



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

DÁRIO GUILHERME TOGINHO

**PROTÓTIPO MÓVEL PARA OTIMIZAÇÃO DA  
CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS**

---

Londrina  
2019

DÁRIO GUILHERME TOGINHO

**PROTÓTIPO MÓVEL PARA OTIMIZAÇÃO DA  
CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Sistemas Embarcados

Orientador: Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo

Londrina  
2019

## **Ficha Catalográfica**

Guilherme Toginho, Dário

Protótipo Móvel para Otimização da Captação de Energia Solar em Painéis Fotovoltaicos. Londrina, PR, 2019. 82 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Sistemas Embarcados. 2. Energias renováveis. 3. Sistema de Orientação. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Título.

DARIO GUILHERME TOGINHO

**PROTÓTIPO MÓVEL PARA OTIMIZAÇÃO DA  
CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Sistemas Embarcados

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Profa. Dra. Maria B. de Moraes França  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Francisco Granziera Junior  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
- UTFPR

Londrina, 7 de agosto de 2019.

À minha companheira, Letícia Maciel Nievola, que esteve ao meu lado nos  
melhores e também nos mais difíceis momentos desta jornada.

# Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Shirley Oliveira Sales, por sempre acreditar em mim e me amar, independente das circunstâncias.

À minha namorada Letícia Maciel Nievola pela paciência, apoio, por ser minha companheira, por dividirmos nossos sonhos e conquistas, por me motivar a sempre crescer e ir adiante, e principalmente por participar da minha vida e compartilhar comigo esse belo e forte sentimento de amar.

Ao meu orientador, Leonimer Flávio de Melo, pelos seus ensinamentos, sua compreensão, acompanhamento e auxílio prestados ao longo da graduação e se estendendo até o presente momento. O que aprendi com certeza será levado adiante em minha vida.

Aos técnicos Luiz Fernando Schmidt e Luis Carlos Mathias, pelo suporte, dicas, e disposição em auxiliar nas etapas deste trabalho.

À Universidade Estadual de Londrina por me proporcionar todo o crescimento pessoal e profissional que tive em minha trajetória até aqui.

Ao Ziggy, que entrou na minha vida no meio desta jornada, me trazendo muita alegria, inspiração, lealdade, admiração e carinho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

# Resumo

Para otimizar a energia fornecida por um painel solar, são utilizados métodos para detectar a posição do Sol e orientar o painel em sua direção. Duas maneiras possíveis de alcançar este objetivo são através de sensores LDR (*Light Depending Resistor* - Resistor Dependente de Luz), e através de equações que modelem a geometria entre a Terra e o Sol. O objetivo principal deste trabalho é a proposta de um sistema protótipo para a otimização da captação de energia solar em painéis fotovoltaicos. Neste trabalho foi desenvolvido um robô móvel alimentado por um painel solar orientado por uma matriz de LDRs e por um dispositivo GPS, de modo a otimizar a energia captada pelo painel. Os LDRs foram utilizados sendo a representação de vetores normais à uma superfície, onde sua soma resultava no ponto de maior incidência luminosa. O GPS, por sua vez, forneceu dados de local, data e hora, que foram utilizados no cálculo do azimute e do zênite do Sol, utilizados por sua vez para orientar o painel. Os resultados obtidos demonstram que um painel fotovoltaico orientado obtém um melhor desempenho quando comparado a um painel estático. Dentre as duas abordagens utilizadas foram encontradas vantagens e desvantagens. O LDR, embora tenha um menor custo, é mais sensível a eventuais interferências luminosas e ruído térmico, e o GPS, embora seja mais exato, possui um custo um pouco mais elevado, e seu funcionamento depende da disponibilidade de satélites em seu local de operação. A execução e documentação deste trabalho demonstraram que as possibilidades e oportunidades neste ramo de pesquisa tendem a crescer nos próximos anos, e que há muitos trabalhos possíveis a serem feitos no futuro, tanto na robótica móvel quanto em demais sistemas alimentados por painéis fotovoltaicos.

Palavras chave: 1. Sistemas Embarcados. 2. Energias renováveis. 3. Sistema de Orientação.

# Abstract

In order to optimize the power provided by a solar panel, methods to detect the position of the sun and orientate it at its position are used. Two possible ways to achieve this are through LDR (Light Depending Resistor) sensors, and through equations that modelate the geometry between the Earth and the Sun. The main objective of this work is the proposal of a prototype system to optimize the harvesting of solar energy on photovoltaic panels. In this work a mobile robot powerred by a solar panel orientated by a LDR matrix and a GPS device was developed. The LDR were used as the representation of vectors normal to a surface, where its sum resulted in the most lighted point. The GPS, in turn, provided location, date and time data, that were used in the calculations of the Sun's azimuth and zenith, used to orientate the panel. The obtained results show that an orientated photovoltaic panel has a better performance when compared to a static panel. Among the two used approaches both advantages and disadvantages were found. The LDR, although has a lower cost, is more sensible to eventual light interferences and thermal noise, and the GPS, although is more exact, has a more elevated cost, and is behaviour depends on the availability of satellites on its operation site. The execution and documentation of this work has shown that the possibilities and opportunities at this branch of research tend to grow for the next years to come, and that there are many possible works to be done in the future, both in mobile robotics and other systems powered by photovoltaic panels.

