



**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**PROJETO DE SISTEMA DE  
POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO PARA  
PAINEL SOLAR**

Por,  
**Leonardo Rocha Matos**

**Brasília, 27 de Junho de 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE SISTEMA DE  
POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO PARA  
PAINEL SOLAR**

POR,

**Leonardo Rocha Matos**

Relatório submetido como requisito para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

## Banca Examinadora

Prof. Mario Benjamin Siqueira, UnB / ENM  
(Orientador)

---

Prof. Cláudio Frate / ENM

---

Prof. Antônio Manoel Dias Henriques, UnB / ENM

---

Brasília, 27 de Junho de 2019

---

## **RESUMO**

Neste trabalho realizou-se o projeto de um sistema de controle de malha híbrida para posicionamento biaxial de um painel solar utilizando-se conceitos de automação a partir de atuadores lineares, microcontroladores do tipo Arduino Uno, transistores L298N e um encoder como sensor de ajuste do posicionamento angular do dispositivo. O sistema de controle foi composto também por entradas recebidas a partir algoritmos de cálculo dos ângulos de azimute e altitude como forma de posicionamento desenvolvidos em linguagem em linguagem Python. O projeto contou também o projeto de uma nova estrutura para o corpo do painel solar já existente como uma forma de garantir a utilização do sistema embarcado.

---

## **ABSTRACT**

This project aimed to design a motor control scheme considering a hybrid approach for a dual-axis solar tracker mechanism using linear electric actuators, an Arduino Uno microcontroller, a L298N transistor and a rotary encoder as a sensor for angular position adjustment. Along with electronical components, the system received information from algorithms developed in Python that calculate the solar position from azimuth and altitude angles. Besides that, the whole project aimed to adapt a solar panel mechanism and propose a new structure to embed the control system.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVO DO PROJETO	5
1.3	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>9</b>
3.1	O SOL, SEU POTENCIAL ENERGÉTICO E SEU MOVIMENTO	9
3.1.1	IRRADIÂNCIA SOLAR NA ATMOSFERA	9
3.1.2	RADIAÇÃO SOLAR SOBRE UMA SUPERFÍCIE	11
3.1.3	IRRADIÂNCIA SOLAR NA SUPERFÍCIE DA TERRA	12
3.1.4	OS MOVIMENTOS DO SOL E DA TERRA	12
3.1.5	O ÂNGULO HORÁRIO	13
3.1.6	DETERMINAÇÃO DA HORA SOLAR E A EQUAÇÃO DO TEMPO	14
3.1.7	CONVERSÃO DA HORA SOLAR	16
3.1.8	ÂNGULOS DE DECLINAÇÃO E DE LATITUDE	17
3.2	ENERGIA FOTOVOLTAICA	19
3.2.1	EVOLUÇÃO HISTÓRICA	19
3.2.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	20
3.2.3	CARACTERÍSTICAS DO SILÍCIO CRISTALINO	21
3.2.4	FILMES FINOS E NOVAS TECNOLOGIAS	22
3.3	ATUADORES LINEARES ELÉTRICOS	23
3.4	MICROCONTROLADORES E ARDUINOS	25
3.4.1	ARDUINOS	25
<b>4</b>	<b>PROJETO DO MECANISMO</b>	<b>30</b>
4.1	IDEALIZAÇÃO DO MECANISMO	31
4.2	DIMENSIONAMENTO DOS PARAFUSOS	36
4.3	DIMENSIONAMENTO DAS SOLDAS	41
4.4	ESCOLHAS DE ATUADORES LINEARES	43
4.5	SISTEMA DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO E ACOMPANHAMENTO SOLAR	49
4.5.1	SISTEMAS DE MALHA ABERTA	50
4.5.2	SISTEMAS DE MALHA FECHADA	51
4.5.3	SISTEMAS DE MALHA HÍBRIDA	52
4.5.4	ESCOLHA DO TIPO DE MALHA DE CONTROLE	53
4.5.5	ALGORITMO DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO	53
4.5.6	O SISTEMA DE CONTROLE	54
<b>5</b>	<b>TABELA DE PRECIFICAÇÃO DO PROJETO</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>57</b>
6.1	CONCLUSÃO	57
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	58
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICES</b>	<b>62</b>
8.1	ROTINA DE CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE POSICIONAMENTO SOLAR	62
8.2	ROTINA DE CÁLCULO DOS ATUADORES LINEARES	63
8.3	PYTHON – CONEXÃO COM ARDUINO – ENVIO DE COORDENADAS	63
8.4	ROTINA DE CONTROLE DO ARDUINO	64

<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
9.1	ESPECIFICAÇÕES DO ENCODER EC05E1220401 .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
9.2	DESENHOS TÉCNICOS.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição da Matriz energética Brasileira. [30]	2
Figura 2 – Oferta de energia elétrica no Brasil nos anos de 2014 e 2015. [30]	3
Figura 3 – Efeito cosseno sobre a Irradiância. [4]	10
Figura 4 – Distância da terra em relação ao sol em Unidades Astronômicas ( $1,496 \times 10^{11}m$ ).[4]	13
Figura 5 – Representação do ângulo de azimute.[4]	14
Figura 6 – Esquema de representação do ângulo de declinação. [4]	17
Figura 7 – Variação do ângulo de declinação ao longo dos meses do ano. [4]	18
Figura 8 – Esquema explicativo de uma junção <i>pn</i> da célula solar [7].	20
Figura 9 – Esquema de atuador linear elétrico.[20]	23
Figura 10 – Atuador linear LINAK – Série LA36 [21].	24
Figura 11 – Atuador linear Automotion – Série FT [22].	24
Figura 12 – Atuador linear TiMotion – Série JP4 [23].	24
Figura 13 – Exemplo de Arduino, modelo <i>Uno</i> . [18].	26
Figura 14 – Componente L298N. [27].	28
Figura 15 – Esquema explicativo do funcionamento de uma ponte H. [28]	28
Figura 16 – esquema de funcionamento de um encoder.	29
Figura 17 – Discos de Encoder e suas resoluções.	29
Figura 18 – Visão lateral do mecanismo de posicionamento do LEA/UnB	30
Figura 19 – Visão superior do mecanismo de posicionamento do LEA/UnB	30
Figura 20 – Desenho CAD de das barras introduzidas no suporte do painel.	31
Figura 21 – Desenho CAD de montagem das barras no suporte do painel solar.	32
Figura 22 – Desenho CAD do suporte em “L” da barra central.	32
Figura 23 – Desenho CAD da barra central do mecanismo.	33
Figura 24 – Desenho CAD das barras laterais do mecanismo.	33
Figura 25 – Desenho CAD da montagem do mecanismo de rotação para o primeiro grau de liberdade...	33
Figura 26 – Desenho CAD do suporte em U do mecanismo.	34
Figura 27 – Desenho CAD da montagem do suporte em U sobre a base antiga.	34
Figura 28 – Desenho CAD da montagem do mecanismo com 2 graus de liberdade.	35
Figura 29 – Desenho CAD final do novo mecanismo.	35
Figura 30 – Propriedades de massa da estrutura do mecanismo para análise dos parafusos de fixação do suporte em “L”	36
Figura 31 – Propriedades de massa da estrutura do mecanismo para a análise dos parafusos de fixação do conjunto no suporte em “U”.	37
Figura 32 – Tabela de materiais e propriedades mecânicas para a classe métrica de parafusos.[24]	38
Figura 33 – Condição de carregamento para parafuso de fixação do suporte em “L” na barra central.[24]	38
Figura 34 – Condição de carregamento para parafuso de fixação das barras laterais no suporte em “L”. [24]	40
Figura 35 – Ponto de solda do suporte em “U”.	41
Figura 36 – Ponto de solda do apoio da base.	42
Figura 37 – Ponto de solda da base quadrada ao corpo da estrutura.	42
Figura 38 – Variação do ângulo de azimute ao longo do dia 11 de maio de 2019.	45
Figura 39 – Variação do ângulo de zênite ao longo do dia 11 de maio de 2019.	45
Figura 40 – Variação do módulo do ângulo de altitude ao longo do dia 11 de maio de 2019.	45
Figura 41 – Exemplo de linha de posicionamento solar para o dia 11 de maio de 2019.	45
Figura 42 – Representação dos eixos de orientação para a posição solar.	46
Figura 43 – Esquema explicativo de variação do comprimento do atuador linear em função da operação do painel solar.	47
Figura 44 – Atuador Linear MECTROL LAS3.[26]	49
Figura 45 – Esquema de movimentação dos ângulos do painel ao longo do dia.	50
Figura 46 – Diagrama de blocos para um sistema de controle de posicionamento de malha aberta.	51
Figura 47 – Diagrama de blocos para um sistema de posicionamento de malha fechada.	52
Figura 48 - Diagrama de blocos para um sistema de posicionamento de malha híbrida.	52
Figura 49 – Encoder EC05E1220401 [29].	55
Figura 50 – Esquema de ligação do circuito de controle.	55
Figura 51 – Carta solar para o dia 05/07/2019 e resultados do algoritmo para o mesmo dia.	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes da equação do tempo de Lamm. [4] .....	16
Tabela 2 – Eficiência dos principais módulos e células fotovoltaicas do mercado. ....	23
Tabela 3 – Modelos de mercado de Arduinos. [19] .....	27
Tabela 4 – Escolhas de parafusos estruturais.....	41
Tabela 5 – Valores máximos, mínimos e médios para os ângulos de posicionamento solar .....	46
Tabela 6 – Resultados para cálculos do tipo de atuador linear da Rotina 8.2 .....	48
Tabela 7 – Tabela de custos estimados para componentes de projeto .....	56



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A utilização dos raios solares como fonte energia é um fenômeno bastante presente na natureza. Plantas de vários tipos utilizam essa energia como sua fonte primária para a realização de fotossíntese, processo responsável pela existência de basicamente todos os animais e seres vivos uma vez que vegetais se encontram, em última análise, na base de todas as cadeias alimentares.

Embora a captação de energia solar e sua utilização seja um fenômeno comum e essencial para a vida, foi somente a cerca de 50 anos que a humanidade realmente utilizar equipamentos especializados para captar e converter a energia solar. [1] De frente com a crescente inflação da população mundial e da conseqüente demanda de energia, as indústrias iniciaram a busca de energias cada vez mais baratas.

Aliado ao custo um outro fator preponderante para a busca de novas fontes de energia foi o impacto para o meio ambiente, uma vez que a principal matriz energética do planeta é a utilização de combustíveis fósseis e que várias discussões sobre a emissão de gases danosos para a camada de ozônio, aquecimento global e seus impactos sobre o ecossistema do planeta.

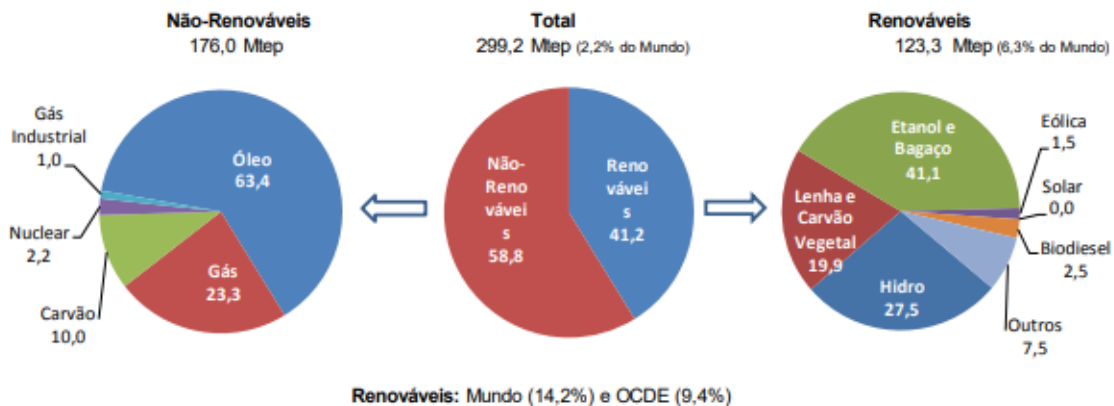
A solução encontrada pelo setor industrial foi a busca de energias ditas renováveis como a eólica, solar, geotérmica e de biomassa. Tais fontes são alvo de grande atenção por apresentarem baixo custo de captação e serem consideradas limpas, não trazendo prejuízos de alta escala para o meio ambiente.

No Brasil possui uma matriz energética com significativa influência de energia renováveis, em especial de bagaço de cana, etanol, lenha, carvão vegetal e hidrelétrica, em razão dos recursos naturais abundantes para este tipo de produção, contudo a utilização de combustíveis fósseis ainda é predominante. A figura 1 mostra um resumo da matriz energética brasileira segundo os dados do Ministério de Minas e Energia dos anos de 2015 e 2017 (relatório 2018, o mais recente publicado).

**Renováveis: supremacia da proporção das renováveis na matriz energética do Brasil**

Brasil	OCDE	Mundo	
41,2	9,4	14,3	← 2015%

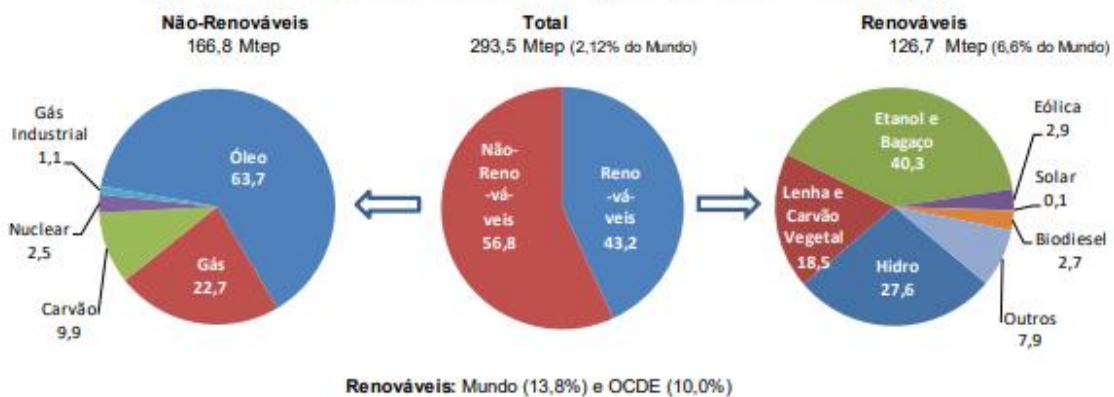
**Figura 1: Oferta Interna de Energia no Brasil – 2015 (%)**



**Renováveis: supremacia da proporção das renováveis na matriz energética do Brasil**

Brasil	OCDE	Mundo	
43,2	10,0	13,8	← 2017%

**Figura 1: Oferta Interna de Energia no Brasil – 2017 (%)**



**Figura 1 – Composição da Matriz energética Brasileira. [30]**

A figura 1 mostra ainda o posicionamento do Brasil em relação à matriz mundial, onde percebe-se um aumento da busca pela utilização de energias renováveis no país com um aumento de 2,1% em 2017 em relação a 2015, ao passo que, para o mundo, há uma redução de 0,5% para o mesmo período.

Ainda segundo dados do Ministério de Minas e Energia a figura 2 mostra a evolução da oferta interna de energia elétrica do Brasil entre os anos de 2014 e 2015.

ESPECIFICAÇÃO	GWh		15/14 %	Estrutura (%)	
	2014	2015		2014	2015
HIDRO	373.439	359.743	-3,7	59,8	58,4
BAGAÇO DE CANA	32.303	34.163	5,8	5,2	5,5
EÓLICA	12.210	21.626	77,1	2,0	3,5
SOLAR	16	59	266,4	0,003	0,010
OUTRAS RENOVÁVEIS	13.879	14.864	7,1	2,2	2,4
ÓLEO	31.668	25.662	-19,0	5,1	4,2
GÁS NATURAL	81.075	79.490	-2,0	13,0	12,9
CARVÃO	18.385	19.096	3,9	2,9	3,1
NUCLEAR	15.378	14.734	-4,2	2,5	2,4
OUTRAS NÃO-RENOVÁVEIS	12.125	12.049	-0,6	1,9	2,0
IMPORTAÇÃO	33.775	34.422	1,9	5,4	5,6
<b>TOTAL</b>	<b>624.254</b>	<b>615.908</b>	<b>-1,3</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<i>Dos quais renováveis</i>	<i>465.623</i>	<i>464.877</i>	<i>-0,2</i>	<i>74,6</i>	<i>75,5</i>

**Figura 2 – Oferta de energia elétrica no Brasil nos anos de 2014 e 2015. [30]**

Percebe-se dessas informações a evolução da oferta de energia elétrica por parte das fontes renováveis e, em especial da evolução percentual da energia solar que, embora com um valor efetivo pequeno em comparação às demais, cresceu cerca de 266,4% em apenas um ano. A partir disso pode-se inferir uma busca relevante pela utilização de energia solar como fonte de energia limpa e eficiente.

Em especial, quando falamos de energia solar – que será o objeto principal desse projeto – há grandes desafios na sua captação e utilização. Como a principal fonte de energia utilizada para esse tipo de energia é o sol e que esse astro está em constante movimento relativo em relação à terra, é de se pensar que o instrumento necessário para a captação desses raios deva acompanhar seu movimento garantindo assim o máximo de raios solares captados ao longo do ciclo do dia.

A busca de acompanhamento desse movimento como forma de maximizar a captação dá abertura para uma série de estudos de movimentos dos astros, posicionamento geográfico, estações do ano e ângulos de incidência dos raios solares, que são pontos relevantes para a definição da eficiência de aproveitamento da energia solar tornando-os conceitos essenciais quando se considera desenhar uma solução de utilização da energia solar.

Um fator relevante para a utilização de energia solar é conversão da energia térmica trazida pelos raios solares em energia elétrica. O efeito fotovoltaico foi descoberto por Becquerel em 1839 em um estudo utilizando o elemento selênio, mas foi somente nas primeiras viagens espaciais que foram feitas as primeiras utilizações de células de silício capazes de converter a energia solar em elétrica. Avançando na história, as células fotovoltaicas dos dias atuais são compostas de vários semicondutores à base de materiais diversos como Silício (Si), Sulfeto de Cobre (Cu<sub>2</sub>S) e Arsenieto de Gálio (GaAs). [1]

A partir desses e de outros materiais são construídas células fotovoltaicas, estruturas que quando são iluminadas pelos raios solares produzem uma tensão que conseqüentemente geram uma corrente elétrica. Essas células são associadas a componentes elétricos como alternadores e por fim armazenados em baterias ou até mesmo conectados a linhas de alimentação da rede elétrica por onde a energia será distribuída.

Apesar de a energia solar ser uma alternativa viável de energia renovável ainda há a grandes desafios relacionados à sua eficiência. Estudos de diversas áreas da engenharia buscam formas mais eficientes dos captadores solares ou reinventam formas de acompanhar o movimento do sol de forma automatizada garantindo melhor aproveitamento da energia solar pelas células fotovoltaicas enquanto engenheiros eletricitas e de materiais buscam novos materiais fotoelétricos ou novas composições para garantir a maior geração de energia.

Em sua maioria, as usinas de energia solar são compostas por grandes quantidades de painéis solares estáticos. Pela sua quantidade a conversão de energia pode ser bastante alta, no entanto esse tipo de solução só se torna viável em locais onde o tempo de insolação é maior e grande parte dos raios de irradiação direta (ou DNI, *Direct Normal Irradiation*) são pouco aproveitados devido a mudança de movimento solar. Uma solução viável está no estudo de dispositivos de rastreamento solar (*Solar Trackers*).

Esses dispositivos são estruturas que recebem informações computacionais pré-programadas ou utilizam sensores para medir e identificar cada um dos parâmetros citados anteriormente com o principal objetivo de captar a irradiação direta proveniente do sol reposicionando os painéis em certos intervalos de tempo o que pode mostrar ganhos de cerca de 22% na produtividade desses painéis [31].

Um maior aprofundamento sobre os principais pontos relacionados à construção de um rastreador solar automatizado – foco do projeto em questão – se encontram ao longo do corpo deste relatório.

## **1.2 OBJETIVO DO PROJETO**

Esse projeto teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de automação de malha híbrida para um painel solar de dois eixos utilizando algoritmos de cálculo de posicionamento solar e sensores de posicionamento angular como entrada e componentes eletrônicos para controle da atuação de atuadores lineares.

O projeto faz parte de uma iniciativa do Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília (LEA/UnB) onde está sendo desenvolvido um rastreador solar para futuros estudos. O estudo completo do laboratório analisa a viabilidade técnica do dispositivo como um todo, cabendo ao atual projeto a concepção de um mecanismo automatizado de acompanhamento do posicionamento solar e captação da sua radiação.

Em conjunto com o desenvolvimento do sistema de automação, como forma de otimizar o funcionamento dos componentes mecânicos selecionados e embarcar o sistema de automação, o projeto buscou também o desenvolvimento de uma nova proposta de estrutura para um painel solar já existente no LEA/UnB.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

O presente relatório está organizado em 8 capítulos sendo o primeiro e atual capítulo responsável pela introdução das principais motivações que levaram ao desenvolvimento desse projeto bem como os objetivos do trabalho.

Em seguida, no segundo capítulo, apresenta-se uma breve visão sobre artigos e publicações científicas que corroboram com o desenvolvimento do presente trabalho e que justificam a busca pelo desenvolvimento de algoritmos de determinação da posição solar e sistemas de acompanhamento solar como uma forma de aumentar a eficiência de sistemas fotovoltaicos.

O terceiro capítulo mostra uma visão completa dos principais conceitos relacionados ao potencial energético do sol, seu movimento e como definir seu posicionamento a partir da localização geográfica de um observador na superfície terrestre. São expostos também, conceitos gerais relacionados aos principais componentes eletrônicos e selecionados, seu funcionamento e importância para o sistema de controle projetado.

O quarto e mais extenso capítulo é responsável por expor todo o processo de desenvolvimento do projeto do painel solar e do sistema de controle iniciando pelo projeto das partes mecânicas do painel solar e dimensionamento dos parafusos e soldas utilizadas. Em

seguida é exposto o projeto do sistema de controle partindo da seleção dos atuadores lineares, seguindo para a definição do tipo de malha de controle e os algoritmos de controle e finalizando com a apresentação dos componentes selecionados, sua função e organização.

Os capítulos finais desse relatório apresentam uma visão de preço de produção do sistema completo projeto (capítulo 5), considerações finais sobre o projeto desenvolvido e indicações de estudos futuros (capítulo 6) e a exposição das referências bibliográficas, anexos e apêndices desse relatório (capítulos 7, 8 e 9).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas atuais condições de desenvolvimento da tecnologia, a utilização de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar é uma ótima solução para o aumento da eficiência e redução nos custos uma vez que as razões que mais limitam a geração fotovoltaica de energia nos sistemas convencionais é a baixa eficiência dos módulos solares. [11]

Os sistemas conhecidos como Solar Trackers desempenham a tarefa de colocar os painéis solares com a sua superfície sempre em posição perpendicular aos raios de sol incidentes. Esses sistemas são responsáveis por compensar as mudanças na posição do sol em relação à Terra durante o dia e com respeito às estações do ano reposicionando os módulos e permitindo que mais radiação seja coletada e transformada em eletricidade dentro de um determinado intervalo de tempo. [12]

Pesquisas demonstram que sistemas que rastreiam o movimento do sol e trabalham em um único grau de liberdade (um único eixo ou *single axis*) podem aumentar em mais de 20% a produção de eletricidade, enquanto que sistemas de rastreamento em dois graus de liberdade (dois eixos ou *double axis*) podem aumentar cerca de 30% a produção de eletricidade. [11]

Para se alcançar tais objetivos, vários pontos precisam ser observados uma vez que a automação do movimento implica em custos relacionados a: motores utilizados, o tipo de sistema de controle e os princípios de movimento. Quanto a esses custos existem estudo focados nas análises de grandes sistemas como plantas de geração de energia elétrica com tecnologia fotovoltaica instaladas em desertos, conhecidas como “Sistemas Fotovoltaicos de Larga Escala (VLS-PV)”.

Essas VLS-PV foram objetos de estudos que apresentam os custos ao longo do ciclo de vida para sistemas de larga escala montados sobre estruturas fixas, estruturas móveis em 1 eixo e estruturas móveis de rastreamento em 2 eixos. Em suas conclusões, relata-se que há viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico, com rastreamento, para uma usina geradora de 100 MW instalada no deserto de Gobi, na China, sob a avaliação de três diferentes índices: custo ao longo do ciclo de vida, tempo de retorno do investimento pela geração de energia e as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida [14].

Esse estudo comprova ainda o custo relacionado a todo o ciclo de vida do sistema fotovoltaico, considerando-se a produção e o transporte dos componentes, a construção, operação e manutenção do sistema pode ser recuperada em um curto período, bastante inferior ao seu tempo de vida útil. [14]

Em sistemas onde não há a necessidade de posicionamento com tamanha precisão, nos quais são utilizados coletores fotovoltaicos planos, sem concentração, resultados significativos no aumento da eficiência podem ser obtidos com o uso de técnicas de controle

mais simples. O uso de algoritmos de controle sendo executados por controladores digitais pode superar limitações relacionadas ao funcionamento sob condições adversas ou não previstas como a ocorrência de nuvens ou sombras que encubram parcialmente áreas das placas fotovoltaicas.

Rotinas executando cálculos a partir de conhecimentos astronômicos, podem prever a localização exata do sol em relação à Terra, conhecidos a localização do arranjo fotovoltaico sobre a superfície terrestre e em qual ciclo de seu movimento o sol se encontra (horário do relógio local, dia, mês e ano). [12]

Um estudo realizado por Vorobiev et al. em 2004 apresentou uma análise teórica e experimental sobre as condições de coleta e conversão de energia solar comparando sistemas de rastreamento. Em seu desenvolvimento, os autores destacam o rastreador solar construído para a avaliação experimental dos efeitos de posicionamento automático em dois eixos, com dois pares de fototransistores em cada eixo atuando como sensores, e servomotores com redução mecânica, observando que o aumento na geração de eletricidade foi considerado relevante (por volta de 30%) e que este tipo de sistema seria mais viável em aplicações práticas no caso de sistemas de rastreamento de baixo custo. Efeitos melhores foram obtidos com o uso de painéis fotovoltaicos bifaciais, os quais possuem custo de produção não muito superior aos módulos padrão de mesma área, e um aumento na produção de energia causado pelo uso efetivo de uma face posterior com um sistema simplificado de espelhos planos poderia chegar a 50 – 60%. [15]

Outro estudo trata sobre a comparação de diferentes tipos de algoritmos utilizados para sistemas de controle de rastreamento, desenvolvido em 2004. [16] A análise da eficiência de cada algoritmo proposto foi feita sobre o mesmo sistema mecânico considerando-se a quantidade de energia elétrica gerada para cada diferente situação de controle.

Dentre as questões analisadas, foi feita a comparação de um sistema fixo e um sistema móvel com as mesmas características elétricas onde observado um aumento de aproximadamente 22% na geração de energia elétrica utilizando-se um algoritmo com elevado grau de complexidade, que combina cálculos baseados no tempo com indicações do sensor direcional de radiação e um discriminador do nível de insolação e os intervalos de tempo de reposicionamento do painel são definidos a partir do máximo erro de posicionamento permitido para o painel fotovoltaico.

