se tornando tipo N, fica exposta ao sol, enquanto a parte dopada com boro, tornando-se tipo P, fica na parte inferior da célula. As células de silício policristalino podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas (SOUZA, 2017).

Se colocadas as células em contato frontal - traseiro, tendo os contatos frontais sobre a parte tipo N, causam sombra e reflexão, diminuindo a eficiência da célula. Seria teoricamente possível diminuir as perdas por reflexão, diminuindo a quantidade de contatos frontais, mas quanto menos condutores para captar os elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico, mais elétrons serão recombinados nos átomos de silício, após perderem a energia adquirida que é transformada em calor, fazendo com que a célula seja ainda mais ineficiente (SOUZA, 2017).

Apesar do processo de pureza do silício e o processo da produção das células de silício policristalino e das células de silício monocristalino serem próximos, as células de silício policristalino são mais baratas se comparadas às de silício monocristalino, por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso.

No entanto, sua eficiência energética tem uma leve queda se comparada à eficiência energética das células de silício monocristalino, tendo alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais (atrás dos 15% de eficiência energética das células de silício monocristalino), segundo o Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sergio S. Brito (CRESESB, 2015).

3.10.2.1. VANTAGENS DAS CÉLULAS POLICRISTALINAS DE SILÍCIO

- Sua durabilidade seguindo mais de 30 anos;
- O custo de produção é mais barato em relação aos outros tipos de células;
- Quantidade de silício residual é menor;

3.10.2.2. DESVANTAGENS DAS CÉLULAS POLICRISTALINAS DE SILÍCIO

- Eficiência, a pureza do polisilício nas células é menor;
- A área de colocação dos painéis também tende a ser maior, aumentando o seu custo;

3.10.3. CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO

Uma célula de silício amorfo representada na Figura 13, difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células monocristalinas e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil (CRESESB, 2015).

Figura 13 - Célula de Silício amorfo



Fonte: Portal Solar (<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html> - Acesso em 10/08/2018)

3.10.3.1. VANTAGENS DAS CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO

- Sua fabricação em alta escala, tornando sua fabricação mais barata
- Placas flexíveis, contribuem para aplicação;
- São mais bonitas e são menos afetadas pelas baixas temperaturas;

3.10.3.2. DESVANTAGENS DAS CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO

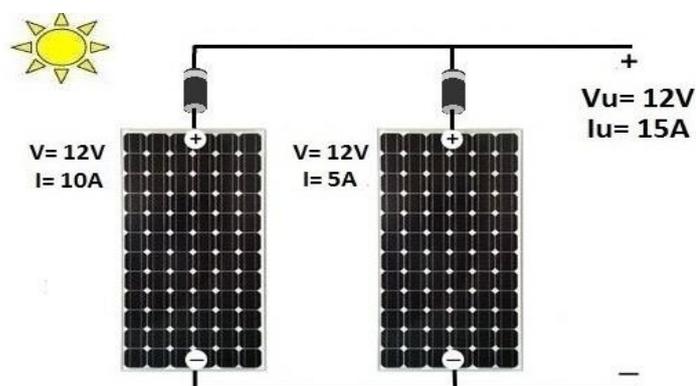
- Menor eficiência por m²;
- A degradação é bem maior do que em outras placas, refletindo então em seu tempo de vida útil;
- O espaço utilizado tende a ser maior na sua instalação;

3.11. LIGAÇÃO SÉRIE E PARALELA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A conexão em paralelo realiza-se conectando todos os polos positivos dos painéis da instalação solar e, depois, pela conexão de todos os polos negativos. Deste modo, mantém-se a tensão final dos painéis solares, enquanto a sua possibilidade de fornecimento de corrente é somada em (Ampères), representado na Figura 14.

- Por exemplo, caso sejam conectados em paralelo 3 painéis solares de 120W 10A de 12V cada, obtêm-se 360W a 30A a uma tensão de 12 volts.

Figura 14 - Painéis Solares Série-Paralelo

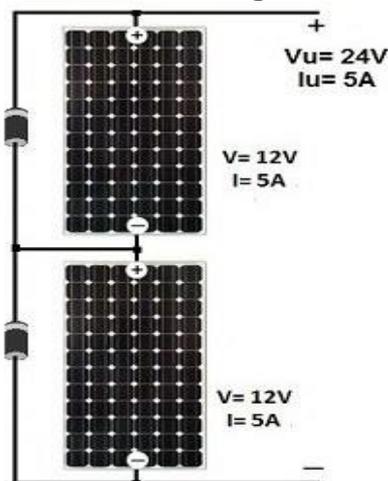


Fonte: Mpptsolar (<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>) - Acesso em 08/09/2019

Por meio da conexão em série, conectam-se diretamente os painéis solares entre si, ligando o polo positivo de um painel com o polo negativo do painel seguinte. Ao contrário da conexão em paralelo, nesta conexão mantém-se a possibilidade de corrente a ser drenada e soma-se a tensão de cada painel.

- Por exemplo, como mostra a Figura 15, caso sejam conectados em série 2 painéis de 60W 5A e V_{mp} de 12V (tensão em ponto de máxima potência) cada, obtêm-se 60W 24V e 5A (Corrente máxima)

Figura 15 - Dois Painéis iguais em série

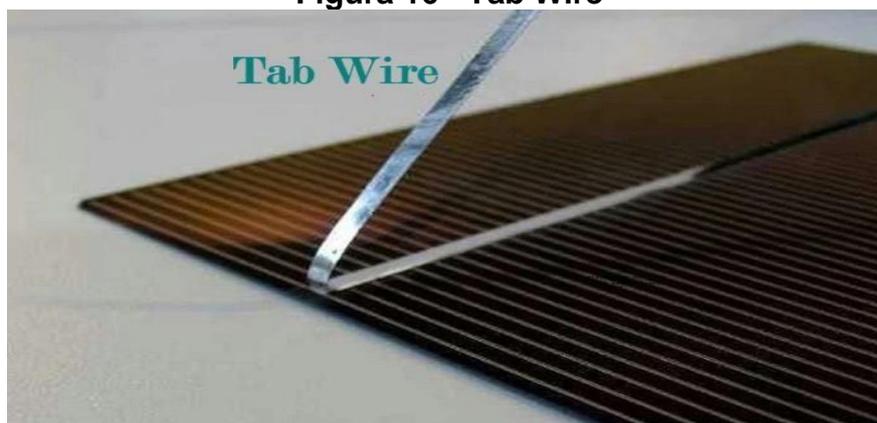


Fonte: Mpptsolar (<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>) - Acesso em 08/09/2019

3.12. FIO DE LIGAÇÃO E FIO DE BARRAMENTO (TAB WIRE E BUS WIRE)

As junções solares individuais produzem baixa tensão. Para obter tensões adequadas, as células precisam ser conectadas em série, formando filas. Em seguida, as extremidades dessas linhas são conectadas em paralelo para obter a capacidade de corrente desejada. O fio da guia é usado para conectar células individuais em série, conforme Figura 16.

Figura 16 - Tab Wire



Fonte: Ani.solar (<https://ani.solar/shop/50-feet-0-12-1-6mm-tab-wire-for-diy-solar-panel-solar-6117-ella/> - Acesso em 11/08/2018)

O fio do barramento é usado para conectar essas linhas em paralelo. Também é, como o fio de ligação, feito de uma seção transversal plana. Uma vez que precisa transportar uma soma das correntes da linha, precisa ter uma espessura e largura maiores para permitir menos resistência por unidade de comprimento do que o fio de ligação. Como o fio de ligação, ele também é feito de fio de cobre redondo por um processo de laminação e é revestido com uma camada de solda para permitir uma solda fácil. A espessura normalmente disponível é de cerca de 0,15 mm a cerca de 0,35 mm. Está disponível em larguras de cerca de 4 mm a cerca de 6 mm.

De fato, os cabos de tabulação e de barramento dos painéis solares são genericamente os mesmos. Somente o fio do barramento deve transportar a corrente do barramento muitas vezes maior que a corrente da linha. Portanto, o fio do barramento deve ser mais grosso e largo. Ambos são vendidos em rolos de vários tamanhos.

3.13. TERMOPAR

Um termopar é um sensor utilizado para a medição da temperatura. Ele é constituído de dois metais distintos, unidos por suas extremidades e ligados a um termômetro termopar ou outro dispositivo com capacidade termopar, na outra extremidade. Quando configurado corretamente, termopares podem fornecer medições de temperatura em uma ampla faixa de temperatura. Um termopar é também conhecido por sua versatilidade como sensor de temperatura, portanto, normalmente são utilizados em uma ampla gama de aplicações - desde um termopar de uso industrial à um termopar regularmente encontrado em utilitários e aparelhos regulares. Devido à sua vasta gama de modelos e especificações técnicas, é extremamente importante entender a sua estrutura básica, como um termopar funciona, suas escalas para melhor determinar qual é o tipo certo e material do termopar para sua aplicação. (Omega, 2015)

3.13.1. COMO FUNCIONA O TERMOPAR

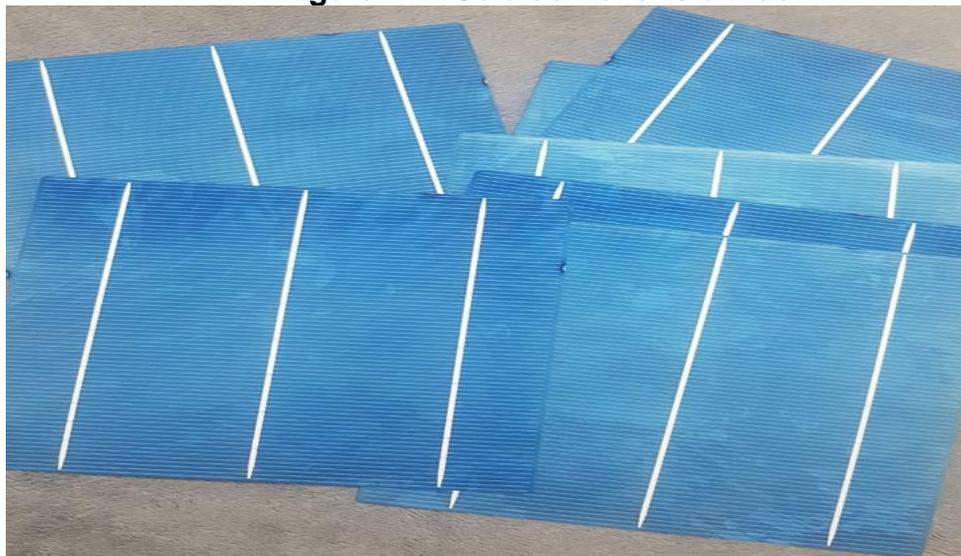
Quando dois fios compostos por metais diferentes são unidos em ambas as extremidades e uma das extremidades é aquecida, há uma corrente contínua que flui no circuito termoelétrico. Se este circuito é interrompido no centro, a tensão de circuito aberto líquido (a tensão Seebeck) é uma função da temperatura de junção e da composição dos dois metais (Omega, 2015).

4. METODOLOGIA E MATERIAIS

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS PARA FAZER OS TESTES

Como parte do trabalho prático, serão utilizados os seguintes materiais e instrumentos de medição para realizar os testes:

- 6 Células Policristalinas, representado na Figura 17. Feita com silício e utilizado cristais do tipo boro e fósforo na sua fundição. Utilizou-se esse tipo de células para compor um painel fotovoltaico.

Figura 17 - Células Policristalinas

Fonte: Autor

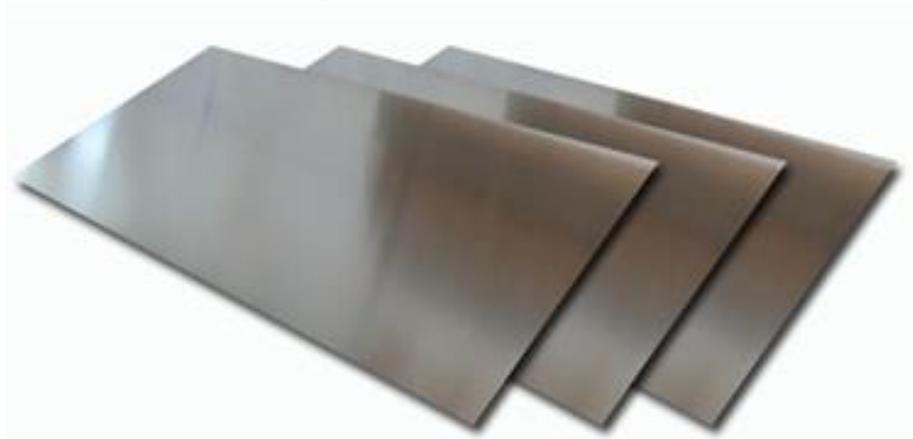
- Caneta de fluxo, representado na Figura 18. Fluxo de Solda é um produto utilizado para preparar a área onde será efetuada a solda, geralmente é usado em placas de circuito impresso visando remover quimicamente as oxidações nos terminais existentes na superfície;

Figura 18 - Caneta de fluxo

Fonte: Autor

- Uma placa de alumínio, conforme a Figura 19. Utilizou-se uma placa fina de alumínio como base para as células fotovoltaicas e de fácil transferência de calor com dimensões de 51cm x 36cm.

Figura 19 - Placa de Alumínio



Fonte: Casa do Refratário
(<http://casadorefratario.com.br/produto/aluminio-chapa/> - Acesso em 17/10/2019)

- Dissipadores, conforme Figura 20, são componentes feitos em alumínio que tem a função de aumentar a área de uma superfície para facilitar que o calor escape com mais facilidade.

