



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática / Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**DETECTOR FLY EYE PARA A
DETERMINAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR
LOCAL**

Lucas Barbosa da Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador
21 de janeiro de 2022

LUCAS BARBOSA DA SILVA

**DETECTOR FLY EYE PARA A DETERMINAÇÃO DA
IRRADIÂNCIA SOLAR LOCAL**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Co-orientador: Prof. Dr. Vitor Leão Filardi

Co-orientador: Prof. MSc. Leandro do Rozario Teixeira

Salvador

21 de janeiro de 2022

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Barbosa da Silva, Lucas

Detector fly eye para a determinação da irradiância solar local / Lucas Barbosa da Silva. -- Salvador, 2022.

104 f. : il

Orientador: Iuri Muniz Pepe.

Coorientador: Leandro do Rozario teixeira.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Mecatrônica) -- Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia, 2022.

1. Solar. 2. Radiômetro Solar. 3. Fly eye. 4. Irradiância Solar. 5. Sistema de aquisição de dados. I. Muniz Pepe, Iuri. II. do Rozario teixeira, Leandro . III. Título.

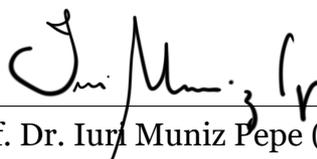
Termo de Aprovação

Lucas Barbosa da Silva

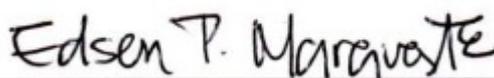
Detector fly eye para a determinação da irradiância solar local.

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia.

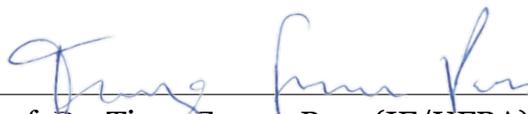
Salvador, 21 de janeiro de 2022



Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe (PPGM)



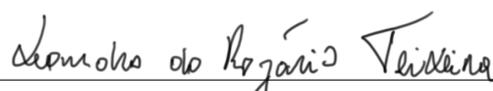
Prof. Dr. Edson Pereira Marques Filho (IF/UFBA)



Prof. Dr. Tiago Franca Paes (IF/UFBA)



Prof. Dr. Vitor Leão Filardi (IFBA)



Prof. Me. Leandro do Rozário Teixeira (IF/UFBA)

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, coragem e superação em diversos momentos para concluir este trabalho.

Agradeço incondicionalmente a minha mãe Dona Maria da Glória pela sua incrível confiança que sempre me passou. Jamais teria conseguido sem você.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe pela oportunidade oferecida, pelos votos de confiança e conselhos que foram dados. Agradeço também ao meu coorientador, Dr. Vitor Leão Filardi por sempre disponibilizar tempo e conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os membros da equipe do Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO) do instituto de Física da UFBA por todo o conhecimento compartilhado e ajuda que auxiliaram de alguma forma na realização desta pesquisa.

Agradeço em especial a Leandro Teixeira, Vulgo “Cabeça”, por ser um colega dedicado, atencioso e conselheiro.

Por fim, agradeço programa de pós-graduação em mecatrônica (PPGM) da UFBA e a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

—EM TODO TRABALHO HÁ PROVEITO, MAS A PALAVRA
DOS LÁBIOS SÓ ENCAMINHA PARA A POBREZA.
PROVÉRBIOS 14:23

RESUMO

Ao longo da última década o aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica tem apresentado números cada vez maiores. Em geral, sistemas de conversão de energia solar em elétrica é realizada por módulos fotovoltaicos planos, instaladas previamente com inclinação determinada em função da latitude do local de instalação e em estruturas fixas. Neste sentido, a utilização de estruturas moveis ou com diferente topologia, tem possibilitado o incremento da produção e estudo da energia solar.

Nessa dissertação foi revisitada a literatura sobre biomimética, o sol como fonte de energia e as diferentes tecnologias empregadas na confecção de células solares, bem como o seu funcionamento, o que contribuem para um conhecimento mais amplo sobre a constituição deste dispositivo.

De modo a contribuir com pesquisas em energia fotovoltaica e estudo da irradiância solar, este trabalho propõe um detector solar de topologia *fly eye* com potencial de aferir a insolação local. O equipamento permite observar a dinâmica da radiação solar durante as diferentes estações do ano.

Foram estabelecidos confrontos entre os resultados obtidos nesta dissertação referentes as estações do ano, desta forma, se averiguar o nível médio de irradiância em cada estação e a relação com o ângulo de inclinação da célula solar no dispositivo que foram usadas como sensor de radiação.

Palavras-chave: Solar, Radiômetro solar, Energia, *Fly eye*, Irradiância solar, CdTe, Sistema de aquisição de dados.

ABSTRACT

Over the last decade, the use of solar energy to generate electricity has shown increasing numbers. In general, solar-electric energy conversion systems are carried out by flat photovoltaic modules, previously installed, provided based on the local latitude of installation and in fixed structures. In this sense, the use of mobile structures or structures with different topology has enabled the increase in the production and study of solar energy.

This dissertation revisited the literature on biomimetics, the sun as a source of energy and the different technologies used in the manufacture of solar cells, as well as their functioning, which contribute to a broader understanding of the constitution of this device.

In order to contribute to research in photovoltaic energy and the study of solar irradiance, this work proposes a fly eye topology solar detector with the potential to measure local insolation. The equipment allows you to observe the dynamics of solar radiation during the different seasons of the year.

Confrontations were established between the results obtained in this dissertation referring to the seasons of the year, in this way, to verify the average level of irradiance in each season and the relationship with the inclination angle of the solar cell in the device that were used as a radiation sensor.

Keywords: Solar energy, solar radiometer, *fly eye*, solar irradiance, CdTe, Data acquisition system.

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	1
1.1 O Problema	1
1.2 OBJETIVOS	6
1.2.1 Objetivos Geral	6
1.2.2 Objetivos Específicos	6
1.3 RESULTADOS ESPERADOS	7
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	7
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 O SOL	9
2.2 Movimento aparente do Sol	11
2.3 Radiação Solar e espectro eletromagnético	12
2.4 Radiação Térmica	14
2.5 O Corpo Negro	14
2.6 Radiação solar na superfície terrestre e determinação da constante solar .	16
2.7 Radiação em superfícies planas e inclinadas	17
2.8 Os semicondutores	18
2.9 Células solares	20
2.10 PRINCÍPIOS ELÉTRICOS	22
2.11 Influência da irradiância e temperatura em uma célula solar	24
2.12 Células solares de CdTe/CdS	25
2.13 Sensores de radiação solar	27
2.14 ADC - Conversor de analógico para digital	29
Capítulo 3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 SÍTIOS EXPERIMENTAIS	31
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	32
3.3 Sensor	33
3.3.1 Células Fotovoltaicas	33
3.4 ESTRUTURA MECÂNICA	35
3.4.1 Domo de acrílico	35
3.4.2 Montagem do detector	35
3.5 BANCO DE CARGA E SISTEMA DE AQUISIÇÃO	37
3.5.1 Banco de carga	37
3.5.2 Sistema de aquisição de dados (SAD)	40

3.5.3	Software de aquisição	42
3.5.4	Calibração das células solares e determinação individual de suas sensibilidades	43
Capítulo 4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	TESTES DE CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS	47
4.2	DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO SÓLIDO DO FLY EYE	47
4.3	METODOLOGIA DA AQUISIÇÃO DE DADOS	53
4.4	ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS ESTAÇÕES DO ANO	53
4.5	ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO EM FUNÇÃO DA TOPOGRAFIA DO DETECTOR	60
4.6	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA	65
Capítulo 5.	CONCLUSÕES	69
Capítulo 6.	TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICES	77
	APÊNDICE I - Diagrama do sistema de aquisição PIC18F4553.....	79
	APÊNDICE II – Desenho Técnico caixa Steck	81
	APÊNDICE III – Desenho Técnico Case da célula Solar	82
	APÊNDICE IV - Desenho Técnico Domo de acrílico	83

LISTA DE FIGURAS

1.1	Figura 1.1- Matriz elétrica brasileira em 2020.	2
1.2	- Espiral do Design Biomimético.	3
1.3	- Ornitóptero de Leonardo da Vinci.	4
1.4	- <i>Fly's eye dome</i>	4
1.5	-A imagem (a) mosca <i>Houseflies</i> e na imagem (b) célula de perovskita.	5
2.1	-Estrutura simplificada com as regiões do interior do Sol e de sua atmosfera	10
2.2	-Representação da posição solar durante o movimento de translação.	11
2.3	-Descrição do movimento aparente do sol.	12
2.4	-Componentes elétricos e magnéticos da radiação eletromagnética em forma de onda.	13
2.5	-Espectro eletromagnético na faixa entre micro-ondas e raios gama.	14
2.6	-Distribuições de comprimento de onda da radiação eletromagnética de corpos negros para diferentes temperaturas, determinada pela equação (7) de Planck.	16
2.7	-Relação geométrica simplificada Terra-Sol.	17
2.8	-Feixe de radiação em superfícies horizontais e inclinadas.	18
2.9	-Ligação covalente de silício: (a) a temperatura de 0 K; (b) a temperatura de 300 K.	19
2.10	-Diagrama de banda de energia na junção p-n.	21
2.11	-Esquema de uma célula solar fotovoltaica.	21
2.12	-Circuito de uma célula solar real.	23
2.13	-Curvas típicas de uma célula, corrente-tensão.	24
2.14	-(a) Efeito do aumento da irradiação; (b) Efeito do aumento da temperatura celular.	25
2.15	-(a) Diagrama esquemático de uma célula solar de CdTe/CdS convencional.	26
2.16	- Comparação da eficiência teórica das células solares (pontilhada) para irradiância espectral AM1.5 versus <i>bandgap</i> e coeficiente de absorção. Em relação a materiais mais comumente utilizados na fabricação de células solares.	27
2.17	- Piranômetro de termopilha.	28
2.18	- Sistema de aquisição de dados.	29
3.1	- Sítio experimental utilizado no projeto. Vista superior do Instituto de Física da universidade Federal da Bahia (IF-UFBA).	32
3.2	- Diagrama geral das etapas do sistema.	33
3.3	- Luminária estilo balizadora solar.	34

3.4	- Célula solar com case em ABS.	34
3.5	- Domo de acrílico.	35
3.6	- Vista superior do detector de topologia <i>fly eye</i>	36
3.7	- Vista da parte interna domo com a cablagem das células solares.	37
3.8	- (a) montagem do banco de carga resistiva com a carga (RL) conectada afastada da célula. (b) montagem do banco de carga resistiva com a carga (RL) conectada próxima da célula.	38
3.9	-Caixa de passagem modelo Light SSX161.	39
3.10	-Banco de carga resistiva abrigado na parte interna domo.	39
3.11	- Acrílico de proteção.	40
3.12	- Vista do hardware de aquisição de dados (Unidade aberta).	42
3.13	-Software de aquisição de dados (DataPlotterMT).	43
3.14	-Gráfico apresentando o espectro do LED Full Spectrum, espectro solar e da célula CdTe/Cds.	44
3.15	- Sistema de calibração dos sensores.	46
4.1	- Diagrama do aparato experimental utilizado para determinar a perda da eficiência dos sensores e ângulo sólido do detector.	48
4.2	- Gaussiana que representa o estímulo em tensão a partir do ângulo de incidência.	49
4.3	- Curva da intensidade de corrente normalizada x ângulo incidente.	50
4.4	- Ângulo sólido do detector <i>fly eye</i> com atenuação de -4dB e -3db respectivamente.	51
4.5	- Ângulo sólido do detector <i>fly eye</i> com atenuação de -2dB e -1,5db respectivamente.	51
4.6	- Ângulo sólido do detector <i>fly eye</i> com atenuação de -1dB.	52
4.7	- Gráfico do limiar de detecção imposto às células solares da borda inferior do <i>fly eye</i> em função do ângulo sólido em função.	52
4.8	- Gráfico em barra Outono 2020.	54
4.9	- Gráfico em barra Primavera 2020.	54
4.10	- Gráfico em barra Primavera 2020.	55
4.11	- Gráfico em barra Verão 2020.	55
4.12	- Gráfico dos valores integralizados para cada estação do ano.	56
4.13	- Soma das conatgens de ADC e W/m^2	57
4.14	- Soma das médias por estação em conatgens de ADC e W/m^2 <i>fly eye</i>	58
4.15	- Gráfico a irradiância entre um radiômetro profissional e o <i>fly eye</i>	59
4.16	- Comparação entre CNR1 e o <i>fly eye</i>	60
4.17	- Outono de 2020, vista superior.	61
4.18	- Outono de 2020, vista isométrica.	61
4.19	-Inverno de 2020, vista superior.	62
4.20	-Inverno de 2020, vista isométrica.	62
4.21	-Primavera de 2020, vista superior.	63
4.22	-Primavera de 2020, vista isométrica.	63

4.23 - Verão 2021, vista superior.	64
4.24 - Verão 2021, vista isométrica.	64
4.25 - Mapa de calor das intensidades médias ao longo do dia 03/10/2020. (a) de 6:00 até 8:00; (b) de 8:00 até 10:00; (c) de 10:00 até 12:00; de 12:00 até 14:00; de 14:00 até 16:00; e de 16:00 até 18.	65
4.26 - Gráfico comparativo da perda de eficiência das células do <i>fly eye</i>	66
4.27 - Gráfico comparativo da perda de eficiência média do detector <i>fly eye</i>	67

LISTA DE TABELAS

4.1 - Local e datas que foram realizadas a aquisição de dados.	53
--	----

Capítulo

1

Neste capítulo será feita uma breve contextualização do trabalho, apresentando também os objetivos e estrutura.

INTRODUÇÃO

1.1 O PROBLEMA

A capacidade de produção de energia elétrica brasileira é composta em sua maioria por usinas hidrelétricas. A opção por este modelo, se justifica por dois fatores, a existência de grandes rios de planalto, promovido por chuvas tropicais e seu menor custo no aspecto operacional. Em contrapartida, os impactos ambientais provenientes desse modelo de produção elétrica e os apelos sociais restringem a expansão do uso das usinas hidrelétricas (Rodrigues, 2013).

Diante da necessidade de reduzir os efeitos das mudanças climáticas e de proporcionar a segurança energética ao país, a energia solar surge como uma alternativa sustentável, o que determina uma diminuição na liberação de dióxido de carbono na atmosfera e assegurando a produção de energia elétrica sustentável (Da Cruz, 2020).

A humanidade tem buscado a diversificação da matriz energética com intuito de impulsionar a utilização das fontes de energia renováveis, e cada vez menos utilizar as fontes oriunda de combustíveis fósseis, como o petróleo. Dentro desse contexto, os potenciais da biomassa, da irradiação solar e da força dos ventos podem garantir a autossuficiência energética do país (Bronzatti, 2008).

A **Figura 1.1** ilustra a matriz elétrica brasileira em 2020, o gráfico indica a fonte solar fotovoltaica como 7^a maior fonte do Brasil. Atualmente, o Brasil conta com grandes usinas solares fotovoltaicas operando nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, espalhadas por 9 estados, com destaque para Bahia, Minas Gerais e Piauí com os maiores potenciais de geração (Da rosa Robson, 2016). Segundo os estudos realizados pelo Plano Nacional de Energia - PNE 2030, entre os anos de 1974 e 2004 o crescimento da demanda de energia, utilizando usinas hidrelétricas em termos de potência instalada, subiu aproximadamente 5 vezes, saindo dos 13.724 MW para 69.000 MW (Tolmasquim, 2007).

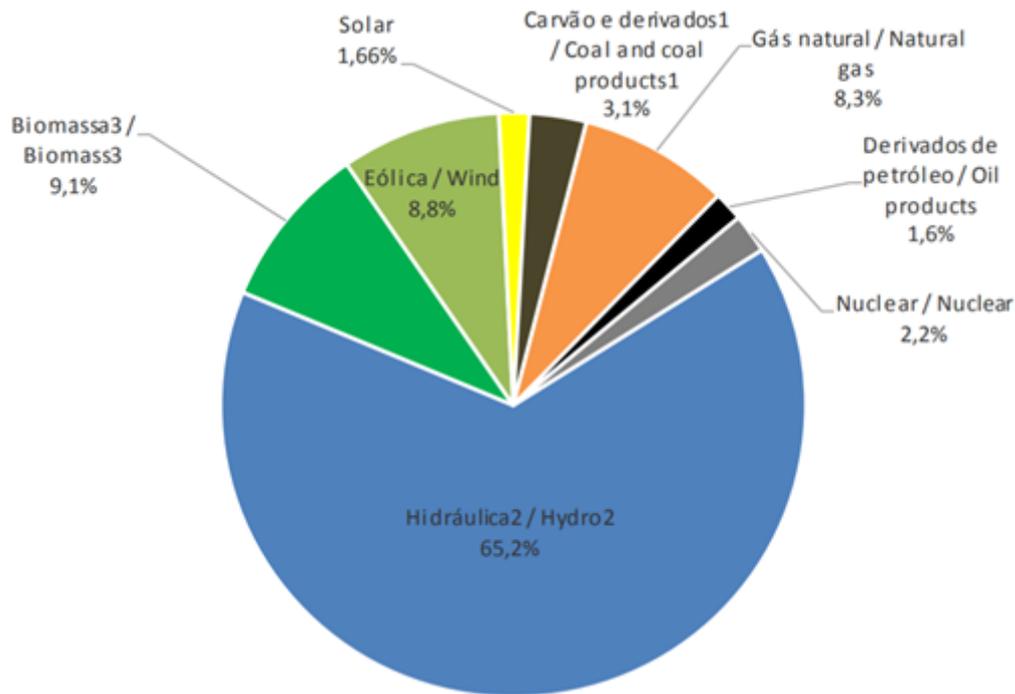


Figura 1.1 Figura 1.1- Matriz elétrica brasileira em 2020.

Fonte: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2021.

Os reflexos dos incentivos para viabilização da energia fotovoltaica na geração de energia elétrica têm quase dois séculos de história com a busca pela otimização dos materiais que fazem foto-conversão e, conseqüentemente, a redução dos custos com o aumento na produtividade. Essa tendência muito se deve ao fato que a energia fotovoltaica é considerada uma fonte de energia limpa e de longa vida (Knabben et al. 2018).

O Brasil possui um favorecimento natural no que se diz respeito a energia solar. Dentre esses, pode-se citar a sua localização: a maior parte deste país se encontra numa região intertropical, zona mais quente do planeta, refletindo assim nos elevados níveis de insolação do país (Atlas Brasileiro, 2017).

A utilização de energias oriundas de reserva renováveis tem ligação direta com a redução de emissões de gases poluentes na atmosfera, como foi acordado no protocolo de Kyoto em 1997.

No que diz respeito ao fomento à geração da energia solar, o Brasil tem como meta obter em sua matriz energética 46,1% de fontes renováveis e alcançar, até 2030, uma redução de 43% das emissões de gases poluentes (Pereira, 2019).

Como apoio ao esforço da geração mais eficiente de energia solar e aos estudos científicos que exigem este esforço, surgem instrumentos e produtos desenvolvidos a partir de analogias direta com a natureza. A inspiração para estes novos produtos vem de sistemas naturais e da reprodução de seus princípios. Essa busca de contribuições relevantes por mímica da natureza é conhecida como Biomimética.

Esta técnica inventiva tem como objetivo principal trazer contribuições da natu-

reza para o campo da inovação de processos e produtos, através da adoção de padrões geométricos/matemáticos ou por analogia direta com a natureza, onde processos e estruturas naturais são imitados de forma direta, dando nascimento ou fazendo parte de equipamentos e sistemas produzidos pelo homem (Detanico, 2010). Uma boa comparação, no que se refere a captação de energia solar, são as plantas. Elas usam a luz solar no processo fotoquímico chamado fotossíntese, convertendo o dióxido de carbono em açúcares, que vão atuar como combustível líquido nos processos próprios das plantas. Com isso, é possível considerar o processo de coleta artificial de energia solar advinda de uma célula fotovoltaica como uma bioinspiração (Martín-Pal, a, 2013).

A partir da década de 50, foram descobertos documentos de carácter científico nos quais constavam inúmeros termos sobre essa relação entre a natureza e a engenharia. Neste mesmo período, o engenheiro biomédico Otto H. Schmitt fez uso da terminologia Biomimética pela primeira vez, que deriva do grego bios (vida) e mimesis (imitação) (ARRUDA, 2017).

A metodologia para aplicação dos conceitos inspirados pela natureza, desenvolvem-se a partir de cinco linhas gerais. Segundo Janine Benyus, pesquisadora do *Biomimicry Institute* nos EUA, em seu livro *Biomimética: inovação inspirada pela natureza*, essas etapas metodológicas podem ser ilustradas na “Espiral do Design Biomimético”. Essa espiral descreve os processos essenciais para o desenvolvimento do design baseados naquilo que a natureza previamente desenvolveu como soluções. Essa espiral pode ser vista na **Figura 1.2**. A sequência das etapas na espiral tem um ponto de partida, porém, essas etapas podem ser interpretadas de diferentes maneiras e seguindo as análises de estudo sem um ponto de partida fixo. Sendo assim, cada caso pode sugerir deduções e argumentações obtidas nas etapas anteriores (Meira, 2008).

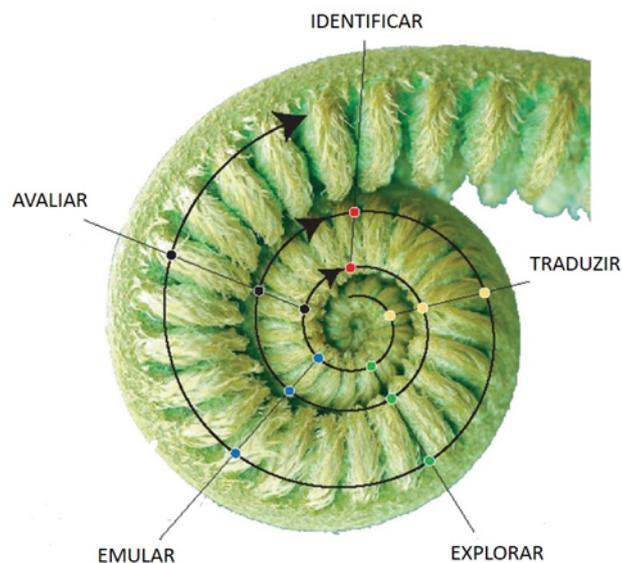


Figura 1.2 - Espiral do Design Biomimético.

Fonte: Adaptada retirada site <http://biomimicryfordesigners.blogspot.com>

Historicamente existem bons exemplos de inspiração advinda da natureza. A **Figura 1.3** retrata um desses exemplos. Ela mostra um dos trabalhos de Leonardo da Vinci, considerado por muitos um dos maiores gênios renascentistas. O termo biomimética não era conhecido por ele nessa época, porém nos seus estudos sobre a aerodinâmica de voo realizado em 1840, observou e descreveu a forma com que as aves manejavam o ar para conseguir elevação e sustentação. Séculos mais tarde esse estudo sobre o deslocamento das aves, teve um importante papel no desenvolvimento do avião (Vieira, 2015).



Figura 1.3 - Ornitóptero de Leonardo da Vinci.
Fonte: Arruda (2017)

Quase um século mais tarde, precisamente em 1965, Richard B. Fuller desenvolveu e projetou com base na inspiração da natureza, uma cúpula em formato olho de mosca como conceito de engenharia para moradia. Nasceria assim, uma casa sustentável e portátil, podendo ser facilmente desmontada, transportada e remontada. Seu apelo ao equilíbrio do ecossistema permeia energia solar e um sistema de coleta de água da chuva. A imagem da **Figura 1.4** retrata a casa concebida por Fuller (Soares, 2016).



Figura 1.4 - *Fly's eye dome*.
Fonte: Adaptada Soares (2016)

Fica explícito que a ideia da utilização da energia solar não é nova. Consta da história que o cientista e grande inventor Arquimedes de Siracusa (287 a.C - 212 a.C) utilizou a energia solar a partir da manipulação de escudos de bronze extremamente polidos, dispostos de maneira a refletir a radiação solar. Concentrando-a em um ponto sobre o casco de embarcações inimigas, com o propósito de destruí-las. Esse conto histórico de Arquimedes, remete a um exemplo da exploração da energia solar com fins térmicos (Moura, 2001).

Contudo, as novas perspectivas surgidas no século XX oriundas da física moderna, tornaram possíveis novos modos de utilização da energia produzida pelo Sol. Um bom exemplo ocorreu em 1839, quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel, de modo experimental, realizou observação do efeito fotoelétrico. Esse efeito pode ser observado, quando uma superfície metálica ou semicondutora sendo exposta à luz em uma dada faixa de frequência, gera corrente elétrica, resultando na liberação de elétrons ligados ao átomo, que passam a circular na forma de corrente elétrica (Chiadini, 2011).

No que diz respeito as células solares, elas podem ser produzidas por diferentes materiais, pelo uso diferentes tecnologias e com diferentes formatos. No ano de 2017 pesquisadores da Universidade de Stanford desenvolveram um conceito de célula solar inspirada em olho de mosca. O material da célula em questão era a perovskita, nome dado ao mineral titanato de cálcio (CaTiO_3). A opção pelo design *fly eye* para formato da célula, teve por finalidade inicial aumentar a rigidez mecânica da célula solar, o que seria o grande desafio para a produção de um painel fotovoltaico de perovskita. Já que este material apresenta grande instabilidade mecânica quando exposto às intempéries.

As moscas utilizadas como fonte de inspiração foram do tipo *Houseflies* (mosca doméstica). Ao analisar seus olhos em microscópio eletrônico de alta resolução, cientistas notaram ondulações extremamente finas na estrutura, caracterizadas por distância regulares de 250 nanômetros. Outro fato interessante é o seu campo de visão. Como seus olhos são relativamente grandes em comparação ao seu corpo, dentro de um plano horizontal o campo de visão desse inseto pode chegar aos incríveis 270 graus. Isso em comparação ao campo de visão do olho humano, equivalente a 63% desse valor, algo em torno de 170 graus (Chiadini, 2011).

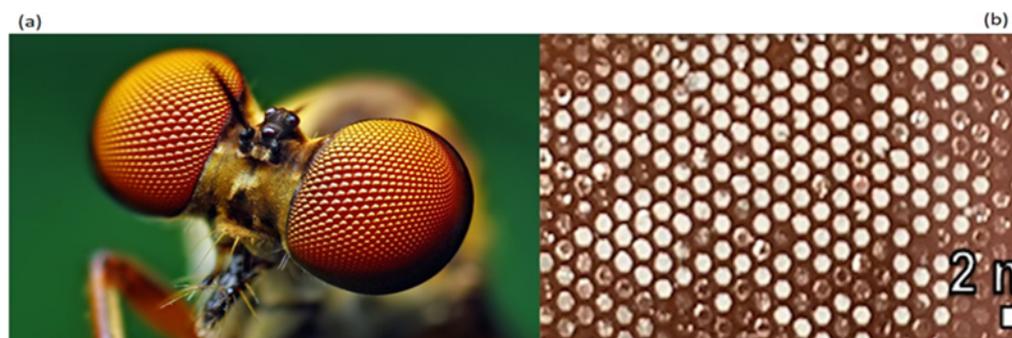


Figura 1.5 -A imagem (a) mosca *Houseflies* e na imagem (b) célula de perovskita.
Fonte: Chiadini (2017)

Para a bióloga Janine Benyus, a Biomimética nasce como um facilitador da compreensão do meio natural e das suas diferentes facetas, promovendo assim, uma melhor adequação do homem em quanto ser natural, dependente do bioma e do ecossistema. Há quase 4 bilhões de anos a natureza molda com refinadas soluções e propósitos lógicos os seres vivos, resolvendo os mais diversos problemas de adaptação desses seres ao ambiente. Com isso, a análise da complexidade do ecossistema natural leva, de forma mais coerente e direta, ao equilíbrio entre o humano e a natureza. Tendo o potencial de trazer para humanidade benefícios tecnológicos simplificados e robustos (Arruda, 2017).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetvos Geral

O objetivo deste trabalho foi a construção de um detector da irradiância solar com topologia do tipo *fly eye*, para a determinação da intensidade da luz do Sol em uma dada região da superfície terrestre. Este detector contou com um sistema para aquisição de dados em tempo real, possibilitando a tomada automatizada de dados de longa duração, durante mais de 11 meses. O dispositivo utilizou células solares de CdTe (Telureto de Cádmio) como unidade de sensoriamento. Estes sensores são conhecidos por sua resposta espectral adaptada ao espectro solar. Esse detector foi capaz de aferir o movimento aparente do Sol, o *fly eye* possibilitou o estudo da distribuição da insolação local ao longo do dia e ao longo das estações do ano.