Key words: 1. Embedded Systems. 2. Renewable Energies. 3. Tracking System.

# Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Convenções e Lista de Símbolos

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos Gerais e Específicos . . . . .	3
1.2	Justificativas . . . . .	4
1.3	Ferramentas Utilizadas . . . . .	4
1.4	Estrutura do Trabalho . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Revisão Conceitual</b>	<b>5</b>
2.1	Análise do estado da arte . . . . .	5
2.2	Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos . . . . .	8
2.2.1	Células Fotovoltaicas . . . . .	9
2.2.2	Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica . . . . .	10
2.2.3	Classificação de Sistemas Fotovoltaicos . . . . .	11
2.2.4	Orientação de Sistemas Fotovoltaicos . . . . .	11
2.3	Sistema Horizontal de Coordenadas . . . . .	12
2.4	Efeito Fotoelétrico . . . . .	14
2.5	Modelo do painel solar . . . . .	15
2.6	Equações de Ângulos do Sistema Horizontal de Coordenadas . . . . .	16
2.7	Rotação de Eixos . . . . .	19

2.8	Filtro Média Móvel . . . . .	20
2.9	Declinação Magnética . . . . .	21
2.10	GPS . . . . .	22
2.10.1	Histórico e Funcionamento . . . . .	22
2.10.2	Padrão NMEA 0183 . . . . .	24
2.11	Conclusão do capítulo . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Metodologias Utilizadas</b>	<b>31</b>
3.1	Dispositivos e Componentes Utilizados . . . . .	31
3.1.1	Painel solar, Controlador e Bateria . . . . .	31
3.1.2	LDR . . . . .	33
3.1.3	Servomotor . . . . .	35
3.1.4	Módulo GPS NEO-6M . . . . .	36
3.1.5	Bússola Digital . . . . .	37
3.1.6	Sistema de Controle Embarcado . . . . .	38
3.2	Modelagem do LDR em relação ao ângulo de incidência da luz . . . . .	38
3.3	Montagem da Matriz de LDRs . . . . .	40
3.4	Estrutura física e mecânica do robô móvel . . . . .	40
3.5	Circuito de Interface entre LDRs e Microcontrolador . . . . .	42
3.6	Cálculo de Posicionamento através dos LDRs . . . . .	43
3.7	Cálculo de Posicionamento através do GPS . . . . .	46
3.8	Conclusão do capítulo . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>48</b>
4.1	Ângulos obtidos com sensores LDRs utilizando Luz Artificial . . . . .	48
4.2	Amostragem dos sensores LDRs com luz solar . . . . .	53
4.3	Amostragem da posição do Sol com GPS e magnetômetro . . . . .	55
4.4	Testes parciais sem coleta de dados . . . . .	57
4.5	Amostragem de potência . . . . .	58

4.6	Conclusão do capítulo . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>67</b>
5.1	Revisão do projeto . . . . .	67
5.2	Considerações Finais . . . . .	67
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	68
	<b>Referências</b>	<b>69</b>
	<b>Apêndice A – Disseminações Científicas</b>	<b>73</b>
A.1	Trabalhos Publicados . . . . .	73
A.2	Trabalhos Submetidos . . . . .	73
	<b>Apêndice B – Sistemas de Controle</b>	<b>74</b>
B.1	Malha Fechada . . . . .	74
B.2	Malha Aberta . . . . .	75
B.3	Conclusão da Seção . . . . .	75
	<b>Apêndice C – Fluxograma do Sistema de Controle Embarcado</b>	<b>76</b>
	<b>Anexo A – Datasheet do GPS</b>	<b>77</b>
	<b>Anexo B – Datasheet da bussola digital</b>	<b>80</b>

# Lista de Figuras

1.1	Foto do protótipo montado e indicações de seus módulos. . . . .	2
1.2	Diagrama representando a comunicação da matriz de LDRs, o módulo GPS e o microcontrolador. . . . .	3
2.1	Representação do ângulo Azimute. . . . .	13
2.2	Representação dos ângulos Zenite e Elevação/Altitude. . . . .	13
2.3	Montagem usada para experimento do efeito fotoelétrico. . . . .	14
2.4	Modelo elétrico de um painel solar. . . . .	15
2.5	Gráfico da Eq. 2.6, onde o eixo vertical é a EoT em minutos, e o eixo horizontal é o número de dias desde o início do ano. . . . .	17
2.6	Representação gráfica do Ângulo de Declinação. . . . .	18
2.7	Um sistema de coordenadas x-y rotacionado em $\theta_d$ para um sistema $x'-y'$ . . . . .	19
2.8	Exemplo de filtro média móvel, onde (a) é o sinal original, (b) é o sinal com filtrado com média móvel de 11 pontos e (c) é a filtragem com 51 pontos. . . . .	20
2.9	Exemplo de declinação magnética positiva, onde $N_g$ é o Norte geográfico e $N_m$ é o Norte magnético. . . . .	21
2.10	Polos Norte Verdadeiro e Magnético. . . . .	22
2.11	Constelação do GPS. . . . .	23
2.12	Segmentos do GPS. . . . .	24
2.13	Elipsoide WGS84 que ocupa a porção média da superfície topográfica mundial. . . . .	27
3.1	Foto do painel solar utilizado neste trabalho. . . . .	32
3.2	Foto da bateria utilizada. . . . .	32
3.3	Foto do controlador utilizado. . . . .	33