Figura 20 - Dissipadores



Fonte: Autor

- Lâmpadas halógenas conforme Figura 21, utilizou-se no total 12 lâmpadas halógenas bulbo dimerizável de 100W de potência consumida cada, alimentadas em tensão alternada de 110V, emitindo luz amarelada para a superfície do painel simulando a luz do sol.

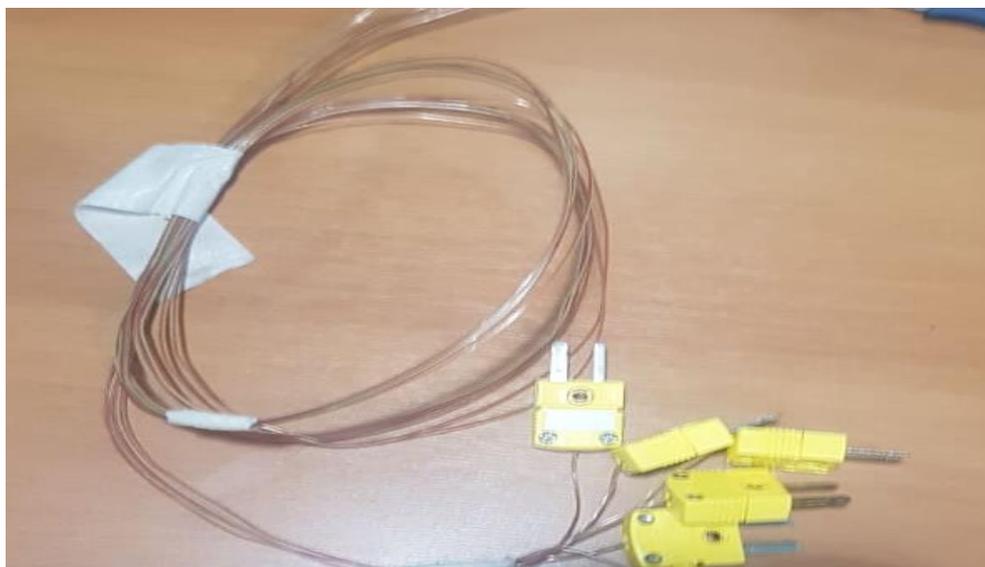
Figura 21 - Lâmpadas halógenas



Fonte: Autor

- Termopares, conforme Figura 22, utilizou-se termopares do tipo K, em que ao interligar os polos negativo e positivo é possível ler a temperatura por meio do multímetro.

Figura 22 - Termopares tipo K



Fonte: Autor

- Multímetro, conforme Figura 23, equipamento eletrônico de medição de corrente, tensão e resistência. Utilizou-se um multímetro com leitura de termopar do tipo K, e outro multímetro simples para leitura de tensão e corrente.

Figura 23 - Multímetros



Fonte: Autor

- Luxímetro, conforme Figura 24, equipamento de teste para medição de luminosidade.

Figura 24 - Luxímetro



Fonte: Autor

- Chave seletora, conforme Figura 25, componente usado na eletrônica para controlar manualmente o fluxo de corrente elétrica por meio de uma alavanca.

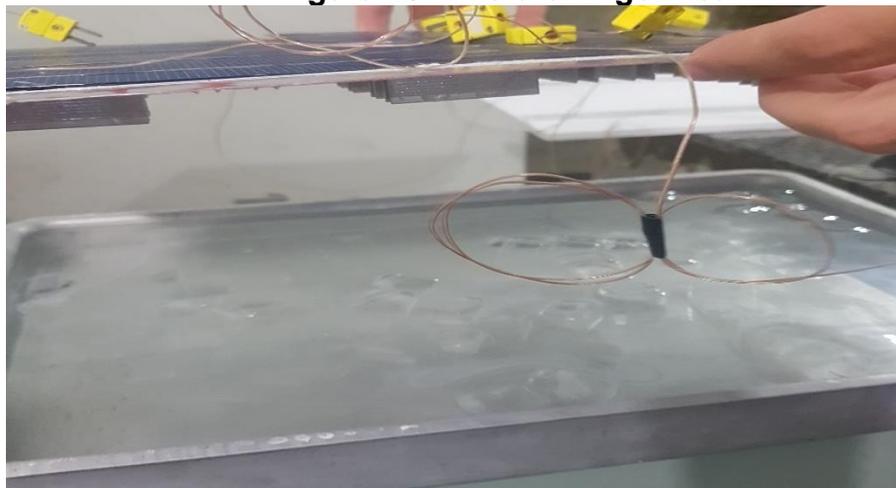
Figura 25 - Chave Seletora



Fonte: Autor

- Mistura Refrigerante, conforme a Figura 26, foi o sistema utilizado para o arrefecimento das células. Um líquido que contém uma mistura de água, gelo e sal grosso, podendo atingir temperaturas muito baixas.

Figura 26 - Mistura Refrigerante



Fonte: Autor

4.2. PROCEDIMENTO DE MONTAGEM

Para montar-se o painel solar, será utilizada uma ligação série entre as células fotovoltaicas em que a conexão das células é feita entre si, ligando o polo positivo de um painel com o polo negativo do painel seguinte. O procedimento de montagem vai ser feita da seguinte forma:

- **Placa de base:** A placa fina feita de um material com uma certa facilidade de transferência de calor, no caso o alumínio conforme a Figura 27.
- **Observação:** Foi preciso colocar na placa de base fita isolante para isolar a parte condutora inferior da célula fotovoltaica, para evitar de entrar em curto com placa de base que é alumínio.

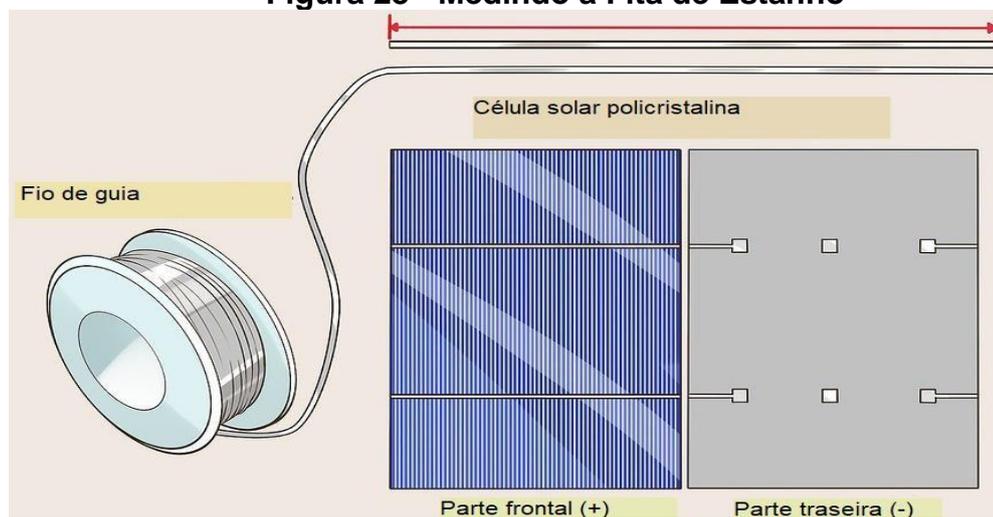
Figura 27 - Placa Base



Fonte: Autor

- **Medir a fita de estanho:** As células policristalinas têm um grande número de linhas pequenas passando por uma direção, e duas linhas mais largas passando pela vertical da célula. Foi necessário conectar o fio de estanho de modo que ele passe pelas duas linhas mais largas e ligue-as à parte de trás da próxima célula. E medir o comprimento dessa linha mais larga, dobrar na medida e cortar dois pedaços para cada célula, conforme a Figura 28.

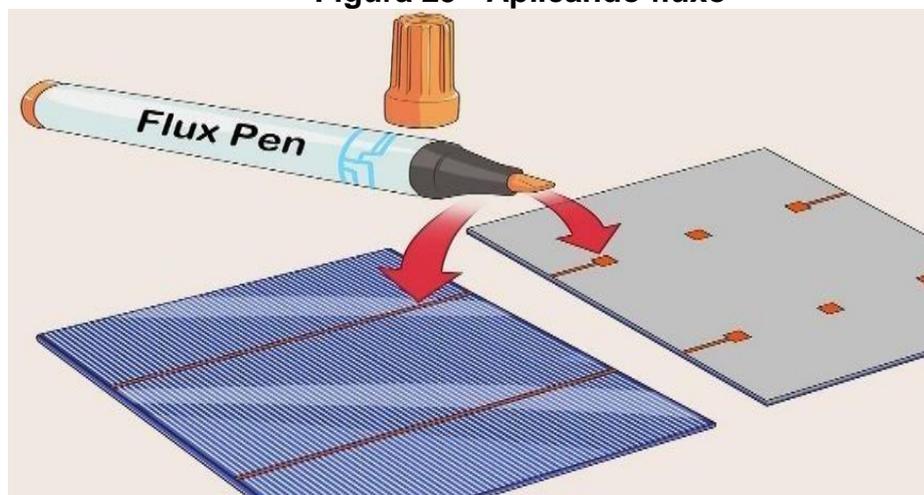
Figura 28 - Medindo a Fita de Estanho



Fonte: WikiHow (<http://casadorefratario.com.br/produto/aluminio-chapa/> - Acesso em 01/11/2019)

- **Aplicando fluxo na área de trabalho:** Usando uma caneta de fluxo, aplicou-se o fluxo pelas tiras de cada tira da célula, ou grupo de três quadrados, conforme a Figura 29. Foi feito isso no verso das células para evitar que o calor da solda cause oxidação.

Figura 29 - Aplicando fluxo

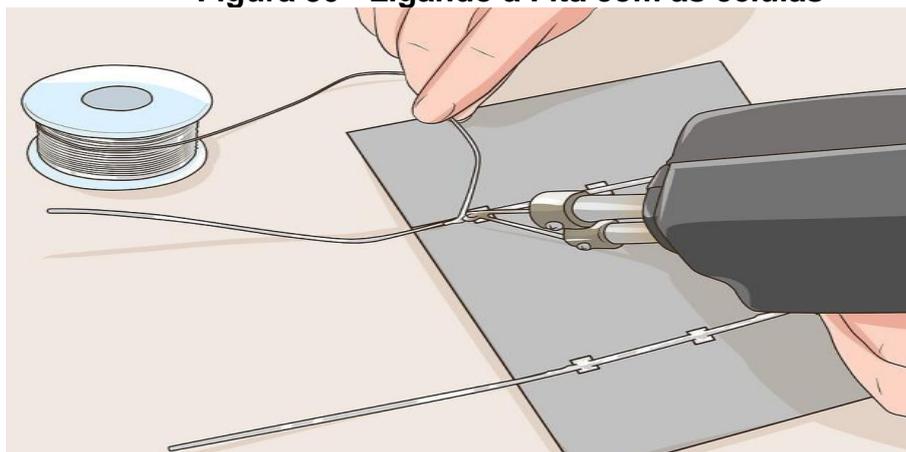


Fonte: WikiHow (<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019)

O principal objetivo do emprego de um fluxo é o de facilitar o processo de soldagem. Um dos obstáculos a uma solda perfeita pode ser uma simples impureza no local da junta, como por exemplo, sujeira, óleo ou oxidação. Estas impurezas, podem ser removidas por lavagem mecânica ou por meios químicos, mas as elevadas temperaturas necessárias para fundir o metal de enchimento (solda), estimula a peça em trabalho bem como seu enchimento a oxidar-se novamente. Este efeito é acelerado conforme as temperaturas de soldagem vão aumentando, podendo até impedir completamente a solda de aderir à peça de trabalho.

- **Soldando a fita de guia com as células:** Soldou-se a primeira metade de um pedaço de fita de estanho usando o ferro de solda. Em seguida, prendeu-se a ponta da fita a uma célula. Repetimos o processo para cada célula, conforme a Figura 30.

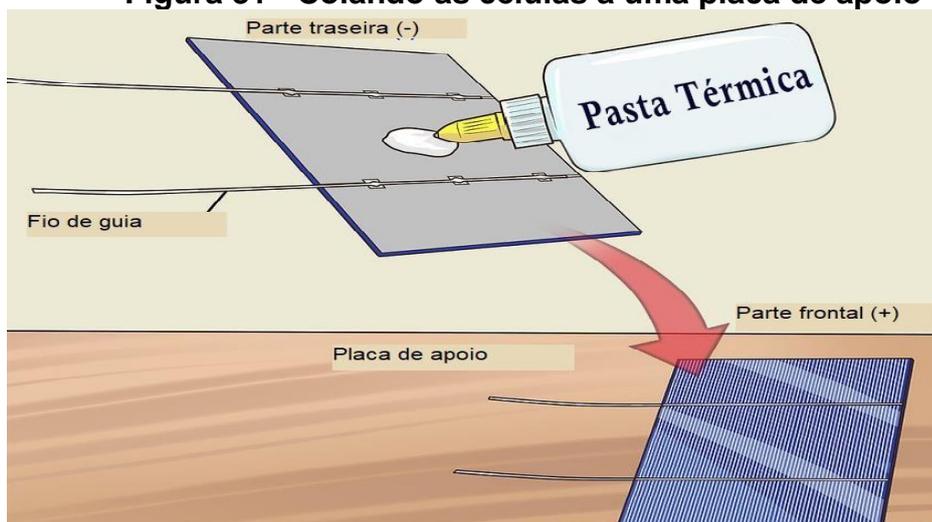
Figura 30 - Ligando a Fita com as células



Fonte: WikiHow (<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019)

- **Aplicando pasta térmica nas células à uma placa de apoio:** Aplicou-se pasta térmica na parte traseira das células, apertando-as contra a placa para fixá-las melhor e manter a temperatura das células baixa. As pontas da fita devem aparecer entre as células e ficar soltas, com apenas as duas peças aparecendo entre cada célula, representado na Figura 31.