1.2.2 Objetivos Específicos

(i) Projetar, desenvolver e montar a estrutura mecânica, elétrica e de cabeamento de sinal de um detector tipo *fly eye*, dotado de 17 células de CdTe/CdS com área ativa de 40 x 40 mm e de fácil transporte (com cerca de 600 mm de diâmetro).

(ii) Projetar e desenvolver um dispositivo para calibração das células solares, valendo-se de uma pastilha de LED com o propósito de calibrar e equalizar os 17 sensores.

(iii) Montar um banco de carga resistiva para as 17 células solares com resistores de precisão usado como sensor da fotocorrente gerada pelas células solares de sensoriamento.

(iv) Projetar, desenvolver e montar uma unidade de aquisição composta por hardware, com a finalidade de realizar a leitura de 17 canais, além de um *software* de medição e monitoramento.

(v) Realizar testes de validação e calibração do protótipo.

(vi) Implementar sistema de plotagem gráfica e de mapa de calor, para melhor visualização e interpretação dos dados obtidos, ambos os sistemas em plataforma MATLAB.

(vii) Realizar aferição da irradiância solar durante as diferentes horas do dia e as diferentes estações do ano (primavera, verão, outono e inverno).

(viii) Analisar os resultados obtidos.

1.3 RESULTADOS ESPERADOS

Ao final deste trabalho esperava-se que o detector, em conjunto com o seu sistema de aquisição de dados fosse capaz de aferir a irradiância solar local, bem como a distribuição da insolação ao longo do dia e ao longo das diferentes estações do ano.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 6 (seis) capítulos, inicialmente é feita (I) a descrição do projeto, (II) a determinação do estado da arte, seguida pelo (III) desenvolvimento do detector *fly eye*, (IV) a avaliação dos resultados, (V) as conclusões e (VI) as perspectivas para trabalhos futuros.

O texto está estruturado em capítulos que dividem e organizam o conteúdo, de forma a facilitar a compreensão, descrevendo uma evolução lógica da linha de raciocínio proposta no trabalho.

Neste capítulo é realizada uma breve exposição de conceitos relativos ao tema abordado como: (i) Sol, (ii) radiação solar e o espectro eletromagnético, (iii) semicondutores, (iv) o estudo sobre células solares, (v) sensores de radiação solar. Serão também apresentados conceitos sobre conversor analógico digital e suas principais aplicações.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O SOL

Pela circunjunção com o planeta Terra, o Sol se torna a sua principal fonte de energia e luz. De forma geral, o Sol é uma esfera gigante de gás incandescente, que em seu núcleo ocorre a geração de energia mediante reações termonucleares. O núcleo solar é a região de maior densidade e temperatura, aproximadamente 10^7 K, e pressão superior a 340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar (Haag, 2007).

Estruturalmente o Sol pode ser dividido em duas partes: o interior solar e a atmosfera solar. Em particular, esse modelo de organização não atende todas as estrelas do universo, essa é uma classificação simplificada e tem relação com a parcela de massa da estrela. É importante lembrar que existem estrelas menos e mais massivas no universo, que serão melhor caracterizada por diferentes modelos de organização estrutural.

As estrelas ditas de baixa massa, tem uma evolução estelar mais lenta, quando comparadas às estrelas de grandes massas, o que relativiza o consumo de hidrogênio (H) em seu núcleo. Para uma estrela como o Sol, estima-se que o consumo de hidrogênio ocorrerá por longos 10 milhões de anos (Cecatto, 2009). Sua estrutura, pode ser classificada pelas regiões: núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa solar, como ilustrado na **Figura 2.1**.

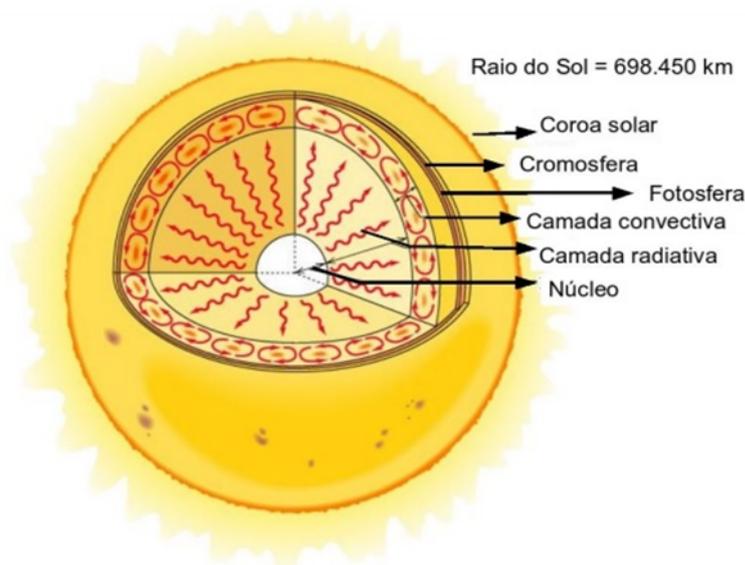


Figura 2.1 -Estrutura simplificada com as regiões do interior do Sol e de sua atmosfera
Fonte: HAAG (2007)

Na estrutura interna do Sol, encontra-se a zona radiativa. Essa região sucede o núcleo, por este motivo a sua energia advém da radiação proveniente dessa camada mais interna. Acima da zona radiativa está a zona convectiva, responsável pelo transporte de energia que ocorre por convecção térmica. Nesse processo a transmissão de calor ocorre quando o transporte de energia térmica se faz pelo transporte de matéria, isso em função da diferença de densidade e ação da gravidade.

Já a estrutura da atmosfera solar é composta pela fotosfera, também conhecida como a superfície radiante do Sol, primeira região da atmosfera solar, sendo assim é uma camada aparente e com temperatura de 5.800 K (Costa Jr, 2011).

A cromosfera que se encontra sobre a fotosfera tem como principal característica ser uma camada rarefeita e com temperatura próxima de 4.300 K em sua base, enquanto seu topo está a mais de 40.000 K. Comumente, a cromosfera não é visível a olho nu, essa invisibilidade tem relação com os baixos níveis de radiação emitidos por esta camada, quando comparado com a fotosfera.

A coroa é considerada como a zona mais rarefeita da atmosfera solar, já que progressivamente ela se funde com a cromosfera, sendo essa a camada mais externa do sol, sua temperatura é de aproximadamente 10^6 K. O vento solar tem sua origem na coroa em função da grande diferença de pressão entre esta estrutura e o espaço vazio entre o Sol e os planetas, o que possibilita a formação e expansão do vento solar que pode chegar a uma distância considerável do Sol (Costa Jr, 2011).

No passado, mais precisamente no século IXX, astrônomos desconfiaram que a energia gerada pelo Sol não poderia ter a combustão como causa. Uma vez que a energia gerada dessa maneira manteria o Sol radiante por aproximadamente 10 mil anos. Em 1937, Hans Albrecht propôs que a energia gerada pelo Sol era consequência de reações

termonucleares, em que prótons eram fundidos em núcleo de hélio liberando energia. A partir disso, conclui-se que o Sol possui hidrogênio para alimentar essas reações por bilhões de anos, ou uma potência equivalente total de 4×10^{24} W (E. Costa et al, 2011).

2.2 MOVIMENTO APARENTE DO SOL

O conhecimento do movimento da Terra em relação ao Sol é indispensável para uma melhor compreensão das mudanças de estações. Porém, o movimento aparente do Sol com relação ao horizonte local, causado pela rotação da terra em torno do seu eixo, altera o ângulo no qual a componente da luz atinge a Terra.

A **Figura 2.2** ilustra o movimento de rotação e de translação da Terra, bem como o solstício e o equinócio que tem ligação direta com as mudanças das estações climáticas.

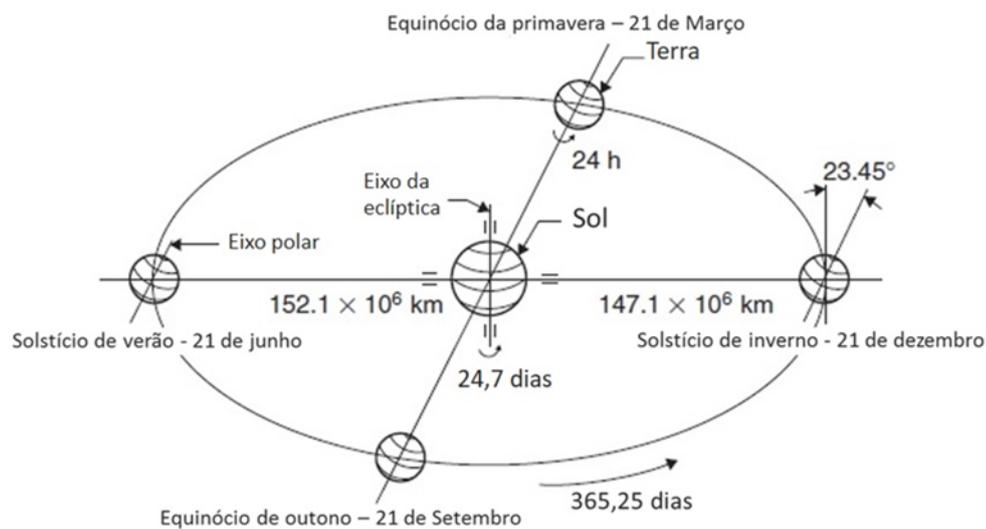


Figura 2.2 -Representação da posição solar durante o movimento de translação.

Fonte: Kalogirou (2013)

Para uma melhor compreensão do movimento solar, pode-se considerar a órbita da Terra em torno do Sol aproximadamente circular. Simplificando a análise do movimento a partir da visão Ptolomaica, que por sua vez, foi fundamentada na filosofia Aristotélica, considerando a Terra fixa e objeto central do sistema Terra-Sol. Assim, convenientemente, é possível descrever um movimento virtual no sistema de coordenadas (Kalogirou, 2013).

A **Figura 2.3** ilustra o movimento aparente do Sol em relação à Terra, bem como o fato de que a posição do Sol vista por um observador fixo na Terra, delimitado pelo seu plano do horizonte, logo esse movimento depende da sua localização na superfície terrestre, da hora do dia e da época do ano. Esse movimento costuma ser denominado aparentes como forma de contrastá-los ao movimento considerado real, descrito com relação a um referencial inercial situado no espaço, em repouso com relação ao Sol, ou seja, em um referencial heliocêntrico (Vidigal, 2020).

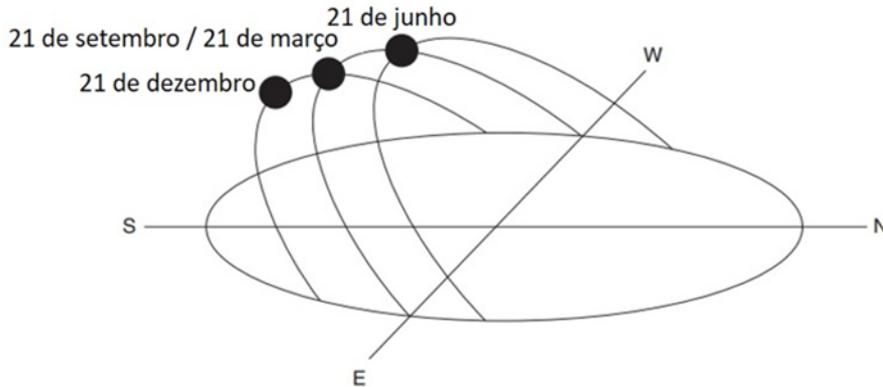


Figura 2.3 -Descrição do movimento aparente do sol.
Fonte: Kalogirou (2013)

2.3 RADIAÇÃO SOLAR E ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A radiação solar é fruto do processo de fusão nuclear no interior do Sol. Após percorrer uma distância média de 150 milhões de quilômetros, a radiação solar chega ao topo da atmosfera terrestre (Hickel, 2017).

Essa radiação sofre inúmeros processos de interações, tanto com a atmosfera, quanto com a superfície terrestre, o que afeta a intensidade do fluxo radiante e o espectro da luz proveniente do Sol. Uma das principais consequências das equações de Maxwell é a previsão da existência de ondas eletromagnéticas relacionadas com as variações, ou ondulações, dos campos elétricos e magnéticos. Tais ondas tem características especiais que as diferenciam das ondas mecânicas. Ondas eletromagnéticas se propagam através do espaço sem a necessidade de um meio material para sua propagação (Machado, 2006).

Uma onda eletromagnética, representada na **Figura 2.4**, é caracterizada por seu comprimento de onda (λ) e sua frequência (ν), sendo o comprimento de onda (λ) definido como a distância espacial que separa dois pontos consecutivos de onda com a mesma configuração espacial. A frequência é definida como o número de ciclos por unidade de tempo. O espectro de ondas eletromagnéticas engloba energias com comprimentos de onda que variam desde as ondas de rádio até os raios gama, que são ondas extremamente curtas. As unidades de comprimento de onda variam de picômetros (pm) a megametros (Mm), já para a frequência a unidade mais usual é o Hertz (Hz) (Foster, 2009).

O comprimento de onda λ e a frequência ν tem uma relação dada da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{c_\gamma}{\nu} \quad (2.1)$$

Em que c_γ é a velocidade da luz, $c_\gamma = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$. Uma onda eletromagnética tem sua energia quantizada, em que essa energia (E) dependente da frequência (ν) de acordo com a equação de Planck:

$$E = h\nu = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (2.2)$$

Nesta expressão h é a constante de Planck ($h = 6.626069 \times 10^{-34}$ J-s ou $4.13527 \mu\text{eV} / \text{GHz}$). (Bisquert, 2017).

A **Figura 2.5** ilustra a representação do espectro eletromagnético e destaca a faixa do espectro visível, entre 400 nm e 700 nm. Estes são os comprimentos de ondas percebidos pelas células cônicas no olho humano.

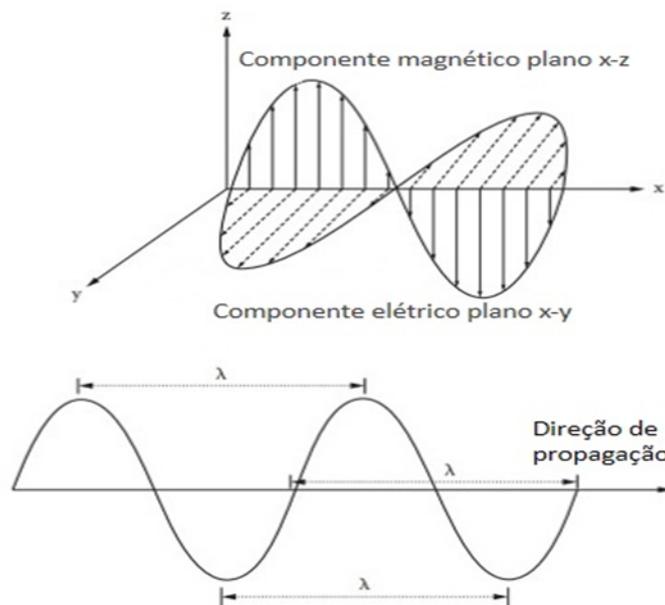


Figura 2.4 -Componentes elétricos e magnéticos da radiação eletromagnética em forma de onda.

Fonte: Foster (2009)

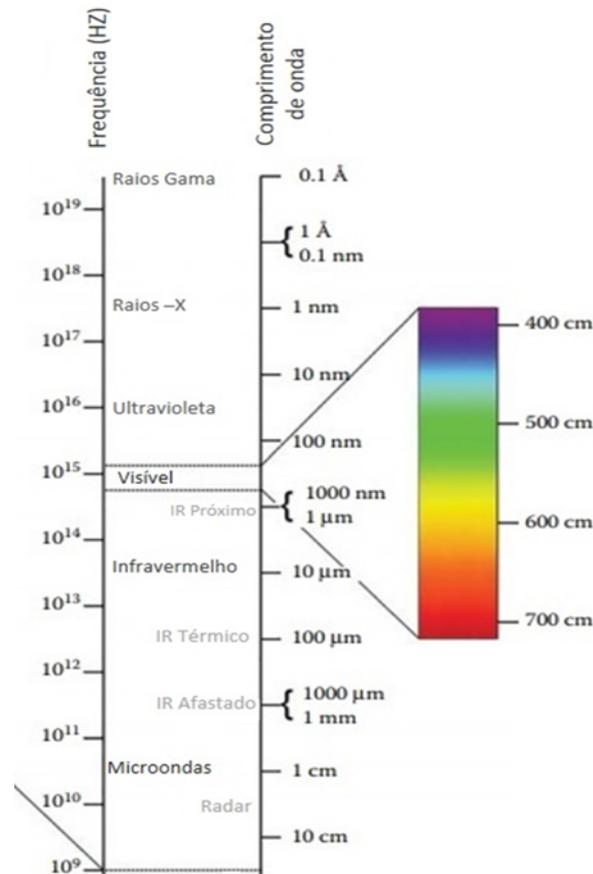


Figura 2.5 -Espectro eletromagnético na faixa entre micro-ondas e raios gama.
Fonte: Adaptado Juan Bisquert (2017).

2.4 RADIAÇÃO TÉRMICA

É um resultado conhecido que todos os corpos emitem continuamente radiação eletromagnética. Em última análise, esta emissão de radiação pode ser atribuída à aceleração de suas cargas elétricas. Este tipo de radiação inclui raios gama, raios X, radiação ultravioleta, luz visível, dentre outras. Sendo produzida de diferentes formas, dependendo do tipo de partícula carregada no processo. Parte da radiação eletromagnética emitida por uma substância origina-se de movimentos rotacionais e vibracionais de seus átomos e moléculas. Como os níveis de energia associados a esses movimentos podem ser termicamente excitados, a radiação emitida resultante é denominada radiação térmica (Medeiros, 2010).

2.5 O CORPO NEGRO

Por definição, um corpo negro é um absorvedor perfeito da radiação que incide sobre ele. Ao absorver energia o corpo negro aumenta em temperatura até passar a

ser um radiador térmico ideal. Assim, corpos negros quando aquecidos a uma mesma temperatura emitem radiação térmica segundo um mesmo espectro. Vale ressaltar que um corpo negro emitirá sempre menos do que absorve e isso vale para todos os comprimentos de onda.

Para a manutenção de sua temperatura, um corpo negro deve absorver toda radiação incidente na mesma medida em que emiti uma dada quantidade equivalente de energia. Um corpo negro absorve mais radiação, quando comparado com um corpo branco (Duffie e Beckman, 2013).

A distribuição espectral do comprimento de onda (λ) emitido por um corpo negro segue a lei de Planck:

$$E_{\lambda b} = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [e^{(hc_0/\lambda kT)} - 1]} \quad (2.3)$$

Sendo:

h = Constante de Planck

K = Constante de Boltzmann

$2\pi hc_0^2$ = Primeira constante de radiação de Planck

hc_0/k = Segunda constante de radiação de Planck

Ao realizar a derivada da equação (3) e igualando-a a zero, o comprimento de onda (λ) corresponde ao máximo de emissão segundo a lei de deslocamento de Wien, é dada da seguinte forma:

$$\lambda_{max} T = \frac{B}{T} \quad (2.4)$$

em que B é uma constante de proporcionalidade cujo valor é $2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$.

A lei de Planck e a lei de deslocamento de Wien são ilustradas na **Figura 2.6**, para corpos negros em diferentes temperaturas (K), os comprimentos de onda de máxima emissão também estão relacionados com a temperatura do corpo.

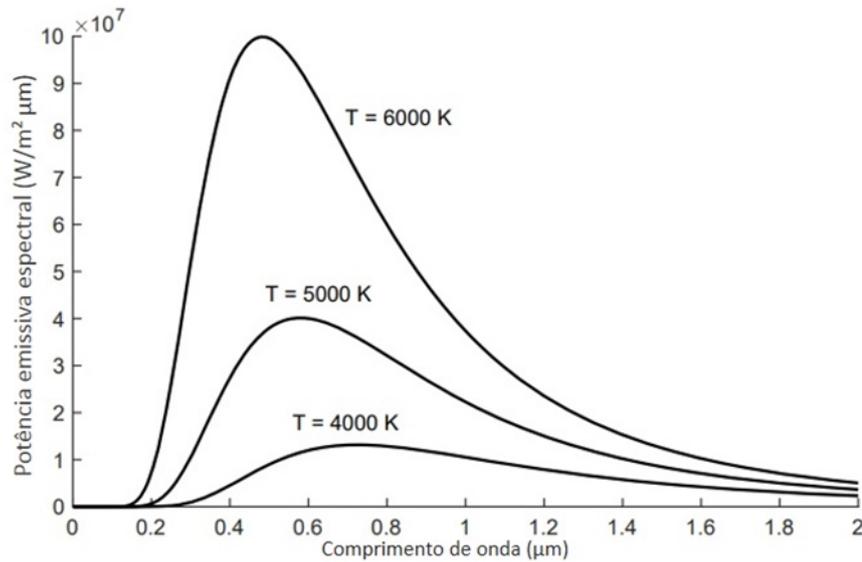


Figura 2.6 -Distribuições de comprimento de onda da radiação eletromagnética de corpos negros para diferentes temperaturas, determinada pela equação (7) de Planck.

Fonte: WIDÉN (2019).

No que tange às contribuições de Ludwig Boltzmann à ciência, destaca-se a unificação da termodinâmica e do eletromagnetismo. A teoria da dependência da intensidade da radiação eletromagnética com a temperatura é denominada como lei de Stefan-Boltzmann, expressa da seguinte forma:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda b} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann (constante de integração) sendo igual a $5.6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$ (Dahmen, 2006). A expressão (5) permite calcular a radiação total para todos os comprimentos de onda com relação a temperatura do corpo negro.

2.6 RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE E DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE SOLAR

É essencial o conhecimento da radiação solar disponível na superfície terrestre. Naturalmente essa radiação sofre interações com partículas na própria atmosfera através de dois fenômenos físicos: absorção (por ozônio, vapor de água, oxigênio, dióxido de carbono etc.) e dispersão, que pode ser seletiva ou não seletiva (por partículas de pó, aerossol marinho, poluição etc.). A partir da interação do comprimento de onda (λ) da radiação incidente com o tamanho da partícula, o grau de espalhamento é determinado. Um dos processos mais importantes da interação da radiação solar com as partículas da atmosfera é a difusão. Neste caso, uma parcela da radiação dirige-se para a Terra e parte retorna ao espaço (Vilela, 2010).

A elaboração de modelos teóricos para presciência da radiação incidente na superfície, advém da denominação da constante solar G_{SC} . Esta constante é composta por todos os comprimentos de onda que chegam ao topo da atmosfera terrestre e tem dependência geométrica entre a Terra e o Sol, que por sua vez não é constante devido ao movimento rotacional da Terra. Como a distância Sol-Terra pode variar ao decorrer do ano entre $1,47 \times 10^8$ km e $1,52 \times 10^8$ km, por inferência a intensidade da radiação G_{SC} varia 1325 W/m^2 e 1412 W/m^2 , portanto esse o valor médio de $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$ (Duffie e Beckman, 2013).

A **Figura 2.7** mostra esquematicamente a geometria das relações Sol-Terra. O fluxo radiante solar extraterrestre pode ser considerado como constante. Devido ao desvio circular da órbita da terra, isto é, o quanto ela se torna mais elíptica, a constante solar pode ser obtida analiticamente da seguinte forma:

$$G_{oo} = G_{SC} \left[1 + 0.333 \cos \frac{360N}{365} \right] \quad (2.6)$$

Sendo,

G_{on} = Radiação solar extraterrestre medida no plano normal para o n ésimo dia do ano (W/m^2).

G_{SC} = Constante solar (W/m^2).

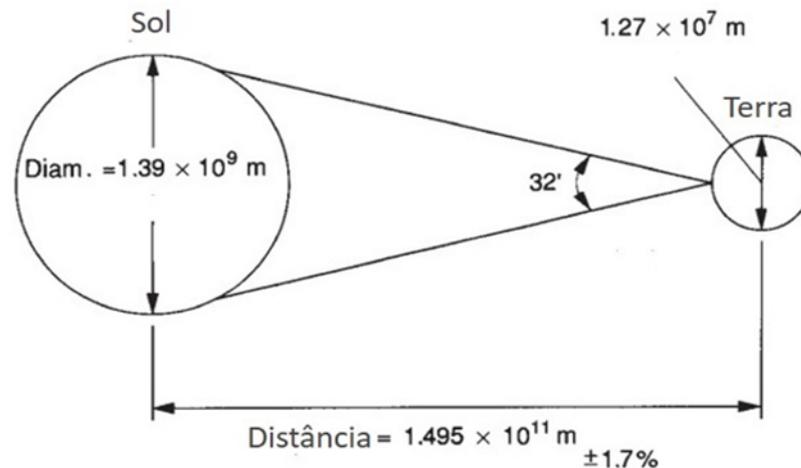


Figura 2.7 -Relação geométrica simplificada Terra-Sol.

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

O valor esperado da constante solar no topo da atmosfera é 1367 W/m^2 (Duffie e Beckman, 2013).

2.7 RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES PLANAS E INCLINADAS

Em superfícies com um certo grau de inclinação faz-se necessário conhecer as direções do feixe luminoso incidente bem como as componentes difusas que atingem superfície inclinada, sendo o seu modelo composto por três partes: isotrópica, difusa circunsolar e

horizonte iluminado (Duffie e Beckman, 2013). Usualmente, como mostrado na **Figura 2.8**, tanto para estudo da irradiação solar quanto para a captação e geração de energia, os sensores ou coletores são instalados com um ângulo em relação a superfície terrestre, para otimizar a quantidade de radiação interceptada e reduzir as perdas por reflexão (Kalogirou, 2014).

A partir dessa dependência, para uma superfície fixa no hemisfério sul voltada para o norte geográfico com ângulo de inclinação β , tem-se:

$$R_B = \frac{G_{bt}}{G_B} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\phi)} \quad (2.7)$$

Em que, G_{Bt} é o feixe de radiação em uma superfície inclinada (W/m^2) e G_B é o feixe de radiação em uma superfície horizontal (W/m^2).

Os termos G_{Bt} e G_B podem ser obtidos a partir do produto entre a radiação solar direta G_{Bn} e os $\cos(\theta)$ e $\cos(\phi)$, ver **Figura 2.8**. Portanto, o fator de inclinação RB para ambas as superfícies é dado da forma:

$$G_{Bt} = G_B R_B \quad (2.8)$$

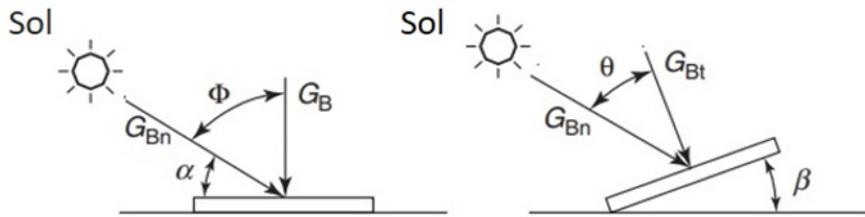


Figura 2.8 -Feixe de radiação em superfícies horizontais e inclinadas.