3.4	Resistência em função da iluminação. . . . .	33
3.5	Algumas informações do LDR, entre elas: (a) Símbolo, (b) Resposta espectral, (c) Aspecto físico. . . . .	34
3.6	Exemplo de circuito divisor de tensão com LDR. . . . .	34
3.7	Circuito alternativo ao da Figura 3.6. . . . .	35
3.8	Controle de posição em malha fechada utilizando motor DC e realimentação de posição angular utilizando potenciômetro próprio para servomotores. . . . .	36
3.9	Placa de circuito do dispositivo GPS utilizado. . . . .	37
3.10	Placa de circuito da bússola digital. . . . .	38
3.11	Placa de circuito do microcontrolador. . . . .	39
3.12	Superfície de isopor com os LDRs posicionados. . . . .	39
3.13	Superfície de isopor com os LDRs posicionados. . . . .	40
3.14	Foto do robô móvel. . . . .	41
3.15	Referência da bússola eletrônica em relação ao robô. . . . .	41
3.16	Circuito multiplexador de interface entre os LDRs e o microcontrolador. . . . .	42
3.17	Diagrama do circuito multiplexador de interface entre os LDRs e o microcontrolador. . . . .	43
3.18	Coordenadas esféricas $\rho$ , $\phi$ e $\theta$ e sua relação com x, y e z (cartesianas) e r(polar). . . . .	44
3.19	Modelo 3D da superfície utilizada com vetores normais as posições de cada LDR utilizado. . . . .	45
4.1	Foto da amostragem número 1 com luz artificial da superfície de LDRs. . . . .	48
4.2	Modelo 3D dos LDRs e resultante indicando posição de incidência da luz na superfície. . . . .	52
4.3	Desvo das medidas de ângulos utilizando LDRs. . . . .	53
4.4	Vista superior dos LDRs na amostra atual. Foto original e com contraste. . . . .	54

4.5	Vista traseira inclinada dos LDRs na amostra atual. Foto original e com contraste. . . . .	54
4.6	Amostras dos ângulos $\theta$ e $\phi$ obtidos pelos LDRs. . . . .	55
4.7	Amostras das coordenadas celestes obtidas através do GPS. . . . .	56
4.8	Amostras da leitura da bússola digital mostrando posição angular do norte geográfico em relação ao robô móvel. . . . .	57
4.9	Foto do robô móvel em relação a sombra no chão para demonstrar alinhamento com o azimute do Sol. . . . .	58
4.10	Foto da inclinação do painel solar durante operação. . . . .	58
4.11	Amostras da leitura de potência do painel solar em 3 abordagens diferentes e sua potência coletada e consumida, dado em $W$ . . . . .	59
4.12	Amostras da leitura da energia acumulada coletada pelo painel solar em 3 abordagens diferentes. . . . .	60
4.13	Amostras da leitura de potência do painel solar de 3 dias utilizando LDRs. . . . .	61
4.14	Amostras da leitura de potência do painel solar de 3 dias utilizando GPS. . . . .	62
4.15	Razão entre as potências obtidas com orientação sobre a potência sem orientação. . . . .	63
4.16	Razão entre as potências obtidas com orientação sobre a potência ideal. . . . .	64
4.17	Razão entre as potências obtidas com orientação GPS sobre a potência com orientação LDR. . . . .	65
B.1	Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada. . . . .	74

# Lista de Tabelas

2.1	Exemplo de frase RMC. . . . .	26
2.2	Exemplo de frase VTG, onde as medidas de ângulos são dadas em graus. . . . .	26
2.3	Exemplo de frase GGA. . . . .	27
2.4	Qualidade do sinal para a frase GGA. . . . .	28
2.5	Exemplo de frase GSA. . . . .	28
2.6	Exemplo de frase GSV. . . . .	29
2.7	Exemplo de frase GLL. . . . .	30
4.1	Dados Brutos da Posição da Matriz de LDRs . . . . .	49
4.2	Dados Processados da Posição da Matriz de LDRs . . . . .	50
4.3	$\mathbf{\Lambda}(\theta, \phi)$ da Matriz de LDRs . . . . .	51

# Lista de Abreviaturas

**A/D** Analógico/Digital

**ARM** Advanced RISC Machine

**CI** Circuito Integrado

**EoT** Equation of Time

**GPS** Global Positioning System

**HRA** Hour Angle

**LDR** Light Depending Resistor

**LST** Local Solar Time

**LSTM** Local Standard Time Meridian

**PWM** Pulse Width Modulation

**USART** Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

# Convenções e Lista de Símbolos

Na notação das fórmulas, as seguintes convenções foram utilizadas:

- funções em negrito são funções vetoriais com componentes cartesianas, por exemplo:  $\mathbf{f}(t), \mathbf{g}(t)$ ;
- subscrito diferencia um elemento de mesma grandeza do outro, exemplo:  $t_{inicial}, t_{final}$ ;
- $A \cdot B$  é o produto escalar dos conjuntos  $A$  e  $B$ ;
- vetores unitários são representados pelas letras  $i, j, k$  sobrescritas com  $\hat{\phantom{x}}$ , por exemplo:  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ ;