Figura 31 - Colando as células a uma placa de apoio

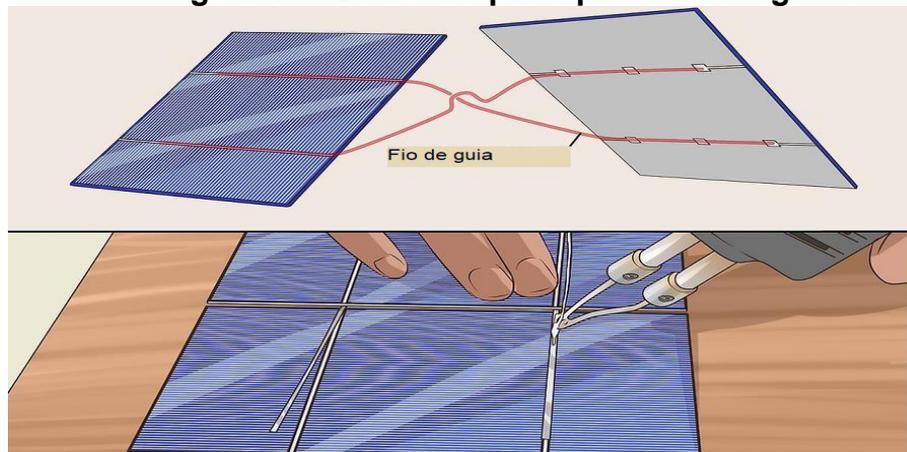


Fonte: WikiHow (Adaptado) <https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019

- **Soldando parte positiva com a negativa da célula:** Aplicou-se o fluxo ao longo das duas linhas grossas de cada célula. Em seguida, pegou-se as pontas soltas da fita de estanho e soldou-se em todo o comprimento das linhas, conforme Figura 32.

- A fita conectada à parte inferior de uma célula é ligada à frente da próxima em todos os casos.

Figura 32 - Soldando parte positiva e negativa



Fonte: WikiHow (<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019)

- **Ligando o Bus Wire (fio de barramento):** No começo da primeira fileira, soldou-se a fita de estanho mais grossa na frente da primeira célula. A fita deve ter cerca de 2,5 cm a mais do que o necessário para cobrir as linhas e se estender na direção do espaço extra na placa. Solde as duas fitas juntas com um pedaço que meça o mesmo que a distância entre as linhas grossas da célula, representado na Figura 33.

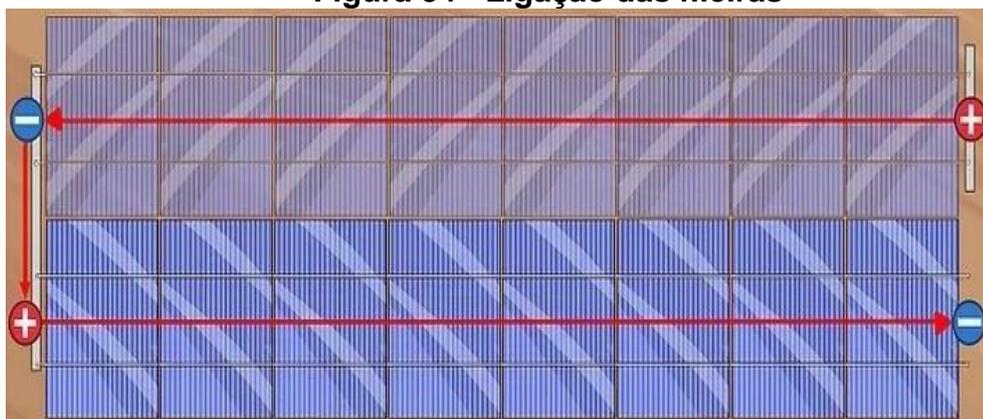
Figura 33 - Ligando o Bus Wire



Fonte: WikiHow (<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019)

- **Conectando a segunda fileira:** Ligou-se o final da primeira fileira ao começo da segunda usando um longo pedaço de fita de estanho grossa (fio de barramento) que se estende ao longo do comprimento das duas fileiras. Foi preciso preparar a primeira célula da segunda fileira com fita de estanho fina a mais, assim como foi feito com a primeira fileira formando a entrada positiva do painel solar e a saída negativa do painel solar, conforme Figura 34.

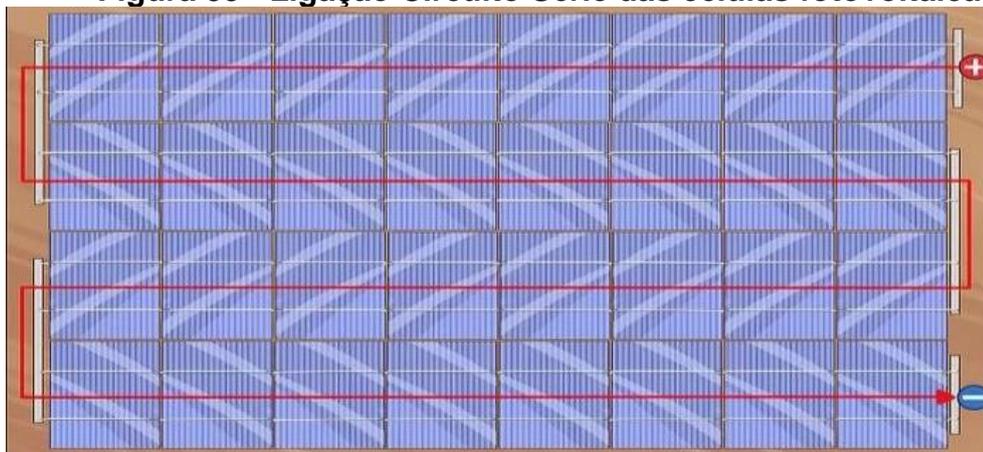
Figura 34 - Ligação das fileiras



Fonte: WikiHow (<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019)

- **Continuar ligando o resto das fileiras:** Continuou-se ligando as fileiras em ligação série com os pedaços longos de fita de estanho até chegar ao final, onde conectou-se com um pedaço curto de fita outra vez. Utilizando-se quantas fileiras forem necessárias para cada projeto, conforme Figura 35.

Figura 35 - Ligação Circuito Série das células fotovoltaicas



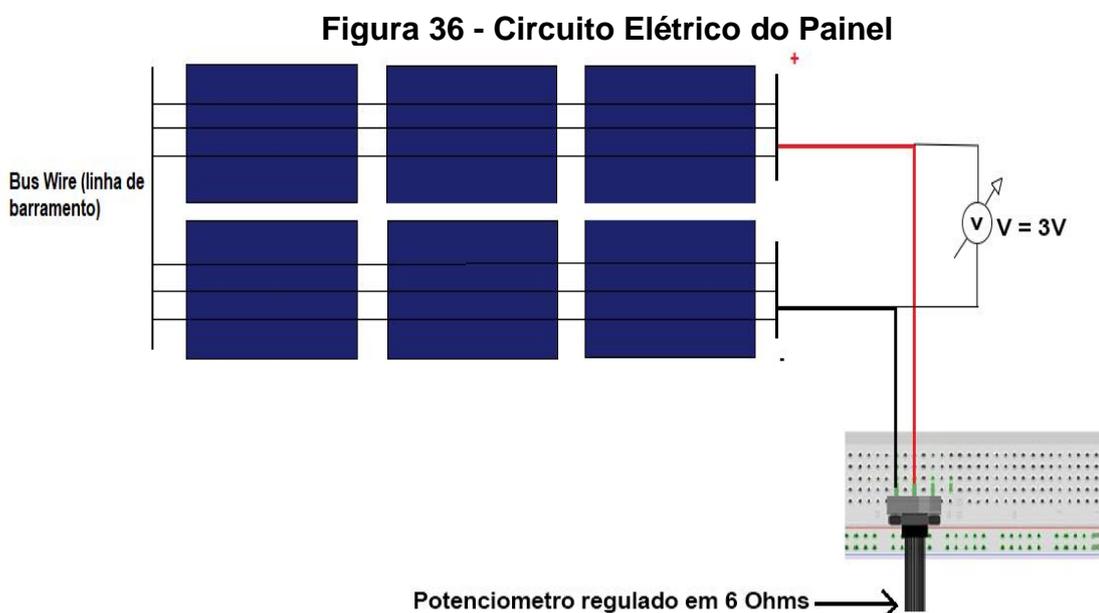
Fonte: WikiHow (<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar> acesso em 01/11/2019)

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consiste em obter e analisar o funcionamento das células fotovoltaicas expostas a uma irradiação de uma fonte de luminosidade. Com o objetivo de observar como a temperatura atingida por cada célula fotovoltaica pode interferir na geração de tensão do sistema, e posteriormente apresentar um sistema capaz de refrigerar e melhorar a eficiência de seu sistema.

5.1. CIRCUITO ELÉTRICO DO PAINEL

As células fotovoltaicas estão ligadas em uma associação série conforme Figura 36 visando somar a tensão de cada célula conforme visto no capítulo 6 do trabalho. De acordo com as especificações do fabricante, cada célula fotovoltaica tem capacidade de gerar 0,5 V de, gerando uma tensão total de 3 V no painel solar e entregando uma corrente de 5 A para uma carga de 6 Ohms.



Fonte: Autor

Em nossos testes observou-se que ao variar o potenciômetro a resistividade do material se opõe a passagem de corrente elétrica do painel solar, ocasionando-se em uma diminuição no valor de corrente elétrica.

Quando a corrente elétrica estabilizou em 5 A, observou-se que foi o maior valor atingido quando paramos de variar o potenciômetro, com uma resistência de 6 Ohms,

portanto esse foi o menor valor de resistência atingido com um valor maior e estável de corrente.

5.2. TESTE DE BANCADA

Para fazer o teste de bancada foi necessário construir um sistema capaz de simular a luz do sol conforme Figura 37.

Figura 37 - Teste de bancada (Fonte de Luminosidade)



Fonte: Autor

O teste de bancada foi feito com uma fonte de luminosidade de base de madeira para sustentar 12 lâmpadas halógenas ligadas em paralelo com potência de consumo de 100 Watts cada e alimentadas com tensão alternada de 110V. O teste de bancada é importante para atingir resultados mais precisos, sendo que a luz solar pode causar interferências que podem prejudicar o resultado dos testes tais como, nuvens, situações climáticas, umidade do ar.

5.3. LUMINOSIDADE DAS LÂMPADAS HALOGÊNEA

Conforme visto no capítulo 3.8, a luminosidade se trata da quantidade luz correspondente em uma área com incidência de 1 lúmen em uma superfície de 1m^2 , ou seja seria a quantidade de luz medida na área sobre o painel fotovoltaico. Em que é possível medir essa quantidade de luz por meio de um luxímetro conforme Figura 38.

Figura 38 – Luxímetro

Fonte: Autor

As lâmpadas halógenas utilizadas nos testes de bancada não possuem as especificações estabelecidas pelo INMETRO, como o fluxo luminoso em lumens (lm), eficiência luminosa (lm/W), que é uma relação de quantos lumens tem a cada 1 Watt de consumo. Portanto foi preciso medir a quantidade de lux (lx) que tem a lâmpada halógena usada nos testes, e usando o luxímetro a melhor medição unitária (por lâmpada) foi de 4330 lux de acordo com a Figura 39.

- **Observação:** Na tela do luxímetro, conforme a Figura 39, mostra o valor total em lux em uma escala automática, de acordo com a intensidade recebida, a escala pode ser x10 ou x100. Com uma distância de 3cm da fonte de luminosidade. Na medição realizada foi de $433 \times 10 = 4330$ lux.

Figura 39 - Quantidade de lux em 1 lâmpada halógena

Fonte: Autor

Baseando-se nessa medição de 4330 lux, a fonte de luminosidade construída para os testes de bancada pode gerar na teoria $4330 \times 12 = 51.960$ lux, pois utilizou-se 12 lâmpadas halógenas. Mas na prática foi medido com o luxímetro luminosidade total com 12 lâmpadas ligadas e com a distância de 3cm da fonte de luminosidade. Chegou-se a um valor de 61.800 lux conforme Figura 40.

Figura 40 - Quantidade de lux da fonte de luminosidade

Fonte: Autor

5.4. ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA LUZ EM RELAÇÃO AO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DAS LÂMPADAS HALÓGENAS.