Fonte: Adaptada Kalogirou (2014).

2.8 OS SEMICONDUTORES

Os materiais do estado sólido podem ser agrupados a partir das suas características elétricas, como: isolantes, semicondutores e condutores. Algumas especificidades desses elementos diferenciam sua utilização em diferentes áreas tecnológicas. Os isolantes por exemplo, tem baixa condutividade, da ordem de 10^{-18} a $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$. Os condutores têm condutividades acima de $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$. Já os materiais com carácter semiconductor, possuem condutividade que estão entre os isolantes e condutores, na ordem 10^{-8} a $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$. O silício (Si) e germânio (Ge), elementos tetravalentes (em que os átomos do cristal puro fazem ligações covalentes com quatro átomos vizinhos equidistantes), formam uma estrutura cristalina do tipo tetraédrica com 8 elétrons a serem compartilhados. A **Figura 2.9** representa a ligação covalente do silício (Si), a 0 K os elétrons participam de 4 ligações covalentes, nessa temperatura o silício é um isolante desprovido de elétrons livres. Em 300 K, por influência da agitação térmica o silício passa a poder conduzir corrente elétrica, uma vez que nessa temperatura podem ser espontaneamente criados pares

elétrons-buracos, conseqüentemente deixando elétrons livres para a condução (Camargo, 2005).

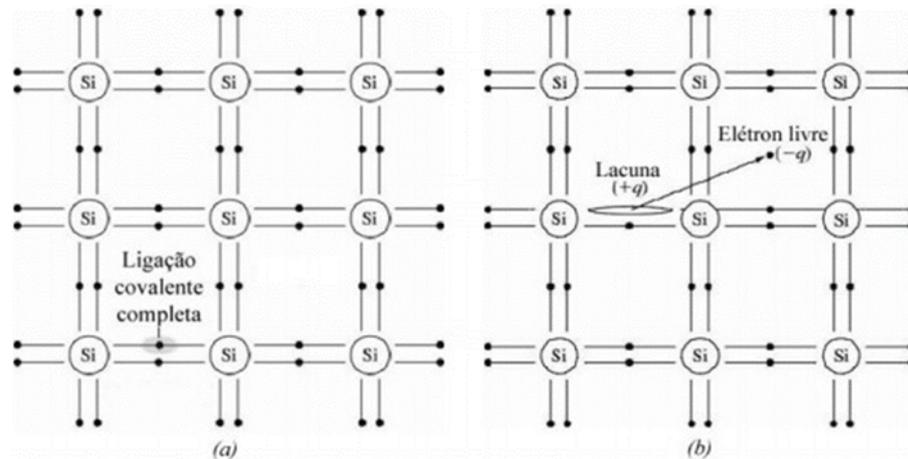


Figura 2.9 -Ligação covalente de silício: (a) a temperatura de 0 K; (b) a temperatura de 300 K.

Fonte: Camargo (2005).

Os semicondutores para fins de aplicação prática se dividem em dois tipos: intrínsecos e extrínsecos. Tem-se como exemplos de semicondutores intrínsecos o silício (Si) e o germânio (Ge) puros, sem impurezas ou anomalias no retículo cristalino. A condutividade elétrica intrínseca ocorre quando os elétrons saltam partindo da banda de valência para banda de condução, adquirindo energia maior ou igual à largura da banda proibida (Camargo, 2005).

Semicondutores extrínsecos são obtidos pela acomodação intencional de impurezas em material semicondutor intrínseco com intuito de alterar suas propriedades eletrônicas. Esse processo é chamado de dopagem e tem como propósito controlar o número de elétrons ou buracos disponíveis para a condução. Estes novos portadores de carga agora ocupam estados entre a banda de valência e a banda de condução, ou seja, dentro da banda proibida.

O processo de dopagem eleva o número de portadores de carga no material semicondutor intrínseco e pode ser feito por impurezas doadoras (dopante penta valente) ou por impurezas aceitadoras (dopante trivalente). O resultado da dopagem é um semicondutor do tipo-n ou ora do tipo-p. Virtualmente quase todos os dispositivos semicondutores comerciais são extrínsecos, isto é, o comportamento elétrico é determinado pelos graus de dopagem em função das quantidades relativas de impurezas presentes no material que os compõem (Callister, 2006). As técnicas de dopagem podem ser diversas, os três processos mais empregados são: difusão térmica, feixe molecular epitaxial e implantação iônica, tornando o material extrínseco permitindo a obtenção de superfícies ativas com baixa corrente de fuga entre a parte superior (dopada n) da célula solar e a parte inferior (dopado p) dessa mesma célula (Kaushika, 2018).

2.9 CÉLULAS SOLARES

No que diz respeito à produção de corrente elétrica a partir da absorção de fótons e no que tange suas características tecnológicas as células solares apresentam boa semelhança com os fotodiodos. A dopagem das pastilhas de semicondutor, ora por matérias doadores e aceitadores de elétrons formam uma barreira que impõem condução de corrente em um único sentido. Com isso a corrente elétrica produzida pela absorção de luz por estes dispositivos é corrente contínua e circula de forma unidirecional. A exemplo dos diodos, nas células solares a junção p-n produzida e a consequente aparição de uma zona de depleção determina a maneira com que elétrons e buracos são criados e entram em condução. A geração de corrente por esses dispositivos depende da energia do fluxo radiante (fótons) que a região ativa da célula solar recebe.

Na **Figura 2.10** são mostradas as bandas de energia na região da barreira, sendo que o eixo x apresenta como variável a distância e o eixo y diz respeito à energia. As bandas da esquerda dizem respeito ao lado da pastilha dopado p, enquanto que a direita é representada as bandas do lado dopado n. Elas se sobrepõem devido ao fato de que na temperatura ambiente (300 K) alguns elétrons com alta energia que ficam próximo a região n da pastilha têm probabilidade não nula de difundir para a parte inferior da banda de condução do lado p. Esse processo é responsável pela formação da banda de depleção durante a produção desses dispositivos. Uma vez terminado o processo de dopagem, com o passar do tempo, a zona de depleção inicia sua formação em função da migração dos elétrons de alta energia, essa é a região ativa das células solares. A energia absorvida dos fótons incidentes cria a condição de equilíbrio e balanço de energia em relação ao potencial de barreira. Virtualmente a absorção de fótons causa o dobramento das bandas de energia, forçando região do lado n para cima, fazendo-a ter o mesmo nível da parte inferior da banda de condução no lado p, criando a possibilidade da circulação de corrente (Kaushika, 2018).

As células solares podem ser fabricadas a partir de materiais semicondutores diversos e por diferentes tecnologias. Apesar disso e por razões históricas o material mais usado continua sendo o silício (Si), em pastilhas com estrutura, monocristalina, policristalina ou amorfa. Além disso, materiais como GaInP, GaAs e CdTe também são utilizados na fabricação de células solares (LUQUE, 2011). Em geral, a determinação da preferência entre o tipo de célula solar que será utilizada tem dependência direta com a aplicação pretendida, assim como a característica de absorção do espectro solar pela célula escolhida, isso em primeira aproximação, sem esquecer do custo. A preferência pelo silício cristalino, deve-se ao fato de sua absorção apresentar certa harmonia com o espectro solar, assim como o fato de seu processo de fabricação já ser conhecido a mais de 50 anos. Mais de 90% da produção global, em carácter comercial, de módulos solares é feita com células de silício, com grau de pureza de até 99,99999% e eficiência energética aceitável, próxima de 17%, com custo final de 0,2 US\$ por watt. É importante ressaltar a relativamente boa estabilidade de funcionamento desse tipo de célula, com vida útil maior que 40 anos (Foster, 2009).

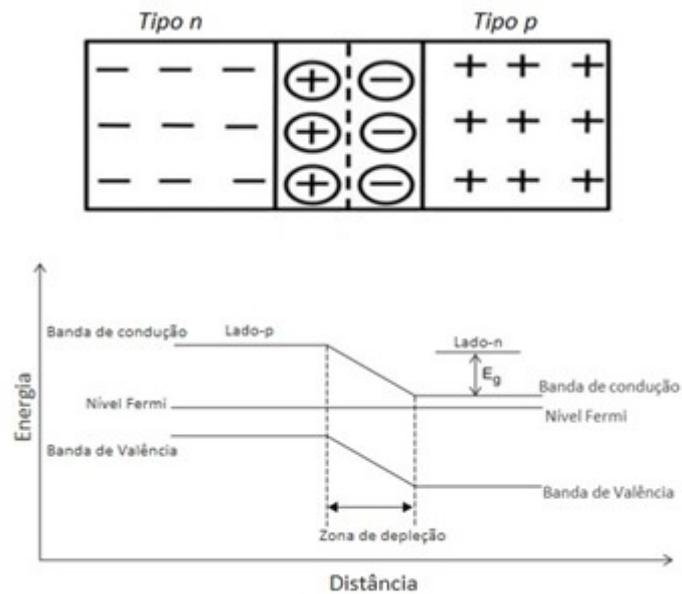


Figura 2.10 -Diagrama de banda de energia na junção p-n.
Fonte: Adaptado de KAUSHIKA (2018).

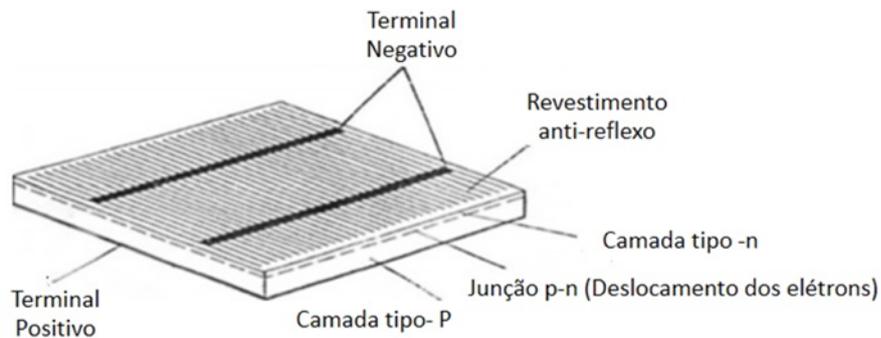


Figura 2.11 -Esquema de uma célula solar fotovoltaica.
Fonte: Adaptado de KAUSHIKA (2018).

A estrutura típica de uma célula solar fotovoltaica está ilustrada na **Figura 2.11**. Na parte superior podem ser vistos os contatos elétricos o revestimento antireflexo, que garante um melhor desempenho e conseqüentemente, por auxiliar na redução de reflexão da luz. A camada tipo-n é obtida por dopagem, o que eleva a quantidade de portadores de carga no material semiconductor, esta camada precisa ser fina para ser transparente e deixar que os fótons cheguem à zona de depleção ou camada ativa da célula. A zona de depleção ou camada ativa aparece durante o processo de dopagem da pastilha de semiconductor para formar a junção p-n, esta zona é desprovida de carga livre. Nela, quando criados pares elétron-buraco, pela absorção dos fótons de luz, a probabilidade

de recombinação é baixa, o que confere ao par criado boa mobilidade. Os fotoelétrons produzidos são obrigados a fluir para a região n pelo campo elétrico da junção, enquanto os buracos seguem na direção da região p. A partir da incidência dos fótons na superfície da célula, podem ocorrer três fenômenos, reflexão, absorção e transmissão. Por absorção de fótons com energia superior à energia da barreira de potencial da célula é que acontece a criação de pares de elétron e buraco. É importante salientar que o processo de geração de pares por absorção de luz não tem eficiência de 100%. Nem todo par criado na zona de depleção gera corrente, existe sempre certa probabilidade de recombinação do par criado, resultando em carga livre igual a zero (Da Silva, 2010).

2.10 PRINCÍPIOS ELÉTRICOS

No modelo de uma célula solar ideal, assume-se nula o valor da resistência interna. Já no modelo de uma célula solar real, o comportamento elétrico pode ser representado a partir do circuito da **Figura 2.12**. Na ausência de luz, o modelo de uma célula solar ideal se assemelha ao comportamento do diodo sendo assim, a equação para determinar a corrente é a mesma utilizada para um diodo de uso geral (Moreira, 2017).

$$I_D = I_S [e^{\frac{qV}{kbt}} - 1] \quad (2.9)$$

sendo:

I_D = Constante de Planck;

I_s = Corrente de Saturação;

q = Carga do elétron;

V = Tensão externa aplicada na junção;

T = Temperatura (Kelvin);

Kb = Constante de Boltzmann;

A equação (9) resulta na corrente líquida na junção p-n quando aplicado uma tensão V em seus terminais. Já em condições normais de operação, a célula solar ideal ao receber fótons, pares de elétron-buraco são gerados pela foto excitação, deslocando-se em direção às zonas dopadas p e n impulsionados pelo campo elétrico da junção. Esses pares acelerados resultam em uma fotocorrente se uma carga (R_L) é conectada à célula. Essa fotocorrente está associada com a capacidade da célula realizar a absorção e conversão dos fótons em pares elétrons-buracos, sendo fisicamente denominado como eficiência quântica (Moreira, 2017).

A eficiência quântica determina o número de pares gerados em função da quantidade de fótons que incide sobre a superfície ativa da célula determinante para inferir a corrente produzida pela célula.

Ainda com respeito ao circuito ilustrado na **Figura 2.12**, I_{ph} é a fotocorrente gerada pela fonte de corrente que representa uma célula solar. R_P é a resistência característica da pastilha, o que inclui a região da barreira de potencial em polarização reversa, além das porções não dopadas da pastilha e, portanto, é uma resistência montada em paralelo com fonte de fotocorrente. Já R_s é a resistência em série com os terminais da

célula, sendo determinada pela qualidade dos contatos ôhmicos que ligam a pastilha semicondutora com os terminais metálicos da célula. Finalmente, V e I são respectivamente a tensão e corrente de saída da célula solar. A relação da corrente fornecida por uma célula solar ideal e a fotocorrente é dada pela equação:

A relação da corrente fornecida por uma célula solar ideal e a fotocorrente $I_p h$ é dada pela equação:

$$I_D = I_S [e^{\frac{qV}{Kbt}} - 1] - I_p h \quad (2.10)$$

No entanto, para fins de operação em condições reais a associação entre os resistores tem que ser levada em conta, assim fica a equação:

$$I = I_p h - I_D = I_p h - I_0 [e^{\frac{qV}{Kbt}} - 1] \quad (2.11)$$

I_D = Corrente do diodo;

I_S = Corrente de saturação do diodo;

R_S = Resistência em série;

R_p = Resistência em paralelo;

V = Tensão aplicada na célula;

Kb = Constante de Boltzmann = 1.381×10^{-23} J/K;

T = Temperatura absoluta da célula (K);

A determinação da curva corrente por tensão com a célula iluminada resulta da equação (11), que permite a determinação das características elétricas da célula. Assim, é possível determinar a corrente de curto-circuito (ICC), a tensão de circuito aberto (VCA) e a potência máxima (P_m) (Moreira, 2017).

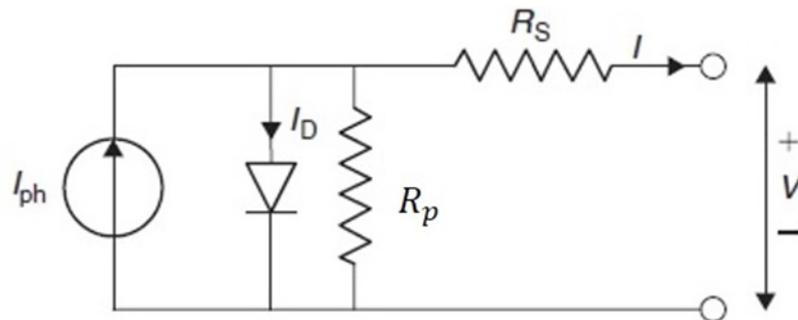


Figura 2.12 -Circuito de uma célula solar real.

Fonte: Adaptada Kalogirou (2014).

A **Figura 2.13** ilustra as curvas de corrente-tensão $I \times V$ para uma célula solar. É perceptível que em curto circuito a corrente atinge o seu máximo, porém na zona de circuito aberto não há fluxo de corrente e a tensão da célula atinge seu máximo (Moreira,

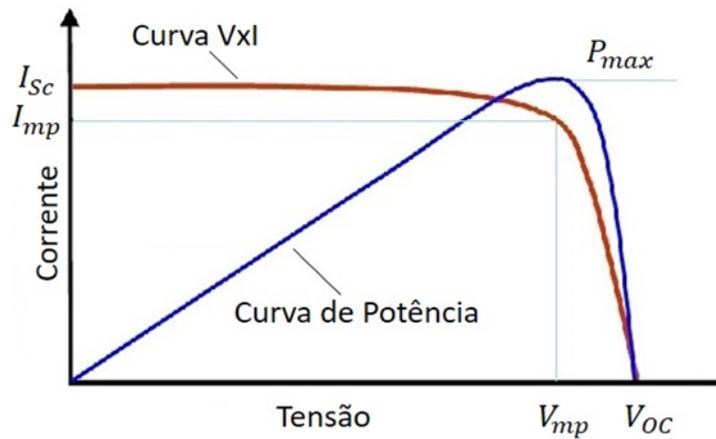


Figura 2.13 -Curvas típicas de uma célula, corrente-tensão.

Fonte: Adaptada Moreira (2017).

2017). Já a potência máxima de uma célula solar pode ser obtida pelo produto corrente e tensão, podendo ser explicitada por:

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (2.12)$$

Onde os termos I_{mp} e V_{mp} são correntes máxima e tensão máxima vide a **Figura 2.13**. Com o referente valor da potência máxima, se faz possível determinar o Fator FF desta forma:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.13)$$

O Fator FF é conhecido como fator de forma e tem implicação direta nas medidas de corrente e tensão da célula solar (Kalogirou, 2014).

2.11 INFLUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA EM UMA CÉLULA SOLAR

Uma das características dos semicondutores é sua sensibilidade às variações térmicas. No que se diz respeito a células solares, a elevação da temperatura está associada ao aumento da intensidade de irradiação solar recebida. Esse aumento da temperatura reduz a energia de gap do material, ocorrendo assim um acréscimo de temperatura, fazendo com que a corrente de curto-circuito (I_{sc}) cresça e tensão de circuito aberto (V_{oc}) reduza. O aumento de temperatura torna a geração de pares elétron-buraco mais fácil, podendo ser interpretado como um aumento de energia dos elétrons que compõem o material.

A **Figura 2.14** apresenta, de forma gráfica, como I_{sc} e V_{oc} variam com a temperatura e exposição a irradiância solar. Analisando a **Figura 2.14** (a), pode-se inferir que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica a partir do aumento da

irradiância, enquanto a corrente aumenta linearmente. Na **Figura 2.14 (b)**, quando ocorre aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto decresce de forma linear em relação a temperatura. Assim, é possível afirmar que a eficiência da célula diminui.

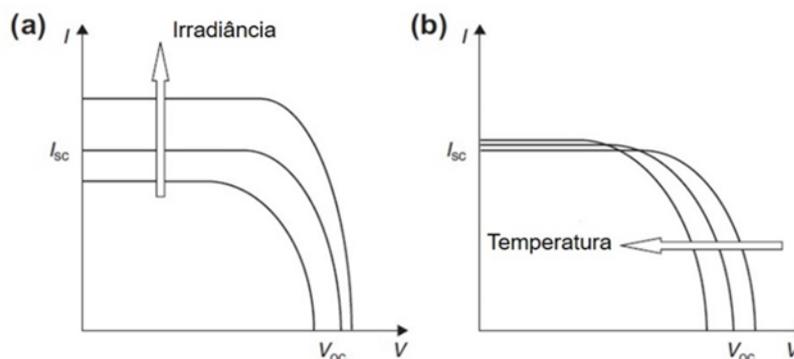


Figura 2.14 - (a) Efeito do aumento da irradiação; (b) Efeito do aumento da temperatura celular.

Fonte: Adaptada Kalogirou (2014).

2.12 CÉLULAS SOLARES DE CDTE/CDS

As células solares de CdTe/CdS são células solares modernamente produzidas por técnicas de deposição de filmes finos. Assim, o contato entre o material semiconductor CdTe (Telureto de cádmio), tipo p e o CdS (sulfeto de cádmio), tipo n cria um dispositivo ativo do tipo célula solar. O emprego desse tipo de tecnologia para conversão de energia solar teve rápido impacto comercial nos EUA (Estados Unidos da América), país que esteve entre 2006 e 2010 como líder em produção de módulos fotovoltaicos de filmes finos. O principal motivo, além de seu baixo custo de produção, é a sua estabilidade no desempenho a longo prazo. Até os dias atuais, células de CdTe/CdS continuam atraindo investimentos em pesquisa e desenvolvimento para otimização de sua eficiência (Luque, 2011).

Em 1879 o químico francês Margottet obteve por síntese química o CdTe pela primeira vez. Anos mais tarde, Jenny e Bube demonstraram que a condutividade nesse material poderia ser otimizada através da dopagem com impurezas. As primeiras células foram fabricadas em 1960, estruturadas a partir da evaporação de uma película de CdS do tipo n sobre cristais de CdTe do tipo p. Essas primeiras células apresentavam baixa eficiência que variavam entre 2% a 5% (Moreira, 2017). Em 2015, a empresa americana First Solar obteve em laboratório um recorde de eficiência de 22,1% para este tipo de célula usando a tecnologia de sublimação e banho químico na deposição do CdS, técnica diferente do que havia sido usado na década de sessenta (Energy.Gov, 2016). No entanto, números como esses de eficiência retratam indicadores que a médio prazo as células de CdTe/CdS tem grande potencial de se tornar uma alternativa promissora nas aplicações terrestres de conversão de energia solar (Moreira, 2017). Os dispositivos de CdTe/CdS

tradicionais tem a camada CdS como janela ótica. Ela que faz o primeiro contato com os fótons provenientes do fluxo de luz incidente, a camada CdTe atua como camada absorvedora. O substrato de vidro serve como suporte mecânico para a célula e no arranjo do dispositivo. A luz incidente deve ultrapassar o substrato de vidro entrando em contato a junção CdTe/CdS (Luque, 2011).

A **Figura 2.15** apresenta o diagrama de uma célula solar CdTe/Cds com as suas devidas estruturas:

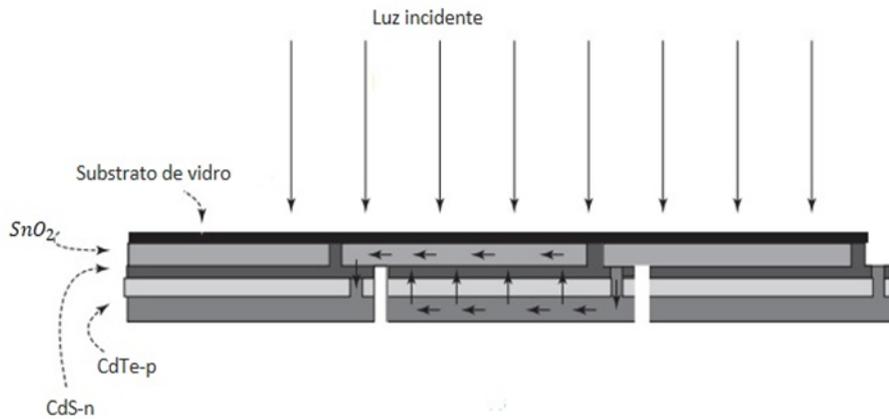


Figura 2.15 -(a) Diagrama esquemático de uma célula solar de CdTe/CdS convencional.
Fonte: Adaptada Luque (2011).

Os resultados de eficiência indicam que o CdTe pode ser considerado um excelente dispositivo tanto para conversão de energia solar quanto para o monitoramento da irradiância solar. Como é sabido, o Sol é uma estrela de classe espectral G2 com temperatura de superfície próxima a 5.700 K. A Figura 2.16, ilustra a eficiência teórica com os diferentes tipos de células solares em comparação a sua capacidade de absorção e eficiência (Luque, 2011).

Os resultados de eficiência indicam que o CdTe pode ser considerado um excelente dispositivo tanto para conversão de energia solar quanto para o monitoramento da irradiância solar. Como é sabido, o Sol é uma estrela de classe espectral G2 com temperatura de superfície próxima a 5.700 K. A **Figura 2.16**, ilustra a eficiência teórica com os diferentes tipos de células solares em comparação a sua capacidade de absorção e eficiência (Luque, 2011).

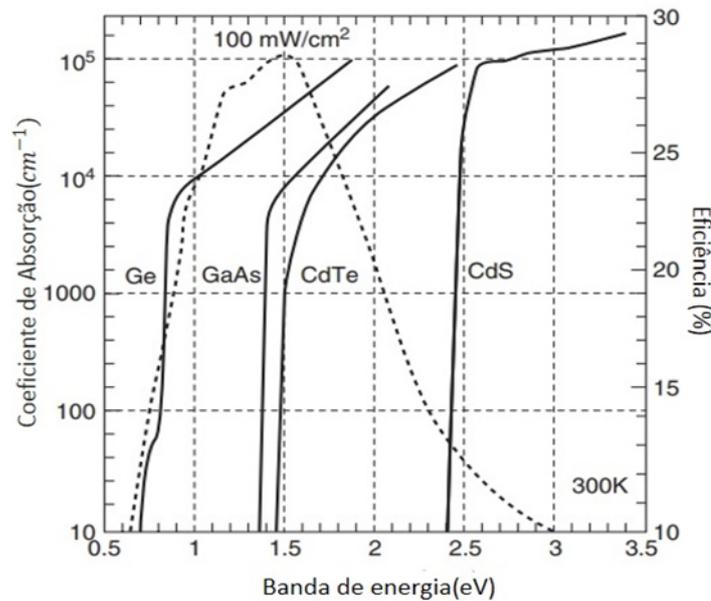


Figura 2.16 - Comparação da eficiência teórica das células solares (pontilhada) para irradiação espectral AM1.5 versus *bandgap* e coeficiente de absorção. Em relação a materiais mais comumente utilizados na fabricação de células solares.

Fonte: Adaptada Kalogirou (2014).

2.13 SENSORES DE RADIAÇÃO SOLAR

Durante a segunda Guerra Mundial apareceu a necessidade do desenvolvimento militar em tecnologia para o sensoriamento de infravermelho (IR), tanto para detecção, quanto para a localização de pessoas e alvos militares. Projetos em sensoriamento remoto, assim como os programas espaciais, foram sempre um campo fértil no enriquecimento das tecnologias para medição da radiação. Essas evoluções tecnológicas foram, ao longo do tempo, sendo aplicadas na indústria e atualmente uma parcela desses recursos se encontram aplicados na maior parte dos lares e diferentes instalações civis (Coulson, 2012).

Sensores de radiação são dispositivos que a partir da excitação por um dado tipo de radiação de interesse retorna um sinal de resposta elétrico. As aplicações para esses sensores dentro das engenharias e ciências são inúmeras. Em aplicações para aferir a radiação solar a responsividade é um fator que deve ser constante sobre todo intervalo de intensidade e comprimentos de onda da faixa de interesse. Ou seja, resposta deve ser linear tanto em relação ao fluxo de radiação solar incidente, quanto em relação ao espectro de energias observado. Para assegurar a confiabilidade da medição da radiação solar o sensor utilizado deve ser estável, ou seja, manter uma resposta constante durante o período de medição. Os sensores de radiação solar em sua maioria fazem uso dos efeitos termoelétricos e fotovoltaicos (Mccluney, 1994). Neste capítulo, serão apresentados apenas os principais instrumentos utilizados para medida da radiação solar. Isso na tentativa

de ambientar o leitor e contextualizar as escolhas feitas nesse trabalho de pesquisa.