Os seguintes símbolos serão utilizados:

símbolo	descrição	página
$\mathbf{R}(x, y, \theta_d)$	função de rotação de $\theta_d$ das coordenadas cartesianas x-y	20
$\mathbf{\Lambda}(\phi, \theta)$	função vetorial do LDR da posição $\phi$ e $\theta$	44
$W(\phi, \theta)$	leitura do conversor A/D no LDR correspondente a posição $\phi$ e $\theta$ menos a média de todos os valores lidos	44
$L(\phi, \theta)$	leitura do conversor A/D no LDR correspondente a posição $\phi$ e $\theta$	44
$\phi_f$	coordenada $\phi$ resultante correspondente a posição do Sol	46
$\theta_f$	coordenada $\theta_f$ resultante correspondente a posição do Sol	46
$\wedge$	Conectivo lógico representando aritmeticamente o operador lógico "E"	45

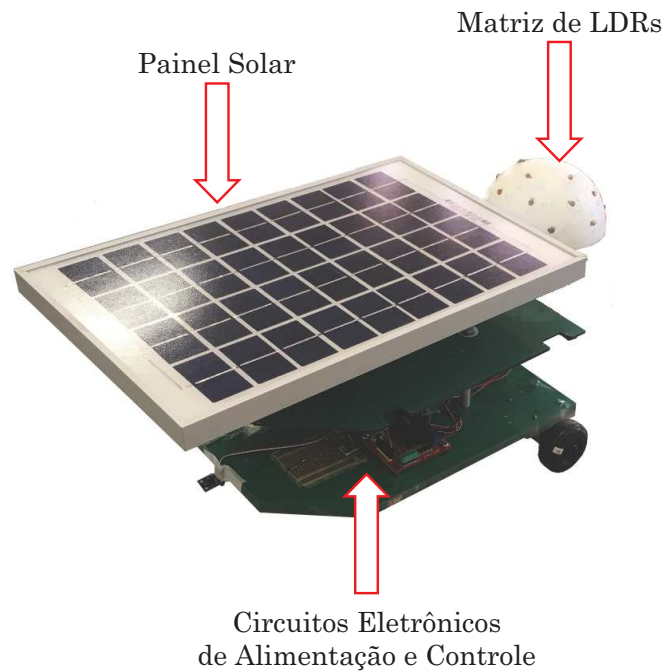
# 1 Introdução

As aplicações da robótica móvel vão desde exploração terrena, exploração aeroespacial, resgate, e também a possibilidade de aplicações domésticas como robôs de limpeza e, em maior porte, de transporte individual ou coletivo. Uma característica que afeta diretamente o desempenho de um robô móvel é sua autonomia energética. É possível utilizar robôs alimentados a baterias, porém há a possibilidade da bateria se esgotar enquanto ele desempenha sua função, o que pode por em risco seus objetivos naquele momento. Uma solução é a utilização de baterias recarregáveis em conjunto com um painel fotovoltaico. Desta forma, a alimentação do robô depende do painel, enquanto este recarrega as baterias. Quando não houver luz incidindo sobre o painel fotovoltaico, as baterias se tornam sua fonte de energia, de forma a garantir uma maior autonomia ao robô móvel. Com a possibilidade do robô móvel atuar por diversas horas, o painel fotovoltaico, caso esteja fixado, afetará o rendimento da geração de energia, que depende do ângulo de incidência do Sol no painel. Assim se recorre a um sistema de orientação do painel fotovoltaico, que possibilita que o painel possa acompanhar a trajetória do Sol, maximizando a potência fornecida no sistema.

Este trabalho tem por finalidade desenvolver um sistema de orientação de painel fotovoltaico aplicado a robótica móvel, utilizando sensores LDR, um módulo GPS modelo NEO-6M, servomotor modelo 1501MG de aproximadamente 9,95 W e um microcontrolador ARM Cortex-M4, modelo STM32F407VG6, produzido pela *STMicroelectronics*. Os LDRs serão dispostos em uma matriz sobre a superfície de uma semiesfera, de forma a mapear os pontos de incidência do Sol. O GPS se comunicará com o microcontrolador através de barramento USART, e fornecerá data, hora, longitude e latitude. Esses dados serão processados, e enviados ao servomotor, que irá atuar diretamente no painel fotovoltaico, alterando sua posição. Em seguida será realizado um estudo para avaliar quais dados de entrada possuem melhor desempenho, se os fornecidos pela matriz de LDRs ou os do GPS. O módulo em questão pode ser visto na Figura 1.1.

O objetivo principal é que o sistema priorize como entrada de dados (LDR ou

**Figura 1.1:** Foto do protótipo montado e indicações de seus módulos.



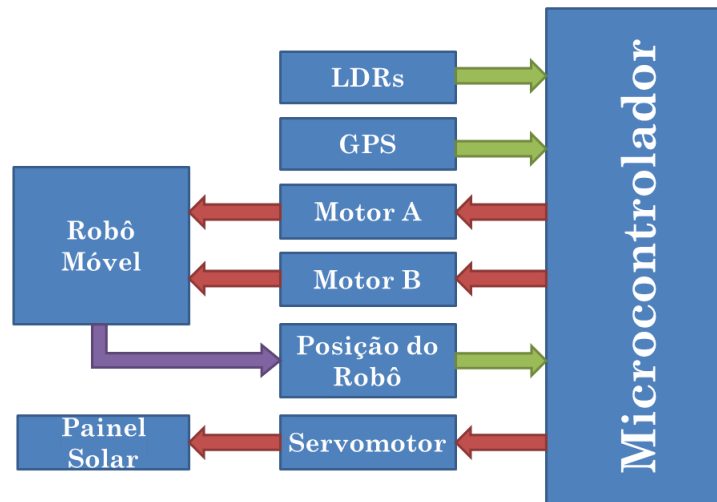
Fonte: Do autor.