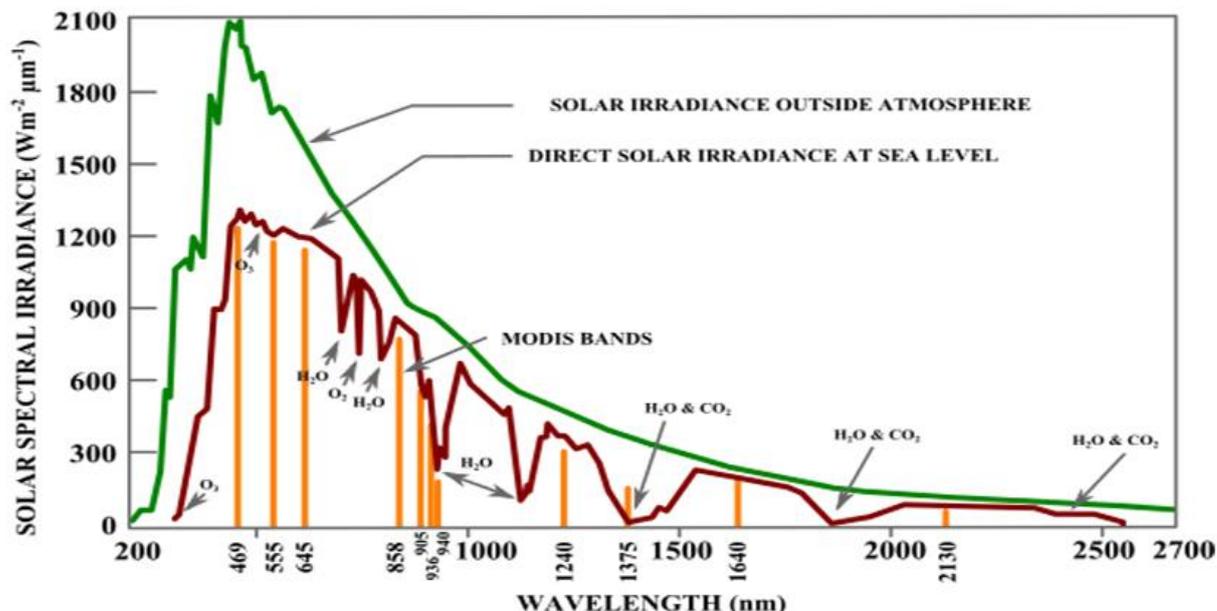
5.4.1. ESPECTRO DA LUZ SOLAR

Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. Cerca de metade desta energia é emitida como luz visível na parte de frequência mais alta do espectro eletromagnético e o restante na do infravermelho próximo e como radiação ultravioleta. A radiação solar fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia. (CRESESB, 2008)

Apesar disto, pode-se definir um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera. Dados recentes da WMO (World Meteorological Organization) indicam um valor médio de 1367 W/m^2 para a radiação extraterrestre. Fórmulas matemáticas permitem o cálculo, a partir da "Constante Solar", da radiação extraterrestre ao longo do ano, fazendo a correção pela órbita elíptica.

A radiação solar é radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s , podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares. Em termos de comprimentos de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 100 nm a 3000 nm , tendo uma máxima densidade espectral em torno dos 550 nm , comprimento de onda que corresponde sensivelmente à luz verde amarelada. A Figura 41 mostra o espectro da irradiância solar acima da atmosfera em verde, e em vermelho a irradiância solar na superfície terrestre a nível do mar.

Figura 41 - Espectro de radiação solar



Fonte: Wiki Wand (Adaptado)

(https://www.wikiwand.com/pt/Radia%C3%A7%C3%A3o_solar - Acesso em 20/10/2019)

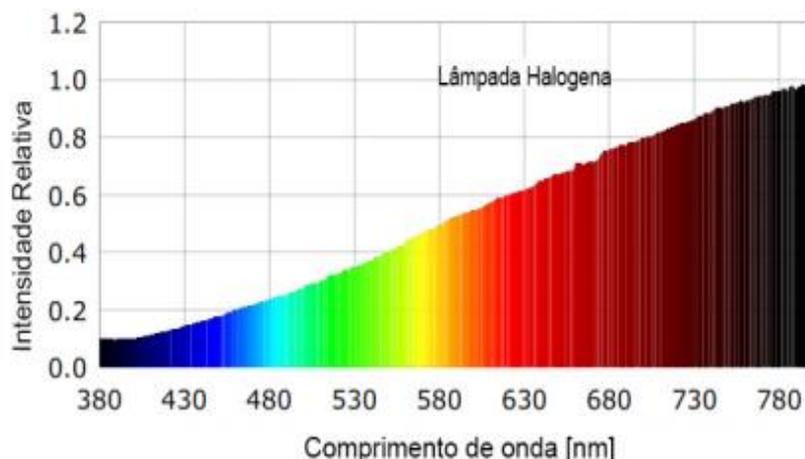
É por meio da teoria ondulatória, que são definidas para os diversos meios materiais, as propriedades na faixa solar de absorção e reflexão e, na faixa de 0,75 a 100 mm, correspondente ao infravermelho, as propriedades de absorção, reflexão e emissão.

5.4.2. ESPECTRO DA LÂMPADA HALÓGENA

Lâmpadas de halogênio ou lâmpadas halógena são lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio contido em um gás inerte e uma pequena quantidade de um halogênio como iodo ou bromo. Lâmpadas halógenas têm o IRC (Índice de Reprodução de Cor) de 100%, significa uma luz mais real, com a luz que obtém-se com o Sol.

Segundo Vicente Scopacasa (Revista O Setor Elétrico, 2018) a melhor qualidade de luz obtida em ensaios realizados é a da lâmpada halógenas. Um ponto importante a se destacar é que a qualidade de luz tem relação direta com a distribuição espectral de potência. Quanto mais contínua for a distribuição, melhor a qualidade de luz da fonte, conforme na Figura 42.

Figura 42 - Espectro lâmpada halógena



Fonte: O SetorElétrico (<https://www.oseletrico.com.br/qualidade-de-luz/> - Acesso em 11/09/2019)

A lâmpada halógena reproduz as cores com total fidelidade e naturalidade. A Figura 35 mostra que a lâmpada halógena apresenta característica de realçar as cores que vão do amarelo para o vermelho no comprimento de onda dominante em 584,8 nm.

Observando as distribuições de potência pode-se concluir que a lâmpada halógena é a que apresenta a distribuição com maior continuidade. Segundo a, IESNA (Illuminating Engineering Society North America) – introduziu a norma IES TM- 30- 15, um novo método de avaliação de cores para fontes de luz. Em que avaliam a fidelidade da cor, ou seja, o quanto a reprodução de cor é fiel a luz do sol, e determina a naturalidade da cor, de acordo com o padrão da norma (AALOK DO HINDI LUZ, 2019).

5.5. ROTEIRO EXPERIMENTAL

Para executar o experimento foi preciso submeter as células fotovoltaicas sob intensa radiação até estabilizarem em uma determinada temperatura, sendo monitorada por termopares captando a temperatura de cada célula. O procedimento foi feito da seguinte forma:

1- Colocar as células fotovoltaicas para receberem irradiação das lâmpadas, conforme Figura 43.

Figura 43 - Fonte de Luminosidade



Fonte: Autor

2- Monitorar a temperatura de cada célula a cada 1 minuto, fazendo a leitura dos termopares com um multímetro, conforme Figura 44.

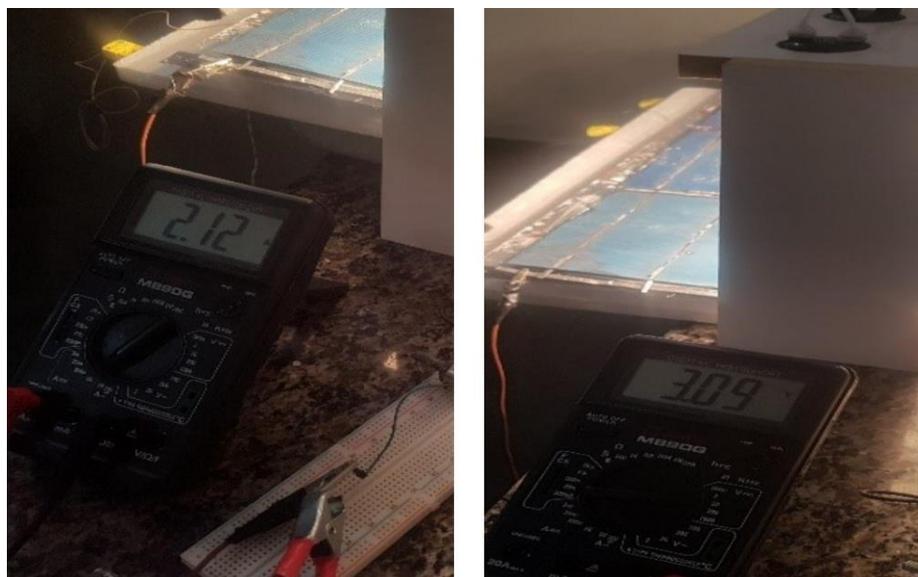
Figura 44 - Medição do termopar



Fonte: Autor

3- Monitorar a tensão e corrente que as células fotovoltaicas geram a cada 1 minuto, conforme Figura 45.

Figura 45- Medição Tensão e corrente



Fonte: Autor

4- Aguardar as células atingirem sua temperatura máxima e estabilizar nessa determinada temperatura e adicionar o líquido de arrefecimento conforme Figura 46.

Figura 46 - Células fotovoltaicas em contato com o líquido arrefecimento



Fonte: Autor

5.6. SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O método de arrefecimento consiste em colocar o painel solar em contato com um líquido de arrefecimento para que a parte inferior das células fotovoltaicas utilizam esta refrigeração abaixando sua temperatura da parte inferior enquanto elas esquentam na parte superior devido a irradiação das lâmpadas. Foi utilizada pasta térmica em uma placa de alumínio devido a sua propriedade de alta transferência de calor e na parte inferior da placa de alumínio foram instalados diversos dissipadores de calor para ficarem mergulhados no líquido de arrefecimento para ajudar nessa transferência de calor, conforme a Figura 47.

Figura 47 - Placa de alumínio com os dissipadores



Fonte: Autor

5.6.1. MISTURA FRIGORÍFICA

Como parte do sistema de resfriamento foi escolhido usar algo simples e conhecido pelos físicos de mistura frigorífica, um recipiente de alumínio contendo gelo, sal grosso e água. Em nossos testes estes ingredientes foram misturados e formou-se uma mistura capaz de abaixar as temperaturas médias de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de maneira manual, conforme Figura 48. Para aplicar a mistura frigorífica utilizou-se um recipiente para armazenar o líquido de arrefecimento, no qual colocou-se manualmente o líquido no recipiente com as células ainda recebendo a irradiação das lâmpadas, conforme representado na figura 46. Formou-se a mistura frigorífica com um volume total de 10 litros de água, sendo que a densidade da água acima de 0°C é de 1 kg/litro , portando resulta em aproximadamente em 10 kg em massa.

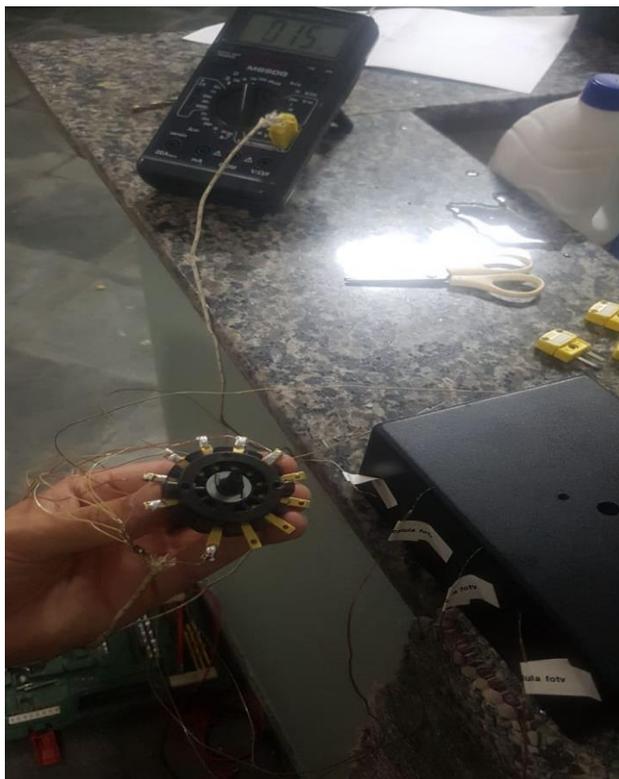
Figura 48 - Mistura Frigorífica

Fonte: Autor

A química explica: o sal faz o gelo derreter mais rápido, em uma reação endotérmica, ou seja, que absorve calor. Se é necessário absorver calor ele terá de vir de algum lugar, portanto o gelo remove o calor.

5.6.2. CHAVE SELETORA

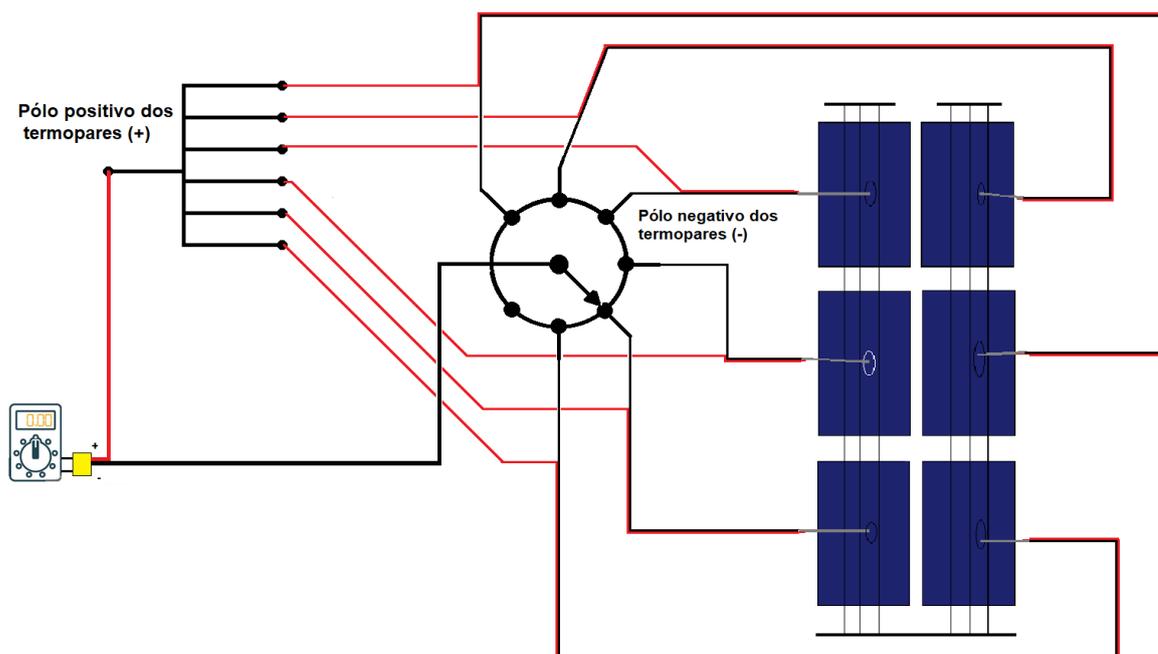
Para viabilizar o monitoramento dos termopares, foi utilizado uma chave seletora de dez posições, em que cada posição da chave foi ligada a um termopar para que quando a alavanca mecânica fechar contato com um termopar, o valor correspondente de temperatura do termopar correspondente pudesse aparecer no multímetro, conforme Figura 49.