Devido a necessidade do monitoramento para diferentes tipos de radiação, a partir de diversas fontes de luz, os sensores de radiação solar, de modo geral são denominados radiômetros. Os radiômetros tem como aplicação o monitoramento do fluxo luminoso de fontes de luz artificiais ou naturais. O dispositivo comumente utilizado para aferir a densidade do fluxo radiante é o piranômetro. O seu princípio de funcionamento baseia-se no efeito *Seebeck*, expressado pelo físico Thomas J. Seebeck em 1821. Para assegurar sensibilidade da resposta do sensor e sua capacidade de medir muito pequenas diferenças de temperatura e, portanto, muito pequeno fluxo luminoso, é usada uma termopilha circular de termopares. Historicamente eram usados termopares de cobre-constantan, mas modernamente tais metais foram substituídos por antimônio-bismuto. Para assegurar uma responsividade constante sobre uma larga faixa do espectro de luz a junção quente, ou seja, a superfície exposta a radiação, é composta por um material com muito boa condutividade térmica e de pequena massa, que propositalmente precisa ser enegrecido de modo se comportar como um corpo negro. A junta fria, em geral, está em contato com o corpo metálico que contém e protege o sensor e usa a temperatura ambiente como referência. Ainda montada no corpo do sensor, uma termistância corrige a temperatura da junta fria.

Sensores de radiação, em sua maioria, são utilizados para medições em ambiente externo (*outdoor*). Nos piranômetros, a termopilha é recoberta e isolada do ambiente por duas cúpulas hemisféricas de vidro, separadas entre si por uma camada de ar intermediária, de modo a garantir o isolamento térmico da junta quente. O corpo metálico recobre e protege a junta fria impede que a radiação incidente aqueça essa estrutura, que deve ser mantida à temperatura ambiente como mencionando anteriormente. As cavidades internas do corpo do sensor, assim como o colchão de ar entre as cúpulas dificultam a troca de calor interna, por retroemissão de radiação já absorvida. Na **Figura 2.17**, ilustra a estrutura de um piranômetro baseado em termopilha (Webster, 2018).

A **Figura 2.17** ilustra a estrutura de um piranômetro de termopilha.

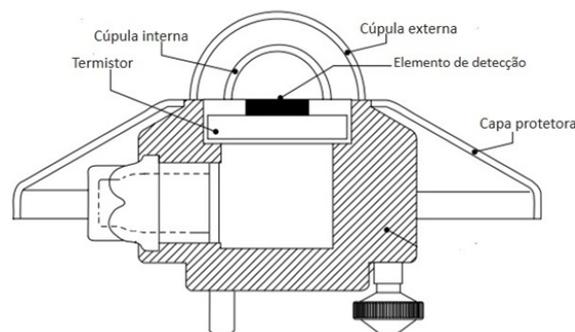


Figura 2.17 - Piranômetro de termopilha.

Fonte: Adaptada, Kipp Zonen, Manual de instruções do piranômetro CMP (2010).

2.14 ADC - CONVERSOR DE ANALÓGICO PARA DIGITAL

As diversas grandezas físicas como temperatura, umidade, pressão etc., em geral, apresentam uma variação contínua de seus valores de intensidade, periodicidade, atraso entre outros. Para melhor representá-las ou mensurá-las são recomendados, por exemplo, sinais elétricos análogos à grandeza de interesse (sinais ditos analógicos). Em caso de uma medição automatizada de tais sinais e para efeito de maior facilidade de armazenamento, aquisição do sinal, diminuição na largura de banda de transmissão e o tratamento para o aumento da relação sinal/ruído é preferido a conversão do sinal analógico de interesse para um formato digital com resolução e amostragem adequadas (Costa, 2015).

Um sistema de aquisição de dados típico é composto por: (i) um sensor ou transdutor, (ii) um circuito de condicionamento de sinal, (iii) um conversor analógico digital (*Analog-to-Digital Converter* - ADC) e um sistema de processamento e armazenamento digital de dados, que pode ser um microcontrolador ou o computador.

A **Figura 2.18** apresenta um sistema típico de aquisição de dados.

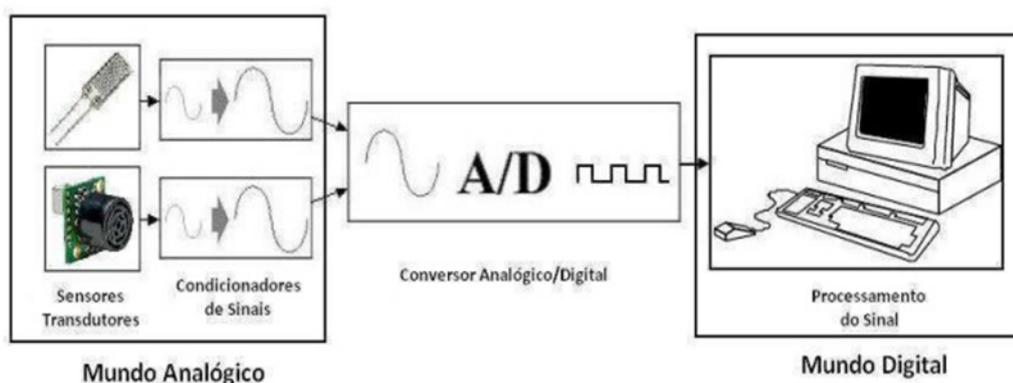


Figura 2.18 - Sistema de aquisição de dados.

Fonte: Tese de Doutorado: conversor analógico-digital de dobramento utilizando circuitos a capacitor chaveado (Costa, 2015).

Analisando o sistema de aquisição por partes, tem-se o sensor ou transdutor como um dispositivo que converte a grandeza ou fenômeno físico medido em uma grandeza elétrica de interesse. Esse sinal elétrico pode ser tensão, corrente, resistência elétrica, frequência etc.

Os circuitos de condicionamento de sinais têm como finalidade adaptar o sinal elétrico monitorado às características da entrada de sinal elétrico do ADC. Assim por vezes é necessário amplificar ou atenuar a amplitude dos sinais elétricos a serem mensurados, casar a impedância dos sinais de saída do sensor com a impedância de entrada do ADC, transformar corrente em tensão ou tensão em corrente, frequência em tensão ou tensão em frequência, de modo a possibilitar a conversão analógico-digital. Ou ainda, filtrar analógica ou digitalmente o sinal elétrico de interesse, suprimindo ou intensificando a resposta em frequência de uma dada faixa espectral do sinal de saída do sensor.

O ADC é a ponte que faz a união entre o sistema analógico, como sensores/transdutores e o sistema digital. Quando a medida obtida em formato analógico é convertida para um formato numérico ou digital, o dado convertido pode ser computado e utilizado das mais diferentes formas por sistemas e algoritmos especialistas (Costa, 2015).

Neste capítulo será descrita a construção do detector e a configuração dos itens que fazem parte do sistema de aquisição de dados. Inicialmente serão apresentados o diagrama básico e a estrutura física da planta, seguido pela descrição dos principais componentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SITIOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um detector para monitoramento contínuo, por longo período, da irradiância solar que usa topologia *fly eye*. O estudo foi iniciado pela escolha do tipo da célula solar que iria equipar o detector e que foram utilizadas como sensores de irradiância. Posteriormente foi feita a montagem do detector e desenvolvida a unidade para aquisição de dados numéricos de irradiância. A estrutura mecânica do detector favorece e permite o acompanhamento ao longo de um ano da insolação local, sendo também sensível às mudanças da trajetória solar durante as diferentes estações do ano.

O local escolhido para instalação do equipamento tinha fácil acesso e com condições apropriadas para o monitoramento da irradiância solar ao longo do ano de 2020. Esse local foi a laje superior (terraço) do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (IF-UFBA), apesar desse local apresentar dois pontos desfavoráveis, (i) certo sombreamento próximo das 17 h, por conta das edificações que rodeiam a área escolhida, e (ii) a existência neste terraço de uma manta asfáltica impermeabilizante aluminizada, uma vez que este tipo de manta proporciona um aumento considerável na componente difusa da radiação solar. Dentro dessa perspectiva, a aquisição de dados foi iniciada a cada dia entre 6 h da manhã às 18 h no final da tarde, com o intuito de garantir o rigor metodológico da tomada de dados de irradiância durante um período de 12 meses.

Geograficamente o Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (IF-UFBA) está situado na cidade de Salvador, capital do Estado da Bahia com localização global: latitude 12°59' (S), longitude 38°30' (W), a aproximadamente 30 m acima do nível do mar. Na **Figura 3.1** é possível visualizar o sítio experimental utilizado no projeto e suas coordenadas geográficas.



Figura 3.1 - Sítio experimental utilizado no projeto. Vista superior do Instituto de Física da universidade Federal da Bahia (IF-UFBA).

Fonte: Google Maps (2021) .

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A estrutura mecânica do detector tem um formato próximo de uma calota esférica (domo) e se destina para uso como claraboia, que de modo geral são instaladas em telhados, com a finalidade facilitar a entrada de luz natural no interior das edificações. Como sensores de irradiância foram adotadas células solares de filmes finos do tipo CdTe/CdS. Foram utilizadas dezessetes células solares comerciais, fabricadas com a finalidade de serem luminárias balizadora, autônomas de jardim. Após serem retiradas dos conjuntos adquiridos, as células solares foram distribuídas de forma simétrica e equidistantes na calota esférica ou domo.

Para o sistema de aquisição foi implementada uma interface que possibilita a conversão de sinais analógicos para digitais. Antes da conversão numérica, a corrente gerada pela absorção da luz era transformada em uma queda de tensão sobre os resistores de cargas com 1% de acurácia em seus valores nominais. Isso para cada um dos sensores de forma independente, requerendo assim dezessetes canais de aquisição e conversão AD.

O *software* de aquisição e monitoramento gráfico usado neste trabalho foi desenvolvido em linguagem de programação *C-Sharp* e permite a leitura em tela dos valores das contagens de ADC em função do tempo. A partir dessa leitura, o *software* gera arquivos diários em formato de texto. O *software*, portanto, é a interface homem-máquina do detector *fly eye* de irradiância solar desenvolvido.

A **Figura 3.2** é a representação em forma de diagrama do sistema proposto.

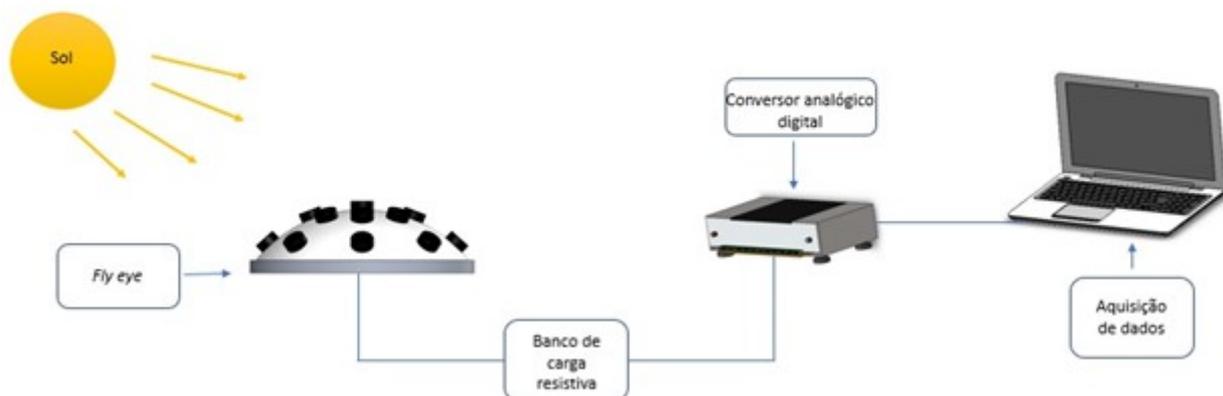


Figura 3.2 - Diagrama geral das etapas do sistema.
Fonte: Próprio autor.

3.3 SENSOR

3.3.1 Células Fotovoltaicas

Em relação à escolha dos sensores fotovoltaicos de irradiância, como já dito, foi preferido a utilização da célula solar de uma luminária balizadora com recarga solar. A célula solar se encontra na parte superior da luminária abrigada em um case de proteção. A preferência pela manutenção da estrutura superior se deve ao fato deste case ser fabricado em plástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e ter certificação IP54 (proteção limitada para pó e boa proteção para *spray* de água em qualquer direção), protegendo assim a célula das intempéries e consequentemente garantindo uma durabilidade maior dos sensores (1). Ainda nesse contexto, na parte interna dessa unidade se encontrava uma placa de circuito (PCB). Este PCB continha a eletrônica de carregamento de bateria interna e de acionamento do LED para iluminação noturna. A parte (2) era constituída de um difusor luminoso, fabricado em termoplástico transparente, auxiliando assim um melhor aproveitamento da iluminação do LED. O resto de seu corpo, também em ABS, conceitualmente fora concebido para servir de “estaca” no solo (3). O difusor (2), a placa eletrônica interna, assim como o restante de seu corpo (3) foram retirados e descartados, pois as suas finalidades não eram compatíveis com o projeto proposto.

A célula solar tem dimensão de 40 x 40 mm e o case em ABS tem 61 mm em sua face superior e 65 mm em sua base. A **Figura 3.3** representa as partes da luminária solar e a **Figura 3.4** mostra a célula solar, as dimensões da célula são de 40 x 40 mm, juntamente com o case em ABS que tem 61 mm em sua face superior e 65 mm em sua base.



Figura 3.3 - Luminária estilo balizadora solar.

Fonte: adaptado retirada do site <https://www.ferreiracosta.com>.



Figura 3.4 - Célula solar com case em ABS.

Fonte: Próprio autor.

3.4 ESTRUTURA MECÂNICA

3.4.1 Domo de acrílico

A partir da proposta de um detector com topologia *fly eye* foram traçadas as linhas gerais desse projeto. Como um olho de mosca tem formato aproximadamente circular, o detector proposto necessitava de uma base com esse formato. A estrutura como um todo precisava ser de relativamente simples movimentação e instalação.

Para isso a base estrutural adquirida foi uma claraboia com formato semiesférico e capacidade de suportar longa exposição ao Sol. Esse componente de construção civil têm a finalidade de permitir parcialmente a entrada da luz natural em ambientes internos, o que significa dizer que sua superfície tende a refletir somente uma fração da luz que incide sobre a claraboia. Claraboias são fabricadas em diversos formatos e com diferentes materiais. A claraboia adquirida para servir de base estrutural para o detector tem um formato de “domo” e é fabricada em acrílico semi-opaco de 3 mm de espessura e diâmetro na base de 600 mm. O domo em acrílico é solidário a um perfil de alumínio F-40 que serve para aumentar a sua estabilidade mecânica.

A **Figura 3.5** apresenta a fotografia da claraboia utilizada na montagem do detector *fly eye*.

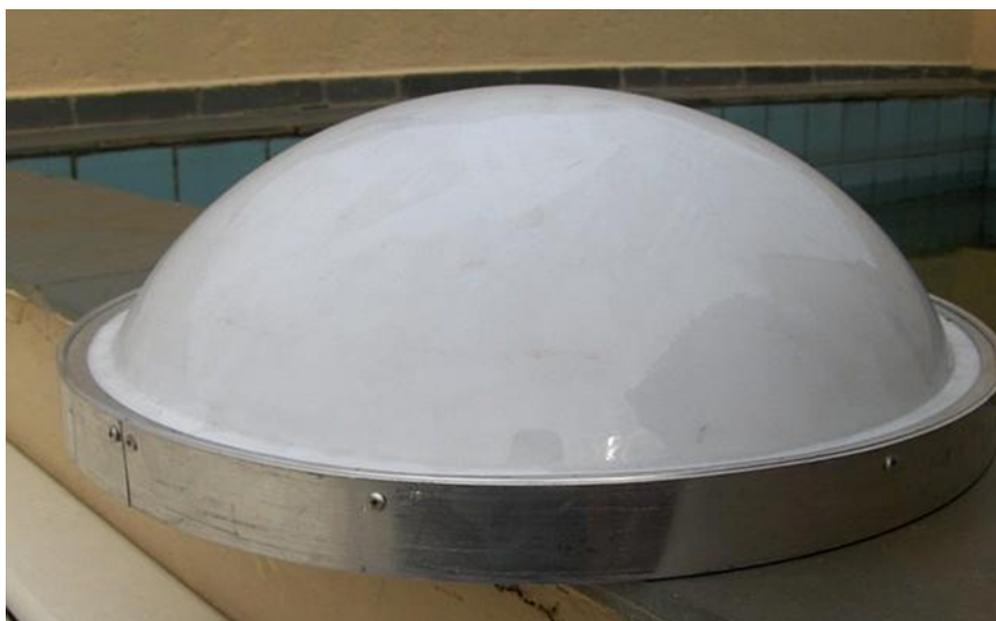


Figura 3.5 - Domo de acrílico.

Fonte: <https://www.ecodomasbrasil.com>

3.4.2 Montagem do detector

Inicialmente foi montado e fixado por parafusos um disco de acrílico com diâmetro de 610 mm e 10 mm de espessura, de forma a servir de tampa traseira do detector. Dessa

forma o detector está fechado deixando um espaço interno para a acomodação das partes, peças e componentes, em particular, o banco de resistores de carga e diferentes conectores, que dessa maneira passavam a estar protegidos contra água da chuva no espaço interior do domo.

Foram distribuídas 17 células solares equidistantes entre si e de forma simétrica com distância aproximada de 145 mm entre cada uma delas. A melhor disposição encontrada foi centralizar uma célula no topo do domo, enquanto as 16 restantes foram posicionadas levando em consideração os pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste) e os pontos colaterais (Nordeste, Sudeste, Nordeste e Sudoeste). Esta disposição atribuiu ao detector a possibilidade de acompanhar a irradiância solar local, ou seja, acompanhar o movimento aparente do Sol em diferentes horários do dia e nas suas diferentes posições no céu durante o ano.

Nas **Figura 3.6** e **figura 3.7** respectivamente é possível observar a vista superior do detector e sua vista interna do domo com a cablagem junto com o banco de carga.



Figura 3.6 - Vista superior do detector de topologia *fly eye*.
Fonte: Próprio do autor.

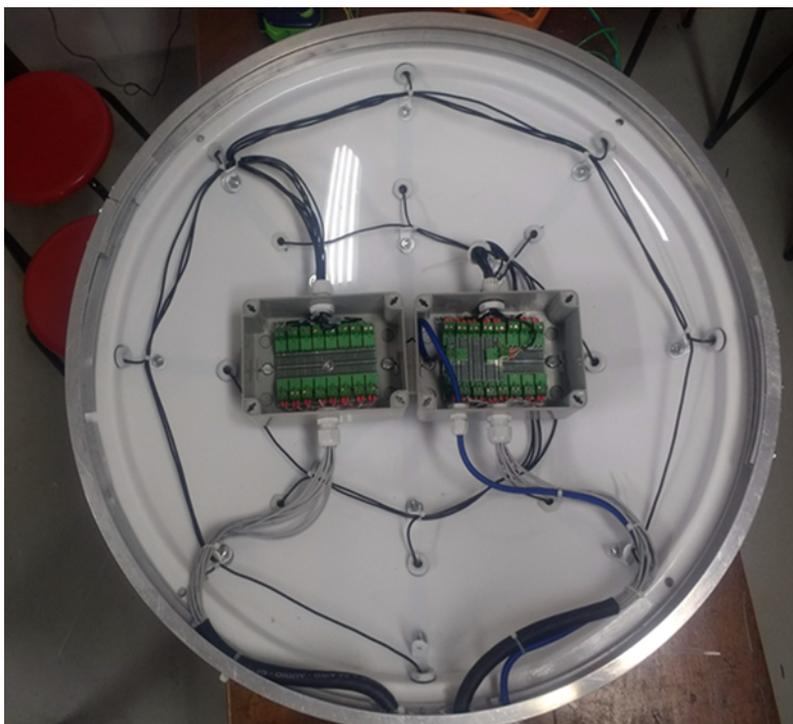


Figura 3.7 - Vista da parte interna do domo com a cablagem das células solares.
Fonte: Próprio do autor.

3.5 BANCO DE CARGA E SISTEMA DE AQUISIÇÃO

3.5.1 Banco de carga

Como já mencionado, a tampa traseira do domo e o volume protegido por ela, criaram um espaço excelente para abrigar os componentes do detector. Foi inicialmente escolhido o interior do domo para acomodar os resistores, pois observou-se que a melhor configuração de montagem seria aquela onde a carga resistiva está montada o mais próximo das células solares, evitando assim, as resistências parasitas dos cabos, dos engates de conexão e das soldas.

Foi inserido, na transversal, um perfil de alumínio para comportar duas caixas de conexão elétrica em termoplásticos de passagem da marca Steck®. A escolha por essas caixas advém da sua versatilidade e resistência mecânica. As caixas têm dimensões de 154 x 110 mm e sua altura é de 70 mm.

Em seu interior foi montado o banco de carga resistiva (RL) para as 17 células solares com resistores de precisão (1%) de filme de metal de 15Ω e 3 W de potência, este banco resistivo está montado a menos de 30 cm das células, para evitar a influência da resistência do cabo de medição e das demais soldas e conexões.

Esses resistores estão montados em paralelo com a saída da célula fotovoltaica e servem de sensor de corrente, gerando uma queda de tensão proporcional a foto corrente I_{ph} gerada. Essa queda de tensão é levada às entradas de um ADC e pode ser amostrada

a cada ciclo de aquisição. Com essa configuração obtém-se uma amostra da tensão de saída do conjunto célula-resistor de carga.

Para melhor entender a escolha de montar o resistor de carga o mais próximo possível da célula é importante lembrar que: (1) células solares são fontes de corrente, com impedância de saída baixa ou muito baixa. (2) Uma tensão é materializada quando esta fonte é conectada a uma carga resistiva. (3) Para que a queda de tensão seja proporcional à corrente gerada, a carga resistiva deve ser relativamente baixa, da ordem de uma dezena de ohms. Esta carga deve ser independente da temperatura e não variar com o tempo, por exemplo. (4) Quando a carga é montada perto do ADC e não perto da célula, resistências parasitas se interpõem e se somam em serie com a carga em paralelo com a célula. Assim para a montagem mostrada na **Figura 3.8(a)** além da carga se somam as resistências das soldas da célula ao conector de saída ($2 \times R_{s1}$), as resistências de engate do conector de saída ($2 \times R_{c1}$) e as resistências do cabo que vai do detector ao ADC ($2 \times R_{w1}$). Além disso, do outro lado do cabo de medição algo similar acontece, assim precisam ser computadas: a solda cabo e conector ($2 \times R_{s2}$), a resistência do engate ($2 \times R_{c2}$) e finalmente a resistência da solda com a entrada do ADC ($2 \times R_{s3}$). Ainda na **Figura 3.8(a)** chama-se a atenção para o fato de que o somatório dos R_n pode ser da ordem de 2 Ohm, o que significa mais de 10% do valor do resistor de carga, que foi escolhido na versão filme de metal para ter tolerância de 1%. Ressalta-se o fato desses resistores parasitas, em particular das soldas em liga de chumbo e estanho, dependerem da temperatura ou do estado de limpeza e oxidação, no caso dos resistores de ancoramento e encaixe dos conectores. A resistência do cabo de medição, que só dependem da qualidade do cobre utilizado, são mais estáveis, mas não são zero, isso pelo fato de terem sido usados multicabos balanceados de microfone, com 10 m de comprimento e diâmetro de 26 AWG. Ou seja, essa topologia não é adequada para aplicação do tipo multicanal, onde busca-se a maior homogeneidade possível entre os diferentes canais.

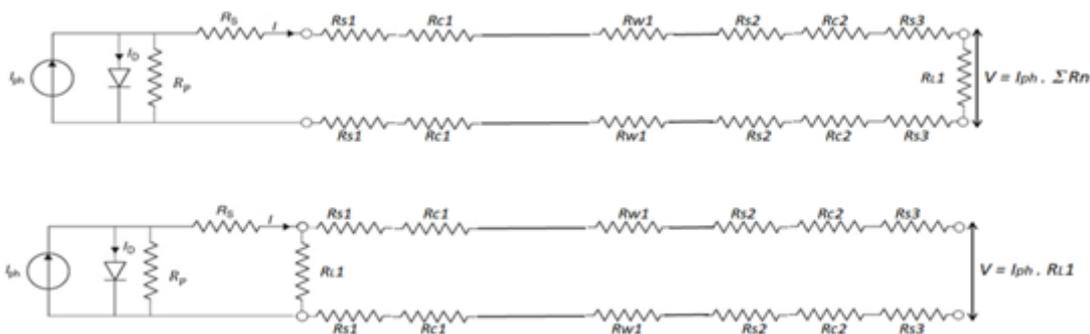


Figura 3.8 - (a) montagem do banco de carga resistiva com a carga (RL) conectada afastada da célula. (b) montagem do banco de carga resistiva com a carga (RL) conectada próxima da célula.

Fonte: Próprio do autor.

Na **Figura 3.8(b)** observa-se que na montagem onde RL é conectada próximo da célula os resistores parasitas continuam presentes, mas não determinam a tensão que será aplicada à entrada do ADC. Ressalte-se que a impedância de entrada do ADC é de 10 k

Ohm e, portanto, quase 600 vezes maior que a impedância de saída da fonte de tensão célula-resistor de carga, dominada pelo valor deste resistor (15 Ohm).

As **Figuras 3.9 e 3.10** apresenta a caixa de passagem utilizada e o banco de cargas utilizado, respectivamente, onde cada célula recebe um resistor montado em paralelo com seus eletrodos de saída.



Figura 3.9 -Caixa de passagem modelo Light SSX161.

Fonte: <https://www.steck.com.br>

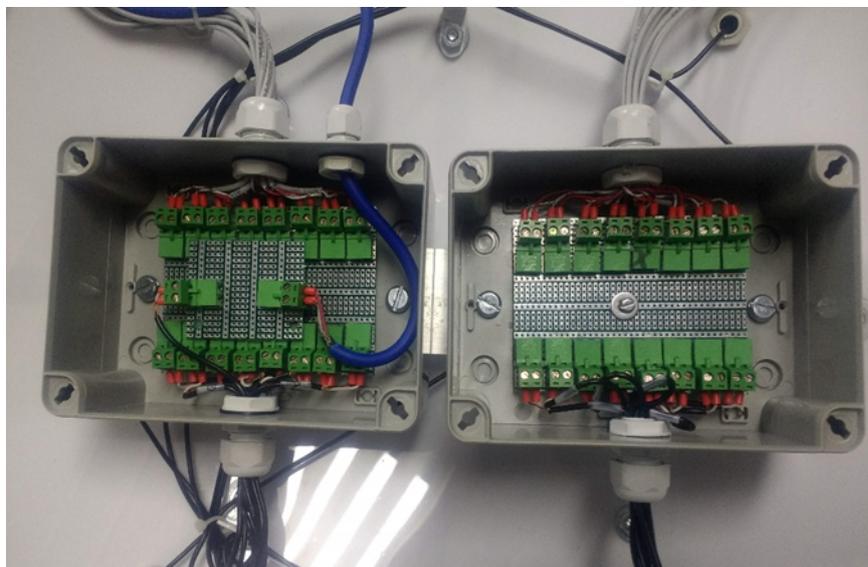


Figura 3.10 -Banco de carga resistiva abrigado na parte interna do domo.