GPS) primária a que apresentar melhor desempenho, e comute para a secundário em caso de um eventual problema. Por exemplo, um satélite do GPS com problemas afetando na coleta de dados de posição ou uma fonte de luz artificial interferindo na leitura do LDR causaria esta mudança de entrada de dados.

Assim, o trabalho foi dividido da seguinte forma: Na primeira etapa foi montada a matriz de LDRs em uma superfície de isopor, espaçando-os simetricamente, e também uma interface eletrônica com circuitos multiplexadores CI4051. Os LDRs foram conectados nas entradas dos CIs e o microcontrolador foi conectado nas entradas de controle dos multiplexadores e seus conversores A/D em suas saídas. Em seguida, foi estabelecida a comunicação USART do microcontrolador com o módulo GPS, e decodificado os dados recebidos pela USART.

Em seguida, o microcontrolador, GPS e a matriz de LDRs foram montados juntamente com o robô móvel e um servomotor acoplado a um painel solar, e os dados adquiridos foram utilizados para orientar a posição do robô e do painel, de acordo com os dados. Na Figura 1.2 há um diagrama descrevendo o sistema de uma forma mais geral.

**Figura 1.2:** Diagrama representando a comunicação da matriz de LDRs, o módulo GPS e o microcontrolador.



Fonte: Do autor.

## 1.1 Objetivos Gerais e Específicos

O objetivo deste trabalho é realizar a implementação de um sistema de orientação microcontrolado de painel fotovoltaico em um robô móvel, através do uso de sensores LDR e módulo GPS, com a finalidade de otimizar a captação de energia solar de sistemas fotovoltaicos, como por exemplo, usinas solares. O trabalho será realizado da seguinte forma:

- Os LDRs serão dispostos em uma superfície semiesférica de isopor representando vetores normais a sua superfície, cuja soma vetorial resulta na posição do Sol;
- Um circuito multiplexador será utilizado como interface entre os LDRs e o microcontrolador;
- Um dispositivo GPS será conectado ao sistema e fornecerá dados de posição, data e hora. Estes dados serão utilizados em um conjunto de equações que relacionam a trigonometria entre a Terra e o Sol, e com isso, fornecer sua posição;

## 1.2 Justificativas

Existem diversos sistemas de orientação de painéis fotovoltaicos em ambientes científicos e também na iniciativa privada, porém, a grande maioria destes sistemas são módulos estáticos, havendo poucos aplicados na robótica móvel. Assim sendo, este trabalho visa implementar um sistema de orientação de painel fotovoltaico em um robô móvel, e avaliar seus resultados. Também abrir a discussão para a possibilidade de implementação de uma sistema fotovoltaico composto de robôs móveis, ou seja, uma frota de robôs, que orientam seus painéis solares, que por sua vez estão conectados a inversores, e estes por sua vez estão acoplados na rede elétrica, operando como uma usina inteligente.

## 1.3 Ferramentas Utilizadas

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento *CooCox*, que é um software para escrita do código em linguagem C do microcontrolador, o *software* de simulação e projeto de placas de circuito impresso Proteus, da empresa *Labcenter*, para projeto da placa de interface entre os LDRs, o servomotor e o microcontrolador.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos abordados e necessários para a concepção, execução e compreensão deste trabalho e também há uma revisão do estado da arte, e os trabalhos mais relevantes relacionados a este documento são apresentados. No Capítulo 3, são apresentadas as metodologias utilizadas, as montagens e implementações feitas e os meios de se obter a posição do Sol através de equações que processam os dados fornecidos pelos LDRs e também os dados fornecidos pelo GPS. No Capítulo 4 encontram-se os dados obtidos, entre eles análises da precisão dos sensores utilizados e análise da potência lida no painel para cada abordagem utilizada. No Capítulo 5 é feita uma discussão sobre o trabalho com ênfase nos resultados obtidos.

## 2 Revisão Conceitual

Nesta seção, serão abordados e revistos tópicos necessários para o melhor entendimento deste trabalho, desde conceitos até algumas equações.

### 2.1 Análise do estado da arte

No trabalho de Chobanov (2016), é avaliado o impacto da orientação de painéis solares em redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*). Comumente, painéis fotovoltaicos são orientados para o Sul no hemisfério Norte e para o Norte no hemisfério Sul. Porém este trabalho avaliou painéis distribuídos em diferentes orientações em uma mesma rede. Foi avaliado que para cada tamanho e tipo de carga (rural, industrial ou residencial), há um tipo de orientação para os painéis, de forma que cada caso deve ser avaliado individualmente.

Já no trabalho de Rezaei et al. (2018), é utilizada uma simulação de Monte Carlo para obter o melhor ângulo a ser utilizado ao longo do ano, ou seja, um ângulo fixo que gere o melhor rendimento de energia, levando em conta a temperatura ambiente, irradiação solar e velocidade do vento. O ganho obtido foi de 1,13%

Dentre as contribuições na área, há o trabalho feito por Fei e Lv (2012), que é um robô móvel modular alimentado por energia solar utilizando uma matriz de LDRs multiplexada.