Figura 49 - Chave Seletora

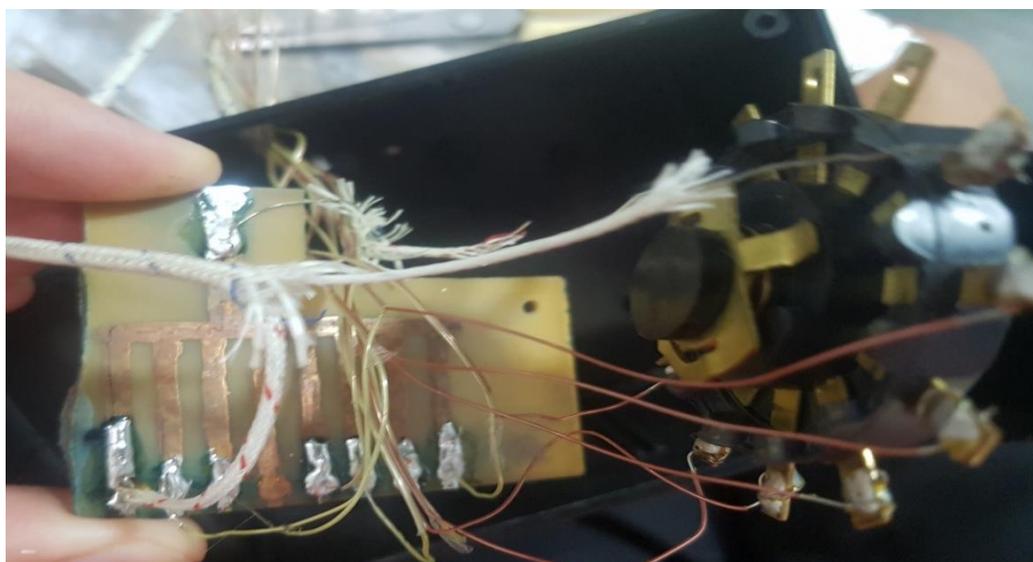
Fonte: Autor

Como os termopares são compostos por dois fios, em que uma extremidade as duas pontas ficam juntas para ler a temperatura, e em outra extremidade há os pólos negativos e positivos para serem ligados corretamente no multímetro. Fabricou-se um circuito em uma placa de cobre seguindo o esquema elétrico, conforme a Figura 50 para interligar-se todos os pólos positivos dos termopares vindos de cada célula fotovoltaica. E cada pólo negativo dos termopares vindo de cada célula fotovoltaica foram ligados nas posições da chave seletora. E assim feito em todos os termopares.

Quando a conexão principal do multímetro era ligada na saída do circuito fabricado contendo os pólos positivos, com a saída da chave seletora contendo os pólos negativos, fechava-se o contato com o termopar correspondente e visualizava-se o valor da temperatura no multímetro na posição de leitura de termopar, também representado na Figura 50. E assim pode-se visualizar como o circuito fabricado interligado com a chave seletora na Figura 51.

Figura 50 - Esquema elétrico das chaves seletoras

Fonte: Autor

Figura 51 - Chave seletora com o circuito fabricado

Fonte: Autor

5.7. EFICIÊNCIA DO SISTEMA

Com base nos testes atingidos, calculou-se a potência do sistema por meio da dedução da primeira lei de Ohm onde Georg Simon Ohm diz que a potência em watts é igual ao produto da tensão e corrente, e por meio disso pôde-se calcular a eficiência do sistema. Usando a potência que as lâmpadas geram por m^2 , resultando na fórmula: $\eta = (\text{Potência elétrica fornecida pela célula/ módulo Potência contida na radiação solar incidente}) \times 100$. Que variou entre 5,89% e 4,06% nas condições de temperatura citadas no próximo item 6.

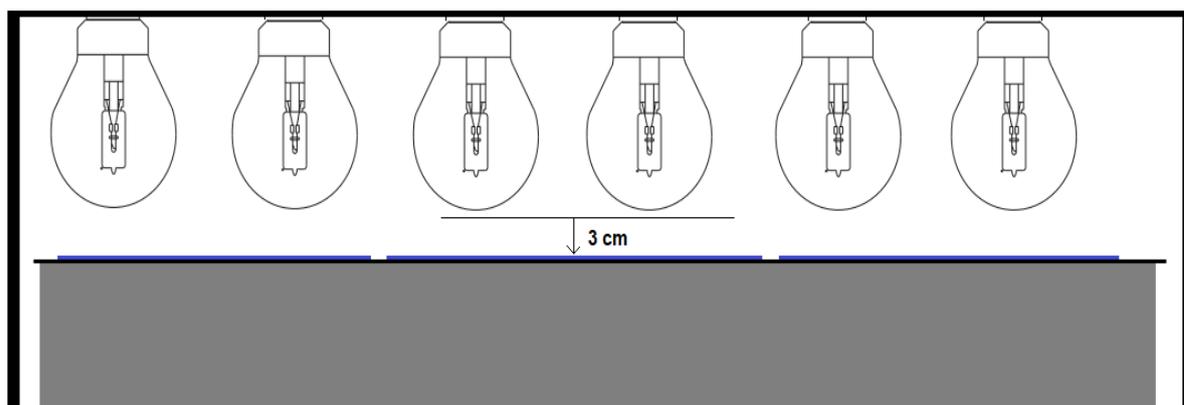
6. RESULTADOS ATINGIDOS

Para realizar os testes padronizou-se as condições para que influências externas não influenciasse nos resultados.

As condições foram as seguintes:

- Ambiente totalmente fechado, sem influência de corrente de ar;
- Temperatura ambiente em média de 21°C.
- Posicionou-se as lâmpadas a uma altura de 3 cm das células fotovoltaicas para que as elas pudessem receber a irradiação das lâmpadas de maneira efetiva, representado conforme a Figura 52.
- O Luxímetro a uma altura de 3cm.
- Termopares posicionados centralizados em cada célula fotovoltaica.

Figura 52 - Distância das lâmpadas com as células

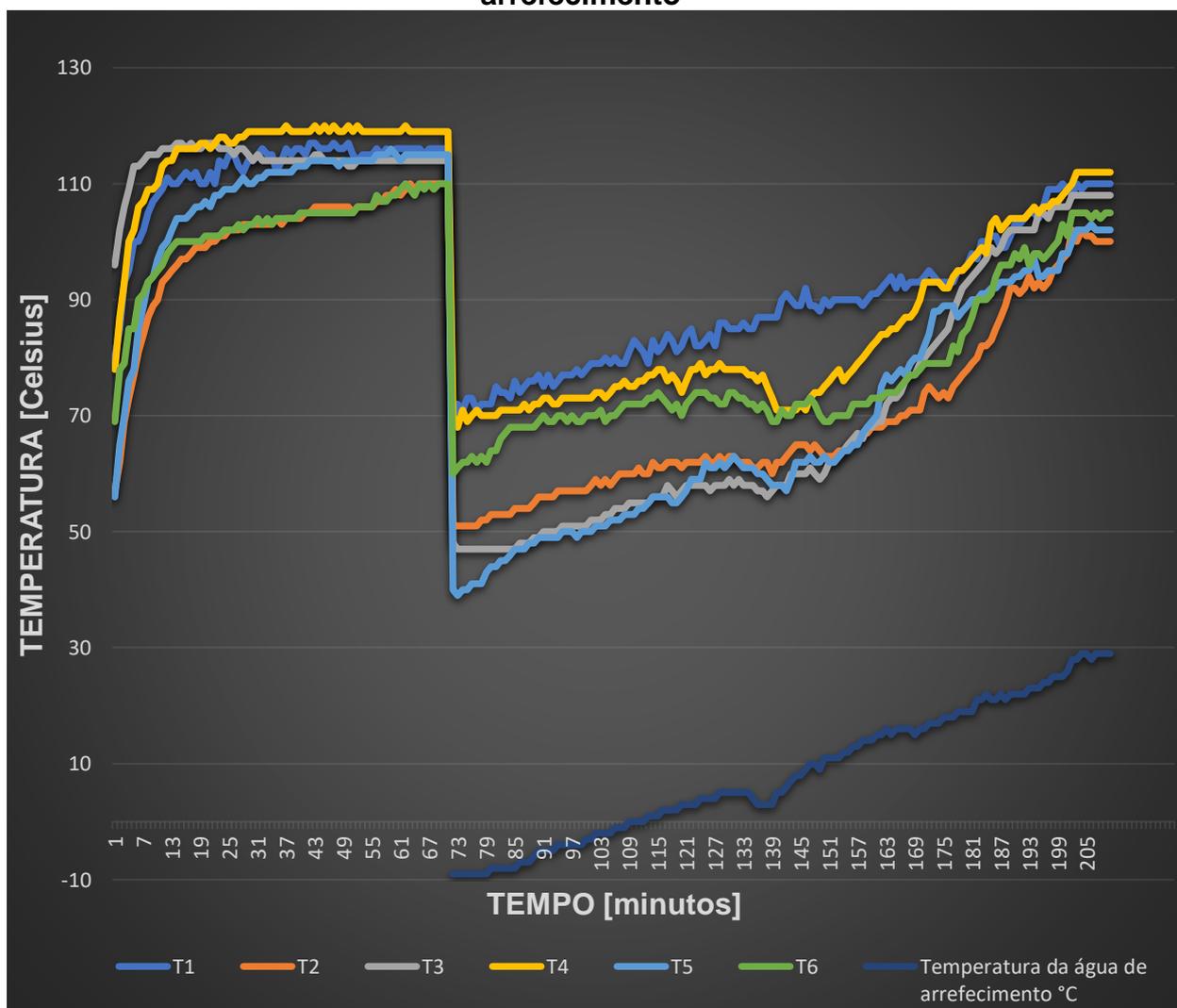


Fonte: Autor

6.1.1. EXPERIMENTO

Com os dados fornecidos pelo experimento, pôde-se elaborar dois gráficos onde no primeiro é possível ver as curvas de temperatura em cada célula fotovoltaica, e temperatura do líquido de arrefecimento, conforme Gráfico 01, em que quando foi atingido 72 minutos de teste e houve a estabilização da temperatura das células fotovoltaicas, foi inserido o líquido de arrefecimento com uma temperatura de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, e é perceptível de acordo com o Gráfico 01 que há uma queda significativa da temperatura das células fotovoltaicas pelo fato do líquido de arrefecimento estar tirando o calor da parte inferior do painel solar, mas ao decorrer do teste viu-se que a irradiação que o painel recebia das lâmpadas gerava calor e voltou a aumentar a temperatura do líquido de arrefecimento.