É visto, portanto que é possível alcançar ganhos de eficiência com os módulos fotovoltaicos não somente com a aplicação de sistemas de controle de acompanhamento solar como na própria otimização dos algoritmos de controle. Nesse projeto, portanto, será explorada a idealização não somente de uma nova estrutura para o sistema fotovoltaico como a construção dos algoritmos de controle e de definição da posição solar.



## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

### 3.1 O SOL, SEU POTENCIAL ENERGETICO E SEU MOVIMENTO

O sol é uma estrela gigante com formato aproximadamente esférico com  $1,39 \times 10^9$  m de diâmetro composta de matéria gasosa a altíssimas temperaturas (cerca de 5760 K) que se encontra a uma distância de aproximadamente  $1,5 \times 10^8$  km da terra [1]. Apesar da enorme distância, por sua radiação viajar na velocidade da luz no vácuo (300.000 km/s) o tempo necessário para um raio solar alcançar a superfície terrestre é de aproximadamente 8 minutos e 20 segundos.

A energia gerada pelo sol é proveniente da fusão nuclear de vários átomos de hidrogênio que se transformam em átomos de hélio e liberam energia no processo. Estima-se a potência do sol alcance níveis de  $3,8 \times 10^{20}$  MW que é dispersada ao longo de todas as direções ao seu redor. De toda essa energia, apenas uma fração de cerca de  $1,7 \times 10^{14}$  kW realmente chega ao planeta terra. Essa energia é chamada de insolação (ou irradiância solar) tipicamente medida em  $W/m^2$  e estima-se que cerca de 84 minutos dessa irradiância seria equivalente a alimentar a demanda de energia do planeta por 1 ano, o que seria desastroso se não houvesse mecanismos de proteção na atmosfera terrestre. [1]

#### 3.1.1 IRRADIÂNCIA SOLAR NA ATMOSFERA

Devido à órbita da Terra ser ligeiramente elíptica, a intensidade da radiação solar recebida fora da atmosfera terrestre varia com o quadrado da distância entre a Terra e o Sol. A irradiância solar varia cerca de 3,4%, sendo que a máxima irradiância ocorre no Periélio, ou seja, quando a Terra está mais próxima do Sol e a mínima ocorre no Afélio. Esta variação pode ser aproximada através da equação 1:

$$I_o = I_{sc} \left[ 1 + 0,034 \cos \left( \frac{360N}{365,25} \right) \right] (W/m^2) \quad (1)$$

onde  $I_o$  é a irradiância solar e  $N$  é o número do dia do ano considerando o calendário Juliano.

Outro ponto relevante de se avaliar é o ângulo de incidência dos raios solares. A influência do ângulo de incidência é conhecida como efeito cosseno, a figura 3 exemplifica esse fenômeno visualmente.

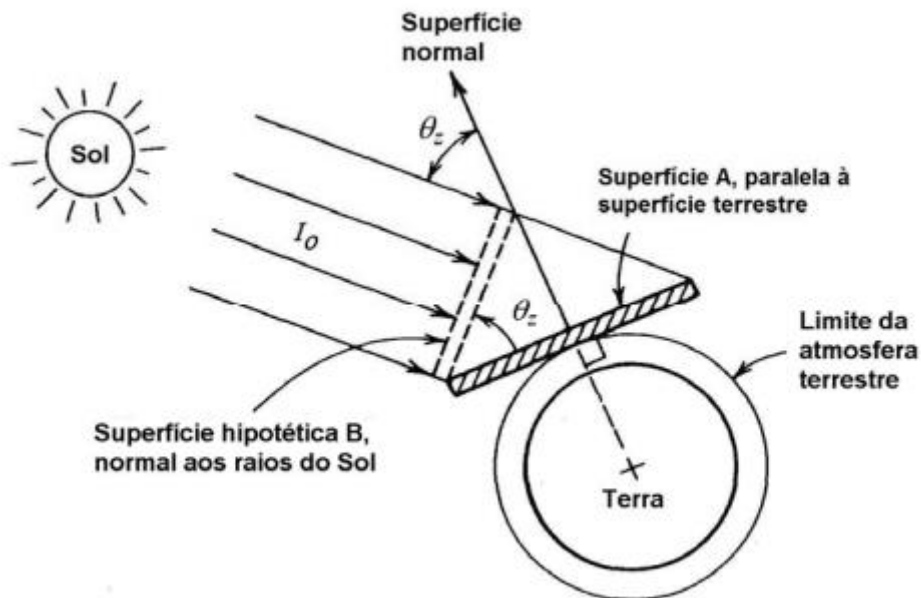


Figura 3 – Efeito cosseno sobre a Irradiância. [4]

A figura exemplifica um modelo de didático onde considera-se uma superfície A paralela à superfície terrestre imediatamente acima da atmosfera e uma superfície B hipotética normal à direção de incidência da irradiância que é a projeção de A sobre um ângulo  $\theta_z$  de forma que ela consiga absorver totalmente os raios incidentes.

Pode-se notar que a potência solar incidente em ambas as placas é a mesma, no entanto ao se analisar a área superficial das placas percebe-se que, para uma mesma quantidade de potência absorvida, a área da placa A é maior do que a placa B, fazendo com que a quantidade de energia solar por unidade de área de A seja menor que a de B. Partindo-se dessa análise, pode-se calcular a irradiância solar que atinge uma superfície paralela ao solo utilizando a equação 2:

$$I_{o,h} = I_o \times \cos(\theta_z) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2)$$

onde  $I_{o,h}$  é a irradiância solar em uma superfície horizontal e  $\theta_z$  é o ângulo entre as duas superfícies. O ângulo  $\theta_z$  é conhecido como o **ângulo de zênite solar**.

Devido ao efeito cosseno, a Irradiância Solar Extraterrestre sobre um plano horizontal varia ciclicamente conforme a Terra rotaciona sobre seu eixo. A quantidade de radiação solar recebida sobre uma superfície horizontal fora da atmosfera determina um limite superior para a quantidade de radiação solar que chegará a uma superfície horizontal abaixo da atmosfera terrestre ainda desconsiderando os efeitos da cobertura da massa de ar e de nuvens presentes nas partes interiores à atmosfera.

### 3.1.2 RADIAÇÃO SOLAR SOBRE UMA SUPERFÍCIE

A quantidade total de energia depositada sobre uma superfície durante um determinado período pode ser calculada integrando-se a irradiância solar durante este período. O resultado dessa integração é chamado de radiação solar (medida em  $J/m^2$  ou  $BTU/m^2$ ).

O valor da radiação solar diária que atinge uma superfície horizontal ( $H_{o,h}$ ), acima da atmosfera terrestre, pode ser calculado a partir dos valores instantâneos da irradiância solar como mostra a equação 3:

$$H_{o,h} = \int_{t_2}^{t_1} I_{o,h} dt \quad (3)$$

onde  $t_1$  e  $t_2$  representam, respectivamente, os horários do nascer e do pôr do Sol. Com o uso de valores conhecidos para os ângulos Terra-Sol, podem ser feitos os cálculos da Radiação Solar incidente sobre uma superfície horizontal em localidades de diferentes latitudes durante um ano, e os resultados permitem aferir conclusões importantes sobre a entrega de energia pelo Sol à Terra neste período.

As maiores quantidades de energia incidentes em um único dia ocorrem nos pontos mais distantes da linha do Equador (maiores latitudes), estes elevados valores de radiação que atingem a Terra ocorrem durante o verão, quando o Sol nunca se põe.

Para latitude zero (sobre a linha do Equador), a maior radiação solar ocorre nos equinócios de outono e primavera, e não no verão, como seria de se esperar. Valores máximos durante o verão somente ocorrem em latitudes superiores a  $23,5^\circ$ . Integrando-se os valores diários de radiação ao longo do ano, encontram-se resultados maiores para o Equador

e menores para os polos, os quais perdem boa parte da energia disponível devido ao efeito cosseno, anteriormente discutido.

### **3.1.3 IRRADIÂNCIA SOLAR NA SUPERFÍCIE DA TERRA**

À medida que a radiação atravessa a atmosfera da Terra, ela é absorvida, refletida, dispersada e transmitida diretamente. Cada um desses fenômenos permite que não somente haja a vida no planeta como que possamos desempenhar algumas atividades como ler um livro embaixo de uma árvore embora aparentemente a luz não consiga alcançar aquele local. O conjunto desses fenômenos que ocorrem na atmosfera provoca uma redução da entrada de energia solar da ordem de 30% em um dia bastante claro a aproximadamente 90% em um dia bastante nublado.

Na superfície da Terra, percebe-se irradiância solar direta ou raios solares que vêm diretamente do sol sem serem desviados, e uma irradiância solar difusa ou espalhada que parece vir do céu em todas as direções. Serão utilizados os subscritos 'b' para representar a componente direta da irradiância solar e o subscrito 'd' para indicar a componente difusa. A soma dessas irradiâncias resultam na chamada irradiância solar global ou total, tradicionalmente identificada pelo subscrito 't'.

Saber a quantidade de energia que incide sobre a superfície é relevante para definir parâmetros de potência e geração de energia, no entanto, para que se possa coletar essa energia de maneira eficiente torna-se indispensável conhecer qual a posição da Terra em relação ao Sol para qualquer instante de forma a garantir o posicionamento adequado das placas fotovoltaicas – que é o foco do atual projeto – assim tomando-se a Terra como referência, o que se busca é saber qual a posição aparente do Sol em relação à Terra em qualquer localidade na superfície terrestre, para todos os instantes de tempo nos quais se possa coletar a energia que chega à superfície.

### **3.1.4 OS MOVIMENTOS DO SOL E DA TERRA**

A Terra completa um giro em torno do Sol a cada 365,25 dias descrevendo uma órbita elíptica, com distância média entre os astros de  $1,496 \times 10^{11} m$  (ou  $1 UA$  – Unidade Astronômica).[4] A terra atinge a distância máxima do Sol no Afélio ( $1,52 \times 10^{11} m$ ) e a distância mínima no Periélio ( $1,47 \times 10^{11} m$ ), conforme mostra a figura 4.

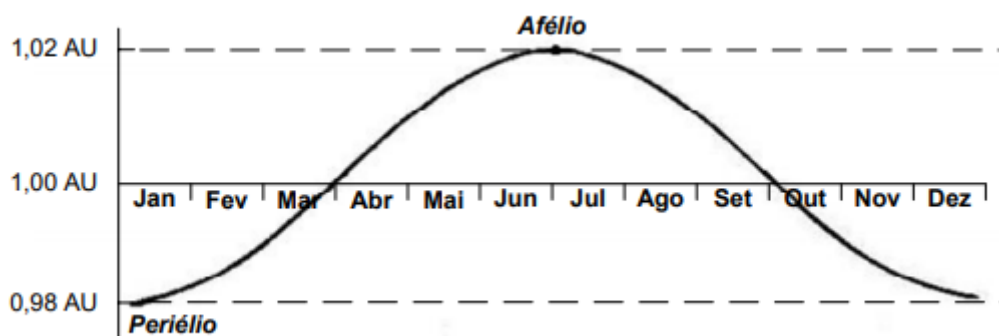


Figura 4 – Distância da terra em relação ao sol em Unidades Astronômicas ( $1,496 \times 10^{11}m$ ).[4]

Além do movimento elíptico ao redor do Sol, a Terra possui um movimento de rotação em torno do seu próprio eixo polar a cada 24 horas. Esse eixo está inclinado  $23,45^\circ$  e sua direção aponta para um ponto fixo no espaço e alinhado com a Estrela do Norte (Polaris) – com desvio máximo de  $45'$  ( $\cong 13 \text{ mrad}$ ). O conjunto desses movimentos é responsável por produzir os dias e noites (em torno do próprio eixo) e as estações do ano (inclinação do seu eixo e movimento ao redor do sol).

### 3.1.5 O ÂNGULO HORÁRIO

Para o entendimento dos conceitos de ângulos horários, é importante entender as divisões feitas por meridianos no planeta terra. Meridianos são linhas imaginárias que seccionam a terra em fatias, sendo a principal referência (ou meridiano principal) o Meridiano de Greenwich. A linha imaginária do meridiano principal, passa sobre a cidade de Greenwich na Inglaterra e sobre os polos do planeta.

O ângulo horário é formado entre o meridiano do observador e o meridiano que contém o sol. Esse ângulo é conhecido como **ângulo de azimute** e é tradicionalmente representado por  $\omega$  sendo a representação angular da rotação da terra sobre seu eixo polar. A figura 5 demonstra a representação do ângulo  $\omega$ .

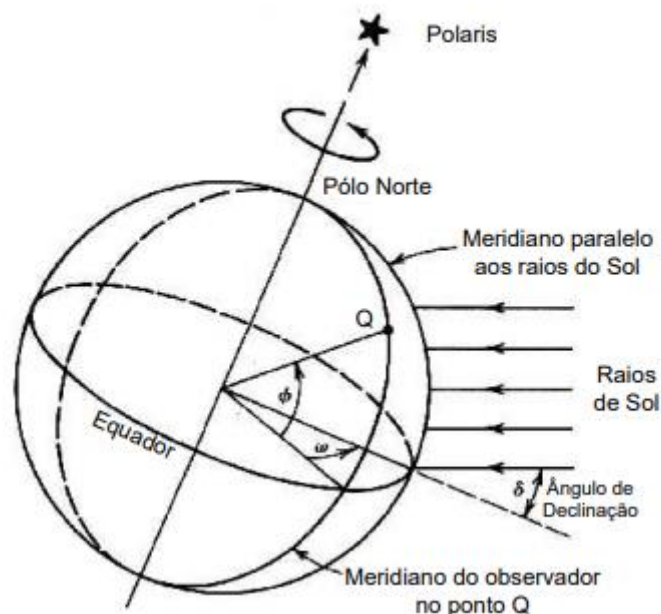


Figura 5 – Representação do ângulo de azimute.[4]

O ângulo horário é zero ao meio-dia solar (quando o Sol atinge seu ponto mais alto no céu). Neste horário diz-se que o Sol está “direto ao Norte” (no hemisfério Sul), pois o plano do meridiano que contém o observador também contém o Sol. A cada hora o ângulo horário aumenta 15°, completando um ciclo de 360° a cada 24 horas.

### 3.1.6 DETERMINAÇÃO DA HORA SOLAR E A EQUAÇÃO DO TEMPO

O conceito de hora solar é usado para prever a direção dos raios solares em um determinado ponto sobre a Terra e é baseado no relógio de 24 horas, com 12h00 sendo o horário em que o Sol está exatamente na direção Norte. A hora solar depende da localidade (longitude) e geralmente é diferente da hora local marcada pelos relógios, definida pelos fusos horários e outras aproximações. Para o projeto de sistemas de posicionamento de painéis fotovoltaicos, a definição exata da hora solar é um dos parâmetros mais importantes para seu posicionamento podendo ser definido pela equação 4:

$$\omega = \frac{\pi}{4} \times (t_s - 12) \text{ (rad)} \quad (4)$$

onde  $t_s$  é a hora solar (medida em horas, numa escala de 0 a 24).

A diferença entre a hora solar média e a hora solar real para uma determinada data pode atingir variações de 17 minutos para mais ou para menos, medidos dentro de um ciclo anual. Esta variação é descrita através da expressão apresentada na equação 5, conhecida como “Equação do Tempo” (EOT, do inglês Equation Of Time).

$$EOT = 2,292(0,0075 + 0,1868 \cos x - 3,2077 \text{sen } x - 1,4615 \cos 2x - 4,089 \text{sen } 2x) \quad (5)$$

onde  $x$  é o ângulo definido como função do número do dia do ano  $N$  no calendário. A equação 6 mostra a relação de  $x(N)$ :

$$x(N) = \frac{2\pi(N - 1)}{365} \text{ (rad)} \quad (6)$$

A equação do tempo foi desenvolvida por Woolf em 1968 e apresenta uma precisão de cerca de 30 s, considerando-se as horas de luz de um dia comum. Posteriormente a Woolf para proporcionar uma menor margem de erro no posicionamento dos painéis solares, Lamm em 1981 esboçou uma nova forma da equação do tempo como mostrado na equação 7:

$$EOT = 60 \sum_{k=0}^5 \left[ A_k \cos \left( \frac{360kn}{365,25} \right) + B_k \text{sen} \left( \frac{360kn}{365,25} \right) \right] \text{ (min)} \quad (7)$$

onde  $n$  é o número de dias em um ciclo de 4 anos, sendo  $n = 1$  corresponde ao dia 1 de janeiro de cada ano bissexto e  $n = 1461$  a 31 de dezembro do último ano (quarto ano do ciclo).  $A_k$  e  $B_k$  são coeficientes da equação definidas a partir do valor de  $k$ . A tabela 1 mostra os valores dos coeficientes a partir dos valores de  $k$ .

**Tabela 1 – Coeficientes da equação do tempo de Lamm. [4]**

$k$	$A_k$	$B_k$
0	$2,0870 \times 10^{-4}$	0
1	$9,2869 \times 10^{-3}$	$-1,2229 \times 10^{-1}$
2	$-5,2258 \times 10^{-2}$	$-1,5698 \times 10^{-1}$
3	$-1,3077 \times 10^{-3}$	$-5,1602 \times 10^{-3}$
4	$-2,1867 \times 10^{-3}$	$-2,9823 \times 10^{-3}$
5	$-1,5100 \times 10^{-4}$	$-2,3463 \times 10^{-4}$

A equação de Lamm, permite reduzir o erro médio relacionado ao posicionamento a valores mínimos de 0,63 s e máximo de 2 s.

### 3.1.7 CONVERSÃO DA HORA SOLAR

A conversão da hora solar para a hora do real do relógio necessita de informações da posição geográfica, do dia do ano e dos padrões de ajuste dos relógios do local, a equação 8 permite utiliza esses parâmetros para fazer essa conversão:

$$t_s = t_a + 4 \Delta long + \frac{EOT}{60} \text{ (horas)} \quad (8)$$

onde  $t_a$  é a hora local, ou do relógio (*Local Clock Time*),  $t_s$  a hora solar e  $EOT$  o resultado do cálculo da equação do tempo em horas.  $\Delta long$  é a correção da longitude do que pode ser calculada a partir da equação 9:

$$\Delta long = Long_{fuso} - Long_{local} \quad (9)$$

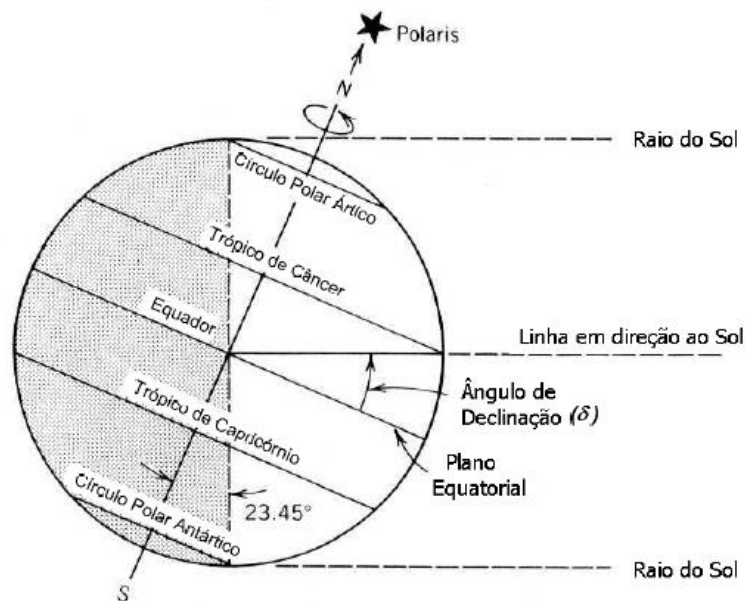
onde  $Long_{fuso}$  é a longitude do meridiano do fuso horário local e  $Long_{local}$  é a longitude correspondente ao local. Por fim,  $D$  é uma constante indicadora de horário de verão, assumindo o valor 1 para casos de a localidade possuir horário de verão e 0 para casos que não.

Uma vez determinadas as horas solar e local, os últimos parâmetros necessários para determinar a posição de ajuste dos painéis solares são os ângulos de declinação da terra e o ângulo de latitude.



### 3.1.8 ÂNGULOS DE DECLINAÇÃO E DE LATITUDE

Define-se como plano equatorial o plano que contém o equador da terra. Se for traçada uma linha que liga o centro da Terra ao centro do sol e partindo-se do fato que o planeta possui seu eixo de rotação inclinado, o ângulo formado entre a linha que interliga os centros e o plano equatorial é chamado de **ângulo de declinação** usualmente representado por  $\delta$ . A figura 6 representa uma visão esquemática do ângulo de declinação.



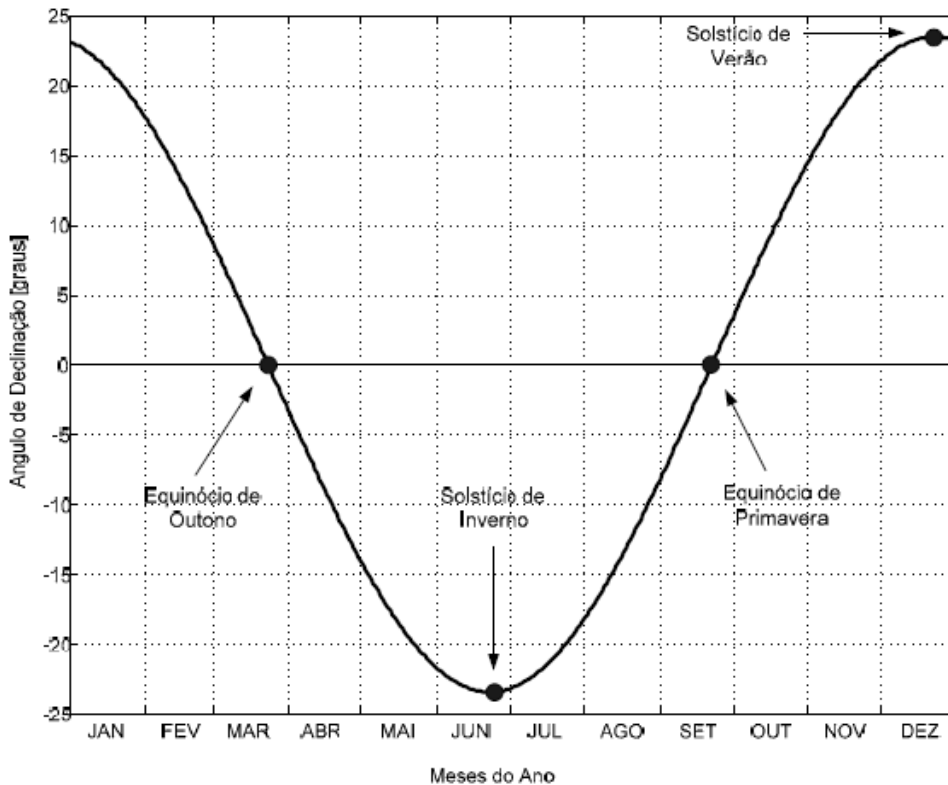
**Figura 6 – Esquema de representação do ângulo de declinação. [4]**

O ângulo  $\delta$  pode variar entre  $\pm 23,45^\circ$  e esses pontos máximos e mínimos ocorrem respectivamente nos solstícios de verão e inverno. Na primeira situação ( $+23,45^\circ$ ) o sol atinge a sua posição mais elevada no céu ao meio-dia solar e indica o início do verão no hemisfério sul. A medida que a Terra continua sua órbita anual em torno do sol, o segundo solstício ocorre qual o extremo mais a norte do eixo de rotação está inclinado em direção ao sol que se encontra ao meio-dia na sua posição mais baixa. Outros pontos específicos ao longo do movimento da terra ao redor do sol são importantes de serem notados como os equinócios de outono e primavera, onde  $\delta = 0$  e onde um observador sobre o equador observaria que o sol está diretamente sobre sua cabeça e visível por exatas 12 horas.

Uma expressão para cálculo aproximado do ângulo de declinação é apresentada na equação 10:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ 2\pi \frac{(284 + N)}{365} \right] [\text{rad}] \quad (10)$$

onde  $N$  é o número do dia do ano já utilizado anteriormente. A figura 7 representa a variação anual do ângulo de declinação evidenciando os pontos de solstício e equinócio.



**Figura 7 – Variação do ângulo de declinação ao longo dos meses do ano. [4]**

Define-se por sua vez o ângulo de latitude como sendo o ângulo  $\phi$  entre uma linha que liga um ponto qualquer da superfície terrestre com o centro da terra com o plano equatorial da Terra. A interseção da linha com o plano equatorial forma a chamada Linha do Equador e corresponde ao ponto de  $\phi = 0$ .

Qualquer ponto na superfície da terra pode ser definido por um ângulo de latitude sendo os polos sul e norte a representação dos pontos de latitude  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$  respectivamente. Outros pontos relevantes de com relação ao ângulo de latitude são os trópicos de câncer ( $+23,45^\circ$ ) e capricórnio ( $-23,45^\circ$ ) que representam os pontos de maior inclinação dos polos norte e sul em relação ao sol.

## 3.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

O processo de conversão da luz em eletricidade é possível por meio de um processo conhecido por **efeito fotovoltaico**, inicialmente observado pelo físico Edmond Becquerel, em 1839. Esse efeito corresponde ao aparecimento de uma diferença de potencial produzida pela absorção dos raios luminosos nos extremos de uma estrutura de material semicondutor conhecido como **célula fotovoltaica**.

### 3.2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico construído a partir de estruturas de estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial, com o advento da microeletrônica. [6] Inicialmente, o alto custo de produção e a baixa eficiência dos painéis solares tornavam esta tecnologia inacessível à população em geral limitando-se apenas a aplicação nas décadas de 50 e 60 na indústria espacial.

As primeiras aplicações comerciais da energia solar fotovoltaica como opção de fornecimento de energia elétrica de baixa potência em locais isolados são relatadas nos Estados Unidos, quando a Southern Railway instalou, em 1974, módulos solares para alimentar as lâmpadas de sinalização nos cruzamentos ferroviários.

Diversas outras empresas ferroviárias adotaram o mesmo sistema para levar eletricidade a localidades remotas, provendo energia a sistemas de sinalização e repetidores de microondas utilizados na comunicação, diminuindo significativamente as despesas com manutenção e extensão da rede convencional para atendimento de pequenas cargas [6].

Outra experiência bem-sucedida ocorreu na Austrália, onde o governo, por meio da empresa Telecom Australia instalou setenta repetidores de micro-ondas cobrindo uma extensão de 2.400 km, totalmente alimentado por energia fotovoltaica, o que acabou por tornar esta tecnologia como um padrão para sistemas de comunicação, os quais geralmente demandam baixa potência e se situam em localidades distantes das redes de distribuição convencional, de difícil acesso para manutenção.

Nas últimas três décadas, avanços significativos no desenvolvimento de materiais permitiram o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos, com a diminuição de custos, tornando a tecnologia acessível a uma maior parcela da população. A crise do petróleo em 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele

momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação a daquelas células usadas em explorações espaciais.