No trabalho de Fei e Lv (2012) foi desenvolvido um módulo solar independente, com sensores de ângulo da luz do Sol, e rotação do painel fotovoltaico com dois graus de liberdade. O robô pode ser dividido em módulo solar, módulo de sensores, módulo de controle, módulo móvel, módulo manipulador. O módulo solar acompanha o Sol e fornece energia para si mesmo e os outros módulos.

O sensor de ângulo solar consiste de uma matriz 5x5 de LDRs dentro de um invólucro com uma pequena fenda em sua face superior. Através dessa fenda, a luz do Sol projeta um feixe na matriz de LDRs. Um conversor Analógico/Digital do

microcontrolador utilizado no módulo de controle lê os valores alterados nos LDRs e processando esses valores, obtêm os ângulos necessários para o posicionamento do painel fotovoltaico.

Este trabalho, entretanto não realizou testes em campo diretamente com a luz solar, apenas com uma lanterna como fonte de luz para o sistema de detecção dos ângulos enquanto o módulo estava parado. Não houve testes em campo com o sistema de orientação em um robô móvel seguindo alguma trajetória.

No trabalho de Chaïb, Kesraoui e Kechadi (2015) o *software* MATLAB é utilizado para determinar os ângulos solares em qualquer horário e qualquer local do globo terrestre. Um controlador robótico com dois graus de liberdade utiliza estes ângulos para corrigir posicionamento de um painel fotovoltaico. Para o controle do posicionamento, foi utilizado um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) utiliza para sua correção os erros entre posição desejada e posição atual, e velocidade desejada e velocidade atual. Foram realizadas simulações no MATLAB e os ângulos solares obtidos foram comparados com o *software* PVSYST, com diferenças entre eles que variavam de 0,27% até 2,11%. Nos testes simulados, foram feitas comparações da irradiação solar diária com painel orientado pelo sistema proposto, com o painel fixo em certas posições, e com o painel com apenas um grau de liberdade.

Embora os resultados tenham sido considerados satisfatórios pelos autores, até o presente momento, não foram realizadas implementações reais do trabalho apresentado.

Em Vastav et al. (2016), o sistema de orientação foi implementado utilizando um CLP (Controlador Lógico Programável) e cinco LDRs dispostos simetricamente do conjunto. Dentre as vantagens de tal implementação, segundo os autores, é a possibilidade de implementação de um sistema fotovoltaico na rede elétrica, de forma a aumentar a geração de energia. Para o trabalho proposto neste documento, o uso de CLP aumenta a robustez e o custo em aplicações para robótica móvel.

No estudo apresentado por Ray e Tripathi (2016), é realizado um estudo comparativo da implementação de LDRs posicionados em um painel trapezoidal em duas topologias, sendo uma em duas extremidades e outra em quatro, para um sistema de orientação de painéis fotovoltaicos fixo. Os resultados obtidos apresentam um estudo comparativo das topologias e apresentam a diferença de custo, o que traz certa relevância, pois nessa seção deste documento, é o único trabalho que realiza um trabalho comparativo de custo.

Uma publicação mais recente nesta área de pesquisa, feito por Mustafa, Al-Ammri e Ahmad (2017), onde usam LDRs e geometria solar para orientação de painéis fotovoltaicos fixos. Neste trabalho, os LDRs são utilizados como sinais de realimentação para correção do posicionamento fornecido pelos dados de geometria solar, como uma forma de ajuste fino. Nos resultados apresentados, foi realizada uma avaliação quantitativa, onde foram apresentados gráficos demonstrando a eficiência do painel comparando um sistema sem orientação com a orientação proposta.

Em Sanguino e Ramos (2013) há uma grande contribuição para a área, pois apresenta um robô móvel com painéis solares e duas baterias. As baterias não são utilizadas simultaneamente. Enquanto uma está sendo carregada, a outra está fornecendo energia para o sistema. O que diferencia o trabalho desta dissertação com o de Sanguino e Ramos (2013) é o fato de que o painel solar alimenta os circuitos ao invés de uma segunda bateria.

A publicação de Plonski, Hook e Isler (2016), consiste em um mapeamento de pontos de onde há maior disponibilidade de luz solar. Esse mapeamento é realizado de duas formas. Uma delas é através de uma interpretação dos dados como um processo estocástico Gaussiano, e a outra através de estimação da geometria do ambiente como uma variável.

No trabalho de Sohag et al. (2015) foi utilizada uma metodologia para rastreamento de posição do Sol utilizando LDRs e processamento de imagem de forma simultânea. Devido a baixa sensibilidade e perturbação existente dos LDRs, foi utilizada uma metodologia que usa um *software* de processamento de imagens do Sol combinado com o efeito dos LDRs de forma a controlar o painel solar. Os LDRs foram distribuídos em uma superfície dividida em 4 quadrantes com divisórias entre si, mais altas que os LDRs, de forma que, de acordo com a movimentação do Sol o sombreamento das divisórias sobre os LDRs gere valores a serem interpretados por um microcontrolador e com isso obter a posição do Sol. Ao mesmo tempo, uma imagem do Sol é capturada e processada pelo *software* responsável, que primeiramente faz uma conversão para escala de cinza e realiza uma filtragem. Com essa filtragem, a imagem capturada se torna monocromática onde o Sol é representado por um objeto de cor branca, e o resto da imagem obtêm a cor preta. Utilizando uma fórmula para obter o centro de massa de objetos irregulares é possível estimar a posição do Sol. A conclusão de tal trabalho foi que LDRs em fusão com o processamento de imagens geram uma eficiência maior na produção de energia Solar.