Fonte: Próprio autor

É importante salientar que a organização dos cabos na montagem de um protótipo de engenharia é um fator relevante. Sendo assim, a organização escolhida levou em consideração a funcionalidade e a fácil manutenção do conjunto, uma vez que esta manutenção

poderia precisar ser feita em campo, sob condições desfavoráveis e com prazos apertados, ou seja, uma eventual manutenção precisaria ser feita o mais rápido possível.

A **Figura 3.11** apresenta a fotografia da parte interna do detector sem o acrílico usado como tampa traseira.



Figura 3.11 - Acrílico de proteção.

Fonte: Próprio autor

3.5.2 Sistema de aquisição de dados (SAD)

O sistema de aquisição de dados (SAD) pode ser dividido em duas partes: o *hardware* e o *software*. Em relação ao *hardware*, foi projetada e desenvolvida uma unidade para aquisição de dados remota baseada em um microcontrolador e um computador local de aquisição. O componente fundamental desta unidade é a placa de aquisição de dados desenvolvida no Laboratório de Propriedades Ópticas (LAPO). Essa é uma placa padrão para aquisição de dados e conta com um microcontrolador PIC, modelo 18F4553, com 12 bits de resolução, 48 MHz de *clock* e 16 pinos de I/O. Esses pinos de I/O podem ser configurados como entrada e saída digitais. Sendo mais específico, 13 destes pinos podem servir de entradas analógicas, os 3 pinos restantes só podem servir como saída. As 13 entradas para sinais analógicos são multiplexadas por um circuito integrado no PIC, uma vez que o PIC usado conta com um único ADC. No projeto ora descrito somente 9 dos 13 pinos foram configurados como entradas analógicas e usados para este mister. Os quatro pinos restantes foram aterrados.

É importante chamar a atenção do leitor para o fato de que o detector desenvolvido contava com 17 células solares para determinação da irradiância solar local, portanto, 4 sensores a mais que as 13 entradas analógicas próprias do PIC usado. Para resolver este impasse técnico optou-se por programar somente 9 canais analógicos. A estratégia de aquisição adotada, para possibilitar a leitura do total de sensores usados no *fly eye*, foi ler os sensores em dois blocos de 9 canais. Num primeiro bloco eram lidos os detectores de 1 a 8, além do sensor 17, que ficava no topo do *fly eye*.

O segundo bloco lido diz respeito aos sensores de 9 a 16, sendo que o sensor 17 era lido novamente. Esta estratégia de aquisição de dados tem duas vantagens: (i) permite a aquisição de dados das 17 células solares que servem de radiômetro e (ii) permite usar a medição consecutiva do canal 17, que deve apresentar um valor numérico com pequena variação, um valor grande de discrepância na medida deste canal pode servir de auto diagnóstico de falha. Assim, caso constate-se discrepância do valor lido no canal 17 o ciclo de leitura pode ser considerado inválido e será recomeçado, por exemplo.

Na implementação dessa estratégia de aquisição de dados foram usados micro-relés de medição da Omron (2 polos, 2 posições, 12 Vdc, modelo SM4-12), comandados por um bit de controle (\mathbf{d}_c) gerado pelo PIC. Assim quando \mathbf{d}_c é igual a 0 os sensores 1 a 8 e a célula solar 17 tem seus valores analógicos amostrados e adquiridos pelo SAD. Quando \mathbf{d}_c é igual a 1, os relés são chaveados, permitindo amostrar e adquirir os sinais das células solares 9 a 16 e mais o sensor 17. Esse banco de relés forma um pré-multiplex eletromecânico responsável por dobrar a capacidade de medição de 8 das 9 entradas analógicas programadas no *firmware* do PIC.

A unidade de aquisição conta com LEDs para indicação do chaveamento dos relés para cada canal, a cada ciclo de leitura. O *hardware de aquisição de dados* (SAD) pode ser melhor entendido a partir da **Figura 3.12**. A unidade SAD comunica-se com um *netbook* instalado ao lado dela por uma porta USB. Ambos ficavam na galeria de serviço que dá acesso ao terraço do Instituto de Física – UFBA. Assim, o computador servia de interface homem-máquina, permitindo o monitoramento em tempo real e o funcionamento do detector *fly eye* desenvolvido, além de assegurar a comunicação com o mundo exterior por um link de internet. Este computador pessoal também criou a possibilidade de armazenar localmente os dados em formato de arquivos de textos (.txt).

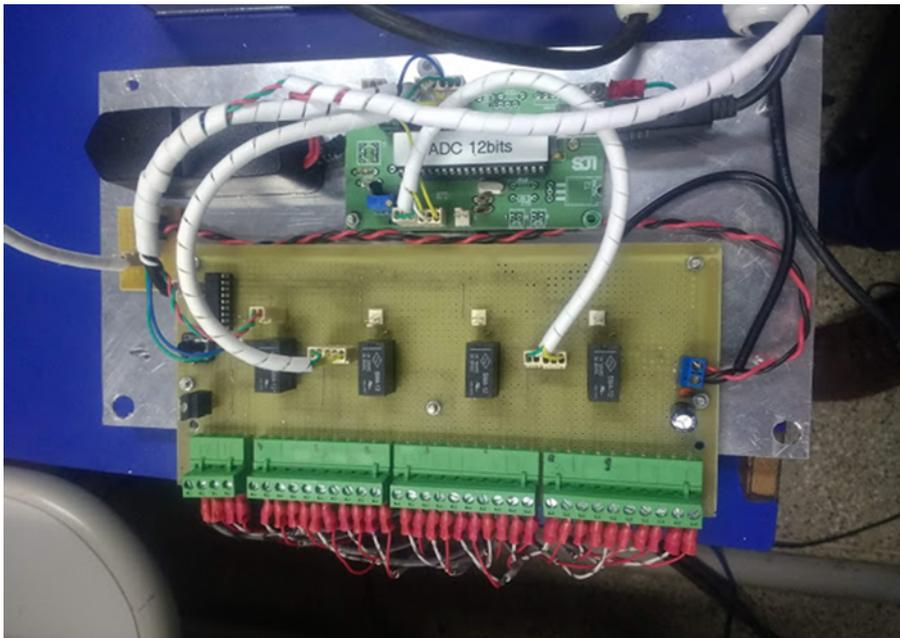


Figura 3.12 - Vista do hardware de aquisição de dados (Unidade aberta).
Fonte: Próprio autor

3.5.3 Software de aquisição

O *software* de aquisição de dados é responsável por chavear o banco de relés e assim determinar qual conjunto de sensores será lido a cada ciclo de aquisição. Inicialmente com os relés de medição estão em repouso e os 9 primeiros canais de aquisição dos sinais analógicos são lidos em sequência por intermédio do *multiplex* interno do PIC. O primeiro bloco de valores digitalizados oriundos da unidade de aquisição SAD é guardado em um arquivo de texto. Este ciclo se repete, mas com os relés chaveados e possibilitando a aquisição do segundo bloco de sensores. Os passos de aquisição dos 9 canais se repetem e os valores digitalizados são guardados no mesmo arquivo de texto inicial, isso por uma instrução do tipo *APPEND*.

O *software* de aquisição e monitoramento foi desenvolvido, em linguagem *C-Sharp*, pelo engenheiro Lucas Ramalho Oliveira. Esse *software* é uma adaptação de uma interface padrão comumente utilizada para aplicações em aquisição de dados. As adaptações para o uso na aquisição de dados do detector *fly eye* foram inúmeras, do formato da IHM (Interface homem Máquina), propriamente dita, aos *delays* no ciclo de aquisição de dados. O programa precisou passar por uma forte adequação por se tratar de um sistema multicanal em tempo real. Pensando em facilitar a compreensão de multi-gráficos plotados em tempo real foi adicionado uma janela com abas que correlacionava a repartição conceitual do detector em dois anéis de sensores, ou simplesmente, *rings*.

Estruturados dessa forma, os *rings*, podem ser acessados de maneira individual a partir das abas em tempo real. Uma outra mudança realizada no *software* ocorreu com a inserção de uma função para que fosse possível impor ganhos particulares a cada

sensor. A determinação de um ganho individual para cada sensor foi a solução encontrada para equalizar a sensibilidade das diferentes células solares usada no projeto. Os ganhos atribuídos foram obtidos experimentalmente a partir da calibração de cada célula usando uma fonte de luz artificial (LED). Isso garantiu a confiabilidade e homogeneidade nos dados de irradiância obtidos.

Na **Figura 3.13** observa-se a interface homem-máquina gerada pelo software de aquisição.

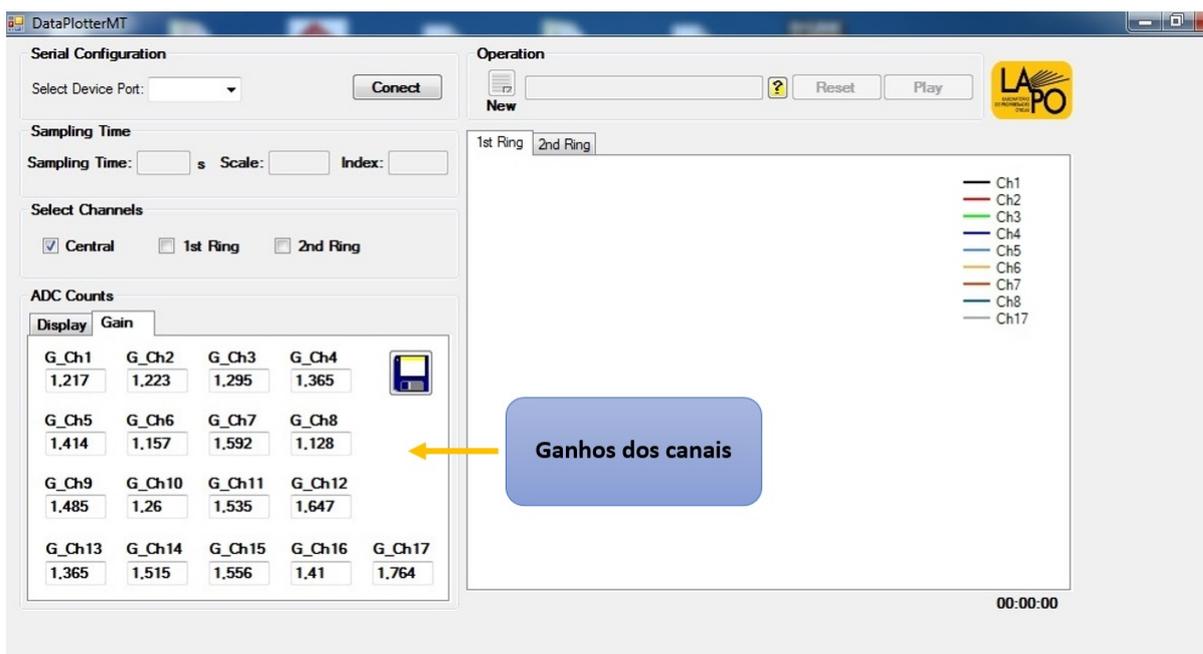


Figura 3.13 -Software de aquisição de dados (DataPlotterMT).

Fonte: Próprio autor

3.5.4 Calibração das células solares e determinação individual de suas sensibilidades

Foi desenvolvido um dispositivo para calibrar as células solares usadas como sensores da irradiância do Sol. Nesse contexto, foi utilizada uma matriz de LEDs do tipo Full spectrum. Essa matriz de LEDs é utilizada para o cultivo de plantas *indoor*, tendo como principal característica a emissão de um espectro largo que se estende de 450 a 800 nm, na tentativa de fazer uma mimica do Sol. Esse tipo de LED torna possível a fotossíntese, proporcionando um ambiente mais próximo do natural para o desenvolvimento das plantas. Na **Figura 3.14** é apresentado o espectro característico do LED *Full spectrum* utilizado, o gráfico de absorção da célula solar de CdTe/Cds e a espectro solar.

No que tange a montagem do iluminador de calibração, a face traseira da pastilha que suporta a matriz de LEDs foi recoberta com pasta térmica, material habitualmente

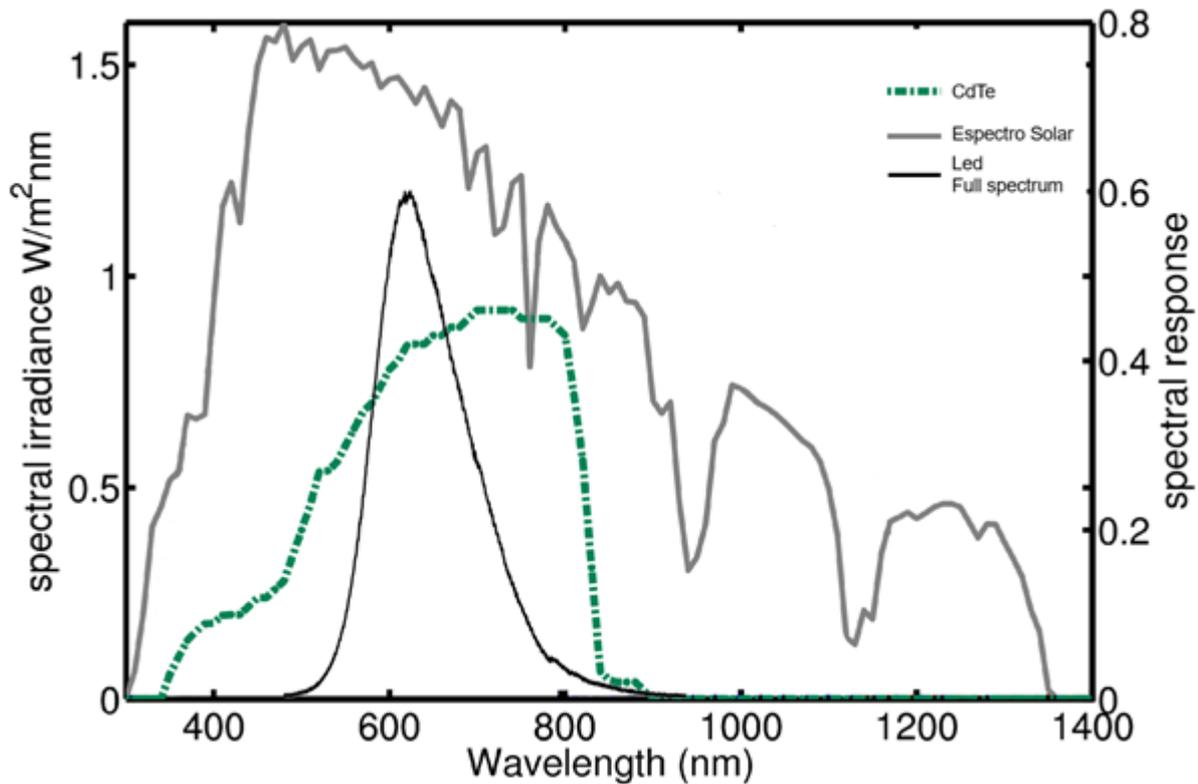


Figura 3.14 -Gráfico apresentando o espectro do LED Full Spectrum, espectro solar e da célula CdTe/Cds.

Fonte: Adaptado de Behrendt Kuhnet Hammer Lorenz Betcke Heinemann (2010)

usado como facilitador para transmissão de calor de dispositivos eletrônicos de potência e CPUs, em seguida a matriz de LEDs foi montada sobre um dissipador. O conjunto dissipador e ventilador usado foi resgatado da sucata e normalmente serve de sistema de arrefecimento para uma antiga CPU AMD-64. No caso aqui reportado, o conjunto de arrefecimento serve para manter a temperatura da matriz de LEDs constante e muito próxima da temperatura ambiente. Mantendo assim a eficiência deste iluminador.

Esse iluminador tem como finalidade realizar a calibração das células solares de filmes finos usadas como sensores de irradiância solar. A metodologia aplicada na calibração pode ser descrita nas seguintes etapas:

(I) Fixação por encaixe *standard* do iluminador na face ativa de cada sensor, um por um, enquanto os outros eram mantidos não iluminados. Isso teve o propósito de obter o mesmo campo de radiação para cada pastilha testada. O campo de iluminação constante em intensidade foi obtido pela aplicação de uma corrente constante na matriz de LEDs, sempre mantida à mesma distância da face ativa das células testadas.

(II) Utilizando tempos iguais de iluminação para todos e cada um dos sensores durante os testes foram determinadas as eficiências de detecção de cada sensor. Com isso

e de forma indireta foram determinados os ganhos para que cada sensor tivesse a mesma resposta em função do fluxo de luz que os demais.

A caracterização avalia de modo geral a qualidade do sensor e evidencia o comportamento da tensão, corrente elétrica e potência elétrica produzida. Esses parâmetros ao final remetem à eficiência dos sensores, garantindo assim uma homogeneidade nas escolhas das células solares como sensores de irradiância solar. A **Figura 3.15** mostra o sistema de calibração, bem como sua fonte de alimentação.

Em termos matemáticos os ganhos podem ser obtidos a partir da razão entre o maior média em contagens de ADC para uma dada célula solar do *fly eye* (que passa a representar 100% de eficiência, ou assume o valor 1 depois de normalizado), com o valor médio em contagens de ADC dos sensores restantes. A relação (14), deve ser aplicada de forma individual para cada sensor.

$$G_{as} = 1 + \left(1 - \frac{M_{ADC}}{mx(M_{ADC})}\right) \quad (3.1)$$

Sendo:

G_{as} = Ganhos dos sensores

M_{ADC} = Média dos níveis de ADC

$mx(M_{ADC})$ = maior média obtida em contagens de ADC



Figura 3.15 - Sistema de calibração dos sensores.
Fonte: Próprio do autor

Neste capítulo, além da análise dos dados de medição, são apresentados os testes de calibração e os resultados finais da eficiência de conversão fotovoltaica em função do envelhecimento dos sensores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os testes e medições feitas durante este trabalho de dissertação. Na primeira etapa foi feita a seleção e calibração dos sensores, no intuito de definir qual a melhor opção de carga resistiva externa para os sensores que seria utilizada. Além dos testes feitos em bancada, que tiveram por objetivo calibrar o instrumento, foram feitas medições da irradiância solar durante o período de um ano. Com bases nos dados obtidos foi possível o entendimento do comportamento médio da insolação local através de um dispositivo fixo de multicanais. Que foi capaz de determinar os pontos que recebem os maiores índices de radiação solar no detector durante as diferentes estações do ano.

4.1 TESTES DE CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS

Nos testes realizados em bancada foi observado a necessidade de equalizar as 17 células solares em relação a suas eficiências de detecção. O principal objetivo foi garantir uma leitura da irradiação solar mais homogênea entre cada célula. Essa consonância na leitura foi feita por software. Com isso foi adicionado uma aba com os ganhos para cada célula, a célula de maior ganho recebeu o valor 1, e com isso foram distribuídos os ganhos para as células restantes a depender da discrepância entre a tensão lida numa dada célula, em relação a célula de mais eficiência de detecção.

4.2 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO SÓLIDO DO FLY EYE

Para determinar o ângulo sólido total do detector desenvolvido foi necessário determinar o ângulo sólido das células solares de filme fino de CdTe/Cds usadas na montagem do fly eye. Essa determinação foi feita utilizando um goniômetro de mesa da RIGOKU; CAT. NO. 1511, uma mini lanterna LED; com foco ajustável; BRASFORT referência 7866, um multímetro de bancada RIGOL; modelo DM3058E, além de uma das células

solares utilizadas no detector fly eye; escolhida ao acaso. A **Figura 4.1** ilustra o procedimento utilizado para traçar a curva do ângulo versus a queda de tensão no resistor de carga, a partir da corrente gerada pela célula.

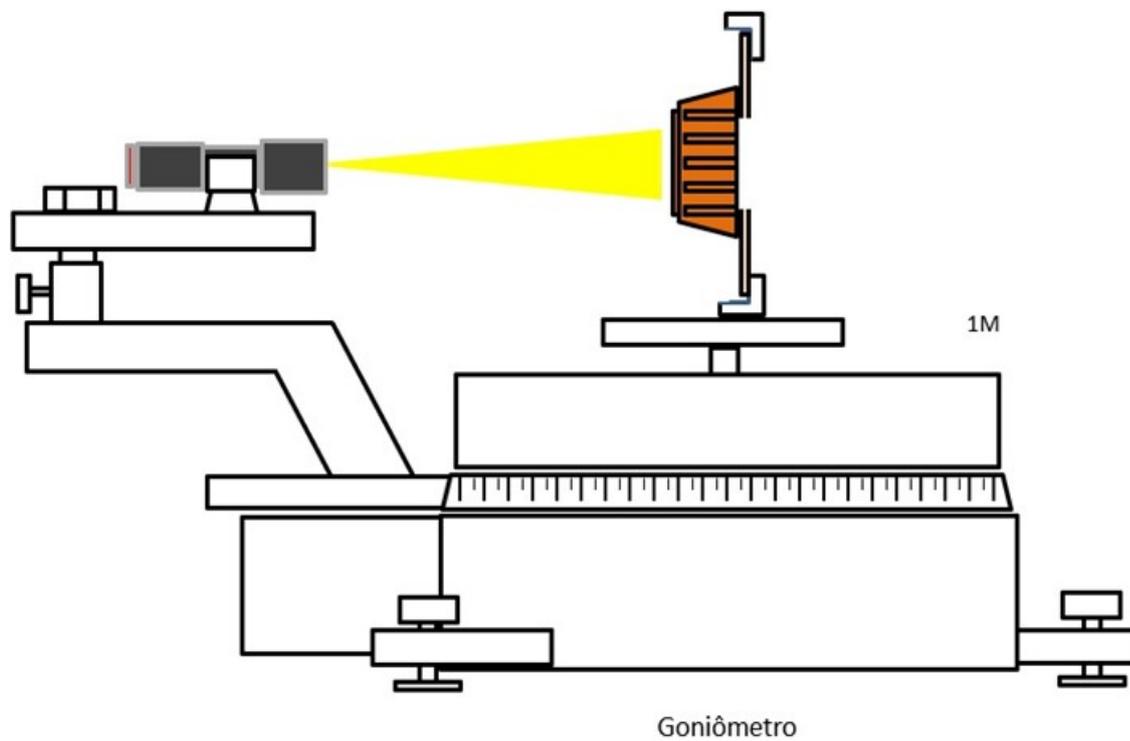


Figura 4.1 - Diagrama do aparato experimental utilizado para determinar a perda da eficiência dos sensores e ângulo sólido do detector.

Fonte: Próprio do autor

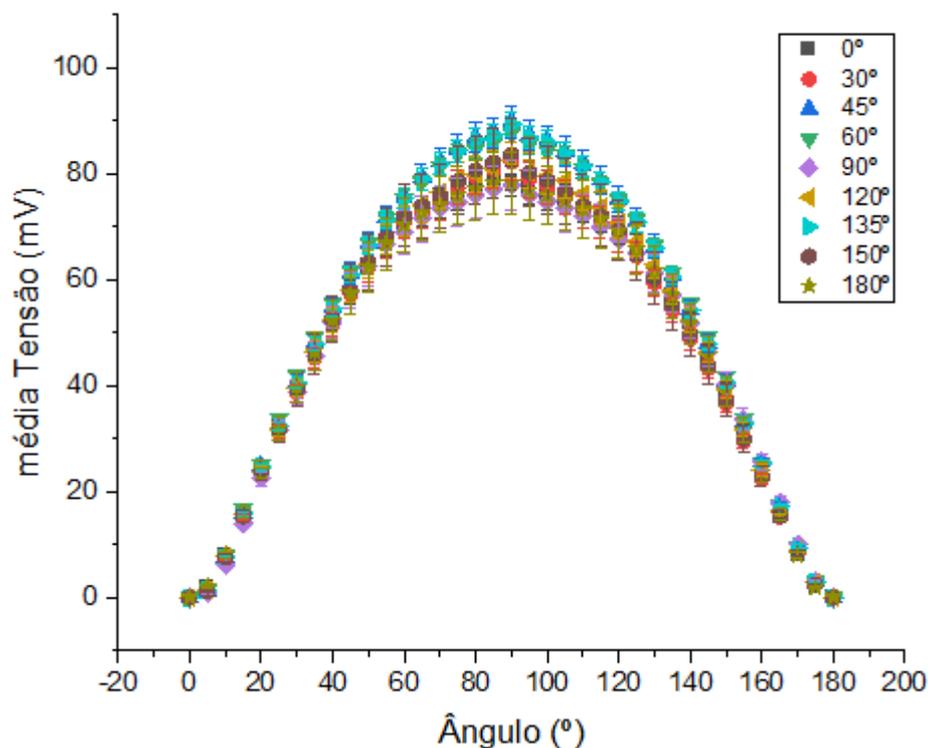


Figura 4.2 - Gaussiana que representa o estímulo em tensão a partir do ângulo de incidência.
Fonte: Próprio do autor

Utilizou-se o sistema apresentado na **Figura 4.1** para determinar a resposta das células solares utilizadas no detector em função do ângulo de incidência relativo entre a célula e a fonte luminosa e ao ângulo de alinhamento da célula no plano central do goniômetro. Assim, a célula foi montada fixa no plano central do goniômetro, devidamente posicionada no plano mediano desse aparato.

A cada medição o braço que servia de fixação para a lanterna tinha seu ângulo de posicionamento alterado de 5 em 5 graus, entre zero e 180°. A **Figura 4.2** representa a curva ângulo x queda de tensão na resistência de carga a partir da corrente gerada pela célula, com as respectivas barras de erro associadas a cada ponto. Como mencionado, o plano central do goniômetro onde a célula estava fixada também pode ser girado, o que permitiu testar a homogeneidade da geração de corrente em função do ângulo de alinhamento da célula no plano. Foram escolhidos ângulos entre 0 e 180°, com intervalos variáveis (0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° e 180°). Para cada angulação do braço e diferentes ângulos de alinhamento da célula no plano central foram realizadas três medições, perfazendo um total de 972 aferições, isso no intuito de gerar uma estatística e minimizar erros associáveis à medição. A **Figura 4.2** sugere que independente desses dois

ângulos a intensidade de corrente gerada pela célula é quase a mesma, o que determina uma muito boa homogeneidade destes dispositivos.

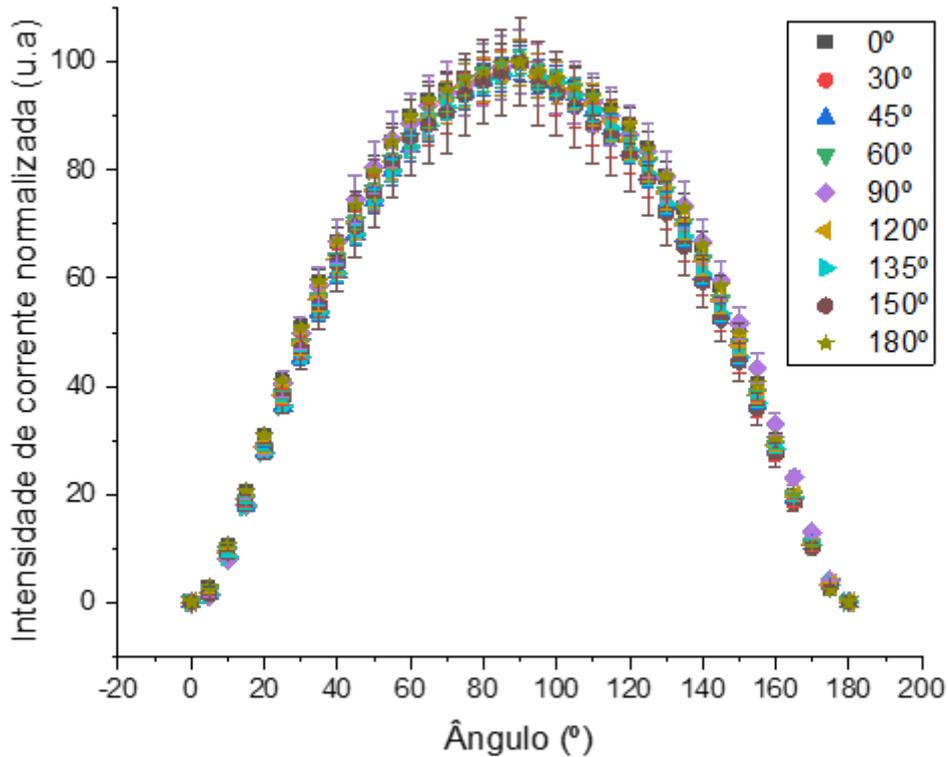


Figura 4.3 - Curva da intensidade de corrente normalizada x ângulo incidente.
Fonte: Próprio do autor

Na **Figura 4.3** os mesmos resultados são apresentados normalizados em intensidade, além disso as barras de erros associadas a cada ponto dizem respeito ao intervalo de confiança atribuído a cada medida.