Dados da Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, 2008) informam que a capacidade mundial instalada de sistemas fotovoltaicos atingiu a marca de 9.162 MW ao final do ano de 2007 tendo uma taxa média de crescimento dos anos 2000 a 2007 de cerca de 35%.

O custo das células solares é, ainda hoje, um grande desafio para a Indústria e o principal empecilho para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

### 3.2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Normalmente conhecidas como células solares, as células fotovoltaicas individuais são dispositivos construídos a partir de materiais semicondutores e que produzem eletricidade. As células fotovoltaicas são encontradas em diferentes tamanhos e formatos comumente conectadas para formar os módulos fotovoltaicos que, por sua vez, podem ser combinados e conectados para formarem arranjos fotovoltaicos [6].

A tecnologia fotovoltaica utiliza células com camadas de material semicondutor tetravalente (em geral, o silício), justapostas, uma com dopagem de átomos trivalentes (em geral, o boro) conhecida como camada tipo *p*, outra com dopagem de átomos pentavalentes (em geral, o fósforo) conhecida como camada tipo *n*. A junção dessas camadas forma uma junção *pn* onde o movimento de cargas forma um campo elétrico. A figura 8 mostra o esquema da junção *pn*.

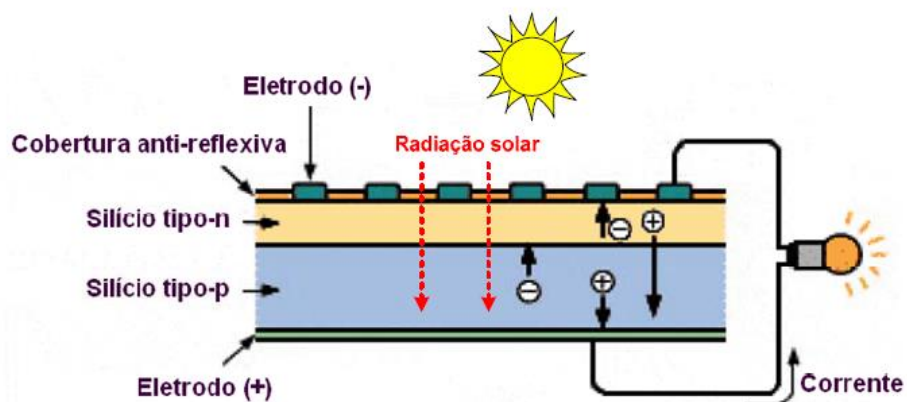


Figura 8 – Esquema explicativo de uma junção *pn* da célula solar [7].

Quando a luz do Sol incide sobre uma célula *pn*, os fótons da luz absorvida expulsam elétrons dos átomos da célula. Estes elétrons livres movem-se ao longo da estrutura cristalina do material, criando pares elétron-lacuna. Este movimento de elétrons e lacunas formam a corrente elétrica, no processo físico chamado efeito fotovoltaico, com intensidade proporcional à intensidade de luz incidente [7].

O silício, segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, impera quase que absoluto no ranking dos materiais utilizados. Ele tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino (mono-Si), policristalino (poly-Si) e amorfo (a-Si). Relatório da Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica informa que 90% das células fotovoltaicas produzidas em 2007 foram feitas de silício cristalino. No entanto, a busca de materiais alternativos é intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra.

Células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas, requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação, características que, por si só, justificam o esforço em seu aperfeiçoamento [7].

As principais diferenças entre os materiais citados são a eficiência na absorção da luz, a eficiência na conversão da energia luminosa em eletricidade, a tecnologia de fabricação e o custo de produção, tendo cada um suas vantagens e desvantagens, além de limitações.

### 3.2.3 CARACTERÍSTICAS DO SILÍCIO CRISTALINO

As células monocristalinas são as mais comuns na indústria fotovoltaica e possuem uma estrutura molecular uniforme, obtida de cristais de silício altamente purificados. Sua uniformidade, se comparada a materiais não-cristalinos, resulta em alta eficiência na conversão da luz solar em eletricidade.

Eficiências superiores a 20% têm sido obtidas com células de silício produzidas em larga escala. Isso significa que, atualmente, já se pode aproveitar cerca de 20% da insolação incidente para produção de eletricidade. Tão importante quanto a eficiência, a espessura das células solares é um fator que tem apresentado evolução, visto que menor quantidade de material resulta em menor custo. Entre 2003 e 2008 a espessura média de *waffers* (estrutura de silício após o corte e antes do encapsulamento) reduziu-se de 0,32 mm para 0,17 mm . [7]

Relatos de março de 2019 indicam preços de US\$ 3,05/W (dólar por watt) no mercado norte americano, preço que vem sendo reduzido drasticamente desde o início da venda de painéis solares na China. [9]

Durante o processo de produção, uma considerável quantidade de silício acaba se perdendo como resíduo do processo de corte dos wafers. O aproveitamento dos pequenos cristais através da fusão e depósito destes sobre um substrato resultam em um material conhecido como silício policristalino que tem a mesma capacidade de absorver luz e transformá-la em eletricidade, com menor eficiência no processo, devido à descontinuidade causada pelos grãos de silício. Esta descontinuidade dificulta o fluxo de elétrons e diminui a potência de saída da célula.

### **3.2.4 FILMES FINOS E NOVAS TECNOLOGIAS**

Novos materiais e novas tecnologias de fabricação têm sido objeto de pesquisas com o intuito de melhorar a eficiência e diminuir os custos de produção e de geração de energia elétrica por processo fotovoltaico. Dentre essas novas tecnologias, destaca-se a tecnologia de filmes finos.

Módulos de filmes finos são construídos pela deposição de camadas extremamente finas de materiais fotossensíveis sobre um substrato de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou plástico. Isto resulta em custo de produção menor quando comparado à produção utilizando tecnologia de silício cristalino. [7]

Dentre os materiais comercialmente produzidos e mais utilizados atualmente estão o Silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre e índio ou gálio (CIS, CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) [10]. Estes ocuparam em 2007 uma fatia de mercado da ordem de 10,4% do total de módulos comercializados.

O filme fino policristalino sobre vidro (CSG) é uma tecnologia produzida industrialmente que, acompanhado das células microcristalinas, em particular a combinação de silício amorfo e silício microcristalino (a-Si / $\mu$ c-Si) são tecnologias promissoras quanto a sua eficiência. A Tabela 2 resume as eficiências dos módulos e das células produzidos com as principais tecnologias conhecidas.

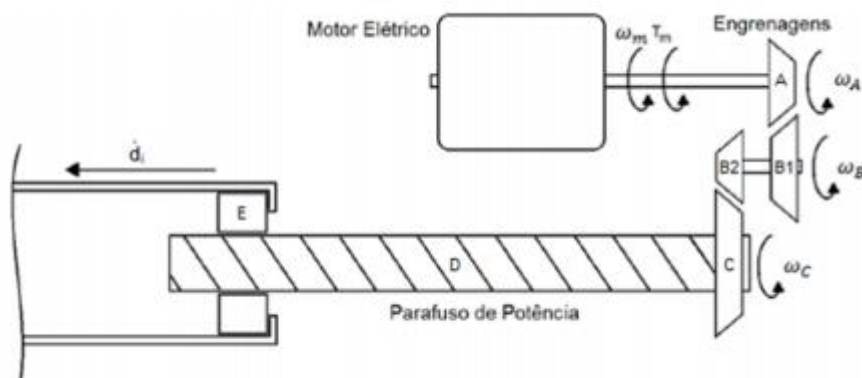
**Tabela 2 – Eficiência dos principais módulos e células fotovoltaicas do mercado.**

	Filme Fino			Silício Policristalino		
	Solício amorfo (a-Si)	Telureto de Cádmio (CdTe)	CIGS	a-Si / $\mu$ c Si	Mono cristalino	Poli cristalino
Eficiência da célula*	5% – 7%	8% – 11%	7% – 11%	8%	16% – 19%	14% – 15%
Eficiência do módulo					13% – 15%	12% – 14%
Área de módulos/ kW	15 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	7 m <sup>2</sup>	8 m <sup>2</sup>

\* Eficiência medida em condições padrão de teste (CPT)

### 3.3 ATUADORES LINEARES ELÉTRICOS

Os atuadores lineares elétricos são dispositivos eletromecânicos que permitem a motorização de diversos equipamentos. Sua função principal é a conversão de movimento rotacional de um motor elétrico em movimento linear a partir de um parafuso de potência e combinações de engrenagens. A figura 9 mostra um esquema de um atuador linear elétrico.



**Figura 9 – Esquema de atuador linear elétrico.[20]**

Embora a mecânica desses atuadores pareça complexa, muitos fabricantes do ramo de automação já possuem essas soluções disponíveis para várias aplicações do dia a dia como portas de elevador, controles de válvula entre outros projetos de automação.

As figuras 10 a 12 mostram exemplos de atuadores de mercado.



**Figura 10 – Atuador linear LINAK – Série LA36 [21]**



**Figura 11 – Atuador linear Automotion – Série FT [22]**



**Figura 12 – Atuador linear TiMotion – Série JP4 [23]**

Os modelos mostrados nas figuras são apenas um pequeno número se comparado aos que existem no mercado. Eles podem variar em tamanho do curso, força de atuação, velocidade de atuação, aplicabilidade, posição do motor dentre outras características. Para a aplicação específica do dispositivo de posicionamento solar, as características mais relevantes que serão analisadas para seleção serão o tamanho do curso e força de atuação uma vez que o movimento linear do parafuso de potência será responsável por posicionar



alterar o ângulo de inclinação do painel empurrando ou puxando a estrutura que suporta o painel solar.

### **3.4 MICROCONTROLADORES E ARDUINOS**

Um microcontrolador, em última análise é um computador de baixo custo em um chip único. Estar em um chip único significa que o todo o sistema do computador está dentro dos limites do circuito integrado.

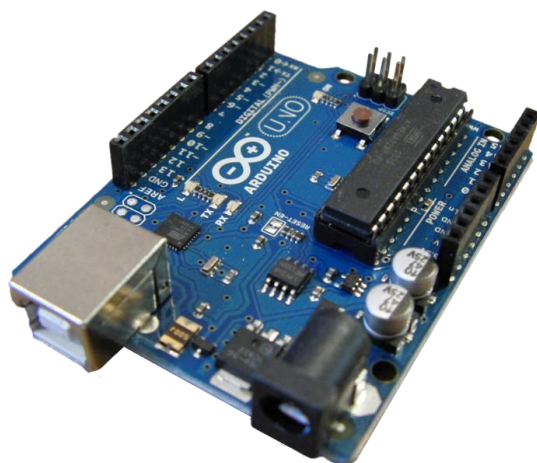
Muitas das características dos microcontroladores se assemelham aos computadores pessoais. Primeiramente, eles são capazes de armazenar e executar programas, sua característica mais importante, além disso eles contém componentes semelhantes a uma unidade central de processamento (CPU), uma memória de acesso aleatório (RAM), memória somente leitura (ROM), memória eletricamente apagável programável somente de leitura (EEPROM), portas de entrada/saída (I/O), portas seriais e paralelas, temporizadores e outros periféricos integrados, como conversores analógico para digital (A/D) e digital para analógico (D/A).

A capacidade do microcontrolador de armazenar e executar programas o torna extremamente versátil e responsável pela sua utilização em muitos dos mecanismos automatizados. Por exemplo, um microcontrolador pode ser programado para tomar decisões e executar funções baseadas em situações predeterminadas, outro exemplo aplicável é o próprio movimento de painéis solares uma vez que, por meio de entradas específicas como o dia do ano, localização geográfica e horário local é possível realizar acionamento de periféricos como motores de passo.

No passado, os primeiros microcontroladores exigiam que o usuário tivesse um conhecimento aprofundado sobre as linguagens de programação, a construção de algoritmos, padrões eletrônicos das placas e até mesmo dimensionamento de placas de circuito. Com o advento dos Arduinos, essa tarefa se tornou extremamente mais fácil e intuitiva.

#### **3.4.1 ARDUINOS**

Um Arduino é um microcontrolador desenvolvido em um sistema de código aberto. Como todo microcontrolador, ele possui um chip central responsável pelo processamento e vários periféricos soldados a uma placa. Uma análise simplificada pode ser feita se comparando um Arduino a uma pequena placa mãe. [18] A figura 13 mostra um exemplo de Arduino do modelo *Uno (R3)*.



**Figura 13 – Exemplo de Arduino, modelo *Uno*. [18]**

Embora o nome Arduino venha sendo usado para designar a placa em si, o conceito por trás dessa tecnologia está mais atrelado aos softwares relacionados. Para ser caracterizado como um Arduino, deve-se utilizar um software específico para a programação da placa, e é exatamente nesse momento que esses microcontroladores se destacam.

O sistema do Arduino traz ao usuário uma experiência mais amigável do que os demais microcontroladores. Nesse sistema muitas funções que antes precisavam ser construídas em códigos compostos por várias funções lógicas encontram-se de forma consolidada como funções. Para o usuário, basta escolher as funções corretas de acordo com a aplicação para conseguir realizar projetos variados de automação.

Outras vantagens claras dessa tecnologia são sua comunidade de desenvolvimento e o preço de aquisição. Por se tratar de uma tecnologia de código aberto, os Arduinos possuem bastante material, FAQs e fóruns online que guiam o usuário na busca por soluções variadas de tecnologia, além disso, uma placa simples como o *Arduino Uno* pode ser encontrada no mercado brasileiro por cerca de R\$ 40,00.

### **3.4.1.1 MODELOS DE ARDUINO E COMPONENTES ELETRÔNICOS**

Os modelos de Arduinos variam quanto a sua configuração de acordo com os requerimentos de um projeto de automação e os componentes necessários para se alcançar o objetivo do controle. A tabela 3 mostra os modelos de mercado existentes e suas características.

**Tabela 3 – Modelos de mercado de Arduinos. [19]**

<b>Modelo</b>	<b>Processador</b>	<b>Memória</b>	<b>Porta I/O Digital</b>	<b>Porta I/O Analógica</b>
<b>Arduino Uno</b>	16Mhz ATmega328	2KB SRAM, 32KB flash	14	6 (I), 0 (O)
<b>Arduino Due</b>	84MHz AT91SAM3X8E	96KB SRAM, 512KB flash	54	12 (I), 2 (O)
<b>Arduino Mega</b>	16MHz ATmega2560	8KB SRAM, 256KB flash	54	16 (I), 0 (O)
<b>Arduino Leonardo</b>	16MHz ATmega32u4	2.5KB SRAM, 32KB flash	20	12 (I), 0 (O)

A modelo de placa para será a central de programação e processamento, no entanto, para garantir o funcionamento adequado ao projeto, os Arduinos são ligados a componentes periféricos que proporcionam características específicas. Dentre os principais componentes, destacam-se os escudos (*Shields*). São exemplos de escudos:

- Xbee: um componente utilizado para criar uma comunicação sem fio com a placa.
- Motor Control: um módulo de controle para motores DC e para leitura dos codificadores desses motores.

Além desses componentes, vários componentes de projetos elétricos podem ser agregados às placas para completar o circuito como: fios, capacitores, resistores, indutores diodos, LEDs, botões, transistores e relays. A escolha desses periféricos é baseada nas funcionalidades do projeto e podem ser combinados de formas variadas para alcançar o objetivo. Quando tratamos de sistemas de controle de posicionamento que utilizam motores de corrente contínua, dois componentes são citados na maioria dos projetos: transistores e *encoders*.

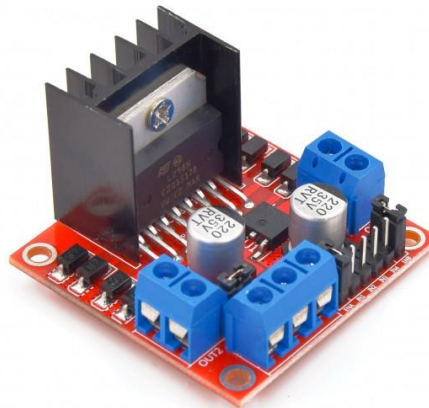
### **3.4.1.2 TRANSISTORES**

Transistores são componentes semicondutores que possuem funções de amplificação de sinais de corrente e tensão além de funções de controle do sentido de alimentação da corrente e proteção do circuito dependendo do seu modelo. Esses componentes são fabricados de diferentes formas, mas a maioria deles apresenta três terminais diferentes, sendo eles:

- Base (B): principal responsável pela ativação do transistor.
- Coletor (C): terminal positivo do transistor.
- Emissor (E): terminal negativo do transistor

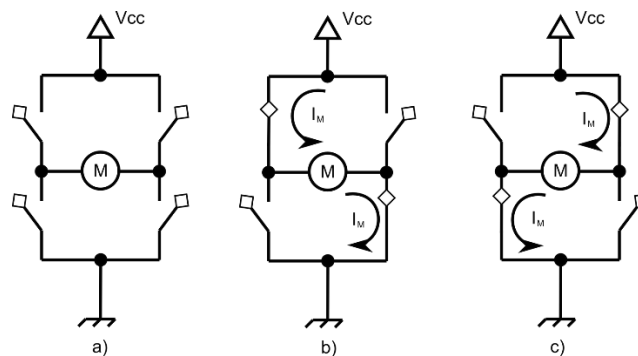
O princípio de funcionamento básico de um transistor, quando acionado por meio de uma tensão de alimentação, é permitir que passe uma corrente por um resistor em sua base alimentando o próximo componente do circuito. Também podemos usar o transistor em paralelo com as cargas que demandam uma corrente elétrica alta, evitando que a esta corrente percorra componentes eletrônicos mais sensíveis.

Sistemas de posicionamento associados a Arduinos e motores de corrente contínua costumam utilizar um modelo de transistor mais complexos que envolvem inclusive conceitos de inversão de corrente, proteção e amplificação de tensão ao mesmo tempo. Um exemplo de transistor desse tipo é o L298N representado pela figura 14.



**Figura 14 – Componente L298N. [27]**

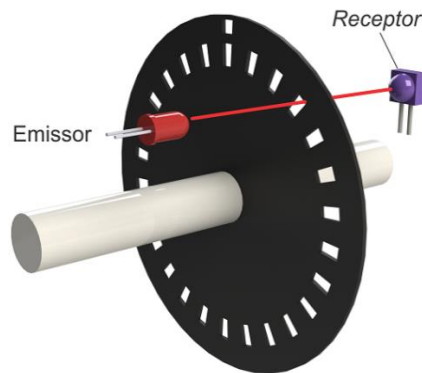
Esse tipo de componente utiliza um conceito de ponte H para o controle do sentido da corrente que envolve a abertura e fechamentos dos canais de alimentação. A figura 15 mostra um esquema de um circuito de ponte H exemplificando a alternância de sentidos da corrente de alimentação.



**Figura 15 – Esquema explicativo do funcionamento de uma ponte H. [28]**

### 3.4.1.3 ENCODERS

Encoders são sensores eletro-mecânicos cuja funcionalidade é transformar posição em sinal elétrico digital. Com a utilização de encoders é possível quantizar distâncias, controlar velocidades, medir ângulos e até número de rotações. Ele é composto basicamente por um disco com marcações, um componente emissor e um receptor de forma que o movimento de rotação do seu eixo é medido a partir da captação de sinais pelo receptor. A figura 16 mostra um exemplo desse sistema.



**Figura 16 – esquema de funcionamento de um encoder.**

À medida que o disco gira o receptor repassa para as saídas do encoder um sinal em forma de uma onda quadrada, proporcional ao número de marcações do disco de acordo com a sua resolução. Logo, a resolução do desse componente corresponde ao número de marcações presentes no disco do dispositivo, que equivale a quantidade de ondas quadradas, geradas em uma volta. A figura 17 mostra alguns dos modelos de discos dos encoders e suas resoluções.



**Figura 17 – Discos de Encoder e suas resoluções.**

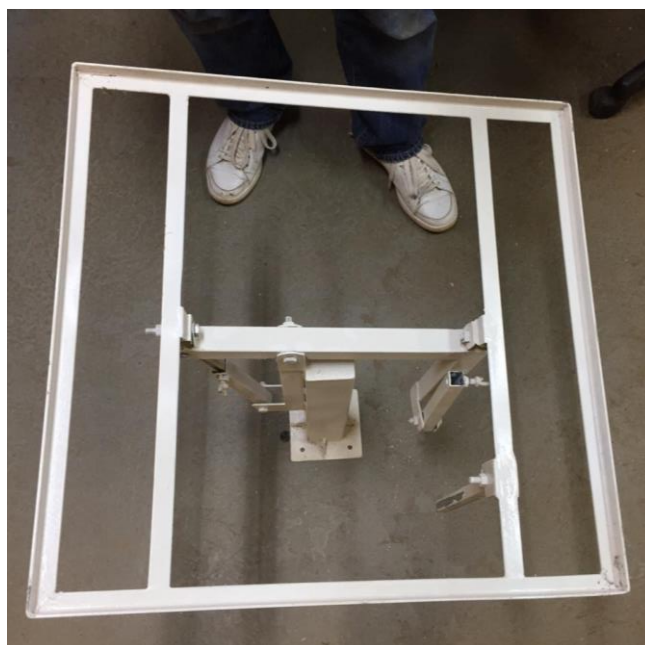
As próximas sessões mostrarão a aplicação das tecnologias e desses componentes eletrônicos além dos conceitos relacionados ao movimento solar para o projeto do sistema de posicionamento automático de um painel solar.

## 4 PROJETO DO MECANISMO

O projeto do dispositivo de posicionamento solar automático partiu da ideia de adaptar a estrutura existente atual no LEA/UnB, alterando parte da sua estrutura e incorporando mecanismos de automação como atuadores lineares elétricos e arduinos para controle do seu posicionamento. As figuras 18 e 19 mostram o formato anterior do dispositivo de posicionamento.



**Figura 18 – Visão lateral do mecanismo de posicionamento do LEA/UnB**



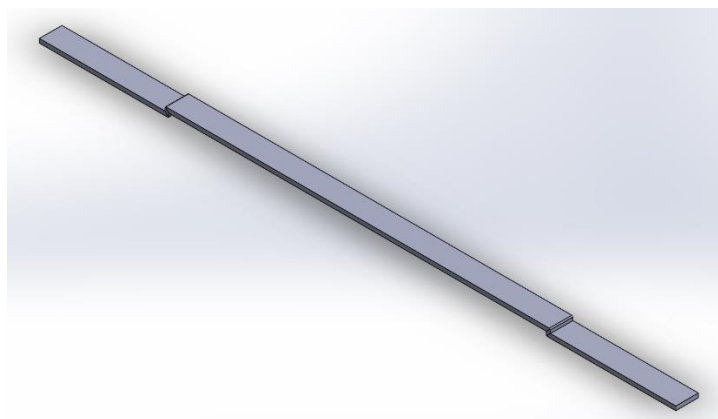
**Figura 19 – Visão superior do mecanismo de posicionamento do LEA/UnB**

Uma análise preliminar da estrutura do mecanismo permitiu levantar pontos de melhoria e adequação anteriormente à aplicação de automação de movimento. Dentre os pontos identificados, observou-se que a estrutura do mecanismos e a disposição dos braços de suporte do mecanismos conforme visto na figura 18, embora proporcionem alcançar os ângulos de movimento necessários para o posicionamento do painel, fazem com que o centro de massa do conjunto se desloque do centro da base, resultando em um desequilíbrio recorrente da estrutura como um todo, o que pode gerar maior dificuldade de controle do posicionamento bem como fará com que os atuadores sejam mais exigidos mecanicamente e de forma constante.

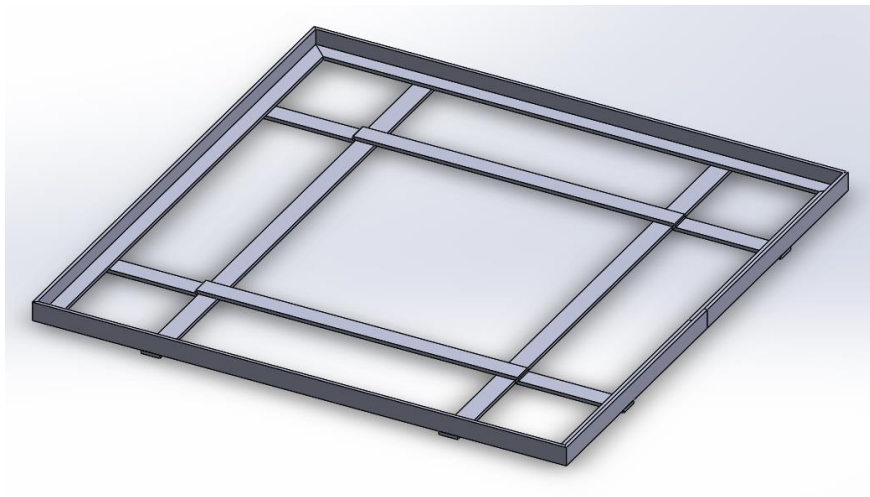
Além do desequilíbrio, observou-se alguns problemas de fabricação e desalinhamento nos pontos de rotação que conectam a estrutura que suporta o painel ao dispositivo. Como ponto inicial, partiu-se da ideia de rever a estrutura do dispositivo, buscando uma composição mais equilibrada e ainda funcional do mecanismo.

#### **4.1 IDEALIZAÇÃO DO MECANISMO**

Inicialmente optou-se pela introdução de duas barras adicionais ao suporte do painel solar de forma a adequar a estrutura a uma atuação de dois eixos e criar um suporte para as demais estruturas que serão adicionadas. A Figura 20 mostra a idealização do formato das barras adicionais e a figura 21 mostra a montagem das barras junto ao suporte.



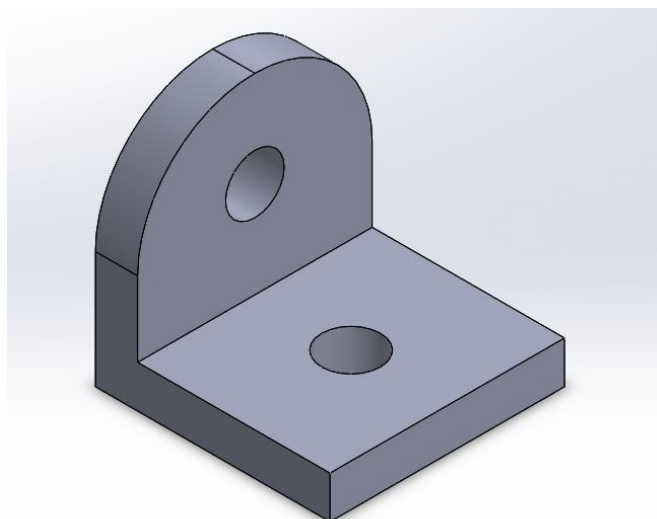
**Figura 20 – Desenho CAD do das barras introduzidas no suporte do painel.**



**Figura 21 – Desenho CAD de montagem das barras no suporte do painel solar.**

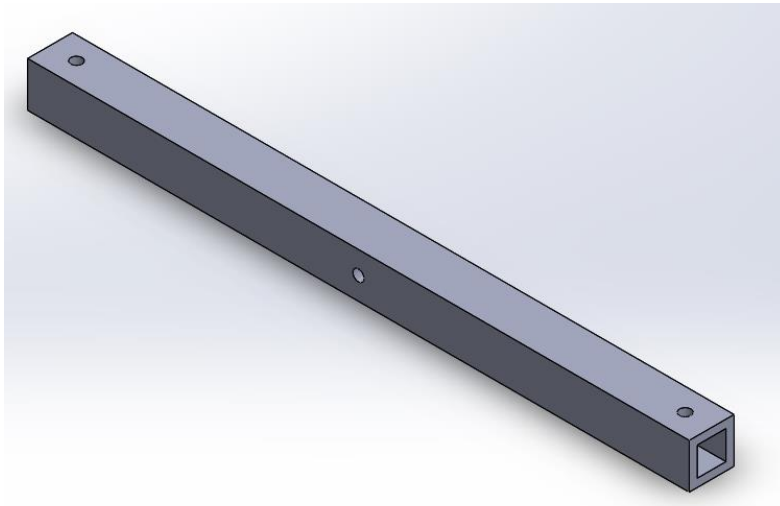
As novas barras possuem um leve desvio da sua forma para encaixe na estrutura e, assim com as anteriores já existentes, serão soldadas ao quadro do suporte do painel solar.