Em Fonseca-Campos, Fonseca-Ruiz e Cortez-Herrera (2016), foi implementado um sistema portátil para avaliar a posição do Sol usando um receptor GPS e um algoritmo de posição do Sol em *Python*. Esse sistema gera uma curva em três dimensões da trajetória do Sol, do momento do seu nascer até se por. Neste trabalho são citados algoritmos de rastreamento da trajetória solar. Seu trabalho é fortemente baseado no trabalho realizado por Grena (2012), que desenvolveu 5 algoritmos para obter a posição do Sol minimizando o seu erro. Eles utilizam o quinto algoritmo de Grena (2012) neste trabalho. Eles propõem que em trabalhos futuros esta interface possa ler e escrever sinais analógicos ou digitais para controlar sistemas de potência baseados em energia solar.

O trabalho de Dolara et al. (2012) fala a respeito do aumento da eficiência de uma usina fotovoltaica na Itália, onde foi implementado um sistema de orientação com um grau de liberdade, e observado um aumento na eficácia de geração de energia. Porém não há detalhes a respeito de como foi feita a orientação, se por meio de sensores ópticos, ou valores tabelados a serem utilizados pelo sistema.

Em García et al. (2009) temos um trabalho que avalia 6 usinas solares ligadas a rede elétrica da Espanha. Foram analisadas as perdas devido a diversos fatores, inclusive por sistemas de orientação, e feito um estudo para correção destas perdas.

Dado o alto consumo de combustíveis fósseis, e o impacto econômico, e principalmente ambiental de outras formas de geração de energia, como a hidrelétrica, a energia solar tem se tornado a alternativa mais viável devido ao seu baixo impacto e também por ser uma energia renovável (KALOGIROU, 2009).

Dentre as aplicações possíveis da energia solar, podemos citar seu uso em sistemas de potência, cadeira de rodas, veículos tripulados terrestres, como carros, motocicletas, e veículos tripulados aquáticos, como barcos de pequeno e grande porte, além de veículos não tripulados, que são o foco deste trabalho, especificamente, do campo de pesquisa da robótica móvel.

As classificações da ABNT nos possíveis tipos de sistemas fotovoltaicos foram apresentadas, e além de um panorama sobre a orientação de sistemas fotovoltaicos

## 2.2 Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos

Nesta seção serão abordados temas, como o histórico das células fotovoltaicas, os modelos e especificações de sistemas de geração de energia fotovoltaica e a sua classificação, e os sistemas de orientação de painéis fotovoltaicos conhecidos

atualmente.

### 2.2.1 Células Fotovoltaicas

A primeira verificação de conversão de energia solar em elétrica foi em 1839, realizada por Edmond Becquerel, onde foi constada uma tensão nos extremos de uma estrutura de material semicondutor (Selênio - *Se*) exposto a luz. No ano de 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico e apenas em 1956 foi iniciada a produção em escala industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica (OLIVEIRA; CASTELLAIN; FISCHER, 2015). Em 1958 foram desenvolvidas as células de silício, que na época possuíam um rendimento baixo (11%), e um custo demasiado elevado (*US\$1000/W*).

A primeira aplicação prática de células solares foi no espaço, onde haviam altos investimentos, já que não havia outra fonte energética viável disponível para tal aplicação. Pesquisas na década de 1960 levaram a descoberta de outros materiais fotovoltaicos, como o Arseneto de Gálio (*GaAs*), que é capaz de operar em temperaturas mais elevadas comparado ao silício, porém possui um custo maior. Células fotovoltaicas são feitas de semicondutores e os materiais mais comumente utilizados são o silício (*Si*), o sulfeto de cádmio (*CdS*), o sulfeto de cobre I (*Cu<sub>2</sub>S*) e o arseneto de gálio (*GaAs*).

As células de silício podem ser amorfas ou cristalinas. A célula amorfa consiste em átomos de silício em uma fina camada homogênea, e a célula amorfa absorve luz de forma mais eficiente que a cristalina além de serem de menor espessura. A célula amorfa pode ser depositada em várias formas de substratos, tanto rígidos quanto flexíveis. A desvantagem da célula amorfa em relação a cristalina, é que a amorfa possui eficiência menor, porém seu baixo custo e facilidade em fabricar a tornam mais utilizada. Outro fator do porque as células de silício serem mais utilizadas, é o fato de o silício ser um material de grande abundância no mundo.

Se a superfície onde a radiação solar é incidida for escura, a energia solar será transformada em calor, o que caracteriza um sistema de produção de energia elétrica heliotérmico, utilizado em usinas termelétricas, e é indicado para regiões com pouca intensidade de nuvens e baixos índices pluviométricos.