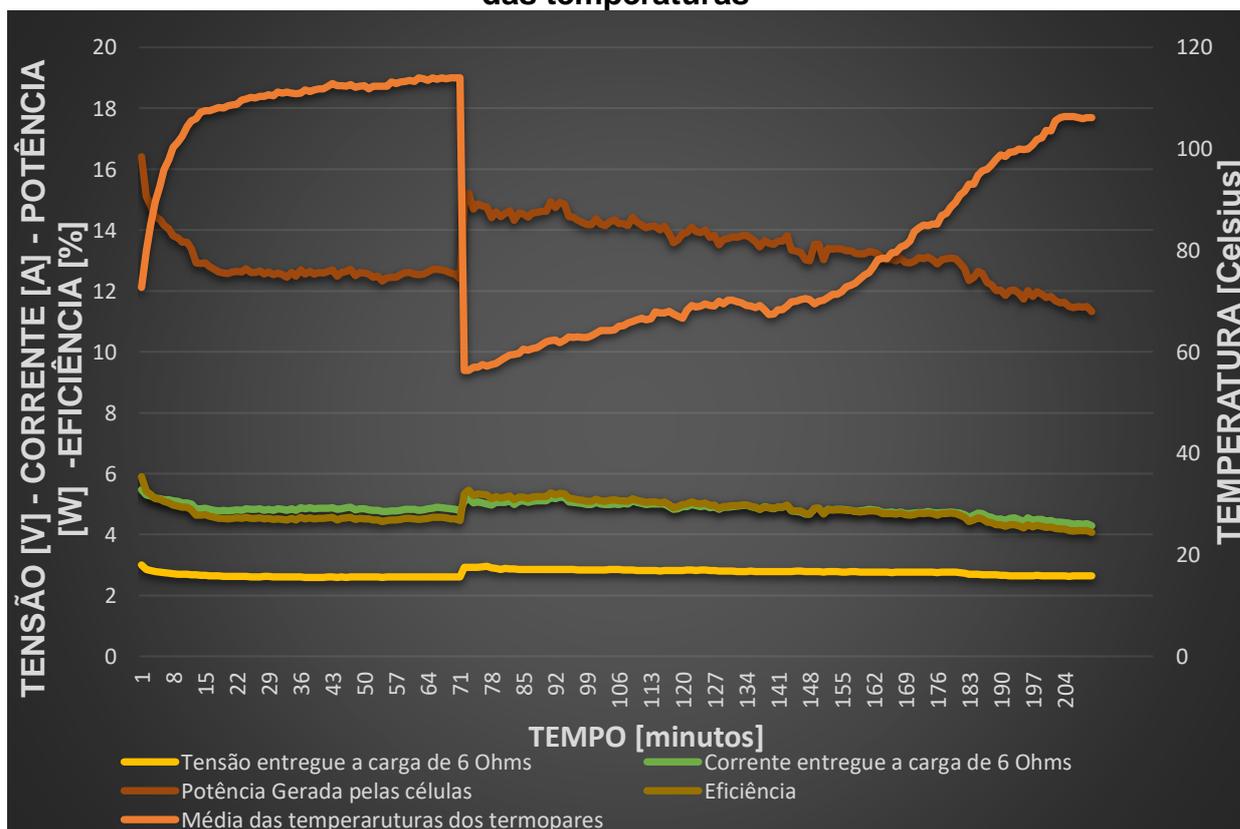
Gráfico 01- Temperatura das células fotovoltaicas e do líquido de arrefecimento



Fonte: Autor

Conforme Gráfico 02 foi feita uma correlação de tensão, corrente, potência e eficiência medidas e uma média de temperaturas das células fotovoltaicas. Percebeu-se que a queda de temperatura do painel fotovoltaico resulta uma melhora nos parâmetros observados nesse teste. Em que é possível observar no gráfico 02, com a diminuição de temperatura há um incremento de tensão chegando a 2,95V aproximando-se da tensão nominal do painel que seria de 3V e conseqüentemente houve um incremento de corrente elétrica e estabilidade desse parâmetro. Conseqüentemente com a melhora desses dois parâmetros, a potência gerada pelo painel também teve um aumento significativo, pois observando o gráfico, com a subida de tensão e corrente, a potência gerada tem um ganho de 3W. Acompanhando essa melhora, com o crescimento de temperatura do painel há uma queda de eficiência do painel, ou seja não está convertendo toda a irradiação recebida em tensão elétrica, mas com a queda de temperatura é perceptível a melhora desse parâmetro, pois diminuindo a interferência da alta temperatura, maior é o aproveitamento de converter a irradiação recebida em tensão. Portanto o sistema de arrefecimento melhora a eficiência global com o qual um painel fotovoltaico trabalha.

Gráfico 02 – Correlação de tensão, corrente, potência, eficiência e média das temperaturas



Fonte: Autor

7. CONCLUSÃO

Esse experimento teve como objetivo, analisar o comportamento de um painel solar feito em pequena escala quando estão recebendo irradiação de lâmpadas halógenas, simulando a luz solar em testes de bancada, que por sua vez ocasiona um aumento de temperatura significativa no painel solar, criando uma dificuldade do sistema fotovoltaico em eficiência de converter a irradiação em energia elétrica. Esta dificuldade afeta todos os painéis da atualidade. Tendo em vista este problema foi confirmada uma forma possível de aumentar a eficiência energética de uma fonte solar de energia 100 % limpa por meio de um sistema de resfriamento que foi capaz de diminuir a interferência da temperatura na capacidade de gerar energia elétrica. O objetivo foi assim atingido.

Durante o experimento realizado, foi feito um monitoramento de minuto a minuto da temperatura de cada célula fotovoltaica do painel solar recebendo irradiação no teste de bancada, e monitorando a tensão e corrente ligado a uma carga de 6 Ohms. Analisou-se a relação da corrente e tensão com o aumento de temperatura das células fotovoltaicas até estabilizarem em uma faixa de temperatura máxima, e foi possível perceber que há uma perda de tensão de quase 0,5 V de um total de 3 V em nosso sistema fotovoltaico, comprovando que a elevação de temperatura do painel afeta a capacidade de eficiência energética do sistema. Mas este trabalho de conclusão de curso visou aplicar um sistema de resfriamento a base de um líquido de arrefecimento para refrigerar a parte inferior do painel. Inserindo esse sistema de arrefecimento no experimento, fez com que a temperatura do sistema diminuísse consideravelmente, voltando a entregar aproximadamente sua tensão nominal de 3 V e estabilização da corrente elétrica enquanto o líquido de arrefecimento manteve-se em temperatura baixas de -9°C a 5°C . Durante o monitoramento minuto a minuto do sistema coletou-se dados de tensão (V), corrente (A), temperatura de cada célula ($^{\circ}\text{C}$), temperatura média do sistema ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura do líquido de arrefecimento ($^{\circ}\text{C}$), até os testes acabarem, fazendo com que o líquido de arrefecimento perdesse sua capacidade de resfriar ocasionando a volta do aumento de temperatura até sua estabilização.

Por meio desses dados obteve-se um gráfico de correlação onde é possível perceber o aumento da eficiência energética que o painel entrega, aproveitando

melhor a potência da irradiação das lâmpadas e convertendo em energia elétrica por m^2 .

Portanto concluímos que o sistema de arrefecimento apresentado é capaz de diminuir a interferência da temperatura no painel solar evitando redução de tensão e consequente redução de corrente do sistema fotovoltaico, mitigando a dificuldade de um painel solar obter uma boa eficiência em aproveitar toda potência irradiada recebida. Assim o método de arrefecimento é recomendado de forma a se utilizar em um sistema fotovoltaico, viabilizando sua capacidade de captar uma energia limpa renovável disponível para todos.

REFERÊNCIAS

2005, Figueira da Foz. Anais... . [s.i.]: Anais, 2005. p. 1 - 6. Disponível em: <repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/.../ENER-05_solar.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2018.

ACKERMANN, Mathieu; COULOT, Laurent; GERLICH Florian. Suíços criam painel solar com 29% de eficiência e batem recorde. Disponível em <<https://ciclovivo.com.br/planeta/energia/suico-recorde-painel-solar-eficiencia/>> Acesso em 19 de mai. 2019.

ALEXANDRE, Carlos. Física; Fótons. Info Escola Navegando e Aprendendo. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/foton/>>. Acesso em 12 fev. de 2010.

ANDRADE, Manuel Correia de. Geografia Econômica, 8 ed. São Paulo: Atlas, 1986.pág 138.

Ani.Solar, Solar Energy Power for Everyone. Tab Wire For Diy Solar Panel/solar. Disponível em: <<https://ani.solar/shop/50-feet-0-12-1-6mm-tab-wire-for-diy-solar-panel-solar-6117-ella/>>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

BAIRD, Colin. Química Ambiental. Com tradução de Maria Angeles Lobo Reeio e Luiz Carlos Marques Carrera. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. pág 264.

CARLOS ALEXANDRE CAVALHEIRO. Fóton. 2010. Carlos Alexandre Cavalheiro. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/foton/>. Acesso em: 11 out. 2019.{pág 35}

Carlos Arthur de Oliveira Fernandes. A importância da energia solar. Disponível em <<https://www.webartigos.com/artigos/a-importancia-da-energia-solar/32718>>. Acesso em 5 jan. 2018

Casa do Refratário. Alumínio Chapa em Curitiba. Disponível em: <<http://casadorefratario.com.br/produto/aluminio-chapa/>>. Acesso em: 15 abr. de 2020.

CORREA, Dominiciano. Coletor Solar. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/coletorsolar.htm?aff_source=56d95533a8284936a374e3a6da3d7996>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. 2ed. Rio de Janeiro: Cresesb, 1999. {pag20}

CRESESB-Centro-de-Referência-para-Energia-Solar-e-Eólica-Sérgio-Brito. Tipos de Células. <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321> . Acesso em: 11 jun. 2019.

DUSOL Engenharia Sustentável. O descobrimento do efeito fotovoltaico. Disponível em <<https://www.dusolengenharia.com.br/post/como-surgiu-a-energia-solar/>>. Acesso em 12 nov. 2019.

Elysia Energia Solar. Projetos. Disponível em: <<https://elysia.com.br/painel-solar-em-gravata/>>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

Física Net – Fonte: <<http://www.fisica.net/quantica/curso/fotons.php>> acesso em 12 fev. 2010.

Fórum Permanente do Estado do Acre. Suíços criam painel solar com 29% de eficiência e batem recorde. Fórum do Acre. 2019. Disponível em: <<https://forumdoacre.org.br/suicos-criam-painel-solar-com-29-de-eficiencia-e-batem-recorde/>>. Acesso em: 15 maio de 2019.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables: version 16. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384, 2000.

Guedes, Philipe; Philipe Guedes. Conta de luz: saiba quais são as taxas e impostos incluídos no boleto da Eletropaulo. Disponível em <<https://g1.globo.com/sp/saopaulo/noticia/2018/09/05/conta-de-luz-saiba-quais-sao-as-taxas-e-impostos-incluidos-no-boleto-da-eletropaulo.ghtml>> Acesso em 05 nov. 2018.

GUIMARÃES, Bruno. SOLAR VOLT. Células fotovoltaicas: o que são, como escolher e como medir suas eficiências. Disponível em:

<<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/quais-os-records-de-eficiencia-para-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em 19 nov. 2019

Juste, Flávio Marcos Alves. Estudo sobre células fotovoltaicas, funcionamento, aplicação e pesquisas de desenvolvimento. 2008.4 f. Trabalho de conclusão de curso- Ministério da Educação Universidade Federal de Uberlândia Instituto de Física.

KOMP, Richard J. Practical photovoltaics : electricity from solar cells. Ann Arbor, USA: Aatec Publications, 1995.

Luminosidade in Dicionário infopédia da Língua Portuguesa [em linha]. Porto: Porto Editora, 2003-2019.[consult. 2019-06-19 18:27:47]. Disponível na Internet: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/luminosidade> (referência sobre iluminancia)

LUQUE, Antonio. Handbook of photovoltaic science and engineering. 2. Ed. São Paulo: Willey, 2011.

Manual de Luminotécnica da Osram

<http://www.osram.pt/osram_pt/Design_de_Iluminacao/Sobre_Iluminacao/Light_%26_Space/Technical_basics_of_light_/Quantitatives/index.html>. Visitado em 19 de março de 2009.

Minha Casa Solar. Painel Solar Fotovoltaico. Disponível em:

<<https://www.minhacasasolar.com.br/saiba-mais-painel-solar-fotovoltaico>>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

MPPT Solar. Painéis Solares: Ligação em Paralelo. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

NELSON, Jenny. The physics of solar cells. São Paulo: Imperial College, 2007.

Nussenzveig, H. M. – Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica; vol.4. São Paulo: Blucher 1998.

OMEGA Spectrus Company; Saiba o que é um Termopar; Introdução a medição de temperatura. Disponível em:

<<https://br.omega.com/prodinfo/termopares.html#pimenu>>. Acesso em 12 out. 2014.

ORTON, John W. The story of semiconductors. Oxford University Press, 2004. P.52 <ftp://tor.kpi.ua/pub/pershin/LIBRARY/.../story%20of%20semiconductors.pdf>
> . Acesso em: 10 jan. 2017.

PALZ, Wolfgang. Energia solar e fontes alternativas. Hemus LTDA, 1981.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Org.). Fontes Renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PARANHOS, Arthur. Luminotécnica; NBR – 5413 Iluminância de Interiores. ENG Planilhas Soluções. Disponível em: <<https://engplanilhas.com.br/nbr-5413/>>. Acesso em: 10 abr. de 2018.

PINTO JUNIOR, José Roberto Lira. Dopagem de Semicondutores. 2010. Disponível em:<https://www.docsity.com/pt/search/?q=dopagem%20de%20semicondutores>. Acesso em: 26 jun. 2020.

Portal Solar. Tipos de Painel Solar Fotovoltaico. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>> Acesso em: 23 jun. de 2020.

Portal Solar. História e origem da energia solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html/>. Acesso em 03 de nov. 2016

Power Lume. Lúmen, Candela e Lux | Conceitos básicos. Disponível em <<https://www.powerlume.com.br/lumen-candela-e-lux-conceitos-basicos/>>. Acesso em 1 fev. 2019 (referência sobre diferenciando na prática Lúmen, Candela e Lux)

ROCHA, Jennifer. Luz Solar e Radiação Ultravioleta. Mundo Educação. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/luz-solar-radiacao-ultravioleta.htm>>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

SCHEER, Hermann. O Império Energético Já. CRESESB. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 14 maio de 2019

SCOPACASA, Vicente. Qualidade de Luz. O setor elétrico. Abr, 2018. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/qualidade-de-luz/>>. Acesso em: 16 out. de 2019.

SILVA, Franciso Wellery Nunes. ASPECTOS GERAIS DA FÍSICA DOS SEMICONDUTORES. 2010. 25 f. Monografia (Especialização) – Curso de Física, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em: < http://www.uece.br/fisica/index.php/arquivos/doc_download/53-aspectos-gerais-da-fisica-dos-semicondutores >. Acesso em: 10 jan. 2017.

SOUZA, Ronilson di. Célula Fotovoltaica de Silício Policristalino. 2017. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>. Acesso em: 05 ago. 2018.

Strom Brasil. Células fotovoltaicas Disponível em: <<http://www.strombrasil.com.br/celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 23 jun. de 2020.