Para realizar uma investigação experimental da irradiância solar, necessita-se de um valor medido que determine a quantidade de radiação eletromagnética que chega à superfície terrestre. Essa quantidade deve ser igual a potência radiante, ou seja, a integral da energia da radiação recebida por uma unidade de tempo, por unidade de área. Apesar das medidas obtidas experimentalmente terem sido realizadas em função da potência radiante, habitualmente na literatura se encontra informações sobre a intensidade da radiação. A potência radiante e a intensidade de radiação são grandezas físicas distintas, porém, relacionadas entre si. Como a intensidade de radiação é definida pela razão entre a potência radiante e o ângulo sólido de incidência do observador, apenas em casos especiais para fins analíticos, quando a área iluminada e o volume são pequenos a potência da radiação pode ser tomada como a sua intensidade. Pensando nessa ques-

tão foi determinado o ângulo sólido total do detector. Essa determinação foi feita pela construção geométrica hipotética do ângulo sólido coberto pelo conjunto dos 17 sensores que formam o detector *fly eye*. Assim, conhecendo o ângulo sólido para uma das células solares de CdTe/Cds, pelo prolongamento das retas limites da borda de cada sensor foi possível estimar o ângulo sólido para o conjunto. É importante chamar a atenção para o fato do detector proposto ser formado por sensores discretos e não por uma superfície sensível contínua. Apesar disso, em função da distância Terra-Sol, os raios que chegam à superfície do planeta podem ser considerados paralelos o que compensa a descontinuidade da superfície sensível do detector.

É também importante lembrar que o ângulo sólido de uma geometria semiesférica depende do ponto de corte imposto para a detecção. Assim, as figuras 44, 45 e 46 apresentam os resultados para diferentes limiares de detecção (em unidade de atenuação -4, -3, -2, -1,5 e -1 dB), isso em relação à intensidade medida pela célula 17, montada no azimute do *fly eye*. Assim, para uma atenuação de -4dB, ou uma medição pelas células da borda de somente 40% da luz detectada pela célula do topo, o *fly eye* é capaz de enxergar luz em até 214° de abertura, ou 17° além da linha do horizonte para cada lado.

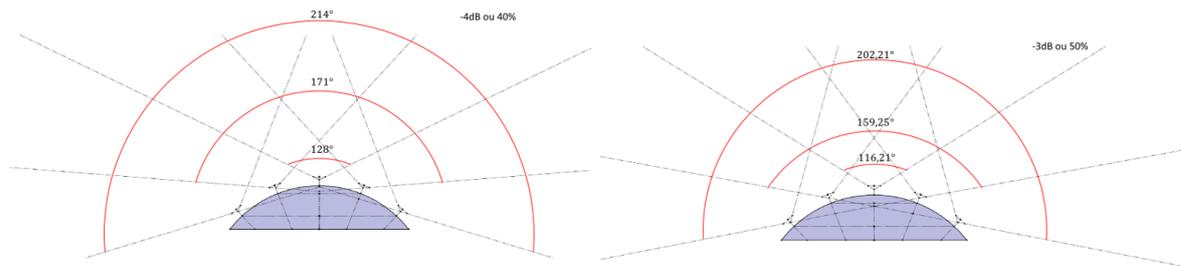


Figura 4.4 - Ângulo sólido do detector *fly eye* com atenuação de -4dB e -3db respectivamente.
Fonte: Próprio do autor

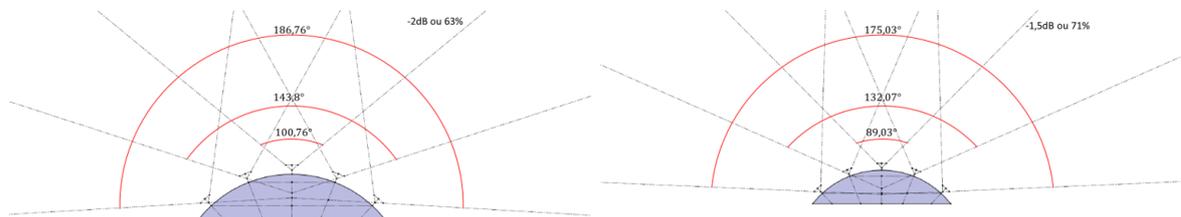


Figura 4.5 - Ângulo sólido do detector *fly eye* com atenuação de -2dB e -1,5db respectivamente.
Fonte: Próprio do autor

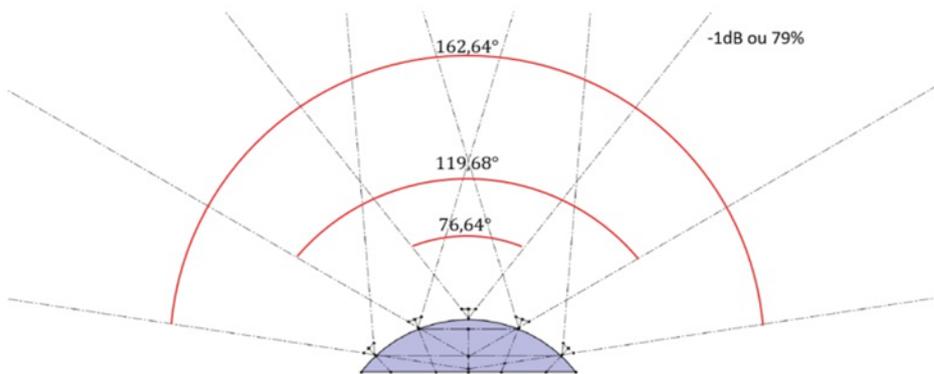


Figura 4.6 - Ângulo sólido do detector *fly eye* com atenuação de -1dB.
Fonte: Próprio do autor

Na **Figura 4.7** é apresentado um gráfico resumindo o resultado encontrado para a dependência do limiar de detecção imposto às células solares da borda inferior do *fly eye* em função do ângulo sólido. A linha em vermelho é um ajuste polinomial quadrático *ad hoc*, de maneira a guiar os olhos do leitor.

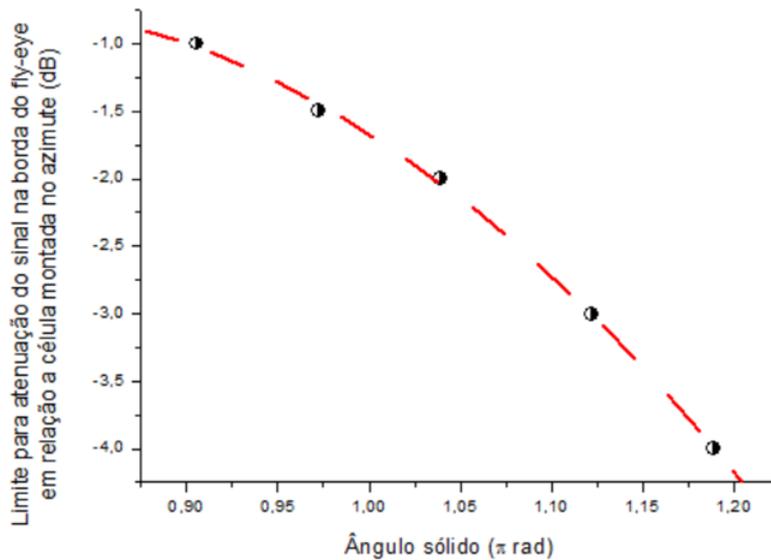


Figura 4.7 - Gráfico do limiar de detecção imposto às células solares da borda inferior do *fly eye* em função do ângulo sólido em função.

Fonte: Próprio do autor

4.3 METODOLOGIA DA AQUISIÇÃO DE DADOS

A estratégia aplicada para a aquisição de dados das 17 células solares que compõem o detector *fly eye* levou em consideração o local de instalação desse radiômetro (latitude e longitude), as diferentes estações do ano, o carregamento resistivo das células e a topologia de montagem do detector (*fly eye*).

Na mensuração da irradiância solar os dados foram sempre tomados com a célula CH01 direcionada para o norte geográfico. Os dados foram obtidos em diferentes estações do ano totalizando uma campanha de aproximadamente 365 dias.

Os dados de irradiância foram gerados dia a dia e salvos em documento do tipo texto. A cada dia o dispositivo era iniciado às 06 h, e encerrava seu funcionamento às 18 h. O sistema de aquisição de dados foi instalado na galeria de serviço abaixo da laje do Instituto de Física da UFBA.

O equipamento coletou os dados de irradiância de forma contínua, iniciado no mês de abril de 2020 e encerrado no mês de março de 2021. Esses dados foram tratados e agrupados em meses equivalentes as estações do ano. Para uma melhor visualização da irradiância solar foram feitos gráficos e mapas de calor que serão apresentados mais adiante neste capítulo.

Aquisição de dados				
	Outono	Inverno	Primavera	Verão
Estação do Ano	20/03/2020 à 20/06/2020	20/06/2020 à 22/09/2020	22/09/2020 à 21/12/2020	21/12/2020 à 20/03/2021
Local	IF – Telhado	IF – Telhado	IF – Telhado	IF – Telhado
Concluído	X	X	X	X

Tabela 4.1 - Local e datas que foram realizadas a aquisição de dados.

Fonte: Próprio do autor

4.4 ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS ESTAÇÕES DO ANO

As estações do ano ocorrem por conta da inclinação do eixo terrestre em relação ao plano do Sol. O movimento de translação que a terra realiza em torno do Sol, percorrendo uma órbita elíptica dá origem às estações.

Para melhor compreensão sobre as estações do ano é importante ter o conhecimento sobre o solstício e o equinócio. A partir da inclinação do eixo da terra que é de $23,5^\circ$ em relação ao eixo de translação, movimento esse que faz com que a Terra descreva uma órbita elíptica em torno do Sol. Esse movimento determinado a época do ano, assim a luz proveniente do Sol incide com maior intensidade sobre o hemisfério norte e, na outra parte do ano, incide com maior intensidade sobre o hemisfério sul, caracterizando o

chamado solstício. Da mesma forma, ocorre que em determinada época a luz solar incide de maneira igual sobre os dois hemisférios, caracterizando o equinócio. Para ilustrar o afirmado acima, nas **Figura 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11** são mostrados os gráficos de insolação média para as diferentes estações do ano obtidos neste trabalho de investigação.

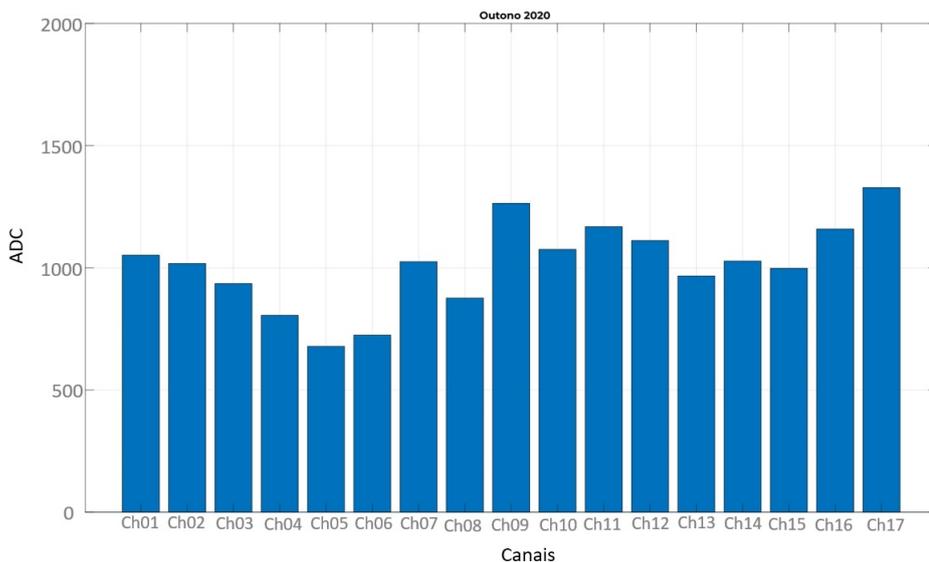


Figura 4.8 - Gráfico em barra Outono 2020.
Fonte: Próprio do autor

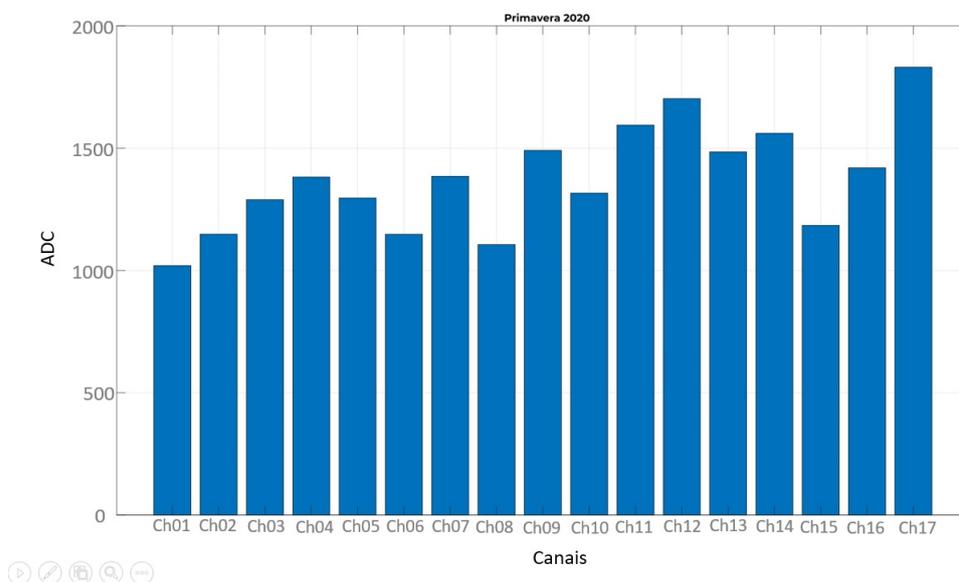


Figura 4.9 - Gráfico em barra Primavera 2020.
Fonte: Próprio do autor

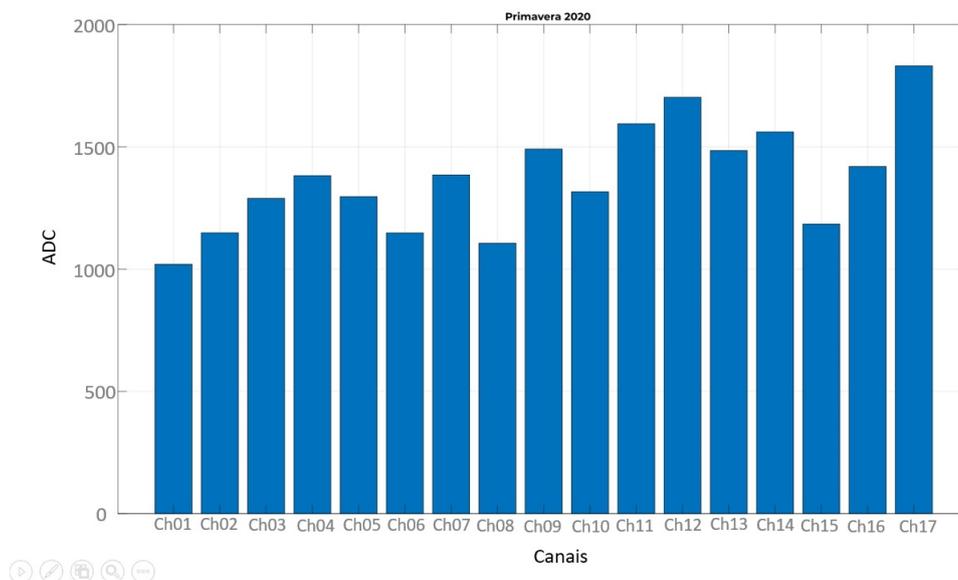


Figura 4.10 - Gráfico em barra Primavera 2020.
Fonte: Próprio do autor

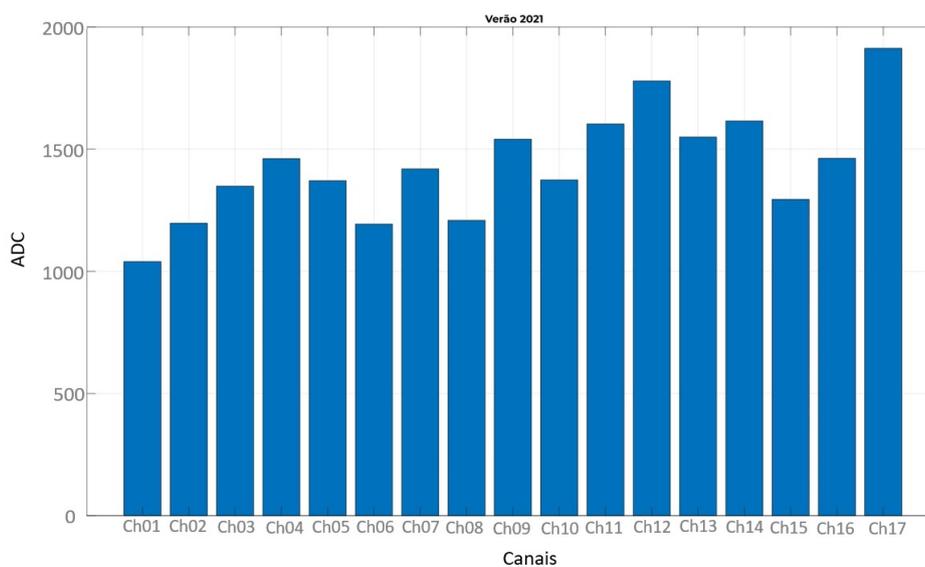


Figura 4.11 - Gráfico em barra Verão 2020.
Fonte: Próprio do autor

As figuras acima ilustram as estações do ano com cada barra em azul representando um canal do detector. O eixo X representa os canais e o eixo Y apresenta o nível de contagem em ADC, que foi normalizado em 2000 contagens. Desta forma é perceptível o nível de radiação solar recebida por cada canal durante as diferentes estações do ano. Foi feita a integralização dos canais de forma a apresentar as medidas aferidas pelo radiômetro

com topologia *fly eye* para cada uma das estações do ano. A **Figura 4.12** apresenta os valores integralizados.

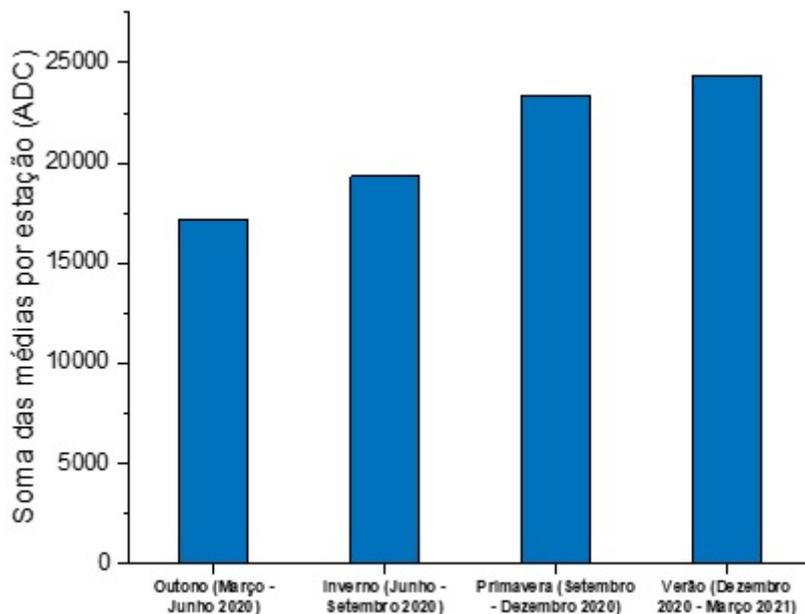


Figura 4.12 - Gráfico dos valores integralizados para cada estação do ano.

Fonte: Próprio do autor

É possível observar a partir das medidas feitas pelo *fly eye* que durante o verão houve cerca 30% mais incidência de radiação solar quando comparado ao outono do período de aquisição de dados. A **Figura 4.13** ilustra a soma da irradiância no período de 52 semanas.

A **Figura 4.14** representa a soma as médias da irradiância. O outono é a estação com menor insolação em comparação as outras estações. O outono brasileiro, no geral é caracterizado pelo tempo ameno e seco, uma vez que essa estação exprime a mudança estacional de um período quente e úmido. Com isso as alterações atmosféricas no outono propõe no Brasil uma acentuação crescente de massas de ar frio e seco. Outro ponto a ser observado, o verão destaca-se com o maior índice de irradiância solar recebida durante as 52 semanas de medição.

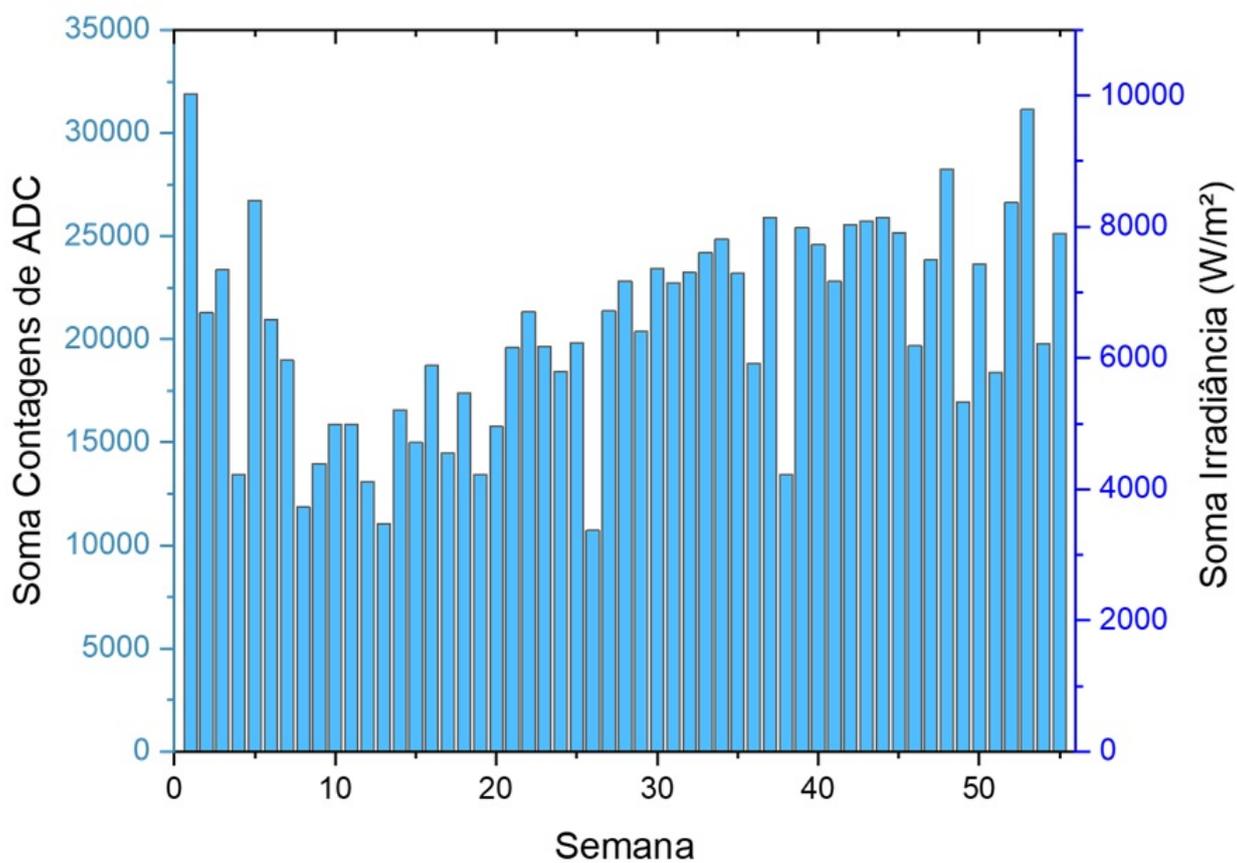


Figura 4.13 - Soma das contagens de ADC e W/m^2 .

Fonte: Próprio do autor

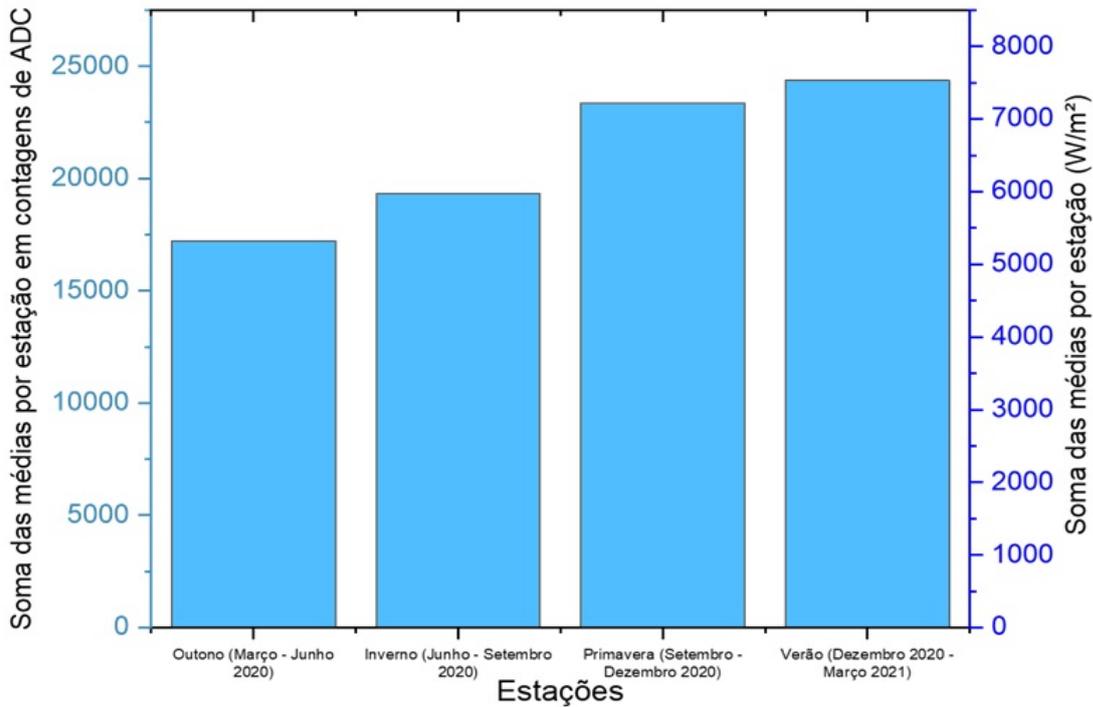


Figura 4.14 - Soma das médias por estação em contagens de ADC e W/m^2r *fly eye*. Fonte: Próprio do autor

Na **Figura 4.15** foi feita a comparação da irradiância obtida por um radiômetro profissional modelo CNR1-KippZonen e o *fly eye*. Esses dados foram cedidos pelo aluno de doutorado do programa em mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, Leonardo Rafael Teixeira Cotrim Gomes. O CNR1 consiste em um par de piranômetro e pirgeômetro voltado para cima e um par complementar voltado para baixo. Os piranômetros e pirgeômetros medem a radiação infravermelha IR de ondas curtas e longas, respectivamente. Analisando o gráfico da **Figura 4.16**, observa-se que o *fly eye* segue a tendência do nível de irradiância durante todo período de medição.