As principais mudanças na estrutura ocorrem exatamente no mecanismo central, responsável por garantir a rotação do suporte do painel solar em duas direções (2 eixos). Inicialmente, para o primeiro grau de liberdade, introduziu-se um mecanismo com duas barras de suporte que serão presas ao quadro do suporte do painel e que estão interligadas por uma barra central a partir do seu centro geométrico a um suporte em “L” com furos para parafuso. As figuras 22, 23, 24 e 25, mostram, respectivamente, em CAD idealizados para o suporte em “L”, a barra central de suporte, as barras laterais e a montagem do conjunto.

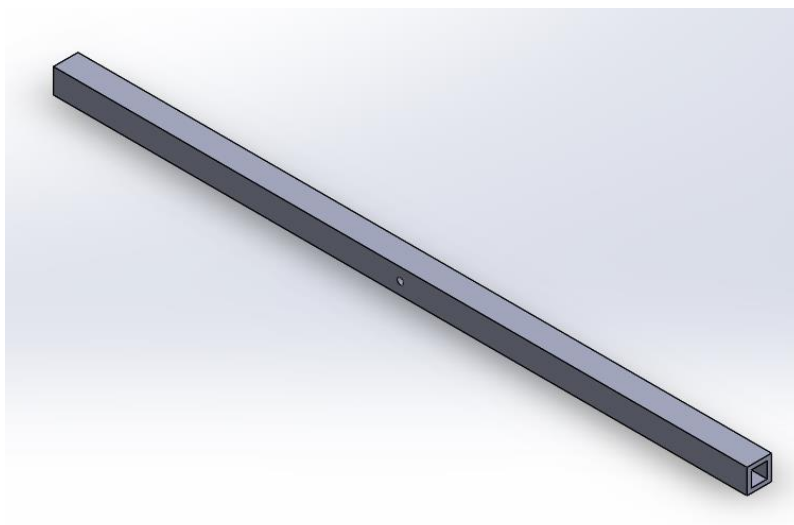


**Figura 22 – Desenho CAD do suporte em “L” da barra central.**

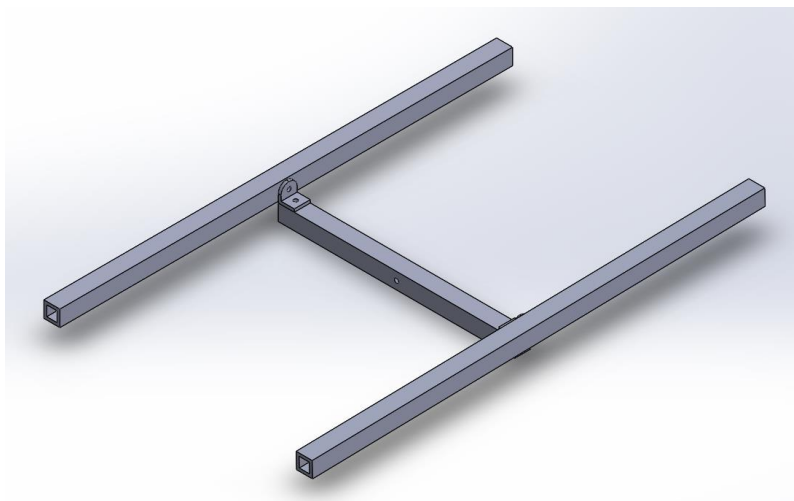




**Figura 23 – Desenho CAD da barra central do mecanismo.**



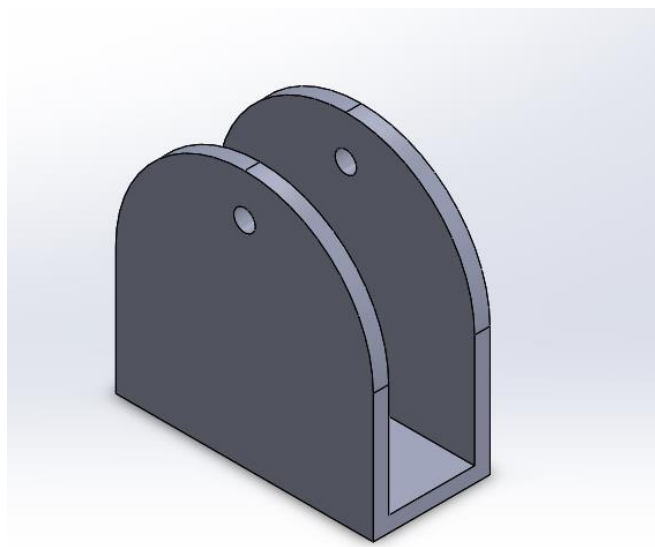
**Figura 24 – Desenho CAD das barras laterais do mecanismo.**



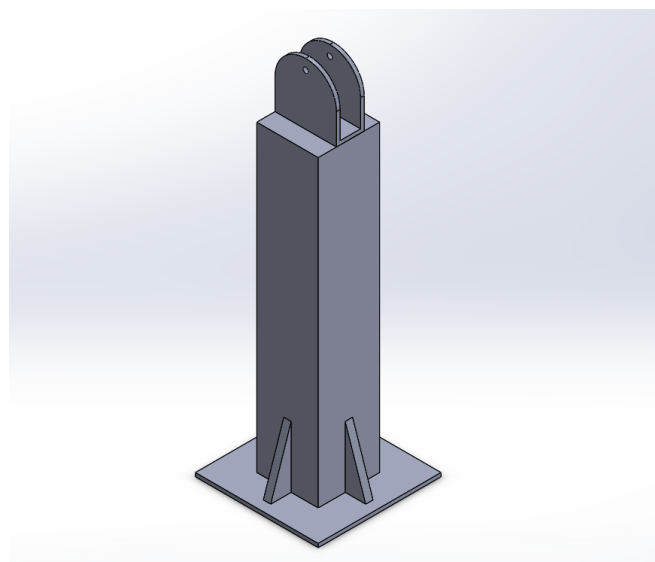
**Figura 25 – Desenho CAD da montagem do mecanismo de rotação para o primeiro grau de liberdade.**

As barras laterais são presas ao suporte em “L” assim como os suportes em “L” são presos à barra central por meio de parafusos, sendo o primeiro caso de forma a garantir a rotação e o segundo apenas como fixação da estrutura.

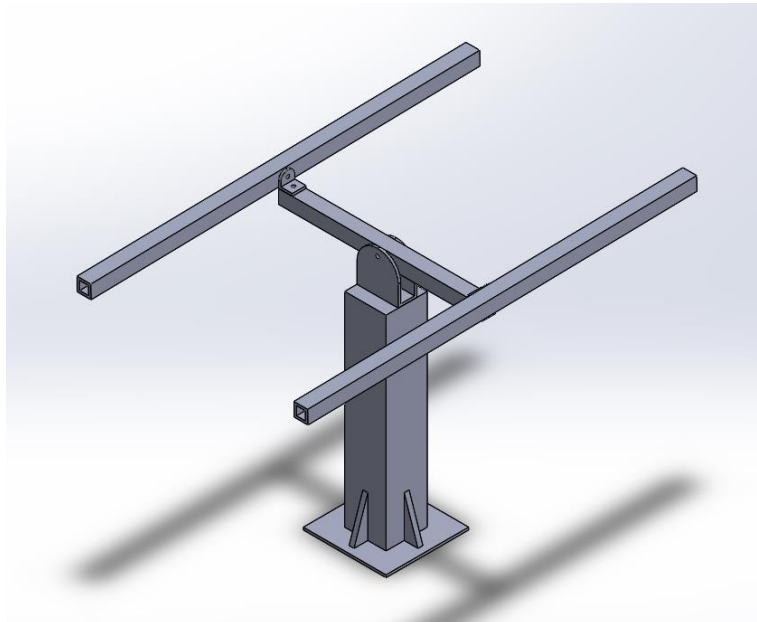
Para o segundo grau de liberdade, idealizou-se um suporte em “U” soldado à base antiga já utilizada e parafusada no furo central da barra central mostrada na montagem da figura 25 de forma a garantir sua rotação. As figuras 26, 27 e 28 mostram os desenhos CAD do suporte em “U”, a montagem do suporte à base antiga e a montagem do mecanismo da figura 25 à nova estrutura da base.



**Figura 26 – Desenho CAD do suporte em U do mecanismo.**

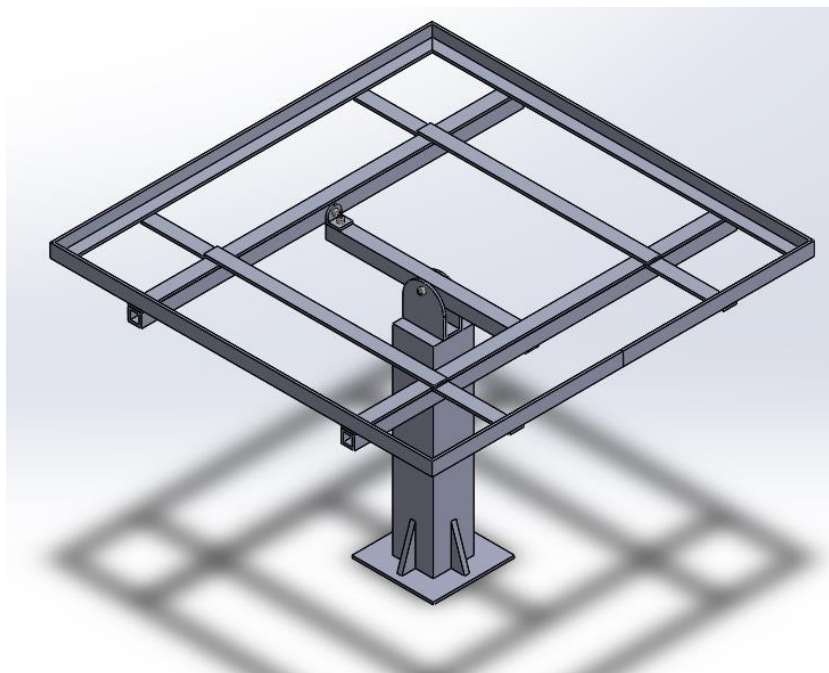


**Figura 27 – Desenho CAD da montagem do suporte em U sobre a base antiga.**



**Figura 28 – Desenho CAD da montagem do mecanismo com 2 graus de liberdade.**

Por fim, as barras superiores são conectadas ao suporte do painel solar, sendo soldadas à estrutura. A figura 29 mostra a montagem final da estrutura como um todo.



**Figura 29 – Desenho CAD final do novo mecanismo.**

Antes de introduzir os atuadores ao mecanismo, se fez necessário avaliar duas questões principais. A primeira diz sobre o dimensionamento dos parafusos de fixação e dos que permitem a rotação do conjunto a partir do peso da estrutura, a segundo está relacionada à distância de instalação dos atuadores mecânicos na estrutura da base, de forma que os ângulos limites sejam alcançados a partir da extensão dos atuadores lineares mecânicos.

## 4.2 DIMENSIONAMENTO DOS PARAFUSOS

Para identificação dos tipos de parafusos ou pinos utilizados nas fixações do novo mecanismo, partiu-se das seguintes premissas:

- Análise estática sobre o parafuso, uma vez que a frequência de atuação do mecanismo é mínima ao longo da utilização (cerca de um movimento de  $15^\circ$  a cada 1 hora) descartando-se assim uma análise de falha por fadiga.
- A estrutura do mecanismo seja toda em aço AISI 1020 para que seja estimado o peso inicial da estrutura.

Como princípio de partida, mediu-se o peso da placa solar que foi construído pelo LEA/UnB utilizada no projeto, chegando-se a  $m_{painel} = 5,5 \text{ kg}$ . Em seguida utilizou-se o software SolidWorks, utilizado para a idealização dos desenhos do novo mecanismo para estimar o peso da estrutura. A figura 30 e 31 mostram os dados do peso das partes consideradas para dimensionamento da estrutura.

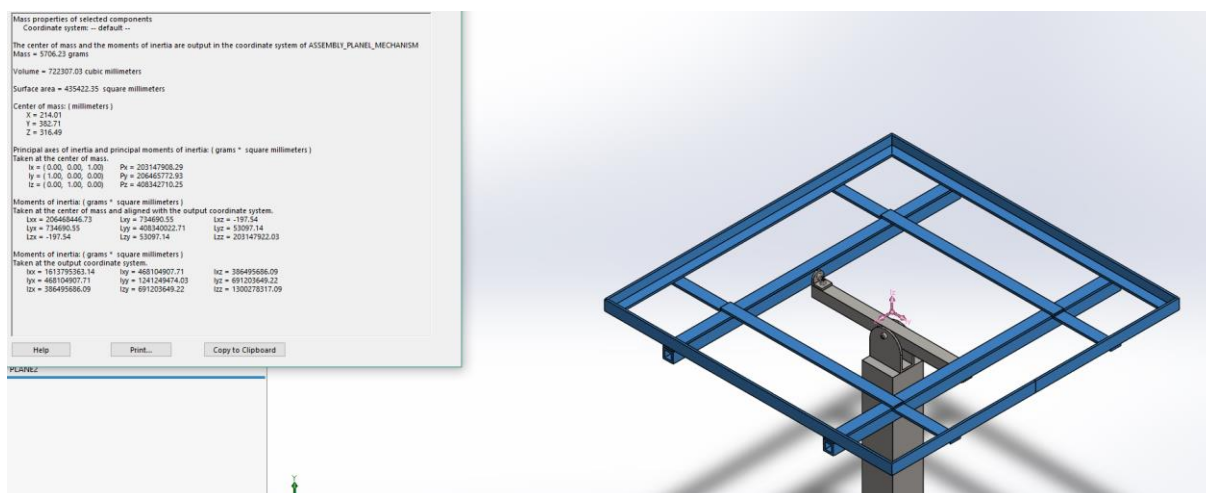
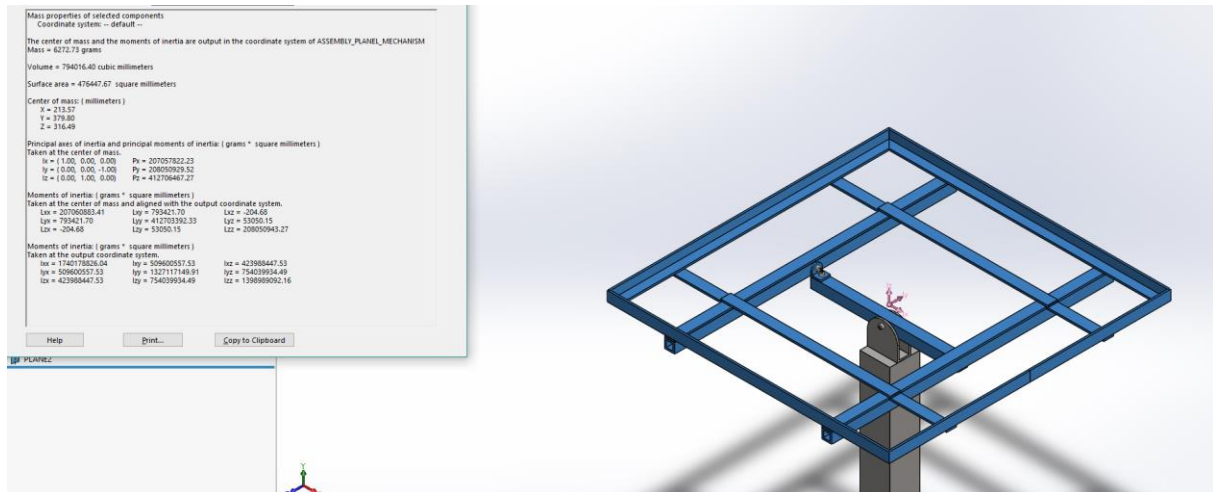


Figura 30 – Propriedades de massa da estrutura do mecanismo para análise dos parafusos de fixação do suporte em “L”.

A partir da figura 30, encontrou-se uma massa  $m_{mecanismo_1} = 5,7 \text{ kg}$  que será utilizado para o dimensionamento dos parafusos do conjunto mostrado figura 25.



**Figura 31 – Propriedades de massa da estrutura do mecanismo para a análise dos parafusos de fixação do conjunto no suporte em “U”.**

Da figura 31, infere-se o valor de  $m_{mecanismo_2} = 6,27 \text{ kg}$  para a estrutura do mecanismo, que será utilizado para o dimensionamento dos parafusos do suporte da base mostrado na figura 28.

A análise foi dividida em dois momentos. Para ambos os casos a massa total corresponde à soma das massas dos mecanismos com a massa do painel, dada pelas equações

$$m_{t_1} = 5,5 + 5,7 \rightarrow m_{t_1} = 11,20 \text{ kg} \quad (11)$$

$$m_{t_2} = 5,5 + 6,27 \rightarrow m_{t_2} = 11,77 \text{ kg} \quad (12)$$

dessa forma, as cargas correspondentes aos pesos totais são dadas por

$$P_1 = m_{t_1} \times g = 11,20 \times 9,8 \rightarrow P_1 = 109,76 \text{ N e} \quad (13)$$

$$P_2 = m_{t_2} \times g = 11,77 \times 9,8 \rightarrow P_2 = 115,35 \text{ N.} \quad (14)$$

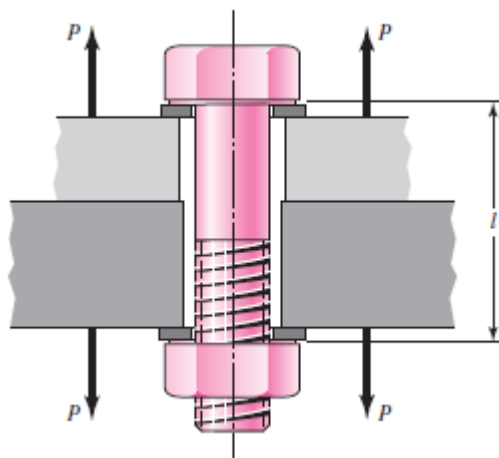
Antes de analisar a resistências dos parafusos, algumas condições iniciais precisam ser consideradas de forma a ter um parâmetro de partida para o dimensionamento, como o material dos parafusos e a condição de carregamento. Para uma análise inicial, utilizou-se a tabela 8-11 disponível no livro Shigley's Mechanical Engineering Design [24] para escolha de um material. A figura 32 demonstra essa tabela.

Categoria de propriedade	Intervalo de tamanho inclusivo	Resistência mínima de prova,* MPa	Resistência mínima de tração,* MPa	Resistência mínima de escoamento,* MPa	Material	Marcação de cabeça
4,6	M5–M36	225	400	240	Baixo e médio carbono	4,6
4,8	M1,6–M16	310	420	340	Baixo e médio carbono	4,8
5,8	M5–M24	380	520	420	Baixo e médio carbono	5,8
8,8	M16–M36	600	830	660	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	8,8
9,8	M1,6–M16	650	900	720	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	9,8
10,9	M5–M36	830	1040	940	Baixo carbono, martensita, Q&T (temperado e revenido)	10,9
12,9	M1,6–M36	970	1220	1100	Liga, Q&T (temperado e revenido)	12,9

**Figura 32 – Tabela de materiais e propriedades mecânicas para a classe métrica de parafusos.[24]**

Devido às baixas cargas  $P_1$  e  $P_2$ , optou-se por escolher inicialmente o primeiro item da listagem com as menores resistências.

Analisando o primeiro caso onde a carga é igual a  $P_1$ , estamos considerando os parafusos que prendem os suportes em “L” na estrutura da barra central e para as barras que estão presas ao suporte em “L” por parafusos. A figura 33 mostra a condição de carregamento do parafuso para a primeira situação.



**Figura 33 – Condição de carregamento para parafuso de fixação do suporte em “L” na barra central.[24]**

Para esse caso, a carga  $P$  representada na figura é tal que corresponde apenas a metade do peso do componente, uma vez que há dois parafusos suportando a carga total da estrutura, assim  $P = P_1/2 = 54,88 N$ . Dado que a condição de carregamento para os parafusos é estática, tem-se que a tensão atuante no parafuso é dada por:

$$\sigma_b = \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} \quad (15)$$

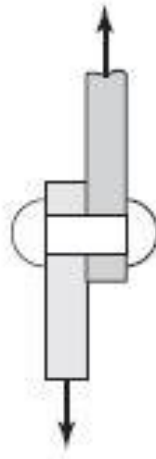
onde  $F_i$  é a pré-carga aplicada sobre o parafuso,  $A_t$  é a área da seção transversal da parte rosqueada do parafuso e  $C$  é a proporção da carga externa que é carregada pelo parafuso. Para análise considerou-se que toda a carga está sendo suportada apenas pelo parafuso ( $C = 1$ ), que a área da seção rosqueada é igual a área máxima do parafuso ( $A_t = \frac{\pi d^2}{4}$ ) e que não há pré-carga aplicada sobre o parafuso ( $F_i = 0$ ) de forma que não há redução sobre a carga aplicada sobre o parafuso garantindo uma condição mais crítica.

Considerando-se  $d$  como o diâmetro do parafuso para o caso escolhido como um parafuso M5, temos que  $d = 5 mm$ . Por fim, substituindo os valores na equação 15, temos:

$$\sigma_b = \frac{\frac{P_1}{2}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{54,88 N}{19,63 mm^2} \rightarrow \sigma_b = 2,79 MPa \quad (16)$$

que, comparada à resistência de prova  $S_p = 225 MPa$  mostra que o peso da estrutura em si não é suficiente para causar a falha do parafuso escolhido. Tornando a opção de um parafuso ASTM M5 uma escolha segura para o mecanismo.

A segunda situação (onde o parafuso está fixando as barras laterais ao suporte em “L”) possui uma análise um pouco diferente do visto que nesse caso não há mais uma tensão de esmagamento ou tração do parafuso, mas sim uma tensão de cisalhamento. A figura 34 mostra a condição de carga atuante sobre o corpo do parafuso.



**Figura 34 – Condição de carregamento para parafuso de fixação das barras laterais no suporte em “L”. [24]**

Para esse caso, considera-se que a tensão atuante no parafuso corresponde a:

$$\sigma_b = \frac{F}{A} \quad (17)$$

onde  $F$  é a carga aplicada sobre o parafuso e  $A$  corresponde à área de atuação da força que corresponde ao produto entre o diâmetro do parafuso e a largura da superfície de contato com o parafuso, ou seja,  $A = d \times t$ .

Para o cálculo da tensão considerou-se que  $t = 3,6 \text{ mm}$ ,  $F = P_1/2$  e que se trata de um parafuso M5 ( $d = 5 \text{ mm}$ ). Dessa forma, temos:

$$\tau_b = \frac{\frac{P_1}{2}}{d \times t} = \frac{54,88 \text{ N}}{18 \text{ mm}^2} \rightarrow \tau_b = 3,05 \text{ MPa} \quad (18)$$

que quando comparado à resistência ao cisalhamento do parafuso dado por  $S_c = 0,577 \cdot S_p = 129,83 \text{ MPa}$ , mostra que os esforços atuantes também não são suficientes para a falha do parafuso por cisalhamento.

Por fim, para análise do parafuso que sustenta toda a estrutura e a conecta ao suporte em “U” demonstrado na figura 28 deste relatório, utilizou-se o mesmo caso de cisalhamento citado no caso anterior ainda considerando-se a espessura da parede do suporte como  $t = 3,6 \text{ mm}$ , os parafusos como o modelo M5 ( $d = 5 \text{ mm}$ ) e  $S_c = 129,83 \text{ MPa}$  apenas alterando o valor da carga  $F = P_2/2 = 57,67 \text{ N}$  o que implica em uma tensão final  $\tau_b = 3,20 \text{ MPa}$ , não invalidando a escolhas dos parafusos ASTM M5 para a fixação de todos os componentes.

Em especial, para os parafusos que permitem a rotação dos componentes, considerou-se uma redução do comprimento rosqueado, de forma a permitir o



escorregamento das partes sobre o corpo do parafuso. A tabela 4 mostra as características dos parafusos escolhidos para cada um dos casos citados anteriormente.

**Tabela 4 – Escolhas de parafusos estruturais**

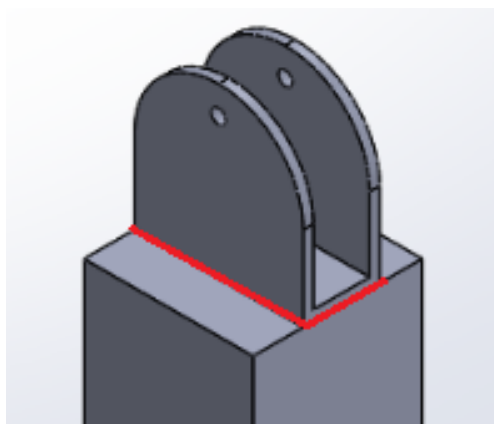
Tipo de parafuso	Diâmetro	Comprimento total	Comprimento rosqueado	Aplicação
M5x12	5 mm	12 mm	5 mm	Fixação das barras laterais e suportes em “L” na barra central
M5x36	5 mm	36 mm	5 mm	Suporte das barras laterais nos suportes em “L”
M5x42	5 mm	42 mm	5 mm	Suporte da barra central na base

### 4.3 DIMENSIONAMENTO DAS SOLDAS

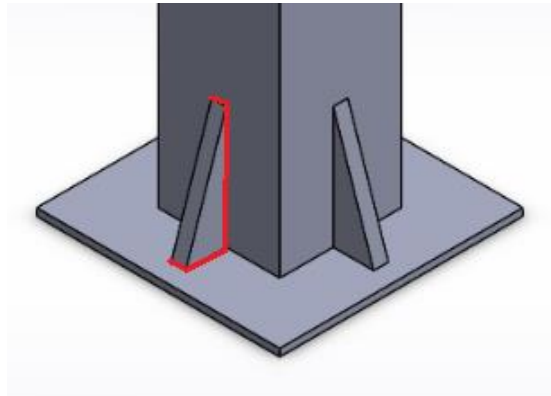
Para o dimensionamento das soldas, dado o contexto analisado anteriormente para os parafusos, considerou-se um dimensionamento para carga estática. Para calcular a tensão aplicada sobre a solda é necessário conhecer a tensão aplicada sobre a junta soldada. A equação 19 mostra a fórmula para esse cálculo.

$$\sigma = \frac{F}{hl} \quad (19)$$

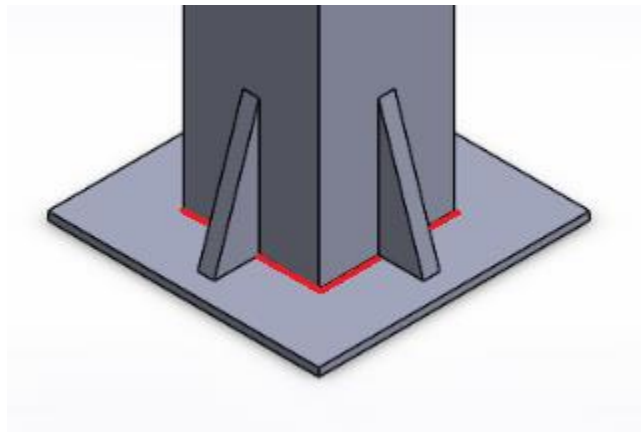
Na equação 19,  $F$  é a carga aplicada sobre a junta, que corresponde ao peso da estrutura sobre a junta para uma análise estática,  $h$  é a garganta da solda selecionada e  $l$  é o comprimento soldado da junta e todos esses parâmetros possuem variações de acordo com a parte soldada. Os pontos soldados da estrutura estão dispostos nas figuras 35 a 37.