Toda Matéria. Física; Espectro Eletromagnético. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em: 01 fev. de 2018

TRINDADE, Manuel et al.. Sistema para Optimização da Extração de Energia de Painéis Solares Fotovoltaicos. In: CONFERÊNCIA SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL, 1., 2005, Figueira da Foz. Anais... [s.i.]: Anais, 2005. p. 1 - 6. Disponível em:<repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/.../ENER-05_solar.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2018.

VIANA, Dandara. Entenda o que é Luminotécnica. Guia da Engenharia. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/luminotecnica/>>. Acesso em: 14 mar. De 2019.

VIANNA, Nelson Solano e Joana Carla S. Gonçalves. Iluminação e Arquitetura. São Paulo: Ed. Virtus S/c Ltda., 2001. (referência sobre luminância)

WEIMAR, Niclas D. .Bus Wire and Tab Wire. Disponível em <<https://sinovoltaics.com/learning-center/components/bus-wire-tab-wire/>>. Acesso em 21 dez. 2018

Wiki How. Como Construir um Painel Solar. Disponível em: <<https://pt.wikihow.com/Construir-um-Painel-Solar>>. Acesso em: 17 maio de 2020.

APÊNDICE A- Temperaturas dos termopares e temperatura da água de arrefecimento

Tempo de medição (a cada 1 minuto)	Temperatura termopares °C sem o arrefecimento						Temperatura da água de arrefecimento °C
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
0 minuto	15	15	15	15	15	15	
1 minuto	80	57	96	78	56	69	
2 minutos	85	62	102	87	65	78	
3 minutos	93	69	106	93	70	79	
4 minutos	95	73	109	100	76	85	
5 minutos	100	77	113	102	78	85	
6 minutos	100	81	113	106	85	90	
7 minutos	102	84	114	107	89	91	
8 minutos	105	87	115	109	93	93	
9 minutos	107	89	115	109	94	94	
10 minutos	108	90	115	110	97	95	
11 minutos	109	93	116	113	99	96	
12 minutos	111	94	116	114	100	98	
13 minutos	110	95	116	114	102	99	
14 minutos	110	96	117	116	104	100	
15 minutos	111	97	117	116	104	100	
16 minutos	112	97	116	116	104	100	
17 minutos	111	98	117	116	105	100	
18 minutos	112	99	116	116	106	100	
19 minutos	110	99	116	117	106	100	
20 minutos	110	99	117	117	107	101	
21 minutos	112	100	117	116	106	101	
22 minutos	110	100	117	117	108	101	
23 minutos	114	101	116	118	108	101	
24 minutos	113	101	116	118	109	102	
25 minutos	115	102	116	117	109	102	
26 minutos	115	102	115	117	109	102	
27 minutos	113	102	116	118	110	103	
28 minutos	112	103	116	118	111	102	
29 minutos	114	103	115	119	110	103	
30 minutos	114	103	114	119	110	103	
31 minutos	115	103	115	119	111	104	
32 minutos	116	103	114	119	111	103	
33 minutos	115	103	114	119	112	104	
34 minutos	115	103	114	119	112	103	
35 minutos	112	104	114	119	112	104	

36 minutos	114	103	114	119	112	104	
37 minutos	116	104	114	120	112	104	
38 minutos	115	104	114	119	112	104	
39 minutos	116	104	114	119	113	104	
40 minutos	116	104	114	119	113	105	
41 minutos	115	105	114	119	113	105	
42 minutos	117	105	114	119	114	105	
43 minutos	117	106	115	120	114	105	
44 minutos	116	106	115	119	114	105	
45 minutos	116	106	114	120	114	105	
46 minutos	116	106	114	119	114	105	
47 minutos	117	106	114	120	114	105	
48 minutos	116	106	114	119	113	105	
49 minutos	116	106	114	119	114	105	
50 minutos	117	106	113	120	114	105	
51 minutos	115	105	113	119	114	105	
52 minutos	114	106	114	120	114	106	
53 minutos	115	106	114	119	114	106	
54 minutos	115	106	114	119	114	106	
55 minutos	115	106	114	119	114	106	
56 minutos	116	107	114	119	115	108	
57 minutos	115	107	114	119	115	107	
58 minutos	116	108	114	119	115	107	
59 minutos	115	108	114	119	116	108	
60 minutos	116	109	114	119	115	108	
61 minutos	116	108	114	119	114	109	
62 minutos	116	109	114	120	115	110	
63 minutos	116	110	114	119	115	109	
64 minutos	116	109	114	119	115	108	
65 minutos	116	110	114	119	115	110	
66 minutos	115	110	114	119	115	109	
67 minutos	116	110	114	119	115	110	
68 minutos	116	110	114	119	115	109	
69 minutos	116	110	114	119	115	110	
70 minutos	116	110	114	119	115	110	
71 minutos	116	110	114	119	115	110	
72 minutos	69	51	48	70	40	60	-9
73 minutos	72	51	47	68	39	61	-9
74 minutos	71	51	47	71	40	62	-9
75 minutos	73	51	47	69	40	62	-9
76 minutos	73	51	47	70	41	63	-9
77 minutos	71	51	47	71	41	62	-9
78 minutos	72	52	47	70	41	63	-9
79 minutos	72	52	47	70	43	62	-9
80 minutos	72	53	47	70	44	64	-8

81 minutos	75	53	47	70	44	64	-8
82 minutos	74	53	47	71	45	66	-8
83 minutos	74	53	47	71	45	67	-8
84 minutos	73	53	47	71	46	68	-8
85 minutos	76	54	47	71	47	68	-8
86 minutos	74	54	48	71	47	68	-7
87 minutos	75	54	48	72	47	68	-7
88 minutos	76	54	48	71	48	68	-7
89 minutos	76	55	49	72	48	68	-6
90 minutos	77	56	49	72	49	69	-5
91 minutos	75	56	50	73	49	70	-5
92 minutos	77	56	50	73	49	69	-5
93 minutos	75	56	50	72	49	69	-5
94 minutos	76	57	50	72	49	70	-4
95 minutos	77	57	51	73	50	70	-4
96 minutos	77	57	51	73	50	69	-4
97 minutos	77	57	51	73	50	70	-4
98 minutos	78	57	51	73	49	69	-4
99 minutos	77	57	51	73	50	69	-4
100 minutos	78	57	51	73	50	70	-3
101 minutos	79	58	52	73	50	70	-3
102 minutos	79	59	52	74	51	70	-2
103 minutos	79	58	52	74	51	71	-2
104 minutos	80	59	53	73	51	69	-2
105 minutos	79	58	53	74	52	70	-2
106 minutos	80	59	54	75	52	70	-1
107 minutos	79	60	54	75	52	71	-1
108 minutos	79	60	54	76	53	72	-1
109 minutos	81	60	55	75	53	72	0
110 minutos	83	60	55	75	53	72	0
111 minutos	82	61	55	76	54	72	0
112 minutos	81	60	55	76	54	72	0
113 minutos	79	60	55	77	55	73	1
114 minutos	83	62	56	77	56	73	1
115 minutos	81	61	56	78	56	74	1
116 minutos	82	61	56	78	56	73	2
117 minutos	84	62	58	76	56	72	2
118 minutos	83	62	57	77	55	71	2
119 minutos	81	62	56	76	55	72	2
120 minutos	82	61	57	74	56	70	3
121 minutos	84	62	58	76	57	72	3
122 minutos	85	62	58	78	59	73	3
123 minutos	82	62	58	78	59	74	3
124 minutos	82	62	58	79	59	74	4
125 minutos	83	63	58	77	62	74	4

126 minutos	84	62	57	78	61	73	4
127 minutos	82	62	58	78	61	73	4
128 minutos	86	63	58	79	62	72	5
129 minutos	86	62	58	78	61	72	5
130 minutos	85	63	59	78	62	74	5
131 minutos	85	63	58	78	63	74	5
132 minutos	85	62	59	78	62	73	5
133 minutos	86	62	58	78	61	73	5
134 minutos	85	62	58	77	61	72	5
135 minutos	85	61	58	77	61	72	4
136 minutos	87	61	57	76	60	71	3
137 minutos	87	62	57	77	60	72	3
138 minutos	87	62	56	75	59	71	3
139 minutos	87	60	57	73	58	69	3
140 minutos	87	62	58	71	58	69	5
141 minutos	90	62	58	71	58	71	5
142 minutos	91	63	58	71	57	70	6
143 minutos	90	64	60	71	59	70	7
144 minutos	89	65	60	71	62	72	8
145 minutos	89	65	60	72	62	72	8
146 minutos	92	65	60	71	62	72	9
147 minutos	89	64	61	73	63	73	10
148 minutos	89	65	60	74	62	72	10
149 minutos	88	64	59	74	62	70	9
150 minutos	90	63	60	75	63	69	11
151 minutos	89	63	62	76	62	69	11
152 minutos	90	63	62	77	62	70	11
153 minutos	90	64	63	78	63	70	11
154 minutos	90	64	64	76	64	70	12
155 minutos	90	65	65	77	64	70	12
156 minutos	90	66	66	78	65	72	13
157 minutos	90	66	67	79	65	72	13
158 minutos	89	67	66	80	67	72	14
159 minutos	90	67	68	81	68	72	14
160 minutos	91	68	68	82	69	73	14
161 minutos	91	68	69	83	70	73	15
162 minutos	92	68	69	84	75	73	15
163 minutos	93	69	72	84	77	74	16
164 minutos	94	69	73	85	76	74	15
165 minutos	92	69	73	85	77	74	16
166 minutos	94	70	74	86	78	75	16
167 minutos	92	70	76	87	77	76	16
168 minutos	93	71	77	87	79	77	16
169 minutos	93	71	77	88	80	77	15
170 minutos	93	71	79	90	80	78	16

171 minutos	94	74	80	93	82	79	16
172 minutos	95	75	81	93	84	79	17
173 minutos	94	74	82	93	88	79	17
174 minutos	93	73	83	93	88	79	17
175 minutos	93	74	84	92	89	79	18
176 minutos	93	73	85	92	89	79	18
177 minutos	93	75	88	94	89	82	18
178 minutos	95	76	90	95	87	81	19
179 minutos	95	77	92	95	88	84	19
180 minutos	96	78	93	96	89	85	19
181 minutos	98	79	94	97	90	87	19
182 minutos	97	80	95	98	90	90	21
183 minutos	100	82	96	99	91	90	21
184 minutos	100	82	97	98	91	90	22
185 minutos	101	83	99	103	92	91	21
186 minutos	101	85	98	104	92	94	21
187 minutos	99	87	99	102	93	96	22
188 minutos	99	89	101	103	93	96	21
189 minutos	101	92	102	104	93	96	22
190 minutos	103	92	102	104	94	98	22
191 minutos	103	91	102	104	94	97	22
192 minutos	104	92	102	104	95	99	22
193 minutos	105	94	102	105	95	96	23
194 minutos	105	92	102	106	97	98	23
195 minutos	104	93	105	105	94	98	23
196 minutos	106	92	105	106	94	97	24
197 minutos	109	93	104	106	95	98	24
198 minutos	109	95	106	107	95	99	25
199 minutos	109	96	106	107	95	100	25
200 minutos	110	97	106	108	98	103	25
201 minutos	109	98	106	109	98	101	26
202 minutos	108	102	108	110	100	105	28
203 minutos	110	100	108	112	102	105	28
204 minutos	109	102	108	112	102	105	29
205 minutos	110	101	108	112	102	105	29
206 minutos	110	101	108	112	103	104	28
207 minutos	110	100	108	112	102	105	29
208 minutos	110	100	108	112	102	104	29
209 minutos	110	100	108	112	102	105	29
210 minutos	110	100	108	112	102	105	29

APÊNDICE B- Média das temperaturas, tensão, corrente, potência e eficiência.