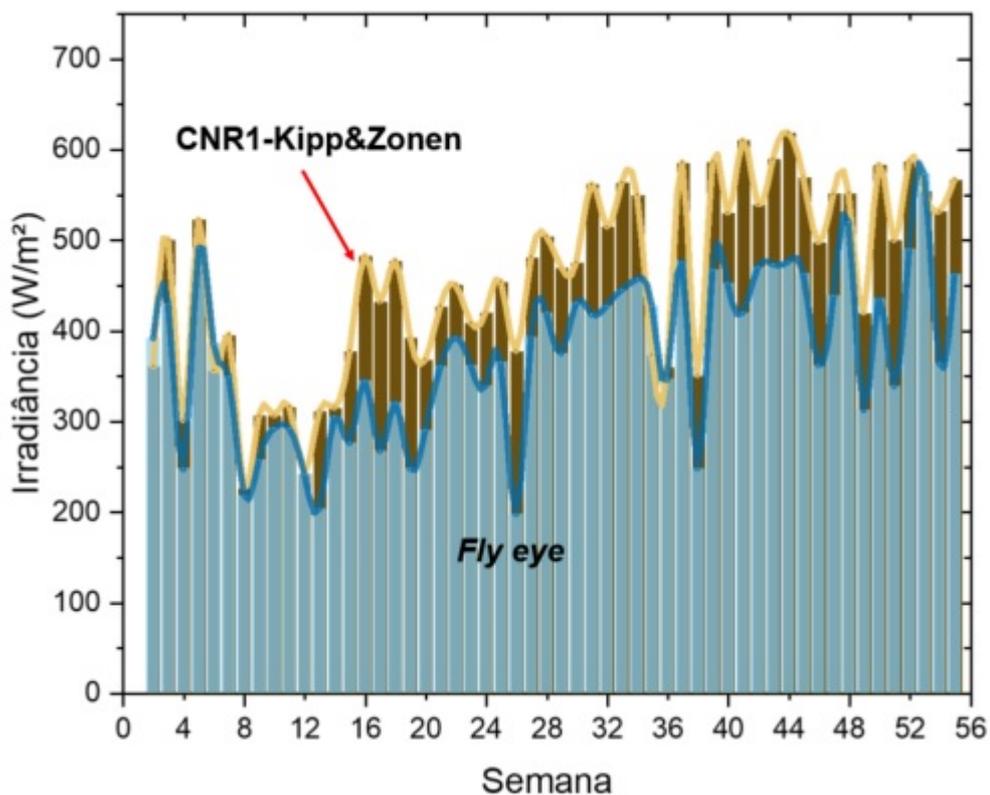


Figura 4.15 - Gráfico a irradiação entre um radiômetro profissional e o *fly eye*.
Fonte: Próprio do autor

A partir dessa análise foi realizada o gráfico da **Figura 4.16** que ilustra os níveis de irradiação entre eles em W/m^2 . A cima representa as semanas com maior leitura em comparação com *fly eye* e na parte inferior ilustra as semanas em que o detector teve o índice de leitura superior ao radiômetro profissional. Interessante salientar que o principal fator para a pequena diferença entre os níveis de irradiação é a estabilidade do CNR1 durante o período de aquisição de dados, ao contrário do detector *fly eye*, que durante esse mesmo período ocorreu quedas de energia elétrica no local em que o detector se encontrava.

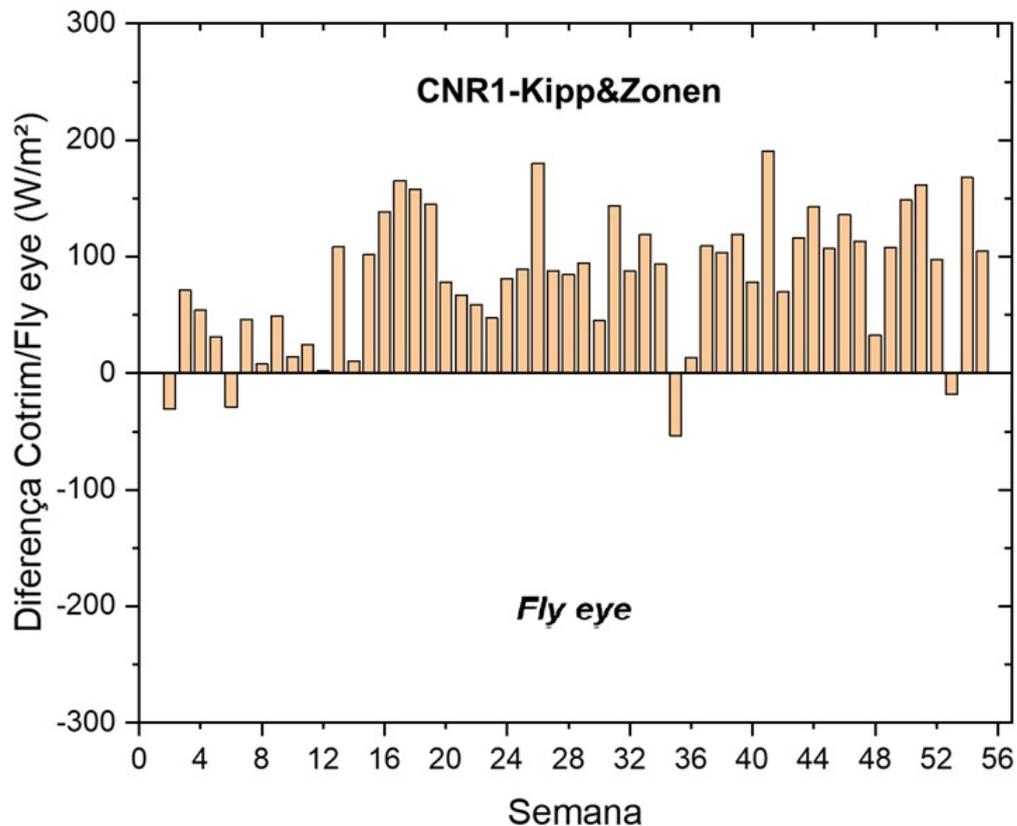


Figura 4.16 - Comparação entre CNR1 e o *fly eye*.

Fonte: Próprio do autor

4.5 ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO EM FUNÇÃO DA TOPOGRAFIA DO DETECTOR

Um dos problemas nas ciências físicas, em particular na determinação de dados referentes a uma dada topologia, é a enorme quantidade de dados gerados quando são buscadas informações das variáveis observadas na natureza. Nesse contexto, a elaboração de mapas de calor, representação gráfica utilizada para resumir regiões de interesse, facilita a leitura e a melhor compreensão dessas variáveis. Para tratar os dados gerados pelas aferições dos 17 sensores que compõem o *fly eye* construído foi desenvolvido, no *software* MATLAB, um macro que prepara e exibe mapas de calor. Desse modo, foi possível melhor observar, a partir das diferentes estações do ano, o caminho aparente do Sol no céu, que é consequência da inclinação da Terra em relação ao Sol.

É de conhecimento comum que o Sol não “nasce” exatamente no ponto cardinal leste, esse fato é uma particularidade nos equinócios (de outono e primavera), nos demais dias do ano o “nascer” do sol ocorre nas redondezas deste ponto cardinal.

A apresentam o mapa de calor do detector com a vista superior e isométrica res-

rectivamente. Essa forma de representação tem algumas vantagens, entre elas, a possibilidade de visualizar a região do dispositivo que recebeu maior intensidade de irradiação solar. Consequentemente, a partir dos conhecimentos teóricos revisitados no capítulo 2, considerando o movimento aparente, o Sol se desloca no céu com inclinações e posições distintas a depender da estação do ano.

Interessante salientar que a barra de cores utilizada no mapa de calor varia do “azul escuro” (0 Contagem ADC) ao “vermelho escuro” (100 Contagem ADC). As **Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24** apresentam os mapas de calor para as diferentes estações do ano.

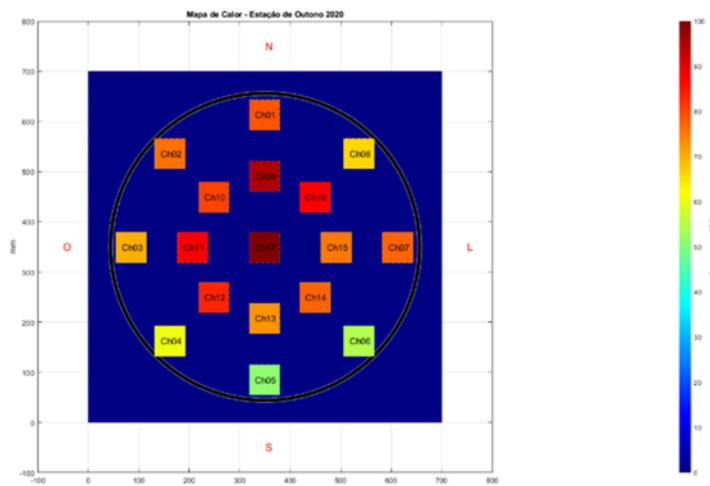


Figura 4.17 - Outono de 2020, vista superior.

Fonte: Próprio do autor

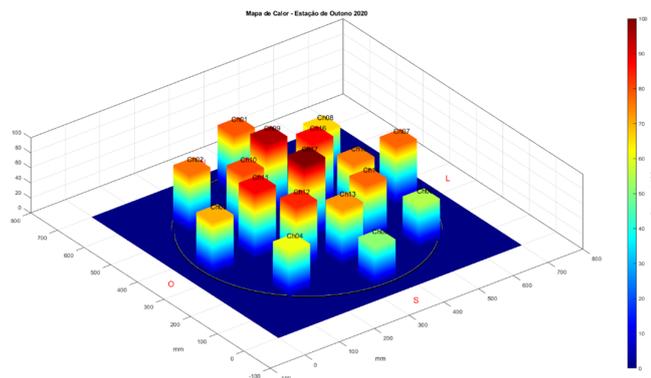


Figura 4.18 - Outono de 2020, vista isométrica.

Fonte: Próprio do autor

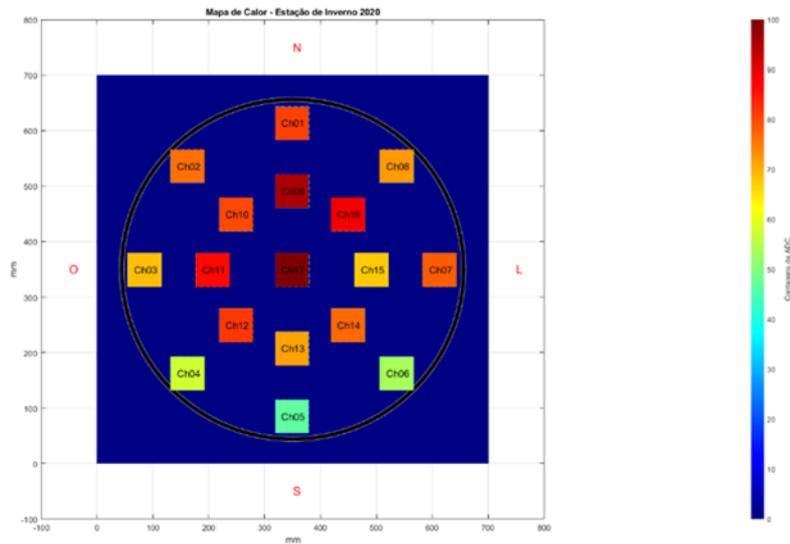


Figura 4.19 -Inverno de 2020, vista superior.
 Fonte: Próprio do autor

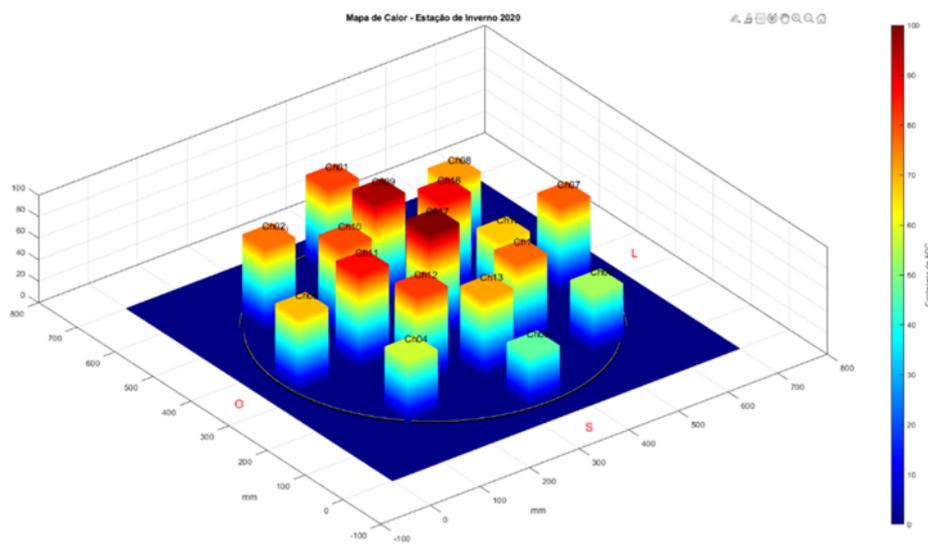


Figura 4.20 -Inverno de 2020, vista isométrica.
 Fonte: Próprio do autor

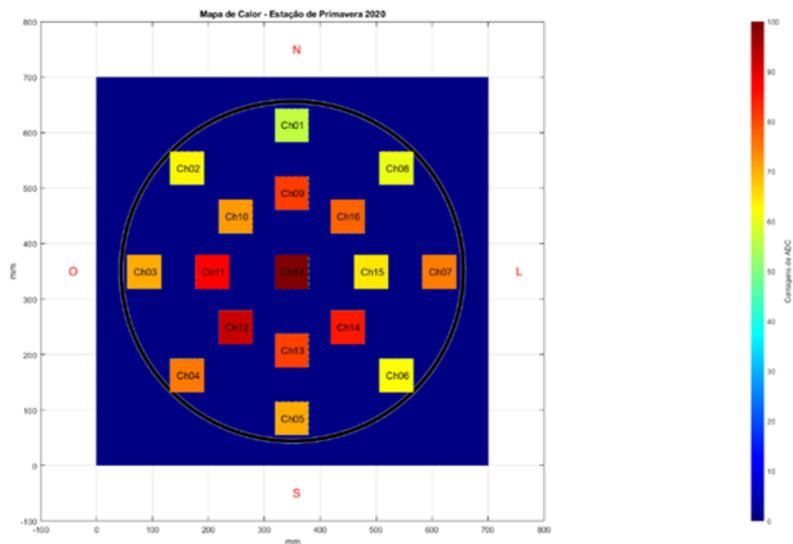


Figura 4.21 -Primavera de 2020, vista superior.
Fonte: Próprio do autor

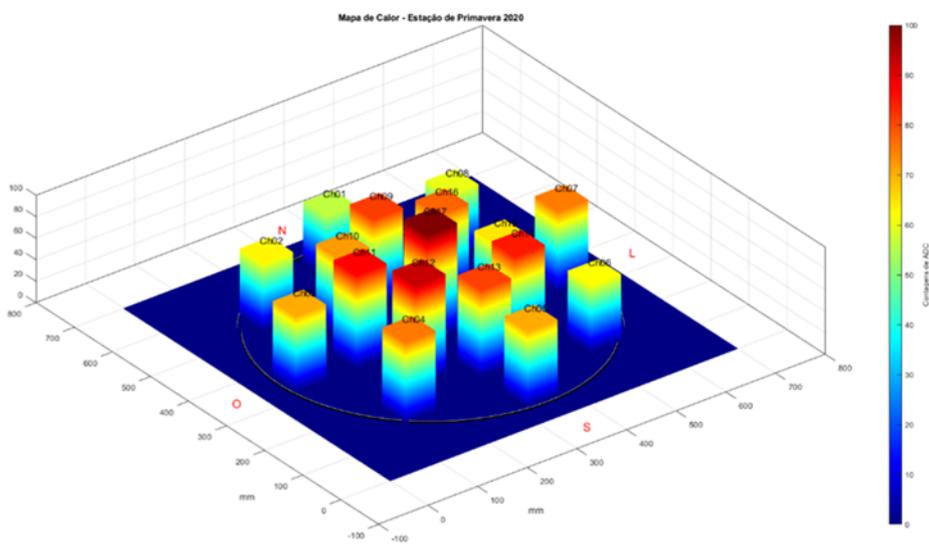


Figura 4.22 -Primavera de 2020, vista isométrica.
Fonte: Próprio do autor

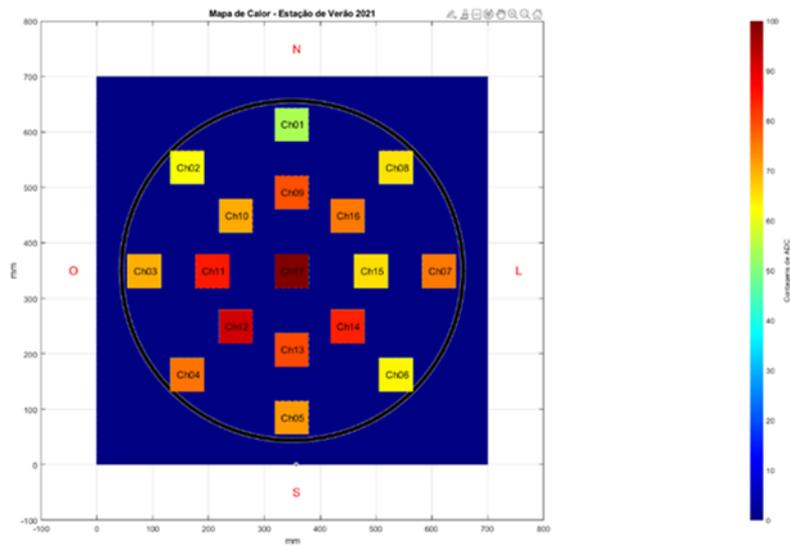


Figura 4.23 - Verão 2021, vista superior.
Fonte: Próprio do autor

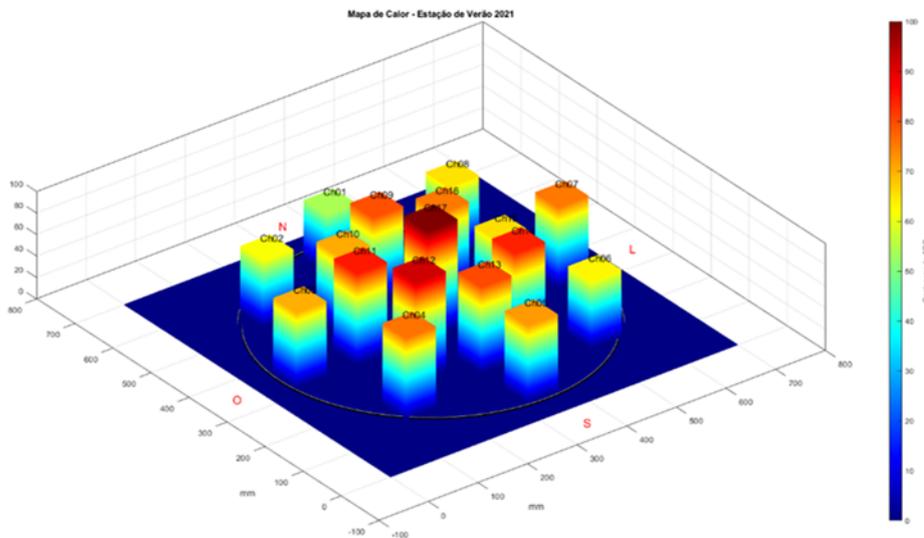


Figura 4.24 - Verão 2021, vista isométrica.
Fonte: Próprio do autor

A **Figura 4.25** apresenta os mapas de calor de um dia durante a primavera, escolhido randomicamente, ao logo das horas de aferição. A partir do gráfico é possível observar a evolução temporal do percurso feito pelo sol. Nas primeiras horas da manhã observou-se as células direcionadas à direita do *fly e ye* a ferindo u ma maior intensidade de radiação ao “nascer” do Sol. No período entre as 10:00 horas e 14:00 horas observou-se uma distribuição de radiação mais uniforme entre os canais. Ao final do dia observa-se

a inversão de padrão obtido quando comparado as primeiras horas de medida, situação que ilustra o pôr do Sol.

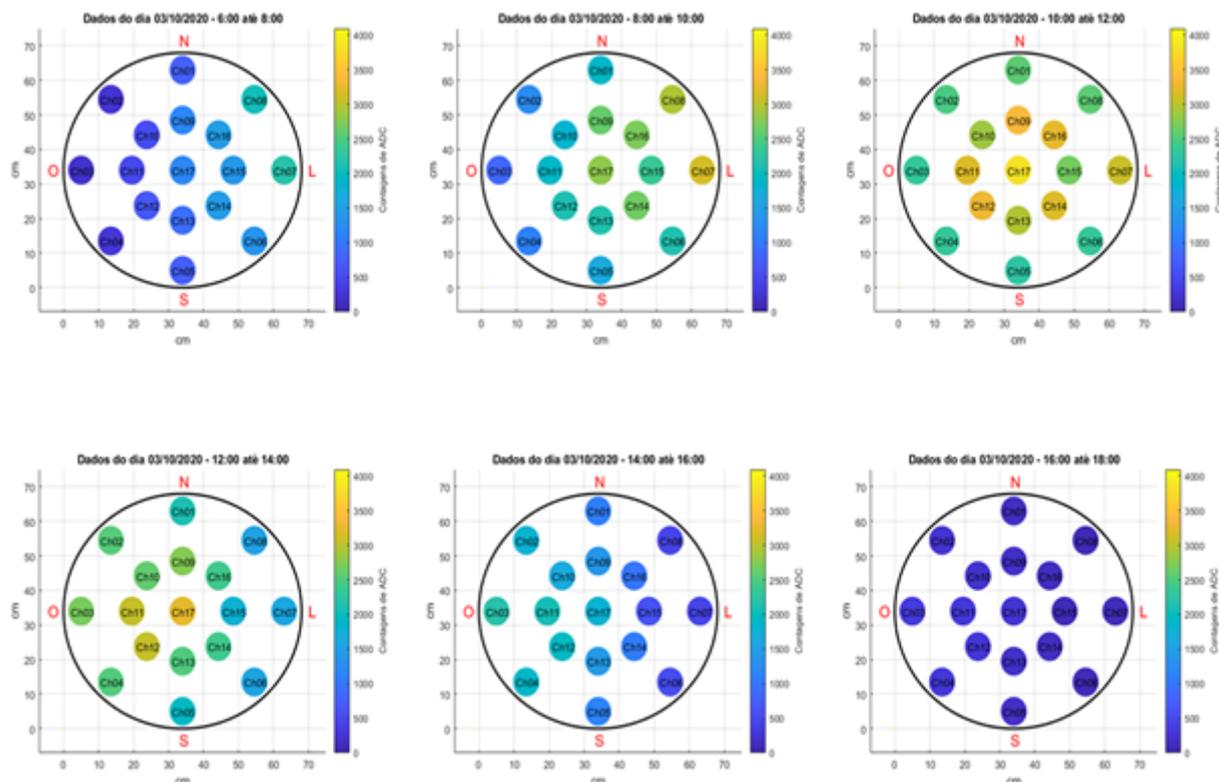


Figura 4.25 - Mapa de calor das intensidades médias ao longo do dia 03/10/2020. (a) de 6:00 até 8:00; (b) de 8:00 até 10:00; (c) de 10:00 até 12:00; de 12:00 até 14:00; de 14:00 até 16:00; e de 16:00 até 18.

Fonte: Próprio do autor

4.6 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

Dentre os pontos positivos das células solares de CdTe estão: a capacidade de serem fabricadas em larga escala e com baixo custo, como já dito. Vale ressaltar que, as investigações para melhor compreender o que influencia na vida útil e na conservação da eficiência das células solares de filme fino são sempre fontes de estudos.

Problemas de estabilidade na eficiência de geração de corrente a longo prazo podem estar ligados, tanto ao processo de produção, em particular à estabilidade da dopagem, quanto a presença de impurezas minoritárias nas camadas de filme fino, que podem influenciar a longo prazo nos parâmetros de funcionamento destes dispositivos. Soma-se a estes aspectos construtivos o envelhecimento das células por sua exposição às intempéries, em particular em ambientes de alta umidade e salinidade, a exemplo das faixas costeiras tropicais. Em células montadas em terrenos elevados ou mesmo fora da atmosfera são possíveis os danos causados por colisões de partículas da radiação cósmica, que

degradam as propriedades de transporte do material. Partículas pesadas como prótons ou nêutrons produzem danos na estrutura da rede cristalina trazendo, conseqüentemente, uma diminuição no desempenho elétrico da célula.

Pensando nessa questão, a **Figura 4.26** retrata a investigação realizada nos sensores após o período de um ano.

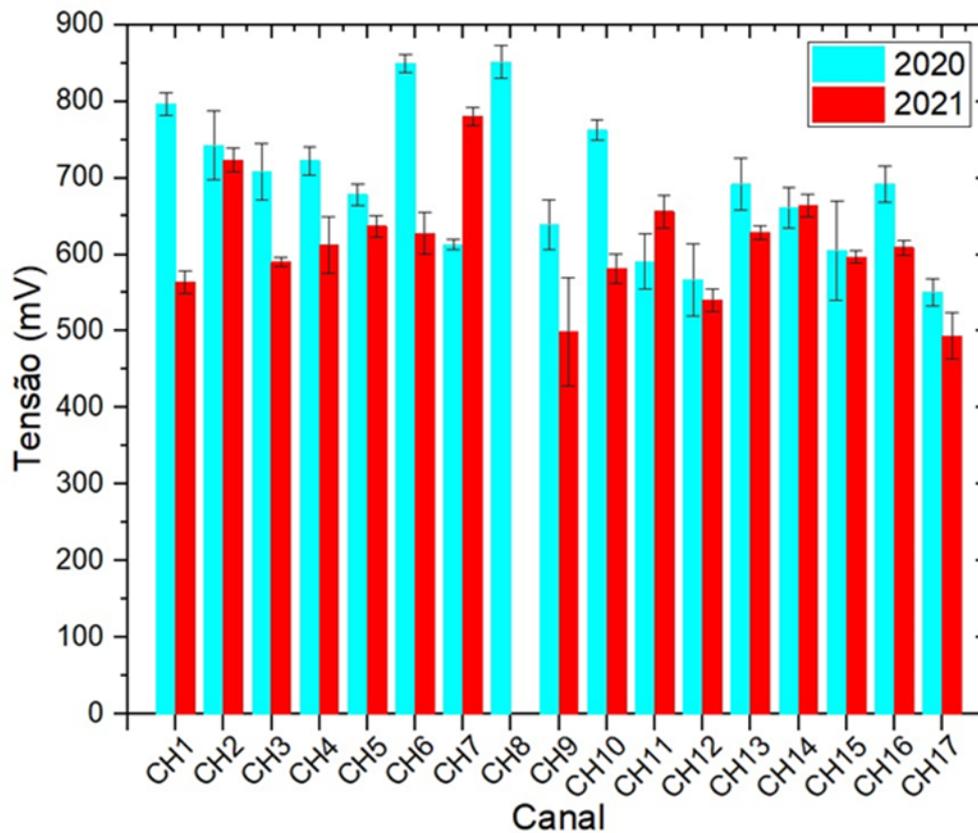


Figura 4.26 - Gráfico comparativo da perda de eficiência das células do *fly eye*.
Fonte: Próprio do autor

O intuito dessa investigação foi comparar o desempenho das células solares que equiparam o *fly eye* desenvolvido, depois de um ano de exposição contínua às intempéries e outros fatores ambientais com aerossol marinho, poeira e sujidades diversas, além da própria radiação solar. Para isso foi usada a bancada de testes representada na **Figura 4.1**. As células solares utilizadas no detector *fly eye* durante o período em que o dispositivo esteve ativo foram resubmetidas a mesma rotina de calibração descrita anteriormente, usando para tanto a fonte de luz artificial baseada em uma matriz de LED *full spectrum*.