**Figura 35 – Ponto de solda do suporte em “U”.**



**Figura 36 – Ponto de solda do apoio da base.**



**Figura 37 – Ponto de solda da base quadrada ao corpo da estrutura.**

No primeiro caso, disposto na figura 35, o peso do corpo que atua sobre a junção corresponde a peso da estrutura do quadro e das barras, somado ao peso do suporte em “U”, ou seja,  $P = 134,95 \text{ N}$ . Adicionalmente, o comprimento do cordão de solda, que percorre todo o contorno do suporte em “U”, corresponde a  $l = 192 \text{ mm}$ , estimando-se um comprimento da garganta da solda  $h = 3 \text{ mm}$  temos a partir da equação 19:

$$\sigma_1 = \frac{116,35}{3 \cdot 192} = 0,20 \text{ MPa}$$

No segundo ponto de solda, representado pela figura 36, o comprimento da solda é dado por  $l = 40 \text{ mm}$  e a carga  $P = 174,15 \text{ N}$ , assim:

$$\sigma_2 = \frac{174,15}{3 \cdot 40} = 1,45 \text{ MPa}$$

O terceiro ponto, representado pela figura 37, possui  $l = 240 \text{ mm}$  e  $P = 174,15 \text{ N}$ , dessa forma:

$$\sigma_3 = \frac{174,15}{3 \cdot 240} = 0,24 \text{ MPa}$$

Como forma de dimensionamento e seleção do tipo de solda utilizado, considerou-se um cordão de solda tipo E60, cujo limite de escoamento é dado por  $S_y = 345 \text{ MPa}$  e, considerando correções citadas em [24], para o caso o primeiro e terceiro caso temos que o limite de escoamento da solda deve ser  $\sigma_w = 0,60 \cdot S_y$  e para o segundo caso onde a solda está sobre cisalhamento,  $\sigma_w = 0,30 \cdot S_y$ . Isso corresponde a valores:

$$\sigma_w^{1,3} = 207 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w^2 = 103,5 \text{ MPa}$$

que, se analisados em relação às tensões encontradas para as juntas soldadas mostrarão que os cordões de solda para selecionados e nessas dimensões atendem aos esforços necessários para o conjunto, não sendo um ponto de preocupação para a o projeto mecânico da estrutura.

#### 4.4 ESCOLHAS DE ATUADORES LINEARES

Para definição dos atuadores lineares que foram utilizados no projeto se fez necessário definir três fatores:

- Os ângulos mínimo e máximo de posicionamento do painel solar;
- A distância de fixação da base do atuador linear; e
- O tamanho do curso do atuador linear.

O primeiro ponto exige que sejam determinados os ângulos de zênite e azimute ao longo dos dias do ano, de forma a entender as possíveis localizações do sol ao longo do ciclo de operação do painel. Para início do cálculo, considerou-se os dados de latitude e longitude Brasília:

$$\text{latitude} = -15,7801^\circ \text{ ou } 15,7801^\circ \text{ S} \quad (20)$$

$$longitude = -47,8825^\circ \text{ ou } 47,8825^\circ W \quad (21)$$

Para a definição do ângulo de zênite e azimute, considerou-se as equações 22 e 23 retiradas de [25], descrito a seguir:

$$\cos \theta_z = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (22)$$

$$\text{sen } A_z = \frac{-\cos \delta \times \text{sen } \omega}{\cos(90 - \theta_z)} \quad (23)$$

onde  $\phi$  corresponde à latitude local, ou seja,  $\phi = -15,7801^\circ$ ,  $\delta$  é o ângulo de declinação definido anteriormente pela equação 10 e  $\omega$  é o ângulo horário definido pela utilização das equações 4, 5, 8 e 9 citadas anteriormente na primeira sessão desse relatório.

Para a determinação do ângulo de azimute, zênite e a altitude solar, que corresponde ao seu complemento ( $\alpha = 90 - \theta_z$ ), uma rotina em linguagem Python foi criada, inserindo-se os parâmetros geográficos de latitude e longitude, dias do ano e horas do dia para cálculo. A rotina também foi implementada para calcular os ângulos máximos e mínimos ao longo do ano e a variação dos ângulos de posicionamento ao longo do dia atual, de forma a servir de parâmetro de entrada para a definição do posicionamento dos atuadores lineares e futuramente para o Algoritmo de controle do posicionamento solar.

As figuras 38 a 41 mostram os gráficos encontrados para a variação dos ângulos de zênite, azimute e altitude ao longo do dia, bem como o posicionamento solar ao longo do dia considerando a data de 11 de maio de 2019 e o código dessa rotina está descrito no apêndice 8.1 desse relatório.

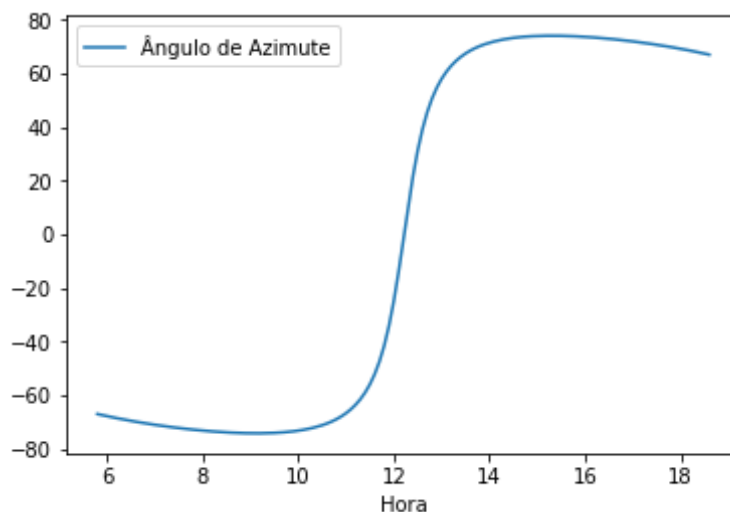


Figura 38 – Variação do ângulo de azimute ao longo do dia 11 de maio de 2019.

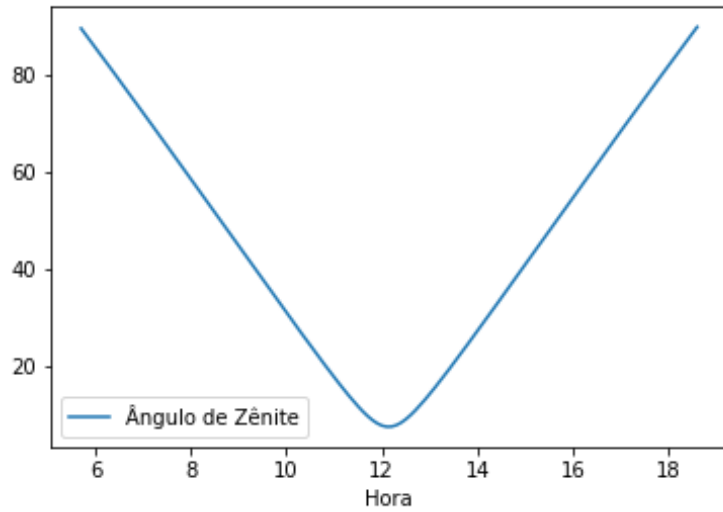


Figura 39 – Variação do ângulo de zênite ao longo do dia 11 de maio de 2019.

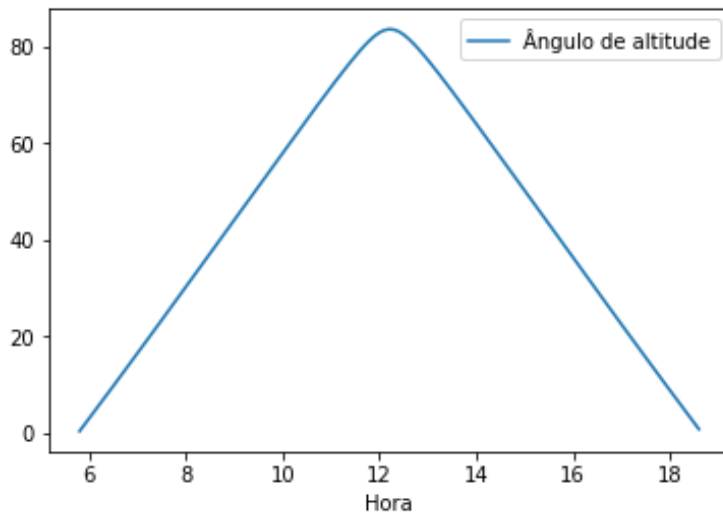


Figura 40 – Variação do módulo do ângulo de altitude ao longo do dia 11 de maio de 2019.

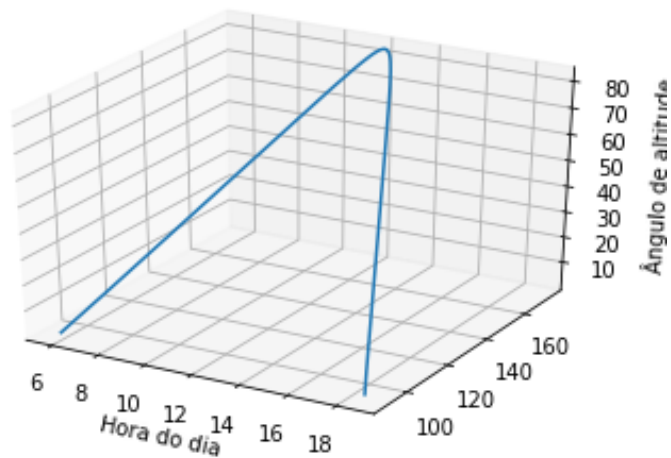


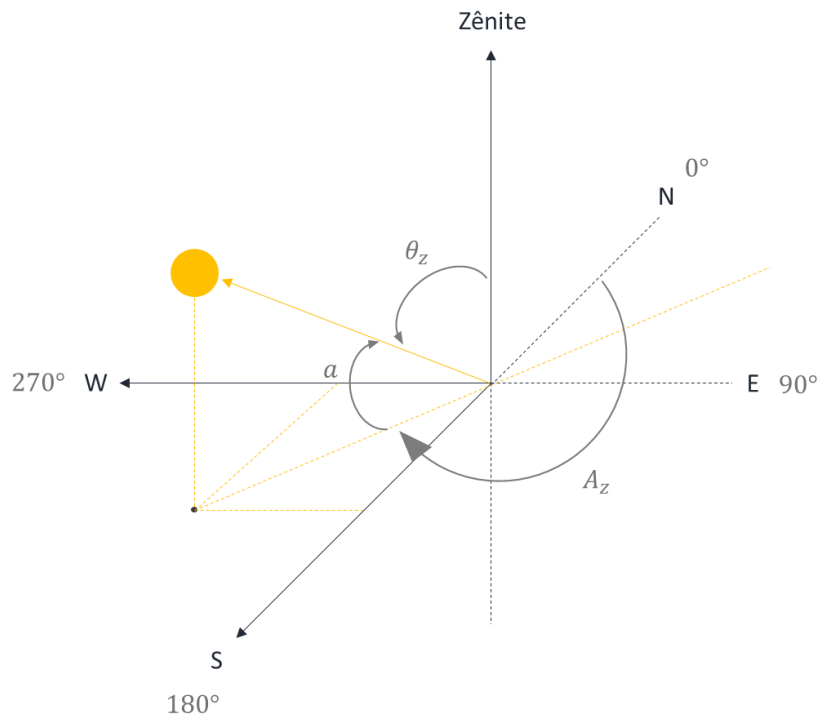
Figura 41 – Exemplo de linha de posicionamento solar para o dia 11 de maio de 2019.

Adicionalmente, da rotina foi retirada a tabela 5 que traz os valores máximos, mínimos e médios dos ângulos de posicionamento do sol.

**Tabela 5 – Valores máximos, mínimos e médios para os ângulos de posicionamento solar**

	Máximo	Mínimo	Média
Ângulo de declinação ( $\delta$ )	23,45°	-23,45°	0,80°
Ângulo de Caminho Solar ( $\phi + \delta$ )	7,67°	-39,23°	-16,68°
Ângulo horário ( $\omega$ )	96,96°	-96,94°	0,005°
Ângulo de zênite ( $\theta_z$ )	89,69°	0,33°	50,24°
Ângulo de altitude ( $a$ )	89,67°	0,031°	39,75°
Ângulo Máximo de altitude ( $a_{máx}$ )	89,67°	50,77°	72,27°
Ângulo de azimute ( $A_z$ )	359,90°	0,053°	180,43°

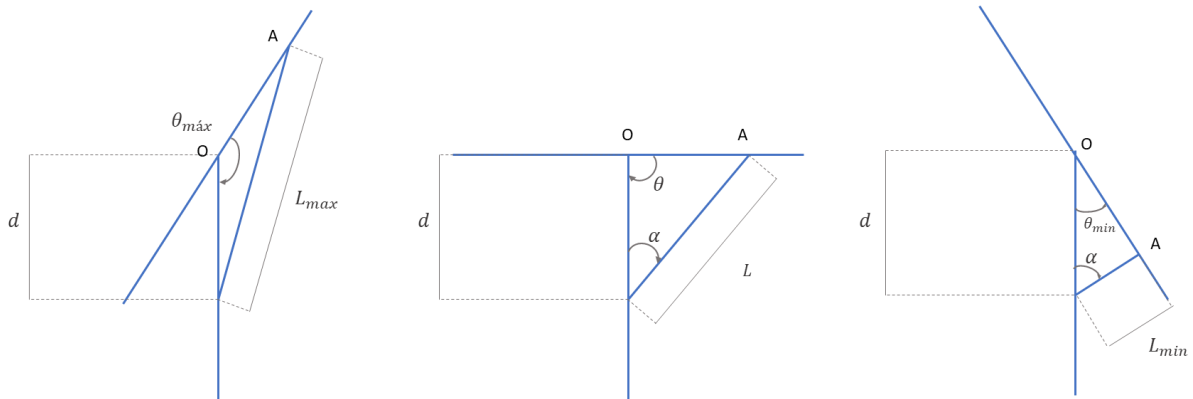
Os valores encontrados serviram também para a validação do grau de precisão do algoritmo desenvolvido quando se confrontam os principais números presentes na bibliografia. Para tal, considerou-se a orientação representada na figura 42.



**Figura 42 – Representação dos eixos de orientação para a posição solar.**

Uma vez com os ângulos máximos e mínimos de posicionamento solar partiu-se para a definição do ponto de posicionamento do atuador linear. Foi criada uma rotina de cálculo iterativo para a definição dos comprimentos máximos e mínimos do atuador linear durante a

operação. A figura 43 mostra um esquema explicativo de como os comprimentos variam ao longo da operação do painel solar.



**Figura 43 – Esquema explicativo de variação do comprimento do atuador linear em função da operação do painel solar.**

A partir da figura 43 utilizando-se a lei dos cossenos, chega-se à relação representada pela equação 24.

$$L^2 = (\overline{OA})^2 + d^2 - 2d(\overline{OA})\text{sen}(\theta) \quad (24)$$

A rotina de cálculo envolveu a utilização dos principais cursos máximos de atuação de atuadores lineares de mercado, variando-se entre as opções de  $L_{curso} = 100\text{ mm}, 200\text{ mm}, 300\text{ mm}$  e  $400\text{ mm}$ , a variação do ângulo de operação de  $\theta = 0,3^\circ$  a  $179,7^\circ$  (conforme observado no ângulo de zênite e considerando-se um arredondamento do valor mínimo) e considerando  $L_{min}$  como sendo o comprimento dos atuadores fechados ( $L = L_{curso}$ ) e  $L_{máx} = 2L_{curso}$ . Além do curso das opções de curso do atuador e do ângulo de operação, variou-se a distância  $\overline{OA}$  do eixo central até o ponto de inserção superior e a distância  $d$  de forma a descobrir a melhor opção de fixação do atuador linear na estrutura que atenderia a especificação de operação.

A intenção da rotina é convergir os valores dos comprimentos fechados dos atuadores lineares escolhidos alterando a distância  $d$  do ponto de posicionamento dos atuadores na base entre  $100\text{ mm}$  e  $400\text{ mm}$  com incrementos de  $5\text{ mm}$  e a distância  $\overline{OA}$  entre  $10\text{ mm}$  e  $282\text{ mm}$  (extremidade externa) com incrementos de  $5\text{ mm}$  avaliando o comprimento dos atuadores fechados possíveis considerando as restrições

$$L_{m\acute{a}x} < 2 \times L_{curso} \text{ e } L_{min} \geq L_{curso}$$

que representam as condições geométricas que garantem que o tamanho do atuador fechado não será menor que o curso do atuador e que o tamanho máximo necessário não ultrapassa o tamanho máximo possível para o atuador totalmente estendido. O código da rotina está disposto no apêndice 8.2 e retornou 613 possibilidades entre os arranjos disponíveis. Como critério de decisão, procurou-se encontrar os arranjos que proporcionavam o maior fator multiplicador de torque gerado sobre a estrutura  $K$  de forma que

$$\tau = \overline{OA} \times F \cos \alpha \rightarrow K = \overline{OA} \times \cos \alpha$$

onde  $\tau$  é o torque gerado pelo atuador linear e  $F$  é a força aplicada pelo atuador sobre o seu ponto de inserção. A tabela 6 mostra os quatro principais arranjos escolhidos segundo esse critério de avaliação.

**Tabela 6 – Resultados para cálculos do tipo de atuador linear da Rotina 8.2**

$L_{min}(mm)$	$L_{m\acute{a}x}(mm)$	$L_{curso}(mm)$	$d(mm)$	$\overline{OA}(mm)$	<b>K</b>
<b>300,00</b>	489,99	300	395	95	90,6
<b>200,00</b>	399,99	200	300	100	89,45
<b>210,00</b>	399,99	200	305	95	86,55
<b>305,02</b>	484,99	200	395	90	86,32

Como opção de atuador, considerou-se a escolha do quarto arranjo representado pelas medidas

Comprimento fechado: 305 *mm*

Comprimento máximo exigido: 484 *mm*

Comprimento do curso do atuador: 200 *mm*

Posicionamento de instalação na base: 395 *mm*

Posicionamento de instalação no suporte do painel: 90 *mm*

Considerando as opções disponíveis no mercado um exemplo de atuador linear que poderia ser utilizado para a aplicação está exposto na figura 44, encontrado no site da Micro Robotics disponível em [26].



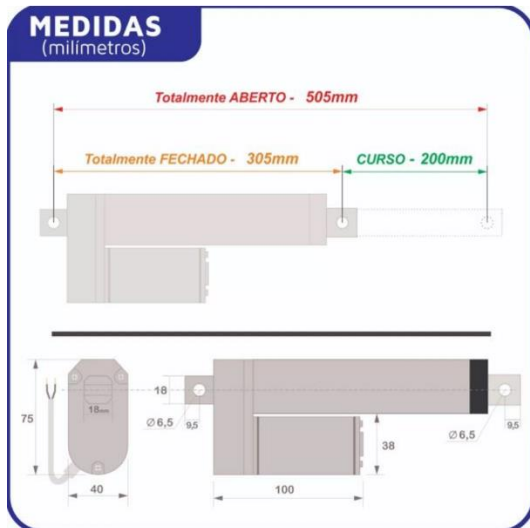


Figura 44 – Atuador Linear MECTROL LAS3.[26]

#### 4.5 SISTEMA DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO E ACOMPANHAMENTO SOLAR

A sessão 2.3 desse relatório discutiu um pouco sobre os principais estudos que justificam a busca por sistemas de acompanhamento solar e controle de posicionamento de painéis solares, bem como a efetividade desses sistemas no aumento de geração de energia a partir das células fotovoltaicas. Em especial foi falado sobre o ganho relacionado aos *Solar Trackers* que trabalham com dois eixos por demonstrarem maior eficiência nessa conversão e, portanto, foram o tipo de mecanismo escolhido para esse projeto.

No projeto de um rastreador solar de dois eixos, o sistema busca posicionar o painel solar sempre normal à superfície do painel visando maximizar a eficiência de coleta dos raios solares de incidência direta (DNI). Esses sistemas podem ser divididos entre dois tipos principais quando se trata de acompanhar o movimento solar:

- O sistema de rastreamento solar por azimute ( $A_z$ ) e altitude ( $\alpha$ ), onde o concentrador deve acompanhar a variação desses ângulos ao longo do dia; e
- O sistema de rastreamento polar (ou equatorial), onde um eixo de rotação é alinhado paralelo ao polo de rotação da terra e os ângulos de orientação são o ângulo horário ( $\omega$ ) e a declinação ( $\delta$ ).

O conceito utilizado para o mecanismo projetado se baseou na primeira opção considerando-se dois atuadores lineares que garantem o movimento do painel em dois eixos, transformando o movimento linear do atuador em movimento angular do painel solar.

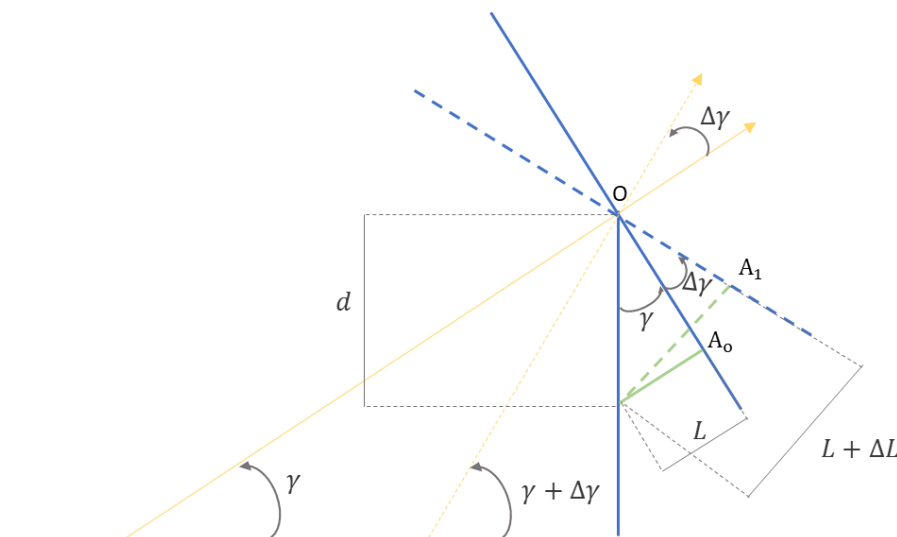
Os sistemas de controle por sua vez utilizarão parâmetros de geolocalização fixos (considerando o posicionamento de Brasília) e as variações dos ângulos de posicionamento solar de altitude e azimute de forma prever a operação dos motores elétricos presentes nos atuadores lineares e gerarem o movimento linear necessário para alcançar essas posições.

De forma geral, sistemas de controle podem ser divididos em três tipos: de malha aberta, de malha fechada ou híbridos.

#### 4.5.1 SISTEMAS DE MALHA ABERTA

Nos sistemas de rastreo em malha aberta, utilizam-se sinais cronológicos de entrada e um ciclo de atuação. São enviados parâmetros de posicionamento solar do dia específico no início do dia de forma a mapear o comportamento do movimento desde o nascer (*BOD ou Beginnig of the day*) até o se por (*EOD ou End of day*).

Esses marcos temporais estão associados diretamente aos ângulos de altitude e azimute. Ainda para esse caso, assume-se o movimento em velocidade constante para o sol, podendo ser determinada a atuação dos atuadores lineares ao longo dos dias considerando um intervalo de tempo  $\Delta T = 1 \text{ hora}$  para a nova atuação. Utilizando-se então relações trigonométricas é possível calcular a velocidade linear do atuador para ambos os ângulos. A figura 45 mostra a relação dos ângulos durante o movimento do painel.



**Figura 45 – Esquema de movimentação dos ângulos do painel ao longo do dia.**

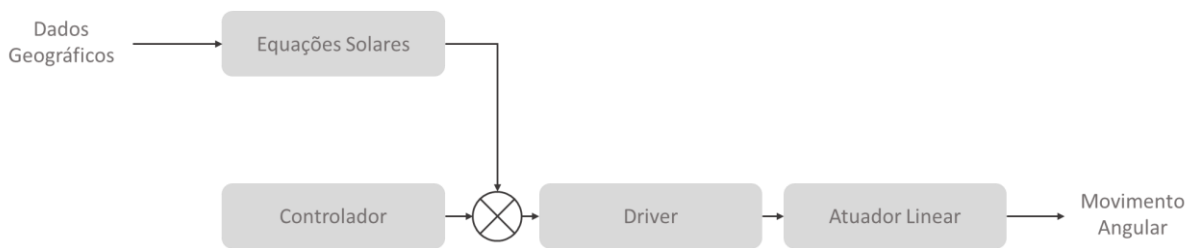
O ângulo  $\gamma$  representa um ângulo genérico que pode ser substituído tanto pelo ângulo de azimute como de altitude, uma vez que o mecanismo foi projetado para trabalhar de forma análoga nos dois eixos de atuação. Adicionalmente, a distância  $\overline{OA_0} = \overline{OA_1}$  e corresponde à

distância de fixação do atuador no painel e, por fim a distância de inserção na base  $d$  também é constante. Dessa forma, é possível determinar as equações 25 e 26.

$$L^2 = \overline{OA_0}^2 + d^2 - 2d \cdot \overline{OA_0} \cdot \cos(\gamma) \quad (25)$$

$$(L + \Delta L)^2 = \overline{OA_1}^2 + d^2 - 2d \cdot \overline{OA_1} \cdot \cos(\gamma + \Delta\gamma) \quad (26)$$

Nas equações, são conhecidos os valores de  $L$  como o comprimento mínimo do atuador determinado na sessão anterior desse relatório,  $\overline{OA_0}$  e  $d$  as distâncias de instalação dos atuadores lineares e  $\gamma$  e  $\Delta\gamma$  são encontrados por meio da rotina de posicionamento solar utilizada inicialmente, sendo os ângulos inicial e o incremento por hora respectivamente. Tendo esses dados é possível identificar o movimento linear necessário  $\Delta L$  do atuador a cada intervalo de tempo. A figura 46 mostra o diagrama de blocos desse tipo de sistema de controle.