Tempo de medição (a cada 1 minuto)	Média das temperaturas dos termopares	Tensão (V) entregue a carga em 6 Ohms	Corrente (A) entregue a carga em 6 Ohms	Potência Gerada pelas células(W)	Eficiência (%)
0 minuto	15	3	5,47	16,41	5,896302684
1 minuto	72,66666667	3	5,47	16,41	5,896302684
2 minutos	79,83333333	2,85	5,3	15,105	5,427401099
3 minutos	85	2,81	5,27	14,8087	5,320937085
4 minutos	89,66666667	2,78	5,19	14,4282	5,184219036
5 minutos	92,5	2,77	5,18	14,3486	5,155617836
6 minutos	95,83333333	2,75	5,15	14,1625	5,088749955
7 minutos	97,83333333	2,73	5,14	14,0322	5,041931659
8 minutos	100,3333333	2,71	5,1	13,821	4,966045058
9 minutos	101,3333333	2,7	5,09	13,743	4,938018756
10 minutos	102,5	2,7	5,04	13,608	4,889511696
11 minutos	104,3333333	2,7	5,04	13,608	4,889511696
12 minutos	105,5	2,68	5	13,4	4,814774891
13 minutos	106	2,67	4,84	12,9228	4,643311415
14 minutos	107,1666667	2,66	4,85	12,901	4,635478423
15 minutos	107,5	2,66	4,86	12,9276	4,645036111
16 minutos	107,5	2,65	4,83	12,7995	4,5990083
17 minutos	107,8333333	2,65	4,8	12,72	4,570443031
18 minutos	108,1666667	2,64	4,78	12,6192	4,534224426
19 minutos	108	2,63	4,79	12,5977	4,526499227
20 minutos	108,5	2,63	4,78	12,5714	4,517049333
21 minutos	108,6666667	2,63	4,8	12,624	4,535949121
22 minutos	108,8333333	2,63	4,81	12,6503	4,545399015
23 minutos	109,6666667	2,63	4,8	12,624	4,535949121
24 minutos	109,8333333	2,63	4,84	12,7292	4,573748697
25 minutos	110,1666667	2,61	4,83	12,6063	4,529589307
26 minutos	110	2,61	4,83	12,6063	4,529589307
27 minutos	110,3333333	2,61	4,85	12,6585	4,54834537
28 minutos	110,3333333	2,62	4,79	12,5498	4,509288204
29 minutos	110,6666667	2,62	4,82	12,6284	4,537530092
30 minutos	110,5	2,61	4,8	12,528	4,501455212
31 minutos	111,1666667	2,6	4,84	12,584	4,521576659
32 minutos	111	2,6	4,82	12,532	4,502892458
33 minutos	111,1666667	2,6	4,79	12,454	4,474866156
34 minutos	111	2,6	4,85	12,61	4,53091876
35 minutos	110,8333333	2,6	4,8	12,48	4,484208257
36 minutos	111	2,6	4,88	12,688	4,558945061
37 minutos	111,6666667	2,59	4,85	12,5615	4,513492149

38 minutos	111,3333333	2,59	4,88	12,6392	4,541410657
39 minutos	111,6666667	2,59	4,85	12,5615	4,513492149
40 minutos	111,8333333	2,59	4,87	12,6133	4,532104488
41 minutos	111,8333333	2,59	4,86	12,5874	4,522798318
42 minutos	112,3333333	2,6	4,86	12,636	4,54026086
43 minutos	112,8333333	2,6	4,88	12,688	4,558945061
44 minutos	112,5	2,59	4,82	12,4838	4,485573641
45 minutos	112,5	2,6	4,85	12,61	4,53091876
46 minutos	112,3333333	2,59	4,88	12,6392	4,541410657
47 minutos	112,6666667	2,6	4,89	12,714	4,568287162
48 minutos	112,1666667	2,6	4,81	12,506	4,493550358
49 minutos	112,3333333	2,6	4,85	12,61	4,53091876
50 minutos	112,5	2,6	4,84	12,584	4,521576659
51 minutos	111,8333333	2,61	4,81	12,5541	4,510833244
52 minutos	112,3333333	2,6	4,79	12,454	4,474866156
53 minutos	112,3333333	2,6	4,8	12,48	4,484208257
54 minutos	112,3333333	2,59	4,76	12,3284	4,429736625
55 minutos	112,3333333	2,61	4,76	12,4236	4,463943085
56 minutos	113,1666667	2,61	4,77	12,4497	4,473321117
57 minutos	112,8333333	2,61	4,77	12,4497	4,473321117
58 minutos	113,1666667	2,61	4,8	12,528	4,501455212
59 minutos	113,3333333	2,61	4,83	12,6063	4,529589307
60 minutos	113,5	2,61	4,83	12,6063	4,529589307
61 minutos	113,3333333	2,6	4,83	12,558	4,512234559
62 minutos	114	2,61	4,8	12,528	4,501455212
63 minutos	113,8333333	2,61	4,81	12,5541	4,510833244
64 minutos	113,5	2,61	4,84	12,6324	4,538967339
65 minutos	114	2,61	4,87	12,7107	4,567101434
66 minutos	113,6666667	2,6	4,89	12,714	4,568287162
67 minutos	114	2,6	4,88	12,688	4,558945061
68 minutos	113,8333333	2,6	4,87	12,662	4,549602961
69 minutos	114	2,6	4,84	12,584	4,521576659
70 minutos	114	2,6	4,83	12,558	4,512234559
71 minutos	114	2,6	4,77	12,402	4,456181955
72 minutos	56,33333333	2,92	5,09	14,8628	5,34037584
73 minutos	56,33333333	2,93	5,19	15,2067	5,463943085
74 minutos	57	2,92	5,03	14,6876	5,277424455
75 minutos	57	2,93	5,07	14,8551	5,337609141
76 minutos	57,5	2,94	5,03	14,7882	5,313571198
77 minutos	57,16666667	2,95	5	14,75	5,299845496
78 minutos	57,5	2,9	4,97	14,413	5,178757501
79 minutos	57,66666667	2,89	5,05	14,5945	5,243972549
80 minutos	58,33333333	2,86	5,05	14,443	5,189536847
81 minutos	58,83333333	2,88	5,05	14,544	5,225827315
82 minutos	59,33333333	2,87	5,1	14,637	5,25924329

83 minutos	59,5	2,87	4,99	14,3213	5,145808631
84 minutos	59,66666667	2,86	5,09	14,5574	5,23064209
85 minutos	60,5	2,85	5,1	14,535	5,222593511
86 minutos	60,33333333	2,85	5,06	14,421	5,181631993
87 minutos	60,66666667	2,86	5,09	14,5574	5,23064209
88 minutos	60,83333333	2,86	5,1	14,586	5,2409184
89 minutos	61,33333333	2,86	5,11	14,6146	5,251194711
90 minutos	62	2,86	5,11	14,6146	5,251194711
91 minutos	62,16666667	2,86	5,22	14,9292	5,364234127
92 minutos	62,33333333	2,85	5,17	14,7345	5,294276167
93 minutos	61,83333333	2,85	5,23	14,9055	5,355718443
94 minutos	62,33333333	2,85	5,21	14,8485	5,335237685
95 minutos	63	2,85	5,07	14,4495	5,191872373
96 minutos	62,83333333	2,85	5,06	14,421	5,181631993
97 minutos	63	2,84	5,04	14,3136	5,143041932
98 minutos	62,83333333	2,84	5,02	14,2568	5,122633035
99 minutos	62,83333333	2,84	4,99	14,1716	5,09201969
100 minutos	63,16666667	2,84	4,99	14,1716	5,09201969
101 minutos	63,66666667	2,84	5,06	14,3704	5,163450828
102 minutos	64,16666667	2,84	5	14,2	5,102224139
103 minutos	64,16666667	2,84	4,98	14,1432	5,081815242
104 minutos	64,16666667	2,86	4,99	14,2714	5,127878984
105 minutos	64,33333333	2,86	5,01	14,3286	5,148431605
106 minutos	65	2,85	4,99	14,2215	5,109949337
107 minutos	65,16666667	2,83	5,02	14,2066	5,104595595
108 minutos	65,66666667	2,83	5	14,15	5,084258561
109 minutos	66	2,83	5,1	14,433	5,185943732
110 minutos	66,33333333	2,82	5,06	14,2692	5,127088498
111 minutos	66,66666667	2,82	5,02	14,1564	5,086558155
112 minutos	66,33333333	2,82	4,99	14,0718	5,056160397
113 minutos	66,5	2,82	5,01	14,1282	5,076425569
114 minutos	67,83333333	2,82	5,01	14,1282	5,076425569
115 minutos	67,66666667	2,8	5	14	5,030361827
116 minutos	67,66666667	2,82	5,01	14,1282	5,076425569
117 minutos	68	2,82	4,92	13,8744	4,985232295
118 minutos	67,5	2,82	4,82	13,5924	4,883906435
119 minutos	67	2,82	4,85	13,677	4,914304193
120 minutos	66,66666667	2,82	4,92	13,8744	4,985232295
121 minutos	68,16666667	2,83	4,92	13,9236	5,002910424
122 minutos	69,16666667	2,83	4,98	14,0934	5,063921526
123 minutos	68,83333333	2,82	4,95	13,959	5,015630053
124 minutos	69	2,83	4,92	13,9236	5,002910424
125 minutos	69,5	2,83	4,95	14,0085	5,033415975
126 minutos	69,16666667	2,82	4,88	13,7616	4,944701951
127 minutos	69	2,81	4,92	13,8252	4,967554166

128 minutos	70	2,8	4,83	13,524	4,859329525
129 minutos	69,5	2,8	4,89	13,692	4,919693867
130 minutos	70,16666667	2,8	4,9	13,72	4,92975459
131 minutos	70,16666667	2,8	4,92	13,776	4,949876038
132 minutos	69,83333333	2,79	4,93	13,7547	4,942222701
133 minutos	69,66666667	2,79	4,95	13,8105	4,962272286
134 minutos	69,16666667	2,79	4,96	13,8384	4,972297079
135 minutos	69	2,8	4,91	13,748	4,939815314
136 minutos	68,66666667	2,79	4,88	13,6152	4,892098739
137 minutos	69,16666667	2,79	4,82	13,4478	4,831949984
138 minutos	68,33333333	2,78	4,91	13,6498	4,904530919
139 minutos	67,33333333	2,78	4,88	13,5664	4,874564335
140 minutos	67,5	2,79	4,85	13,5315	4,862024361
141 minutos	68,33333333	2,79	4,89	13,6431	4,902123531
142 minutos	68,33333333	2,79	4,89	13,6431	4,902123531
143 minutos	69	2,79	4,95	13,8105	4,962272286
144 minutos	69,83333333	2,79	4,78	13,3362	4,791850814
145 minutos	70	2,8	4,75	13,3	4,778843735
146 minutos	70,33333333	2,8	4,74	13,272	4,768783012
147 minutos	70,5	2,79	4,67	13,0293	4,681578096
148 minutos	70,33333333	2,78	4,67	12,9826	4,664798247
149 minutos	69,5	2,79	4,85	13,5315	4,862024361
150 minutos	70	2,78	4,87	13,5386	4,864575473
151 minutos	70,16666667	2,77	4,7	13,019	4,677877187
152 minutos	70,66666667	2,78	4,82	13,3996	4,814631167
153 minutos	71,33333333	2,78	4,81	13,3718	4,804642305
154 minutos	71,33333333	2,78	4,82	13,3996	4,814631167
155 minutos	71,83333333	2,77	4,83	13,3791	4,80726528
156 minutos	72,83333333	2,77	4,81	13,3237	4,787359419
157 minutos	73,16666667	2,78	4,79	13,3162	4,784664583
158 minutos	73,5	2,78	4,76	13,2328	4,754697999
159 minutos	74,33333333	2,77	4,77	13,2129	4,747547699
160 minutos	75,16666667	2,76	4,79	13,2204	4,750242535
161 minutos	75,66666667	2,76	4,82	13,3032	4,779993532
162 minutos	76,83333333	2,76	4,81	13,2756	4,770076533
163 minutos	78,16666667	2,76	4,79	13,2204	4,750242535
164 minutos	78,5	2,76	4,73	13,0548	4,690740541
165 minutos	78,33333333	2,76	4,72	13,0272	4,680823542
166 minutos	79,5	2,75	4,74	13,035	4,683626172
167 minutos	79,66666667	2,76	4,71	12,9996	4,670906543
168 minutos	80,66666667	2,76	4,74	13,0824	4,70065754
169 minutos	81	2,76	4,69	12,9444	4,651072545
170 minutos	81,83333333	2,76	4,68	12,9168	4,641155546
171 minutos	83,66666667	2,76	4,7	12,972	4,660989544
172 minutos	84,5	2,77	4,73	13,1021	4,707735978

173 minutos	85	2,76	4,73	13,0548	4,690740541
174 minutos	84,83333333	2,76	4,75	13,11	4,710574539
175 minutos	85,16666667	2,76	4,72	13,0272	4,680823542
176 minutos	85,16666667	2,74	4,7	12,878	4,627214257
177 minutos	86,83333333	2,76	4,72	13,0272	4,680823542
178 minutos	87,33333333	2,76	4,73	13,0548	4,690740541
179 minutos	88,5	2,76	4,74	13,0824	4,70065754
180 minutos	89,5	2,76	4,73	13,0548	4,690740541
181 minutos	90,83333333	2,75	4,7	12,925	4,644101901
182 minutos	91,66666667	2,73	4,66	12,7218	4,571089792
183 minutos	93	2,7	4,57	12,339	4,433545327
184 minutos	93	2,69	4,63	12,4547	4,475117675
185 minutos	94,83333333	2,69	4,7	12,643	4,542776041
186 minutos	95,66666667	2,68	4,69	12,5692	4,516258848
187 minutos	96	2,67	4,6	12,282	4,413064568
188 minutos	96,83333333	2,67	4,57	12,2019	4,384283712
189 minutos	98	2,67	4,5	12,015	4,317128382
190 minutos	98,83333333	2,66	4,52	12,0232	4,320074737
191 minutos	98,5	2,66	4,46	11,8636	4,262728612
192 minutos	99,33333333	2,65	4,53	12,0045	4,313355611
193 minutos	99,5	2,65	4,54	12,031	4,322877367
194 minutos	100	2,65	4,5	11,925	4,284790342
195 minutos	99,83333333	2,65	4,43	11,7395	4,218138048
196 minutos	100	2,64	4,55	12,012	4,316050447
197 minutos	100,83333333	2,65	4,46	11,819	4,246703316
198 minutos	101,83333333	2,66	4,5	11,97	4,300959362
199 minutos	102,1666667	2,65	4,49	11,8985	4,275268585
200 minutos	103,6666667	2,65	4,45	11,7925	4,23718156
201 minutos	103,5	2,65	4,46	11,819	4,246703316
202 minutos	105,5	2,65	4,41	11,6865	4,199094535
203 minutos	106,1666667	2,64	4,4	11,616	4,17376307
204 minutos	106,33333333	2,65	4,39	11,6335	4,180051022
205 minutos	106,33333333	2,63	4,37	11,4931	4,129603679
206 minutos	106,33333333	2,64	4,34	11,4576	4,116848119
207 minutos	106,1666667	2,64	4,35	11,484	4,126333944
208 minutos	106	2,65	4,33	11,4745	4,122920484
209 minutos	106,1666667	2,64	4,35	11,484	4,126333944
210 minutos	106,1666667	2,64	4,29	11,3256	4,069418993