A partir da comparação entre o período de 2020 e 2021, é perceptível que a perda de eficiência foi significativa em alguns canais do detector e menores em outros. Como foi dito, existem inúmeros fatores que podem influenciar nessa diminuição de eficiência. A simples oxidação dos contatos entre a pastilha e o resistor pode reduzir a eficiência

final da célula, dificultando a coleção de cargas geradas na célula solar. Por sua vez a vida útil de uma célula solar é limitada pelo grau de dano da radiação que ela recebe, logo quanto mais essa célula é exposta em situações hostis de condições meteorológicas, à uma atmosfera oxidante ou às sujidades diversas, maiores serão os efeitos de degradação da mesma.

Imaginando *fly eye* como um todo, foi calculado a média de tensão elétrica aferida no início das medidas (2020) e ao seu término (2021). A **Figura 4.27** apresenta o gráfico comparativo da perda de eficiência média do *fly eye*.

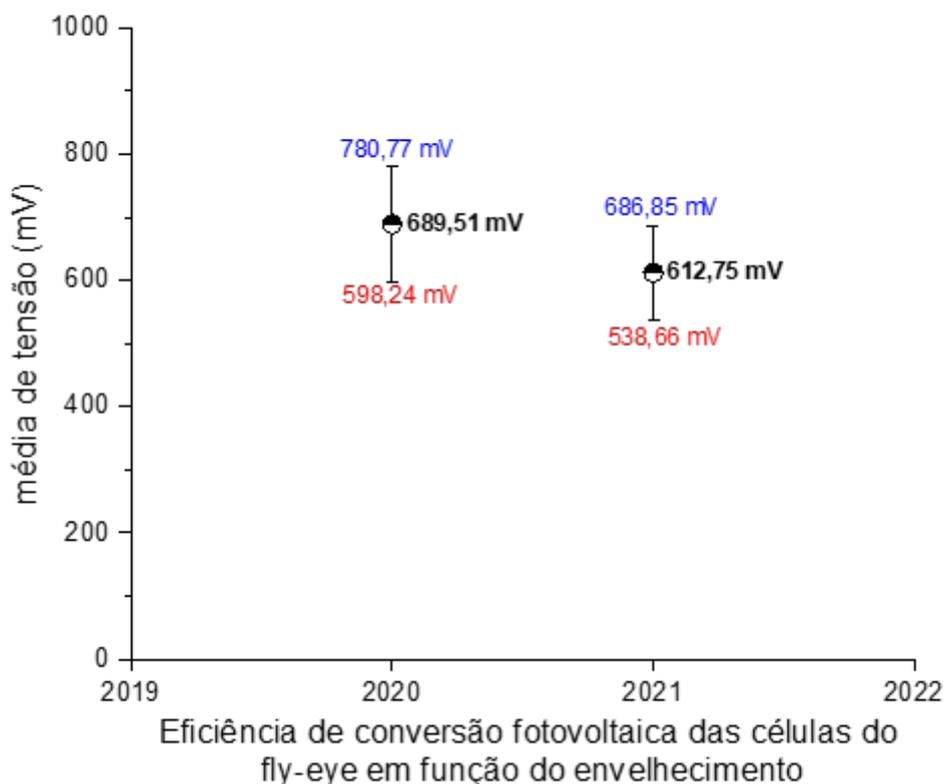


Figura 4.27 - Gráfico comparativo da perda de eficiência média do detector *fly eye*.

Fonte: Próprio do autor

É possível observar que houve uma perda de cerca de 11% quando comparado ao início das medidas, em 2020.

A célula que melhor envelheceu foi a de número 15, com 1% de perda de eficiência, enquanto a célula de número 1 teve a maior queda de eficiência 29%, a o l ongo da campanha de medição.

CONCLUSÕES

A hipótese assumida neste trabalho de investigação foi a possibilidade de construir um sistema de sensoriamento e aquisição de dados fotovoltaicos para a caracterização da insolação local, baseado em uma topologia de olho de mosca. Esta hipótese foi testada com sucesso pela montagem, teste e a coleta de dados da irradiação eletromagnética do Sol, durante o período de um ano completo, por um detector do tipo *fly eye*.

O design em olho de mosca permitiu, além de explorar uma maior área de sensoriamento, ser sensível a um ângulo sólido de 214° , isso em um equipamento robusto, que tolera bem as intempéries, alta umidade e salinidade de áreas tropicais costeiras e a própria radiação solar durante um longo período (1 ano) de medição. O equipamento dispõe de 17 células solares (CdTe/CdS), usadas como elemento sensor, diferentemente dos radiômetros fotovoltaicos comerciais, que normalmente utilizam fotodiodos. A utilização dessa tecnologia como sensor apresenta a vantagem em relação ao seu preço relativamente menor que os fotodiodos, a sua portabilidade e adequação aos intemperes à coleta de dados *outdoor*. Por se tratarem de células solares e, portanto, fontes de corrente um banco de carga resistiva foi montado no interior do domo que serve de suporte para as células, onde os resistores de carga estão montados o mais próximo possível das células solares, evitando assim, as resistências parasitas dos cabos, dos engates de conexão e das soldas.

O detector solar *fly eye* mostrou ser uma alternativa para o estudo da irradiância solar, com capacidade de seguir o movimento relativo do Sol no decorrer do dia, sem a necessidade de um motor direcionando os sensores e com isso poupando possíveis gastos de energia e manutenção mecânica. O sistema de calibração desenvolvido, composto pelo iluminador LED *Full spectrum*, fonte de corrente para o LED e suporte de encaixe nas células, foi capaz de calibrar os ganhos individuais de cada canal do detector. Esse sistema também foi utilizado para determinar a perda de eficiência na conversão fotovoltaica das células após um ano de coleta de dados, que pode ser contornada por calibrações periódicas.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido, composto de uma placa de aquisição baseada no PIC 18F4553 é dotada de 9 canais de medição (conversor analógico digital, ADC, de 12 *bits*), que podem ser comutados por um sistema de relés possibilitando a

medida dos 17 canais do *fly eye*. Este sistema se mostrou robusto, sem apresentar falhas durante o ano de coleta de dados. O software especialista desenvolvido se mostrou estável na aquisição e armazenamento dos dados.

Foram desenvolvidos macros, scripts escritos em linguagem MATLAB, para organizar, tratar e apresentar os dados de forma gráfica e de fácil compreensão dos dados coletados. Os macros permitiram o tratamento e apresentação de uma grande quantidade de dados, inclusive em forma de mapas de calor, de forma a melhor assimilação das variáveis de interesse.

Foram adquiridos dados de irradiação solar durante o período de março de 2020 à março de 2021, possibilitando a criação de uma coleção de dados com os dados separados por dias, meses e estações do ano. Os dados coletados podem servir de material de apoio para projetos futuros.

TRABALHOS FUTUROS

O sistema de aquisição de dados proposto conseguiu atender aos requisitos especificados como objetivo específico deste trabalho experimental, entretanto algumas melhorias poriam ser realizadas. Como: adicionar um sensor de temperatura para monitoramento da temperatura das células fotovoltaicas. E com o conhecimento dessa variável, poderia ser verificada a interferência da temperatura na resposta das células.

Realizar uma aquisição de dados por um período de tempo equivalente a dois anos, com isso possibilitar uma comparação entre a mesmas estações em anos distintos. Produzir uma miniaturização do detector *fly eye*, deixando-o mais portátil, facilitando assim o transporte e sua instalação em ambientes de difícil acesso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, Amilton J. V. **DESIGN & COMPLEXIDADE**. São Paulo: Blucher, 2017.

BEHRENDT, T., KÜHNERT, J., HAMMER, A., LORENZ, E., BETCKE, J., AND HEINEMANN, D, (2010) **Spectrally resolved solar irradiance from satellite data to investigate the performance of thin film photovoltaics**. In Proceedings of the 25th European PV Solar Energy Conference, Valencia. WIP Munich.

BISQUERT, Juan. **The physics of solar cells: perovskites, organics, and photovoltaic fundamentals**. CRC press, 2017.

BRONZATTI, Fabricio Luiz; IAROZINSKI NETO, Alfredo. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 28, p. 13-16, 2008.

CALLISTER, William D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. LTC, 2006.

CAMARGO, F. **Fatores que influenciam a resolução em energia na espectrometria de partículas alfa com diodos de Si**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2005.

CECATTO, José Roberto. **O SOL**. Parte integrante da coleção de volumes. São Paulo, 2009.

CHIADINI, Francesco et al. **Insect eyes inspire improved solar cells**. **Optics and Photonics News**, v. 22, n. 4, p. 38-43, 2011.

COSTA JR, E. et al. **O vento solar e a atividade geomagnética**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 4, p. 4301-4301, 2011.

COSTA, Wendell Eduardo Moura et al. **Conversor analógico-digital de dobramento utilizando circuitos a capacitor chaveado**. 2015.

COULSON, Kinsell. **Solar and terrestrial radiation: methods and measurements.** Elsevier, 2012.

DA CRUZ BRAGA, Ronaldo; DA SILVA PIMENTEL, Márcia Aparecida; ROCHA, Edson José Paulino. **Mudanças Climáticas e Impactos da Elevação do Nível do Mar na Zona Costeira:** Pesquisa Bibliográfica e Contribuição Conceitual.

DA ROSA, Antonio Robson Oliveira; GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista brasileira de energia solar**, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

DA SILVA, Marcus Vinicius Santos et al. **Fabricação de filmes finos de CuInSe₂ por eletrodeposição para fabricação de células fotovoltaicas.** 2010.

DAHMEN, Sílvio R. **A obra de Boltzmann em Física.** Revista brasileira de ensino de física, v. 28, p. 281-295, 2006.

DE MEDEIROS, Wanderley Honorio. **Primórdios da física quântica: radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico.** 2010.

DETANICO, Flora Bittencourt; TEIXEIRA, Fábio; DA SILVA, Tânia LK. **A biomimética como método criativo para o projeto de produto.** Design & Tecnologia, v. 1, n. 2, p. 101-113, 2010.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes.** Hoboken. 2013.

ENERGY, Gov. **Cadmium Telluride.** Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>. Acesso em 06 de 03 de 2020.

FOSTER, Robert; GHASSEMI, Majid; COTA, Alma. **Solar energy: renewable energy and the environment.** CRC Press, 2009.

HAAG, Rafael. **Desenvolvimento de um radiômetro espectral e metodologia para caracterização do espectro solar.** 2007.

Hickel, Bernardo Meyer. **"O impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos FV-metodologia e avaliação através de curvas IxV em campo."** (2017).

KALOGIROU, Soteris A. **Solar energy engineering: processes and systems.** Academic Press, 2013.

KAUSHIKA, N. D.; MISHRA, Anuradha; RAI, Anil K. **Solar photovoltaics.** Springer International Publishing, Cham, 2018.

LUQUE, Antônio; HEGEDUS, Steven (Ed.). **Handbook of photovoltaic science and engineering.** John Wiley & Sons, 2011.

MACHADO, Kleber Daum. **Teoria do eletromagnetismo: volume 3.** UEPG, 2006.

MCCLUNEY, Ross. **Introduction to Radiometry and Photometry.** Artech House. Inc., Norwood, MA, USA, 1994.

MEIRA, Gerson Luiz. A biomimética utilizada como ferramenta alternativa na criação de novos produtos. **ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO DO VALE ITAJAÍ-ENSUS**, 2008.

MOREIRA, Raquele Lima. **Fabricação e caracterização de células solares de CdTe/CdS com eletrólito polimérico.** 2017.

Pereira, Enio Bueno, et al. **"Atlas brasileiro de energia solar."** São José dos Campos: Inpe 1 (2017).

PEREIRA, Narlon Xavier. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada.** 2019.

Rodrigues, Sergio Augusto, and Gislaine Cristina Batistela. **"UMA REVISÃO SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA BRASILEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA?."** Geoambiente on-line 21 (2013).

SOARES, Theska Laila de Freitas. **A biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller: uma estratégia de biodesign.** 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

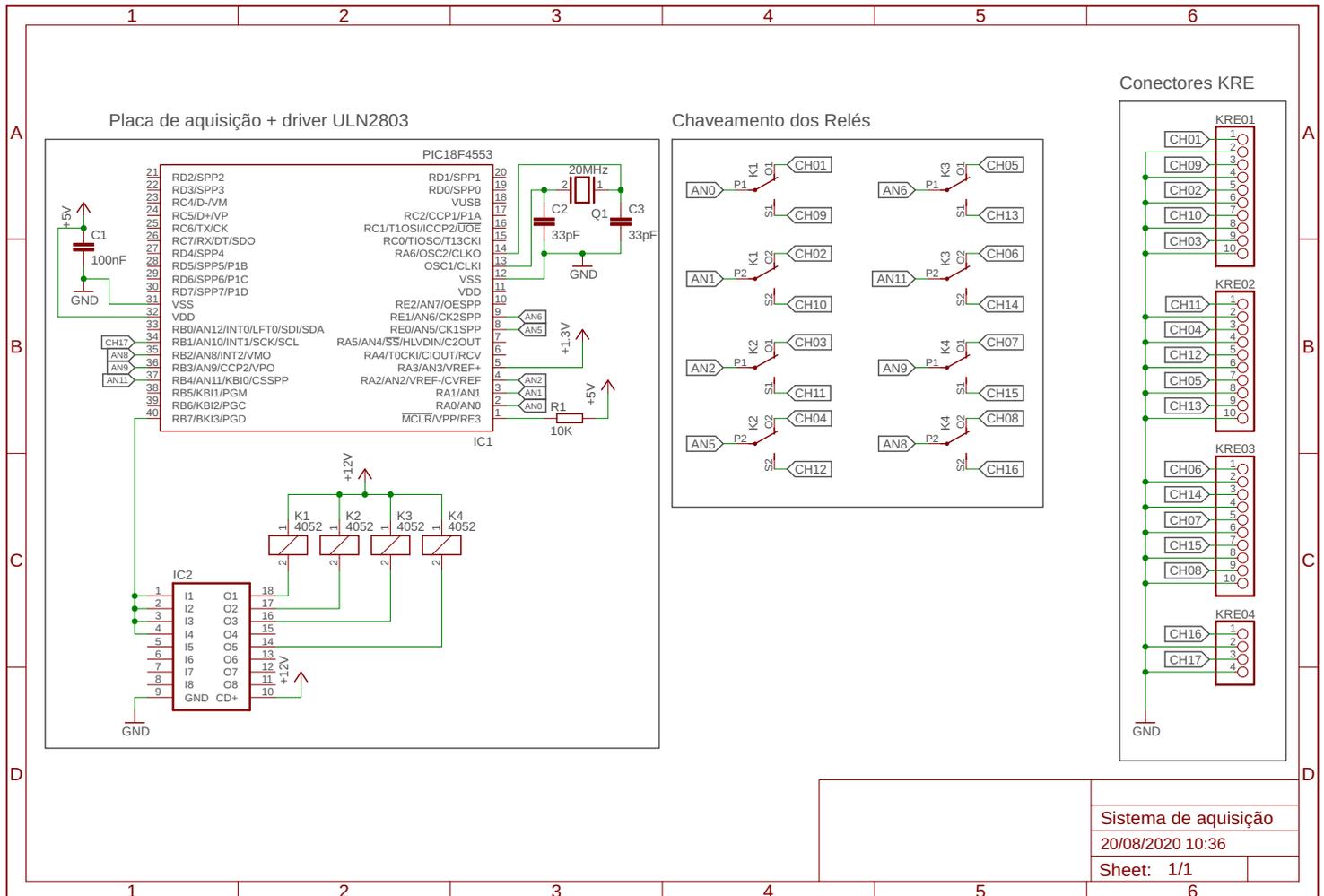
VIEIRA, Micael Tiago Leite. **Projeto, Desenvolvimento e implementação de um Robô Voador de Inspiração Biológica**. 2015. Tese de Doutorado.

VILELA, Waldeir Amaral. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. São José dos Campos: INPE, 2010.

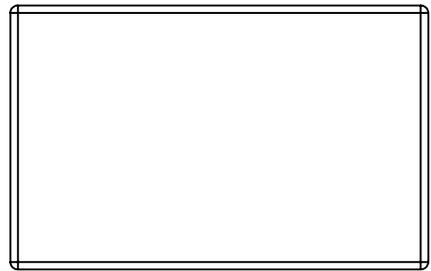
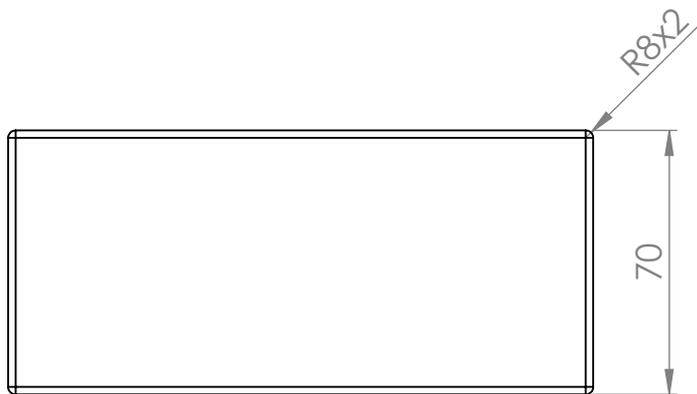
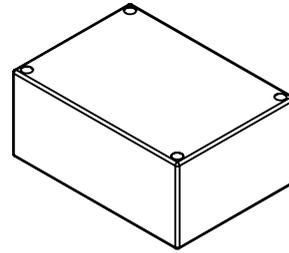
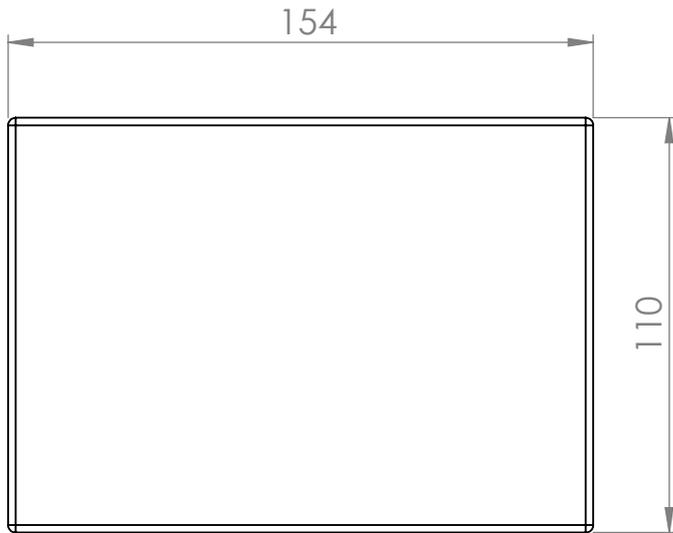
WIDÉN, Joakim; MUNKHAMMAR, Joakim. **Solar Radiation Theory**. Uppsala University, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE I - Diagrama do sistema de aquisição PIC18F4553

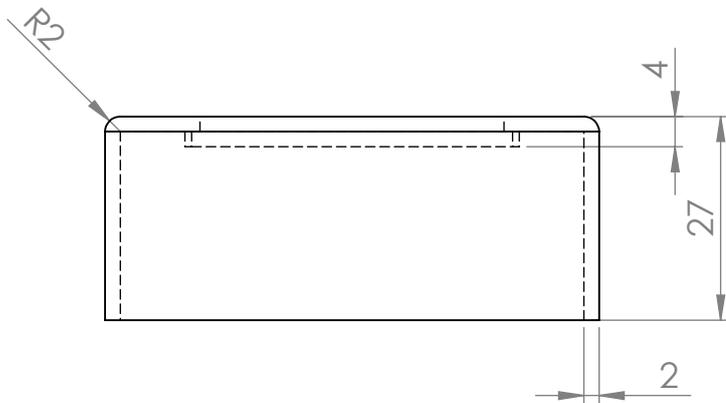
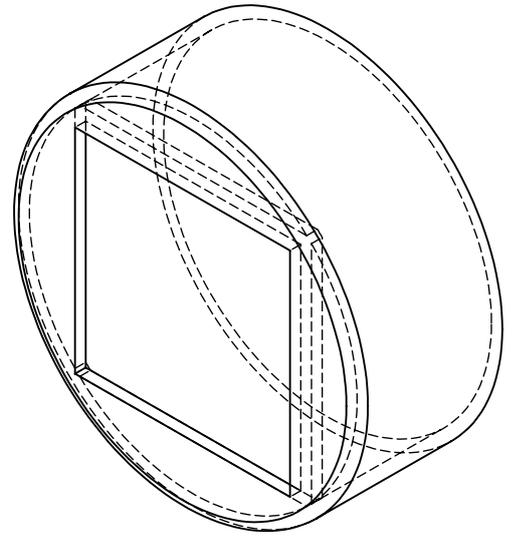
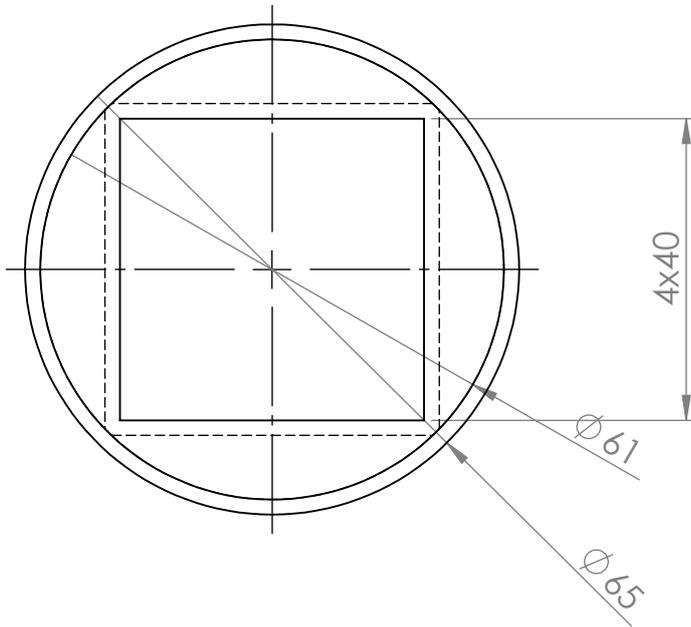


APÊNDICE II – Desenho Técnico caixa Steck



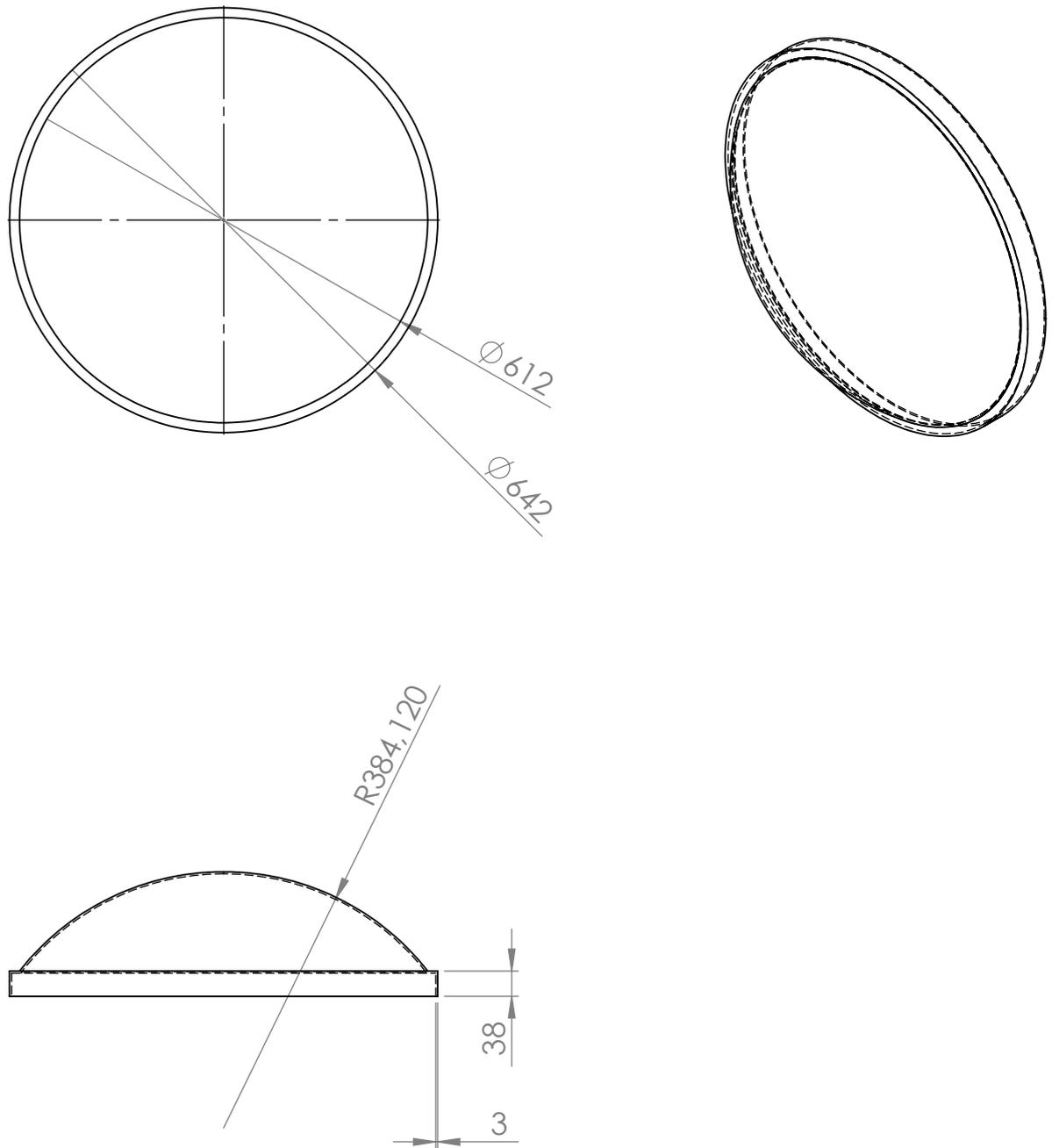
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
								<h1 style="margin: 0;">Caixa de Steck</h1>			
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA					DES. Nº		A4	
VERIF.								03			
APROV.								ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1	
MANUF											
QUALID				MATERIAL:							
				PESO:							

APÊNDICE III – Desenho Técnico Case da célula Solar



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:			REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS			NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO		
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA					<h1 style="margin: 0;">Case</h1>					
VERIF.	Edgard C. Brito			08/09									
APROV.													
MANUF													
QUALID													
				MATERIAL:				DES. Nº		02		A4	
				PESO:				ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1			

APÊNDICE IV - Desenho Técnico Domo de acrílico



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA	Domo			
VERIF.	Edgard C. Brito		08/09				
APROV.							
MANUF							
QUALID							
				MATERIAL:	DES. Nº	01	A4
				PESO:	ESCALA: 1:10	FOLHA 1 DE 1	