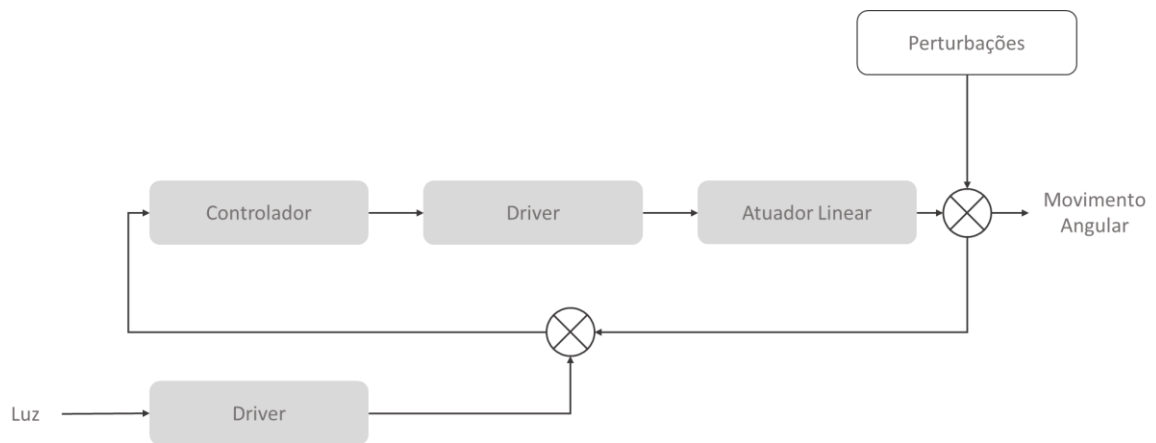
**Figura 46 – Diagrama de blocos para um sistema de controle de posicionamento de malha aberta.**

#### 4.5.2 SISTEMAS DE MALHA FECHADA

Os sistemas de controle de malha fechada utilizam-se de sensores diversos responsáveis pela aferição dinâmica do posicionamento dos painéis. São utilizados sensores mais usualmente, sensores fotossensíveis e dinamômetros de forma a haver a retroalimentação do sinal de posicionamento ao longo da operação. A utilização desses sensores pode implicar em uma melhoria relevante na precisão de posicionamento com a devida calibração de forma a evitar pequenos defeitos mecânicos, de instalação e desalinhamentos.

Dentre as desvantagens de se utilizar esses sensores fotossensíveis encontra-se a dificuldade de se determinar a posição adequada para o painel em dias nublados, uma vez que o excesso de nuvens pode gerar uma excessiva quantidade de radiação difusa, no entanto, em sistemas híbridos esse problema é corrigido quando se tem, assim como no de malha aberta, um algoritmo de posicionamento que é validado constantemente a partir das

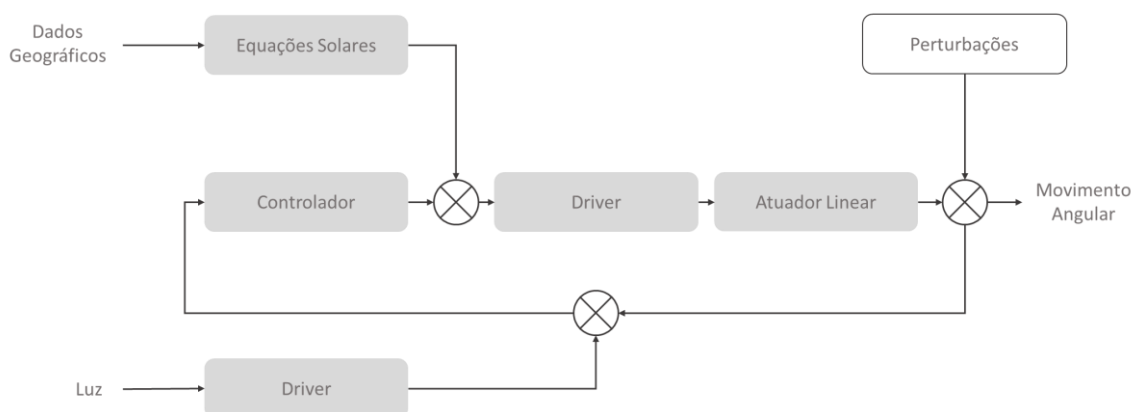
leituras do sensor. A figura 47 mostra o diagrama de blocos para um sistema de malha fechada com sensores fotossensíveis.



**Figura 47 – Diagrama de blocos para um sistema de posicionamento de malha fechada.**

### 4.5.3 SISTEMAS DE MALHA HÍBRIDA

Conforme citado anteriormente, os sistemas de posicionamento de malha híbrida trabalham com a alimentação simultânea tanto das equações solares como dos sensores. Essa associação permite que as dificuldades encontradas pelos sensores em dias nublados sejam evitadas, ao mesmo tempo que os algoritmos de posicionamento são validados com a retroalimentação dos sensores. Além de sensores fotossensíveis, é comum se utilizar outros equipamentos como *encoders* digitais e potenciômetros (responsáveis pela medição de inclinação do painel). A figura 48 mostra o diagrama de blocos de uma malha híbrida.



**Figura 48 - Diagrama de blocos para um sistema de posicionamento de malha híbrida.**

#### 4.5.4 ESCOLHA DO TIPO DE MALHA DE CONTROLE

Para escolha do tipo de malha de controle, foram analisados pontos relacionados à operação dos atuadores lineares, assim como a precisão de posicionamento exigida pela operação do painel. Quando tratamos de motores de corrente contínua (ao qual o atuador linear escolhido se assemelha) sua operação ocorre como um botão de liga e desliga, ou seja, o motor do atuador funcionará enquanto houver corrente alimentando o sistema e irá parar assim que esse fluxo de corrente for cortado.

O tipo de operação desses motores elétricos está sujeito a incertezas de medição relacionadas a própria inércia do motor quando a corrente é cortada, isso faz com que medidas sejam necessárias para garantir que o ângulo percorrido pelo painel a partir do movimento linear do atuador tenha que ser corrigido. Ao mesmo tempo existe também a possibilidade de o tempo de alimentação desse motor não ser o suficiente, fazendo com que o motor seja ligado novamente para essa correção ou que fatores externos como as correntes de vento alterem a posição inicial do painel, o que atrapalharia o desenvolvimento do ângulo correto ao longo do dia. Em todos os casos conclui-se que, dado que a precisão de movimento do painel é uma premissa de operação, um sistema de controle de malha aberta não seria suficiente para garantir essa premissa.

Dada essa conclusão, optou-se por um sistema que utiliza as equações de posicionamento para o acionamento dos atuadores, porém com potenciômetros associados de forma a coletar os posicionamentos angulares do painel e efetuar correções necessárias. Tal arranjo caracteriza uma malha de controle híbrida, representado pela figura 48.

#### 4.5.5 ALGORITMO DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO

A construção do algoritmo de controle de posicionamento do painel seguiu os passos a seguir:

1. Introdução das coordenadas geográficas da localização do painel no algoritmo de posicionamento disposto no apêndice 8.1;
2. Utiliza-se os Dataframes *Graph\_frame* e *MaxMin* para coleta dos ângulos de posicionamento solar ao longo do dia de coleta. (O algoritmo já retorna os valores específicos para o dia atual);
3. Sabendo os ângulos máximos e mínimos para o azimute e a altitude e o tempo de insolação, calcula-se o incremento angular  $\Delta\gamma = \frac{\gamma_{m\acute{a}x} - \gamma_{m\acute{i}n}}{\Delta T}$ .

4. Sabendo o incremento angular por unidade de tempo, é calculado o incremento linear do atuador.
5. Introduce-se as características mecânicas do atuador de movimento linear por unidade de tempo e calcula-se o tempo de corrente necessário para alcançar o ângulo de posição.

Fatores adicionais de controle relacionados aos potenciômetros foram adicionados de forma a efetuar correções nesse posicionamento até se alcançar a posição desejada. A rotina de controle avalia após o movimento:

1. O ângulo medido pelo potenciômetro corresponder ao ângulo de posição dentro de uma margem de erro menor que  $1^\circ$ ?
2. Se sim, não há necessidade de correção. Se não, o valor do ângulo é maior ou menor do que o ângulo de posição?
3. Em ambos os casos, calcula-se o tempo necessário de alimentação de corrente para que o motor avance ou retorne até o ponto desejado.

Essa rotina se repete até que o erro mínimo desejado seja alcançado. O código desses algoritmos se encontra no apêndice 8.4 desse relatório.

#### **4.5.6 O SISTEMA DE CONTROLE**

Para controlar o sistema de posicionamento, optou-se por utilizar um Arduino Uno devido a seu baixo custo, versatilidade e facilidade de implementação. Juntamente a ele, foram utilizados componentes específicos para que seja possível o movimento dos atuadores e para que haja devida proteção do circuito elétrico. São eles:

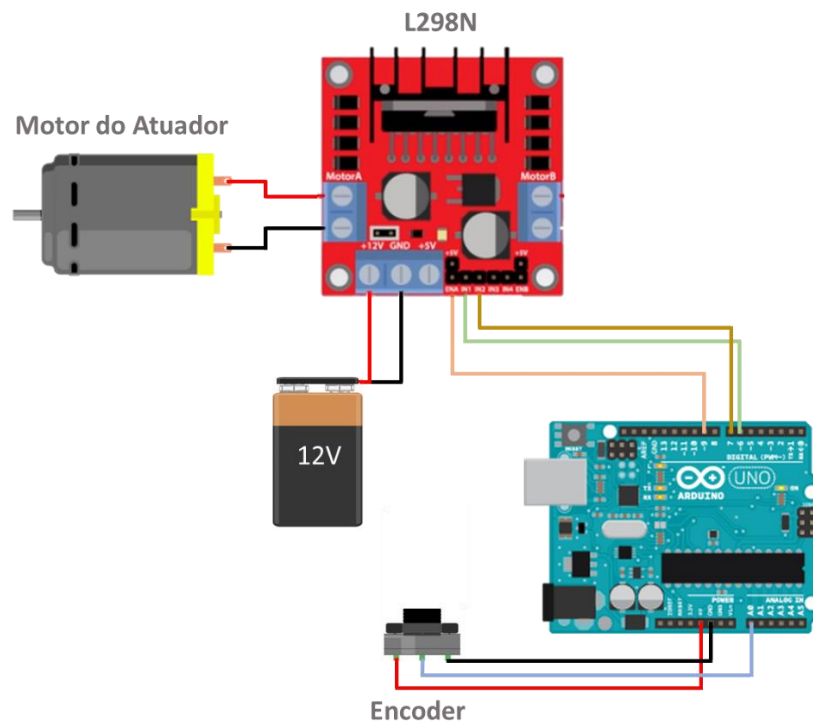
- L298N (Transistor): devido à tensão de alimentação do motor do atuador linear (12V) exceder a tensão do Arduino (5V), é necessário se adicionar um transistor ao circuito de forma a servir como uma chave para a alimentação do motor por uma bateria de 12 volts. Um ponto relevante sobre a operação do atuador linear é que ele necessita de uma atuação tanto de extensão com de contração do fuso, para tal o L298N utiliza um conceito de ponte H para a inversão de corrente e poder proporcionar o movimento em ambas as direções.
- Bateria auxiliar de 12V: uma vez que a alimentação do sistema exige uma tensão maior do que a do Arduino, é necessário a inclusão de uma bateria de maior tensão.

- Encoder EC05E1220401: esse componente estará preso ao eixo de rotação das dos braços laterais vistos nas figuras 25 e 28. Sua função será medir hora a hora o deslocamento angular do painel, de forma a evitar que um ângulo maior ou menor do que o esperado seja alcançado devido a erros ou perturbações mecânicas além da inércia do atuador linear. A figura 49 mostra esse componente selecionado. As especificações do componente se encontram no anexo 9.1.



**Figura 49 – Encoder EC05E1220401 [29]**

Por fim, para representar a montagem completa do circuito de controle, construiu-se o esquema ilustrativo presente na figura 50.



**Figura 50 – Esquema de ligação do circuito de controle.**

A figura mostra também o esquema utilizados nos algoritmos de programação do Arduino, correspondendo ao esquema de montagem do circuito de controle real.

## 5 TABELA DE PRECIFICAÇÃO DO PROJETO

Uma vez determinados os componentes e serviços necessários para a construção do projeto do painel solar e do sistema de controle, construiu-se a tabela 7 que resume os custos associados a cada parte. Cabe salientar de antemão de os custos com a produção da estrutura foram estimados de forma reduzida devido ao aproveitamento de peças já existentes na antiga estrutura ou reaproveitadas com a intenção de redução do custo.

Tabela 7 – Tabela de custos estimados para componentes de projeto

CUSTO ESTIMADO DO PROJETO		R\$	1221,80
Item	Qt	Valor da unidade	
<b>Estrutura do Painel</b>		<b>R\$</b>	<b>107,95</b>
Material para a estrutura (m <sup>3</sup> )	0,8	R\$	130,00
Serviços de conformação e usinagem	0	R\$	-
Parafusos M5x12	2	R\$	0,40
Parafusos M5x36	2	R\$	0,60
Parafusos M5x42	1	R\$	0,70
Porcas M5	5	R\$	0,25
<b>Sistema de controle</b>		<b>R\$</b>	<b>1113,85</b>
Atuadores lineares LAS3	2	R\$	480,00
L298N	1	R\$	15,00
Arduino Uno	1	R\$	40,00
Encoder EC05E1220401	1	R\$	37,85
Bateria Auxiliar 12V	1	R\$	56,00
Fios e cabos	1	R\$	5,00

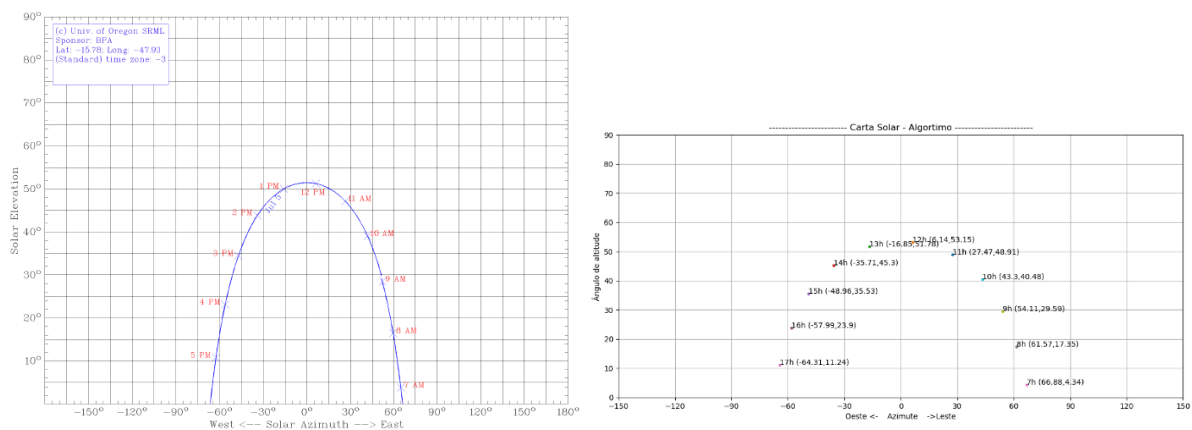


## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido nesse projeto permitiu a construção de um sistema de controle de malha híbrida utilizando algoritmos de posicionamento solar e leitura de sensores de posicionamento angular para garantir o posicionamento adequado de um painel solar.

O algoritmo de posicionamento solar desenvolvido mostrou uma adequação precisa às cartas solares fornecidas por laboratórios de pesquisa do laboratório da Universidade de Oregon, mecanismo utilizado para validar as entradas calculadas do sistema de controle. A figura 51 mostra os resultados da Universidade de Oregon e do algoritmo criado lado a lado para o dia 05/07/2019.



**Figura 51 – Carta solar para o dia 05/07/2019 e resultados do algoritmo para o mesmo dia.**

A figura 51 mostra ainda que os valores encontrados hora a hora para o dia de referência estão próximos ou acurados o suficiente para que o algoritmo possa ser validado considerando um laboratório de referência para estudos de geração de energia solar.

Embora a nova estrutura não tenha sido produzida, foi possível a partir de um algoritmo simplificado validar a composição dos componentes eletrônicos do sistema de controle que foram utilizados junto à estrutura antiga do painel solar. A união da entrada analógica do algoritmo de posicionamento com a validação do arranjo dos componentes do sistema de controle permite validar a solução idealizada para o sistema de controle como um todo.

Ainda serão necessários estudos futuros para que o algoritmo de controle desenvolvido seja aplicado ao projeto que está em curso no LEA/UnB, no entanto, o atual

trabalho deixa um legado relevante para guiar esses estudos, podendo servir como pontos de partidas relevantes para construção de um sistema de acompanhamento solar automático bem como de outras áreas de estudo.

## 6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Partindo de uma visão macro até uma visão mais micro das possibilidades de estudos relacionados aos legados deixados por esse projeto, um dos principais pontos indicados seria a validação da primeira premissa citada anteriormente que envolve a **validação do impacto do sistema de controle sobre a produção energética das células fotovoltaicas**. Esse trabalho mais macro poderia dar uma visão geral se o protótipo idealizado atende realmente seu objetivo de conseguir captar uma maior quantidade de raios DNI.

Quanto a estudos mais específicos, encontram-se também oportunidades como:

- **Validação da estrutura mecânica idealizada:** projeto que envolveria entender se a estrutura proposta está otimizada quanto ao seu propósito e como ela reagiria a agentes externos como as correntes de vento.
- **Validação e otimização do algoritmo de controle:** projeto que envolve os testes reais do algoritmo de controle dos atuadores lineares, sua otimização e alteração para garantir maior precisão de posicionamento, o que já foi citado como uma forma de aumento da eficiência dos painéis solares.

Outros possíveis projetos podem decorrer ainda de estudos relacionados à eficiência não somente do acompanhador solar como das células fotovoltaicas e que podem utilizar o conhecimento construído nesse projeto como um ponto importante de partida para o desenvolvimento de novas tecnologias, não somente na área da Engenharia Mecânica como na Elétrica e Mecatrônica além de demais cursos voltados para tecnologias como a Computação, o que justificou ainda mais o esforço realizado nessa produção científica apesar de não completamente concretizado.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KALOGIROU, S. Solar Engineering – Processes and systems 1st ed. Elsevier, Burlington, 2009.
- [2] JAGOO, Z. Tracking Solar Concentrators - A Low Budget Solution. Réduit, Mauritius: Spronger, 2013.
- [3] FRONTIN, S. O.; BRASIL, A.C.P.; CARNEIRO, M.T.D.; GODOY, N.R.D. **Usina Fotovoltaica Jaíba Solar: Planejamento e Engenharia**. Teixeira Gráfica e Editora LTDA, Brasília, 2017.
- [4] STINE, W.B., GEYER, M. **Power from the Sun**. 2001. Disponível em: [www.powerfromthesun.net](http://www.powerfromthesun.net). Acesso em: 05/03/2019
- [5] WOOLF, H. M. **On the Computation of Solar Evaluation Angles and the Determination of Sunrise and Sunset Times**. National Aeronautics and Space Administration. NASA Report TM-X-164. Set. 1968.
- [6] PERLIN, John. **The History of Solar Energy – Photovoltaics**. Michigan: Edwards Brothers, 1999. Disponível em: <[http://www.californiasolarcenter.org/history\\_pv.html](http://www.californiasolarcenter.org/history_pv.html)>. Acesso em: 10/03/2019
- [7] EPIA – European Photovoltaic Industry Association. **Solar Generation V – 2008**. Bruxelas, Bélgica, 2008. Disponível em <<http://www.epia.org>>. Acesso em: 12/03/2019
- [8] MAH, Olivia. **Fundamentals of Photovoltaic Materials**. National Solar Power Research Institute, Incorporate. San Francisco, California, dez. 1998.
- [9] MATASCI, Sara. **How much does the average solar panel installation cost in the US**. Energy Sage. Disponível em: <<https://news.energysage.com/how-much-does-the-average-solar-panel-installation-cost-in-the-u-s>>. Acesso em 24/03/2019.
- [10] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 1999. 204 p.

- [11] CHUN-SHENG, W.; YI-BO, W.; SI-YANG, L.; YAN-CHANG, P.; HONG-HUA, X. **Study on Automatic Sun-tracking Technology in PV Generation**. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Nanjing, China.
- [12] MARINESCU, D.; MARINESCU, C. **Control Optimizing Algorithm for Soft Sun-Trackers**. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006. Volume 1. Maio 2006.
- [13] ITO, M.; KATO, K.; KOMOTO, K.; KICHIMI, T.; SUGIHARA, H.; KUROKAWA, K. **An Analysis of Variation of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in the World Deserts**. Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Osaka, Japão. Volume 3. Maio 2003.
- [14] ITO, M.; KATO, K.; KOMOTO, K.; KICHIMI, T.; SUGIHARA, H.; KUROKAWA, K. **Comparative Study of Fixed and Tracking System of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in the World Deserts**. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, França. Junho 2004.
- [15] VOROBIEV, P. Y.; GONZALES-HERNANDEZ, J.; VOROBIEV, Y. V. **Optimization of the Solar Energy Collection in Tracking and Non-Tracking Photovoltaic Solar System**. 1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Junho 2004.
- [16] CHOJNACKI, J.; TENETA, J. **Control Algorithms for a Remote Sun-Tracking Photovoltaic System**. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, França. Junho 2004.
- [17] LENZ, A. L. **Conjugado, potência e velocidade em máquinas elétricas**. Disponível em: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com/2014/07/conjugado-potencia-e-velocidade-em.html>>. Acesso em: 26/03/2019.
- [18] SAVASGARD, E. **Arduino 101 for beginners guide**. Createspace Independent Publishing Platform, California, 2014.
- [19] **What are the different types of Arduino**. Disponível em: <<https://www.elprocus.com/different-types-of-arduino-boards/>>. Acesso em 01/04/2019.

[20] Martins, G.C.P. **Modelagem e Simulação de um atuador elétrico linear**. PUC-RJ, Rio de Janeiro 2016. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29781/29781.PDF>>. Acesso em 15/04/2019.

[21] **Linear Actuators LA36**. Disponível em: <<https://www.linak.com/products/linear-actuators/la36/>>. Acesso em 15/04/2019.

[22] **Linear Actuators SÉRIE FT**. Disponível em: <<https://www.automotion.com.br/produtos/atuadores-lineares/ft-serie>>. Acesso em 15/04/2019.

[23] **Linear Actuators JP 4 Series**. Disponível em: <<https://www.timotion.com/en/product/detail/linear-actuators/jp4-series?upcls=1481269298&guid=1488425529>>. Acesso em 15/04/2019.

[24] **Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition**. Budynas-Nisbett, McGraw-Hill Primis.

[25] Frontin, S.O.; Brasil Jr. A.C.P.; Carneiro, M.T.D.; Godoy, N.R.D. **Usina Fotovoltaica Jaíba Solar: Planejamento e Engenharia**. Primeira Edição. Teixeira Gráfica e Editora LTDA, Brasília, 2017.

[26] **Micro Robotics**. Disponível em: <<https://www.robotics.org.za>>. Acesso em 15/04/2019

[27] **Smart Prototyping**. Disponível em: <<https://www.smart-prototyping.com/L298N-Dual-H-bridge-Motor-Driver-Board>>. Acesso em 25/05/2019.

[28] **Athos Eletronics**. Disponível em: <<https://athoselectronics.com/>>. Acesso em 25/05/2019.

[29] **Alps Alpine Eletronics**. Disponível em: <<https://www.alps.com/prod/info/E/HTML/Encoder/Incremental/EC05E/EC05E1220401.html>> Acesso em 01/06/2019.

[30] **Resenha Energética Brasileira**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Documents/Resenha%20Energ%C3%A9tica%202018%20-MME.pdf>>. Acesso em 20/06/2019.

[31] S. ABDALLAH, O.O. BRADAN. **Sun tracking system for productivity enhancement of solar still**. Applied Sciences University, Amman, Jordan, 2007

## 8 APÊNDICES

### 8.1 ROTINA DE CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE POSICIONAMENTO SOLAR

```
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import math as mt
import pandas as pd
import numpy as np
from datetime import datetime as dt
from tzlocal import get_localzone

lat = -15.7797200
long = -47.9297200
LSTM = -45

DataFrame_SolarPosition = []
Graph_frame = []
N = np.arange(1,366,1)
LT = np.arange(1,25,0.5)
x=1

for i in range(len(N)):
    for j in range(len(LT)):

        B = mt.radians((N[i]-81)*360/365)
        #Equation of Time
        EOT = 9.87*mt.sin(2*B)-7.53*mt.cos(B)-1.5*mt.sin(B)
        #Correção do Tempo
        TC = 4*(long-LSTM)+EOT
        #Hora Solar Local
        LST = LT[j] + TC/60
        #Ângulo horário
        HRA = mt.radians(15*(LST-12))

        #Ângulo de Declinação
        ang_delta = mt.radians(23.45*mt.sin(360/365*(N[i]-81)))
        #Ângulo de Latitude
        ang_phi = mt.radians(lat)
        #Ângulo de Elevação
        ang_elevation = mt.asin(
            mt.sin(ang_delta)*mt.sin(ang_phi)
            + mt.cos(ang_delta)*mt.cos(ang_phi)*mt.cos(HRA)
        )

    DataFrame_SolarPosition = pd.DataFrame(
        np.transpose(np.column_stack(DataFrame_SolarPosition)),
        columns=['Dia do Ano',
                'Hora',
                'Phi',
                'Delta',
                'Ângulo de Caminho Solar',
                'Ângulo Horário',
                'Ângulo de Zênite',
                'Ângulo de altitude',
                'Ângulo Máximo de Altitude',
                'Ângulo de Azimute'])

    Graph_frame = pd.DataFrame(
        np.transpose(np.column_stack(Graph_frame)),
        columns=['Dia do Ano',
                'Hora',
                'Phi',
                'Delta',
                'Ângulo de Caminho Solar',
                'Ângulo Horário',
                'Ângulo de Zênite',
                'Ângulo de altitude',
                'Ângulo Máximo de Altitude',
                'Ângulo de Azimute'])

    MaxMin = pd.DataFrame({'Max': DataFrame_SolarPosition.max(),
                          'Min': DataFrame_SolarPosition.min(),
                          'Avg': DataFrame_SolarPosition.mean()})

    fig = plt.figure()
    ax = fig.gca(projection='3d')
    ax.plot(Graph_frame['Hora'],Graph_frame['Ângulo de Azimute'],Graph_frame['Ângulo de altitude'])
    ax.set_xlabel('Hora do dia')
    ax.set_ylabel('Azimute')
    ax.set_zlabel('Altitude')

    Graph_frame.plot('Hora','Ângulo de altitude')
    Graph_frame.plot('Hora','Ângulo de Zênite')
    Graph_frame.plot('Hora','Ângulo de Azimute')
```

## 8.2 ROTINA DE CÁLCULO DOS ATUADORES LINEARES

```
import math as mt
import pandas as pd
import numpy as np

# LINEAR ACTUATOR INITIATION
Frame_Atuaador_Linear = []
L_max = 0
L_min = 282.5
# LOWER ANGLE
teta = 8

# GEOMETRIC TOP POSITION
G_1 = np.arange(10,282,5)

# FIXED DISTANCE ON THE CENTER SUPPORT
d = np.arange(100,400,5)

# LINEAR STROKE LENGTH
x_max = [100,200,300]

# ITERATIONS
for r in range(len(G_1)):
    for j in range(len(x_max)):
        for i in range(len(d)):
            L_1 = mt.sqrt(mt.pow(G_1[r],2) + mt.pow(d[i],2) - 2*G_1[r]*d[i]*mt.cos(mt.radians(teta)))
            L_2 = mt.sqrt(mt.pow(G_1[r],2) + mt.pow(d[i],2) + 2*G_1[r]*d[i]*mt.cos(mt.radians(teta)))
            alpha = mt.degrees(mt.atan(G_1[r]/L_1))
            if (L_1 >= x_max[j] and L_2 < 2*x_max[j]):
                Frame_Atuaador_Linear.append([L_1,L_2,x_max[j],d[i],alpha,teta,G_1[r],mt.cos(mt.radians(alpha))*G_1[r]])
            if (G_1[r] > L_max):
                L_max = G_1[r]
            if (G_1[r] < L_min):
                L_min = G_1[r]
Frame_Atuaador_Linear = pd.DataFrame(np.transpose(np.column_stack(Frame_Atuaador_Linear)),columns=['L_min','L_max','L_curso','d','alpha','teta','Encaixe','Torque'])
```

## 8.3 PYTHON – CONEXÃO COM ARDUINO – ENVIO DE COORDENADAS

```
import serial as sl #importar biblioteca de conexão com arduino
import time
import datetime

arduinoserialdata = serial.serial('com11',9600)
flag = 1
tflag = 0
oldhour = dataframe('hora')[1]
bufsize = 0

while true:
    ts = datetime.datetime.now()
    if flag == 1:
        datafile = graph_frame
        old_day = ts.day
        flag = 0

    hour = ts.hour
    minute = ts.minute
    timeout = hour+minute
    interval = ts.hour%1.

    if(interval < 1.e-5):
        if(hour!=oldhour):
            tflag = 1;
            oldhour = hour;
    if(tflag==1):
        arduinoserialdata.write(graph_frame['azimute'],graph_frame['altitude'])
        if(arduinoserialdata.inwaiting()>0):
            data1 = arduinoserialdata.readline()
            datafile.write(' '+str(timeout)+'\t'+str(data1))
            tflag = 0
            print timeout
        time.sleep(10)
    if(ts.day != old_day):
        datafile.close()
        flag=1
```

## 8.4 ROTINA DE CONTROLE DO ARDUINO

```
//PYTHON

import serial
import time
from datetime import datetime as dt

arduino = serial.Serial('COM1', 9600, timeout = 1)
i = 1

while 1:
    now = dt.now()
    If(now.hour == Graph_frame.get_value(i, 'Hora')):
        arduino.write(Graph_frame.get_value(i, 'Altitude'))
        arduino.write(Graph_frame.get_value(i, 'Azimute'))
        time.sleep(3600)
        i = i + 1

// ARDUINO
const int engineMotor 9
const int input1 4
const int input2 5

int motorSpeed = 0;
int distEncaixeBraco = 90;
int distEncaixeBase = 395;
int distInstalacao = 305;
int velocidadeAtuador = 10;
int EncoderValue = 0;
int Diff = 0;
int AnguloPosicao = 0;
int AnguloAtual = acos(-1 * (distInstalacao ^ 2 - distEncaixeBraco ^ 2 -
distEncaixeBase ^ 2) / (2 * distEncaixeBraco*distEncaixeBase));
float DutyTime = 0;
float ErroAdmitido = 1;

void setup() {
    // Define a porta de acesso ao arduino
    Serial.begin(9600);

    pinMode(engineMotor, OUTPUT);
    pinMode(input1, INPUT);
    pinMode(input2, INPUT);

    EncoderValue = AnalogRead(A0);
}

void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        AnguloPosicao = Serial.read();

        if (AnguloAtual < AnguloPosicao) {
            Diff = AnguloPosicao - AnguloAtual
            DutyTime = GetTime(Diff, distEncaixeBraco, distEncaixeBase,
distInstalacao, velocidadeAtuador) * 1000;

            //Acionamento do atuador no sentido de extensão
            digitalWrite(input1, LOW);
            digitalWrite(input2, HIGH);

            analogWrite(engineMotor, 255);
```



```

    delay(DutyTime)
    analogWrite(engineMotor, 0);

    EncoderValue = analogRead(A0);
    Diff = EncoderValue - AnguloPosicao;
}
}
if (abs(Diff) > Erro && Diff > 0) {
    //Acionamento do atuador no sentido de extensão
    digitalWrite(input1, LOW);
    digitalWrite(input2, HIGH);

    DutyTime = GetTime(Diff, distEncaixeBraco, distEncaixeBase,
distInstalacao, velocidadeAtuador) * 1000

        analogWrite(engineMotor, 255);
    delay(DutyTime);
    analogWrite(engineMotor, 0);

}
else if (abs(Diff) > Erro && Diff < 0) {
    //Acionamento do atuador no sentido de retração
    digitalWrite(input1, HIGH)
    digitalWrite(input2, LOW)

    DutyTime = GetTime(Diff, distEncaixeBraco, distEncaixeBase,
distInstalacao, velocidadeAtuador) * 1000

        analogWrite(engineMotor, 255);
    delay(DutyTime);
    analogWrite(engineMotor, 0);
}
else {
    AnguloAtual = EncoderValue;
}
}

float GetTime(angleIn, angleIn, distEncaixeBraco, distEncaixeBase,
distInstalacao, velocidadeAtuador) {

    float DutyTime

    gamma = acos(-1 * (distInstalacao ^ 2 - distEncaixeBraco ^ 2 -
distEncaixeBase ^ 2) / (2 * distEncaixeBraco * distEncaixeBase))
        delta_gamma = gamma - angleIn * 3.14 / 180

    delta_L = sqrt(distEncaixeBraco ^ 2 + distEncaixeBase ^ 2 - 2 *
distEncaixeBraco * distEncaixeBase * cos(gamma + delta_gamma)) -
distInstalacao

    DutyTime = delta_L / velocidadeAtuador
    return DutyTime
}

```

## 9 ANEXOS

### 9.1 ESPECIFICAÇÕES DO ENCODER EC05E1220401





## 5mm Size Hollow Shaft Type EC05E Series

Number of detent		12
Number of pulse		12
Operating direction		Vertical
Operating temperature range		-30°C to +85°C
Electrical performance	Ratings	0.55mA 5.5V DC
	Output signal	Two phase A and B
	Max./min. operating current(Resistive load)	0.55mA/—
	Insulation resistance	50M $\Omega$ min. 50V DC
	Voltage proof	50V AC for 1 minute
Mechanical performance	Detent torque	1.6 $\pm$ 1.3mN·m
Durability	Operating life	100,000 cycles
Minimum order unit (pcs.)	Japan	8,000
	Export	16,000

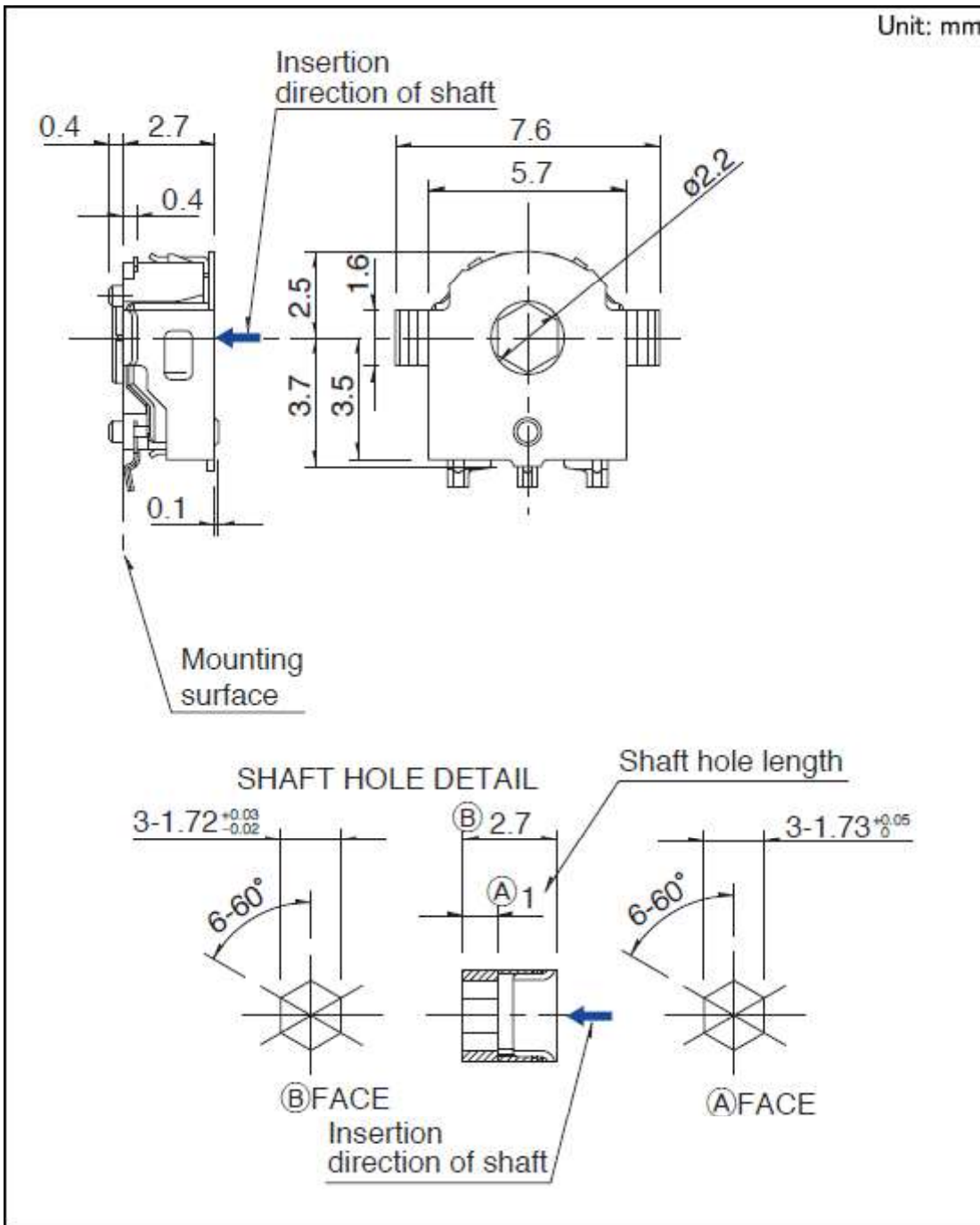
## Dimensions

### About Cookies on this site:

This site uses cookies to improve your online experience. By continuing to use this site without changing your cookie preferences, we will assume that you are agreeing to our use of cookies. For more information, visit our [Terms of Use](#).

Accept

Unit: mm

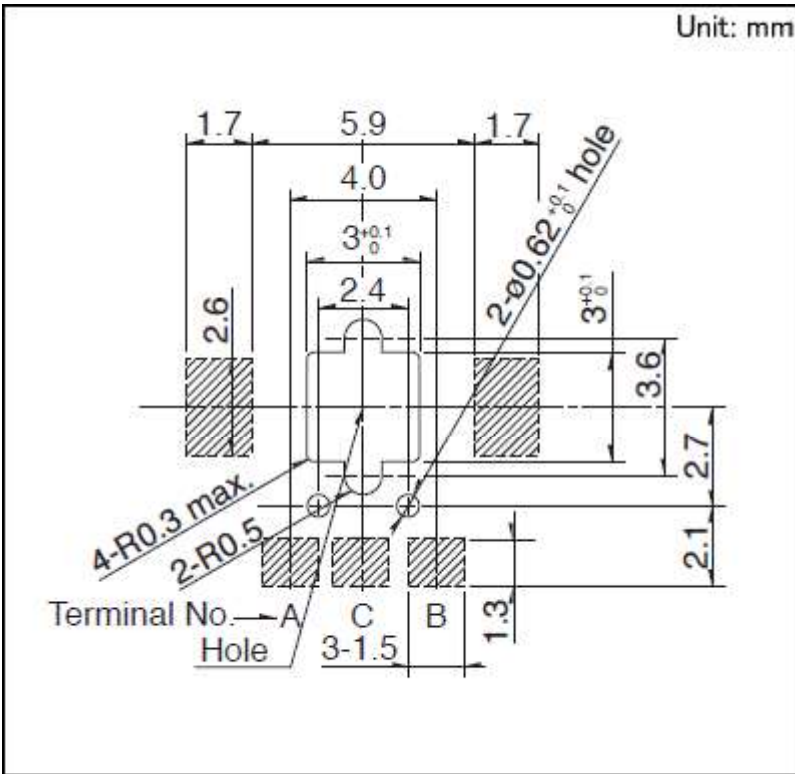


## Land Dimensions

About Cookies on this site:

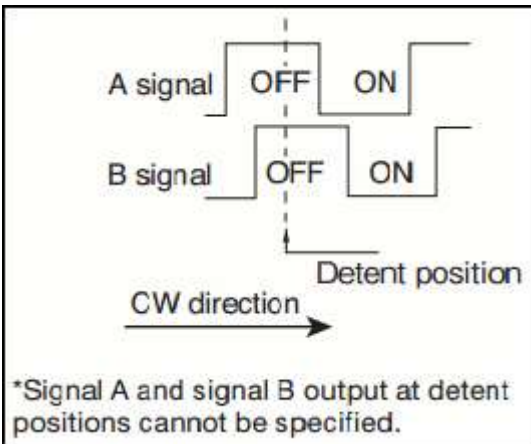
This site uses cookies to improve your online experience. By continuing to use this site without changing your cookie preferences, we will assume that you are agreeing to our use of cookies. For more information, visit our [Terms of Use](#).

Accept

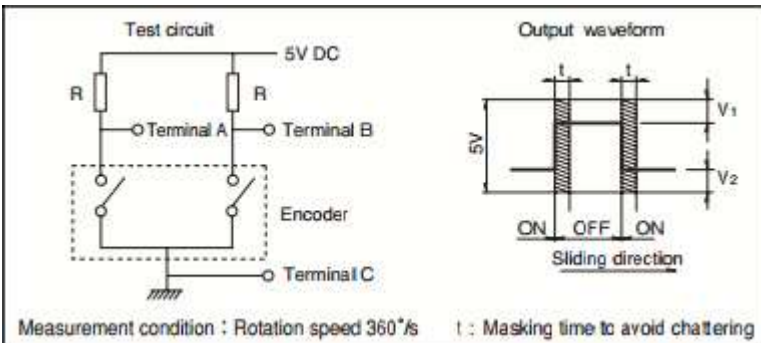


Viewed from mounting side, shaded area indicated soldering land.

Output Wave



Sliding Noise



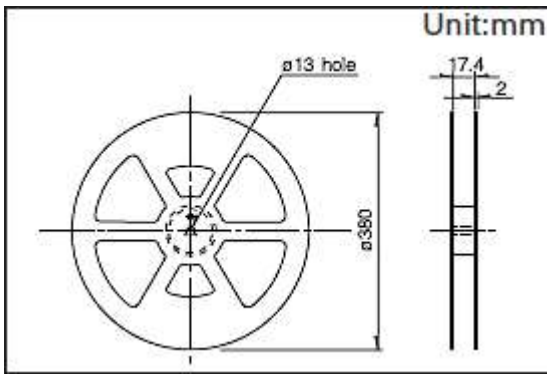
V1=V2=2.5V max.  
At R = 10kΩ Chattering : 6ms max. Bounce : 6ms max.

Packing Specifications

Taping

About Cookies on this site:  
This site uses cookies to improve your online experience. By continuing to use this site without changing your cookie preferences, we will assume that you are agreeing to our use of cookies. For more information, visit our [Terms of Use](#).

Accept



Number of packages (pcs.)	1卷	2,000
	1 case / Japan	8,000
	1 case / export packing	16,000

Tape width (mm) 16

Export package measurements (mm) 485 × 410 × 246

### Soldering Conditions

#### Example of Reflow Soldering Condition

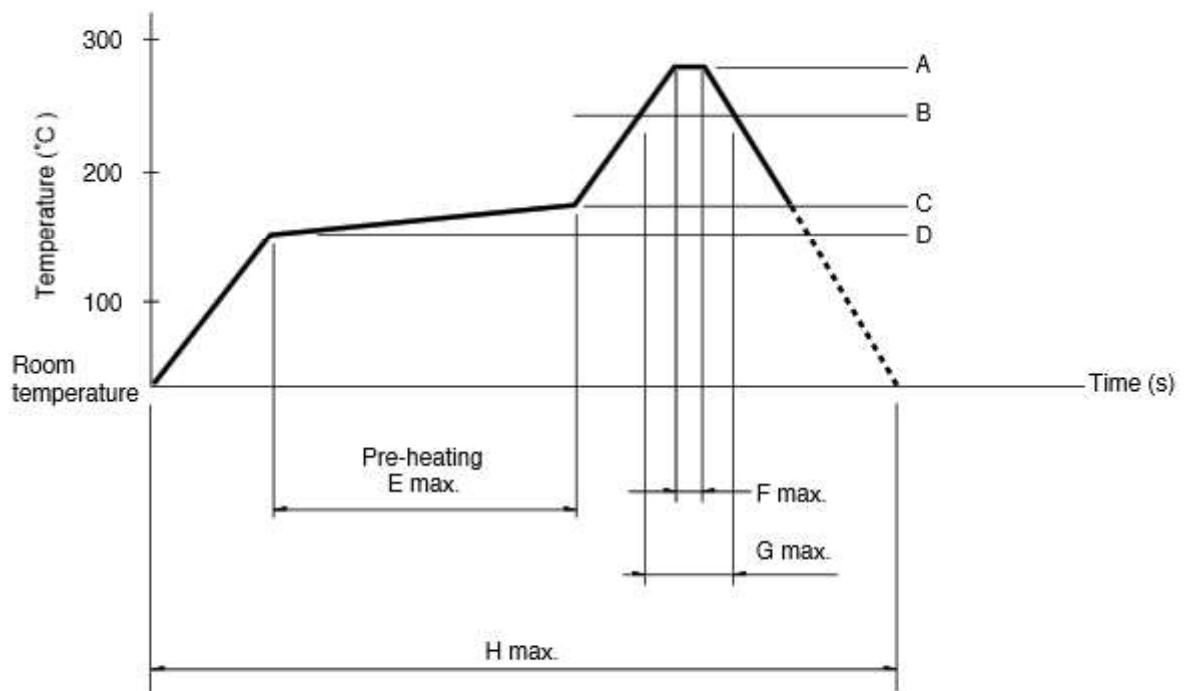
1. Heating method

Double heating method with infrared heater.

2. Temperature measurement

Thermocouple 0.1 to 0.2 Φ CA (K) or CC (T) at soldering portion (copper foil surface). A heat resisting tape should be used for fixed measurement.

3. Temperature profile



A	B	C	D	E	F	G	H	No. of reflows
250°C min.	230°C min.	180°C	150°C	60s to 120s	-	30s to 40s	-	2 time max.

(1)When using an infrared reflow oven, solder may sometimes not be applied. Be sure to use a hot air reflow oven or a type that uses infrared rays in combination with hot air.

About Cookies on this site:

This site uses cookies to improve your online experience. By continuing to use this site without changing your cookie preferences, we will assume that you are agreeing to our use of cookies. For more information, visit our [Terms of Use](#).

Accept

to use.

#### Reference for Hand Soldering

---

Tip temperature 350°C max.

---

Soldering time 3s max.

---

No. of solders 1 time

---

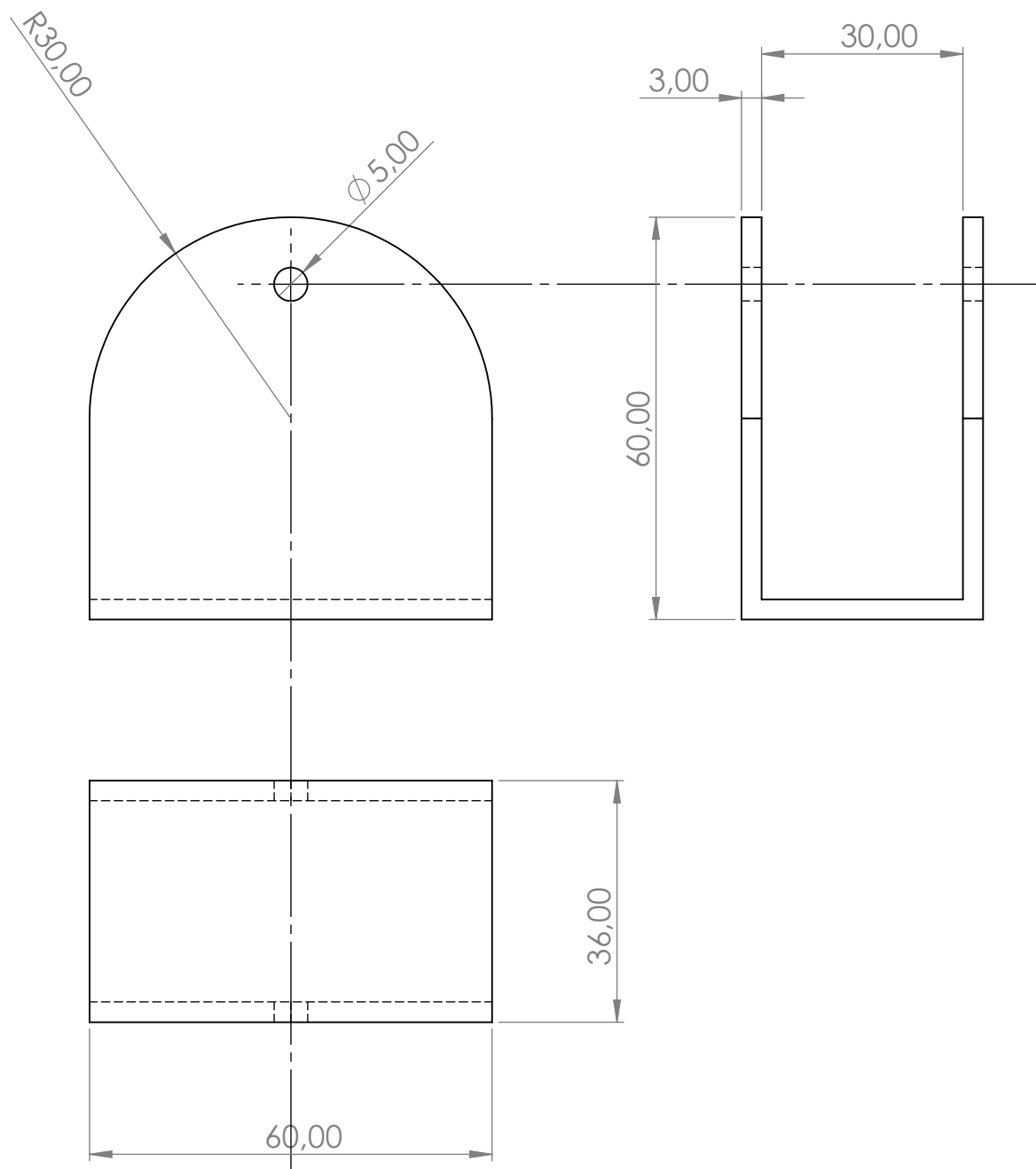
#### Notes are common to this series/models.

1. This site catalog shows only outline specifications. When using the products, please obtain formal specifications for supply.
2. Please place purchase orders for taping products per minimum package units (1 reel or a case). Please see taping specifications.

About Cookies on this site:

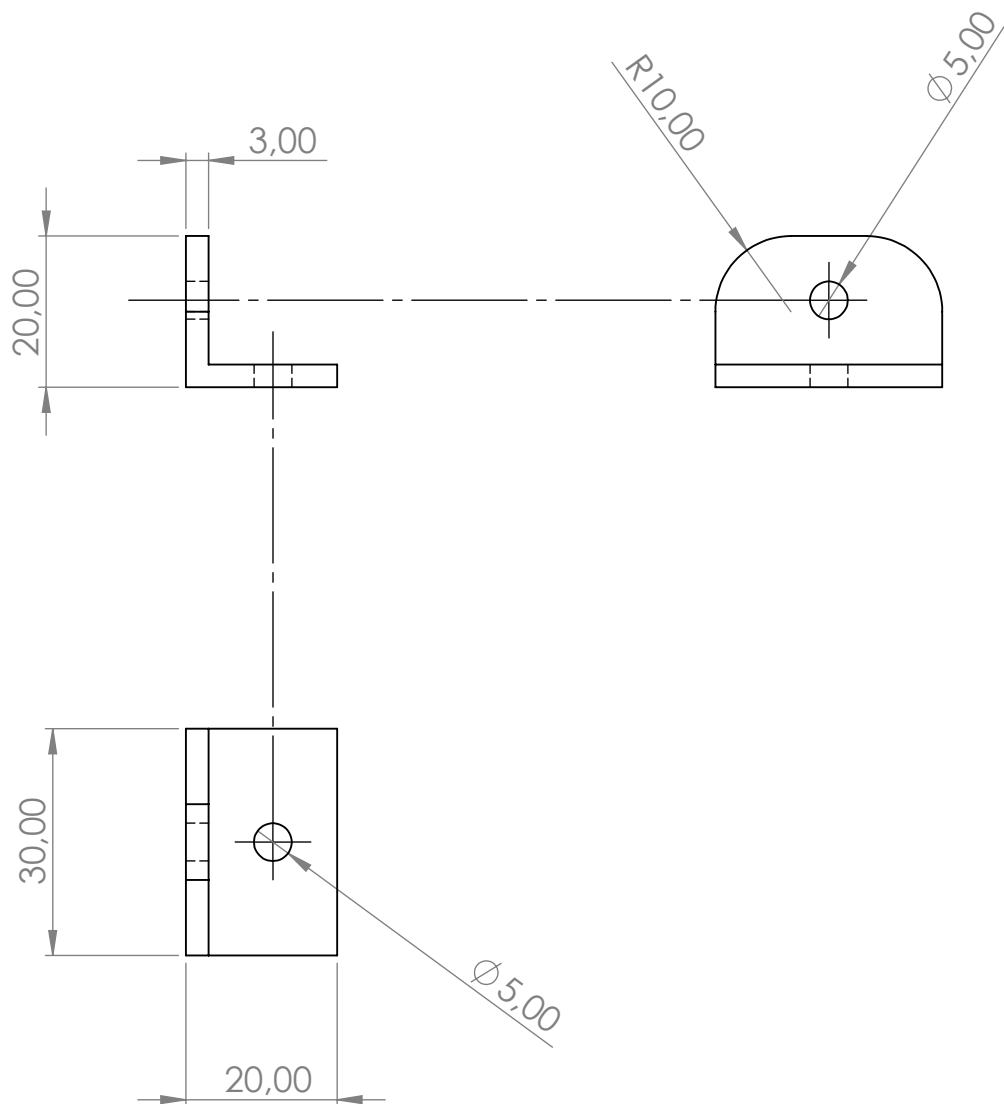
This site uses cookies to improve your online experience. By continuing to use this site without changing your cookie preferences, we will assume that you are agreeing to our use of cookies. For more information, visit our [Terms of Use](#).

Accept



<b>Universidade de Brasília</b>	<b>FT - Faculdade de Tecnologia</b>		Data: 10/06/2019
	<b>Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar</b>		
Nome da peça:			
<h1>SUPORE EM U - BARRA CENTRAL</h1>			
Diedro:	Código da peça: 001		Unidades: mm
	Material: AISI 1020		Escala: 1:1
<b>Projetista:</b>	Leonardo Rocha Matos		
<b>Desenhista:</b>	Leonardo Rocha Matos		Nº da folha: 1 de 11





Universidade  
de Brasília

FT - Faculdade de Tecnologia

Data: 10/06/2019

Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar

Nome da peça:

SUPORTE EM L - BARRAS LATERAIS

Diedro:



Código da peça: 002

Unidades: mm

Material: AISI 1020

Escala: 1:1

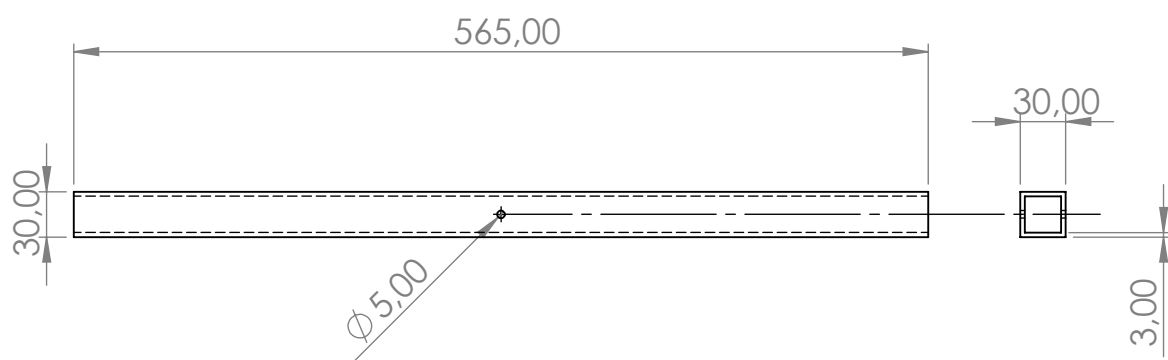
Projefista:


Leonardo Rocha Matos

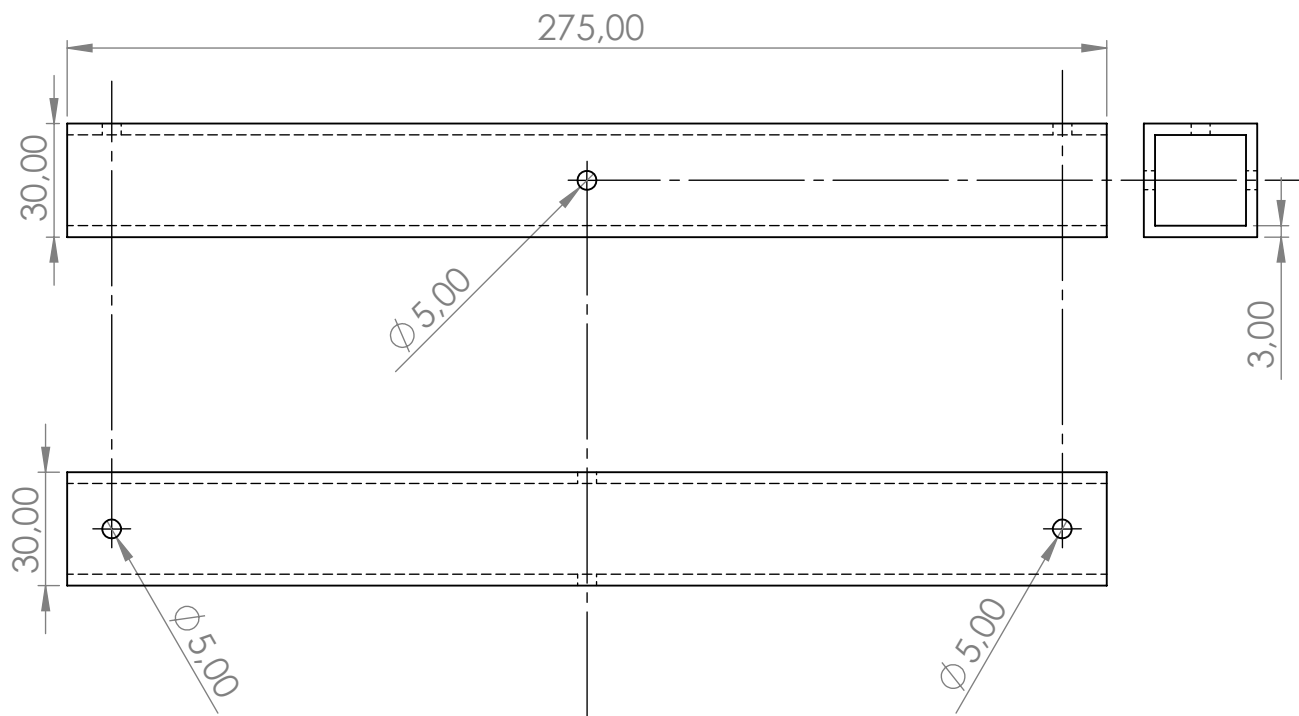
Desenhista:


Leonardo Rocha Matos

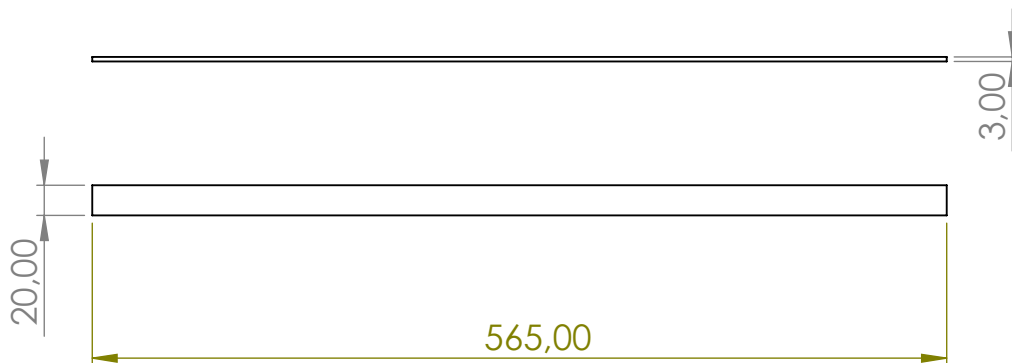
Nº da folha: 2 de 11




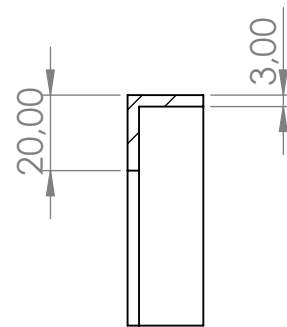
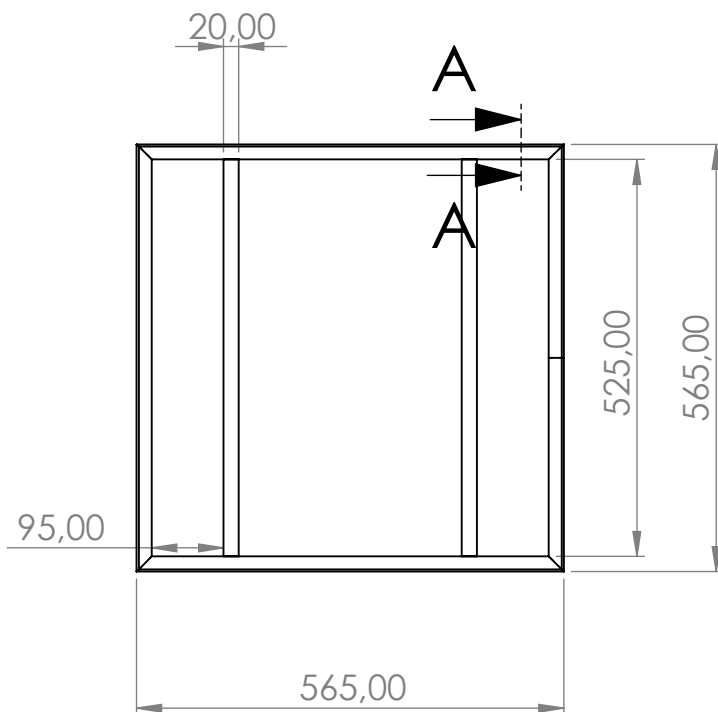
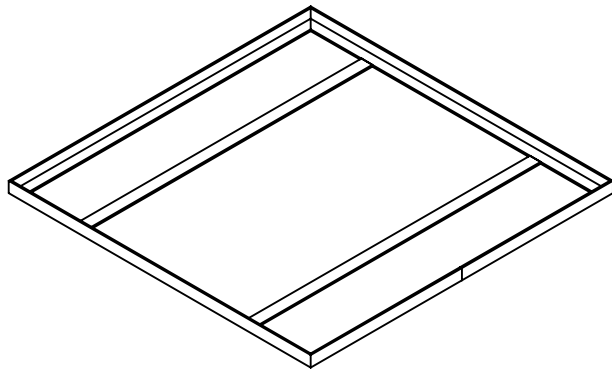
<b>Universidade de Brasília</b>	<b>FT - Faculdade de Tecnologia</b>		Data: 10/06/2019
	<b>Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar</b>		
Nome da peça:			
<h1>BARRA LATERAL</h1>			
Diedro:	Código da peça: 003	Unidades: mm	
	Material: AISI 1020	Escala: 1:5	
<b>Projetista:</b>	Leonardo Rocha Matos		
<b>Desenhista:</b>	Leonardo Rocha Matos		N° da folha: 3 de 11



<b>Universidade de Brasília</b>	<b>FT - Faculdade de Tecnologia</b>		Data: 10/06/2019
	<b>Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar</b>		
Nome da peça:			
<h1>BARRA CENTRAL</h1>			
Diedro:	Código da peça: 004	Unidades: mm	
	Material: AISI 1020	Escala: 1:2	
<b>Projetista:</b>	Leonardo Rocha Matos		
<b>Desenhista:</b>	Leonardo Rocha Matos		Nº da folha: 4 de 11

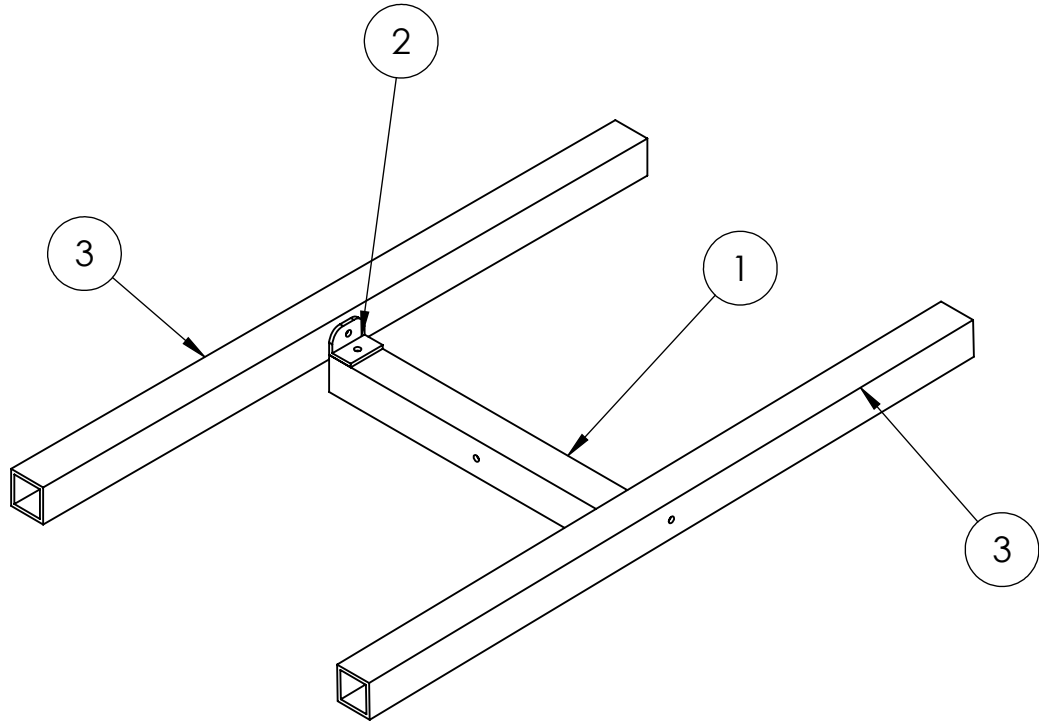


<b>Universidade de Brasília</b>	<b>FT - Faculdade de Tecnologia</b>		Data: 10/06/2019
	<b>Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar</b>		
Nome da peça:			
<h1>SUPOORTE DO QUADRO</h1>			
Diedro:	Código da peça: 005	Unidades: mm	
	Material: AISI 1020	Escala: 1:5	
<b>Projetista:</b>	Leonardo Rocha Matos		
<b>Desenhista:</b>	Leonardo Rocha Matos		Nº da folha: 5 de 11



SECÇÃO A-A  
ESCALA 1 : 2

<b>Universidade de Brasília</b>	<b>FT - Faculdade de Tecnologia</b>		Data: 10/06/2019
	<b>Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar</b>		
Nome da peça:			
<h1>QUADRO</h1>			
Diodo:	Código da peça: 006	Unidades: mm	
	Material: AISI 1020	Escala: 1:10	
<b>Projetista:</b>	Leonardo Rocha Matos		
<b>Desenhista:</b>	Leonardo Rocha Matos		Nº da folha: 6 de 11



N	NOME DA PEÇA	OBSERVAÇÕES	QTD
1	BARRA CENTRAL		1
2	SUPOORTE EM L - BARRA LATERAL	Os suportes são presos às barras laterais por meio de parafusos M5x36 e à barra central com parafusos M5x12	2
3	BARRA LATERAL		2

**Universidade  
de Brasília**

**FT - Faculdade de Tecnologia**

Data: 10/06/2019

**Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar**

Nome da peça:

## MONTAGEM DO SUPORTE DO QUADRO

Diedro:



Código da peça: 007

Unidades: mm

Material: AISI 1020

Escala: 1:5

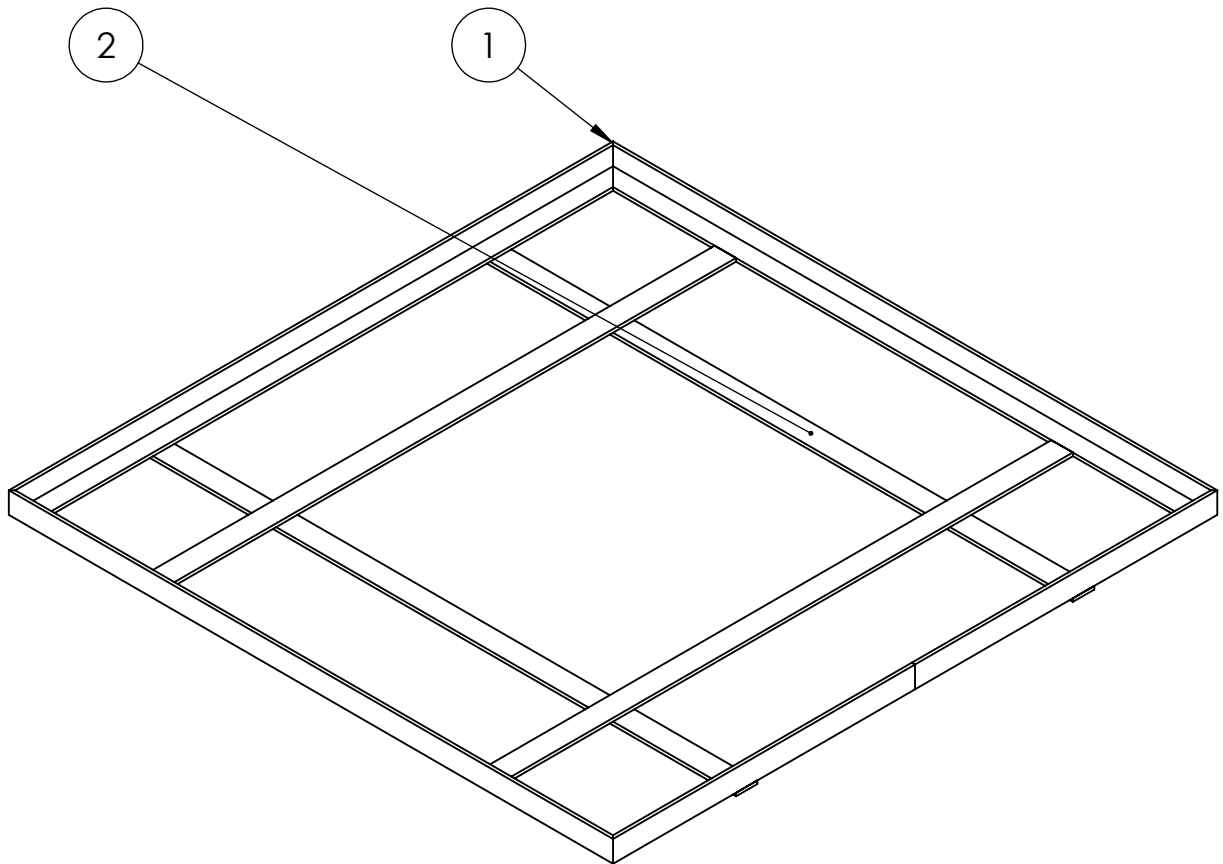
**Projetista:**

Leonardo Rocha Matos

**Desenhista:**

Leonardo Rocha Matos

Nº da folha: 7 de 11



N	NOME DA PEÇA	OBSERVAÇÕES	QTD
1	QUADRO		1
2	SUPORTE QUADRO	Os suportes curvados devem ser soldados ao quadro antes dos suportes retos	1

**Universidade de Brasília**

**FT - Faculdade de Tecnologia**

Data: 10/06/2019

**Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar**

Nome da peça:

# MONTAGEM DO QUADRO

Diedro:



Código da peça: 008

Unidades: mm

Material: AISI 1020

Escala: 1:5

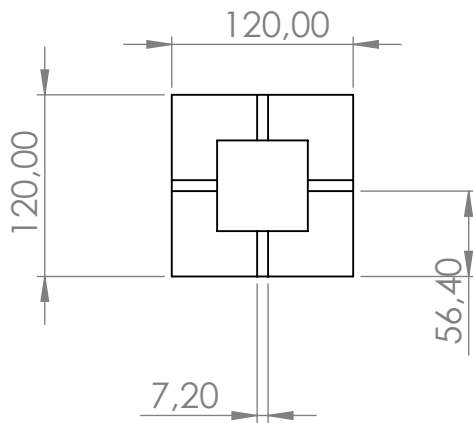
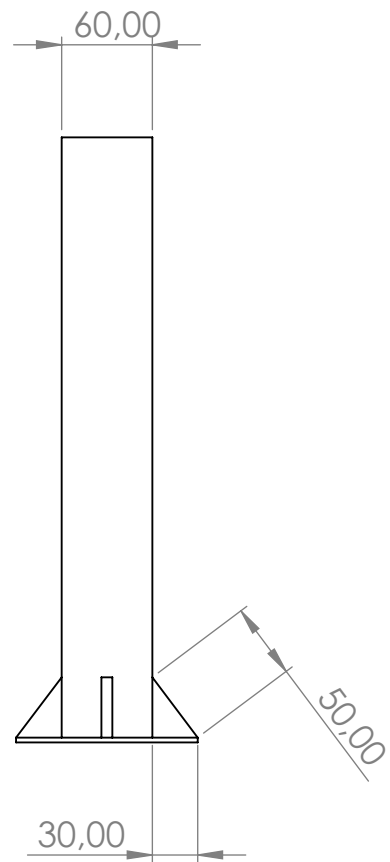
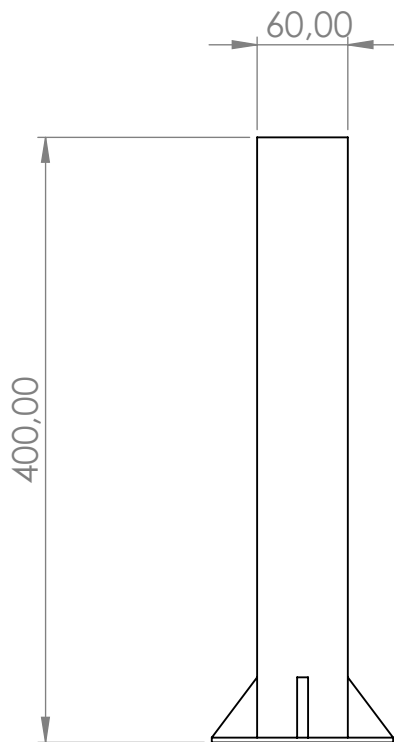
Projefista:


Leonardo Rocha Matos

Desenhista:

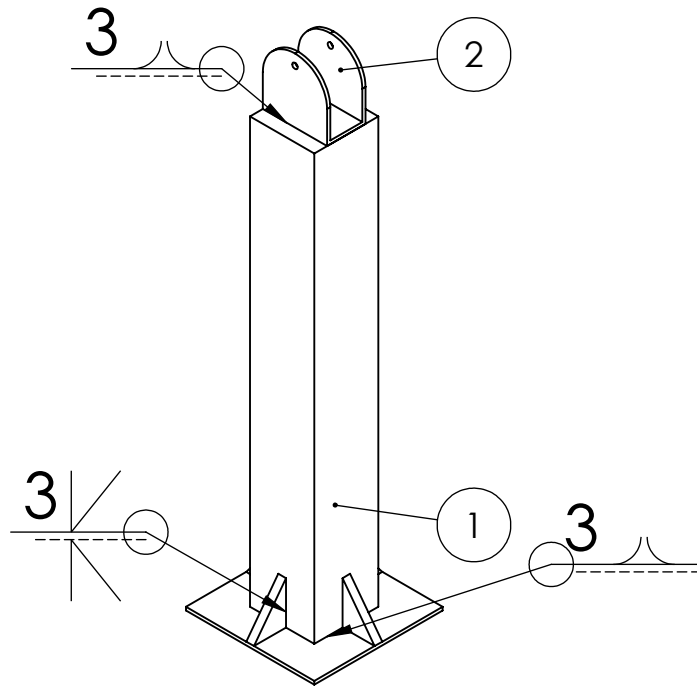
Leonardo Rocha Matos

Nº da folha: 8 de 12



Universidade de Brasília	FT - Faculdade de Tecnologia		Data: 10/06/2019
	Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar		
Nome da peça:  <h1>BASE</h1>			
Diedro: 	Código da peça: 009	Unidades: mm	
	Material: AISI 1020	Escala: 1:5	
Projefista:	Leonardo Rocha Matos		
Desenhista:	Leonardo Rocha Matos	N° da folha: 09 de 11	





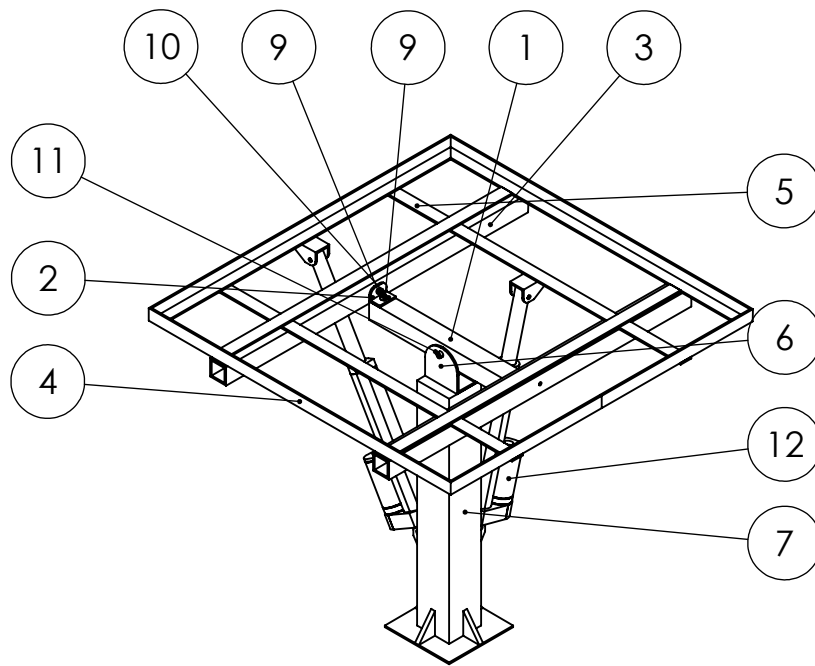
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	BASE		1
2	SUPORE EM U		1

<b>Universidade de Brasília</b>	<b>FT - Faculdade de Tecnologia</b>	Data: 10/06/2019
	<b>Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar</b>	

Nome da peça:

## MONTAGEM DA BASE

Diedro: 	Código da peça: 010	Unidades: mm
	Material: AISI 1020	Escala: 1:5
Projefista:	Leonardo Rocha Matos	
Desenhista:	Leonardo Rocha Matos	Nº da folha: 10 de 11



N	NOME DA PEÇA	QTD
1	BARRA CENTRAL	1
2	SUORTE EM L	2
3	BARRA LATERAL	2
4	QUADRO	1
5	SUORTE QUADRO	2
6	SUORTE EM U	1
7	BASE	1
9	PARAFUSOS M5X12	2
9	PARAFUSOS M5X36	2
10	PARAFUSOS M5X42	1
11	PORCAS M5	5
12	ATUADOR MECTROL LAS 3 300mm	2

**Universidade  
de Brasília**

**FT - Faculdade de Tecnologia**

Data: 10/06/2019

**Projeto de dispositivo de posicionamento automático para painel solar**

Nome da peça:

**DESENHO DE CONJUNTO DO SUPORTE DE PAINEL FOTOVOLTAICO**

Diedro:



Código da peça: 011

Unidades: mm

Material: AISI 1020

Escala: 1:5

Projeta:

Leonardo Rocha Matos

Desenhista:

Leonardo Rocha Matos

Nº da folha: 11 de 11