Se a superfície onde a radiação solar é incidida possui células semicondutoras fotovoltaicas, ocorre o efeito fotoelétrico. Para o funcionamento como célula fotovoltaica é necessário um grau de pureza maior, chegando na faixa de 99,9999%. As fotocélulas comerciais atingem uma eficiência de até 15% (OLIVEIRA; CASTEL-

LAIN; FISCHER, 2015), entretanto, há células projetadas que conseguem alcançar uma eficiência próxima de 25% (SOPORI; FRIEDMAN, 2019), sendo que o limite de eficiência utilizando silício é de 29% (BLAKERS et al., 2013). Um conjunto de células fotovoltaicas formam um painel solar, ou painel fotovoltaico.

### 2.2.2 Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica

De acordo com Ball (2017), um sistema de geração de energia fotovoltaica pode estar ligado e sincronizado diretamente a rede elétrica, através de inversores, e pode ser composto tanto de painéis em telhados de edifícios quanto de grandes "fazendas solares" gerando de centenas de quilowatts a centenas de megawatts.

Um sistema fotovoltaico conectado na rede elétrica consiste basicamente de módulos fotovoltaicos, conversor DC-AC, e ligações de fios, relés, chaves e fusíveis. Em sistemas de maior porte são agrupamentos de sistemas menores, com mais subsistemas para seu uso adequado. Os módulos fotovoltaicos são conectados em série até atingir uma tensão que seja adequada ao inversor em uso.

Ainda segundo Ball (2017), sistemas fotovoltaicos podem ser acoplados a rede elétrica para produzir e injetar energia na rede, mas também podem ser construídos no lado do consumidor e não geram mais energia do que a consumida pela carga local, ou faz uso de baterias para armazenar a energia excedente. Esse tipo de sistema costuma ter um custo menor, porém é comum quando a energia gerada excede a demandada, e essa pode ser injetada na rede elétrica.

Grandes edifícios comerciais e industriais podem instalar um sistema fotovoltaico em seus telhados. Um típico prédio comercial possui um telhado plano ou levemente inclinado, permitindo que diversos módulos fotovoltaicos sejam dispostos em sua superfície. Eles podem ser instalados de forma plana, ou com uma inclinação, que pode aumentar a produção de energia ao longo do ano. Entretanto, deve-se levar em conta a velocidade média do vento no local, pois dependendo da inclinação, e se há ou não alguma mureta no telhado, o vento pode mudar a posição do painel, e até mesmo danificá-lo. Existe também a possibilidade de integrar o sistema na estrutura do prédio, como no vidro da parte exterior, por exemplo. Embora tenha um custo elevado, é uma abordagem que utiliza técnicas inovadoras durante o projeto e construção do edifício.

Há também sistemas montados no nível do solo, desde um par de módulos em um poste, até usinas contendo centenas de milhares de módulos. Uma das vantagens dos sistemas montados no solo, é o fato de, caso seja fixo e não orien-

tado, o painel possui uma amplitude de posicionamento maior que o montado no telhado comercial.

### 2.2.3 Classificação de Sistemas Fotovoltaicos

Segundo ABNT (2008), os sistemas fotovoltaicos são classificados como sistemas isolados, sistemas conectados à rede (*On-Grid*), e se dividem em puros (também chamado de autônomos) ou híbridos.

Um sistema isolado não possui contato com a rede de distribuição das concessionárias, enquanto os sistemas conectados à rede fornecem energia para a rede de distribuição.

Um sistema híbrido trabalha em conjunto com outro sistema de geração elétrica, como por exemplo, um gerador eólico, ou gerador a combustão (por exemplo, diesel), ou qualquer outro sistema de geração elétrica. O sistema híbrido pode ou não possuir armazenamento de energia. Um sistema puro, por outro lado, é aquele que não possui outra forma de eletricidade em conjunto, ou seja, gera energia somente durante os períodos em que a luz solar está presente.

### 2.2.4 Orientação de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica, desde sistemas isolados a sistemas conectados a rede, podem utilizar sistemas que orientam o painel de forma a se tornar perpendicular ao Sol. De acordo com Gómez-Gil et al. (2009), o custo de investimento para um sistema de orientação para painéis solares, pode elevar o custo do projeto em 20%, porém pode levar a um aumento do rendimento de até 40%. Pelo maior valor de investimento necessário, poucos sistemas fotovoltaicos são orientados.

No trabalho de Tiberiu e Kreindler (2010), é dito que a maioria dos painéis de usinas fotovoltaicas possui orientação com 1 grau de liberdade, e que este é ajustado manualmente através do ano em intervalos regulares. Entretanto alguma usinas utilizam sistemas de orientação com um ou dois graus de liberdade. Porém, como é feita essa orientação pode variar de acordo com cada usina. Uma possibilidade, por exemplo é através de CLP. Vale salientar que na revisão bibliográfica feita ao longo deste trabalho, não foram obtidos maiores detalhes sobre o funcionamento do sistema de orientação de usinas fotovoltaicas, isto é, se eram utilizados sensores ópticos, GPS, ou qualquer outro instrumento.

Segundo Ball (2017), os tipos mais comuns de sistemas de orientação, ou

seguidores, são:

- Sistema de 1 eixo - O sistema segue do Leste ao Oeste ao longo do dia;
- Sistema de 1 eixo com inclinação no eixo Norte-Sul - Em direção ao Norte no hemisfério Sul e ao Sul no hemisfério Norte;
- Sistema de 2 eixos - Segue do Norte ao Sul ao longo do ano, e de Leste a Oeste ao longo do dia;

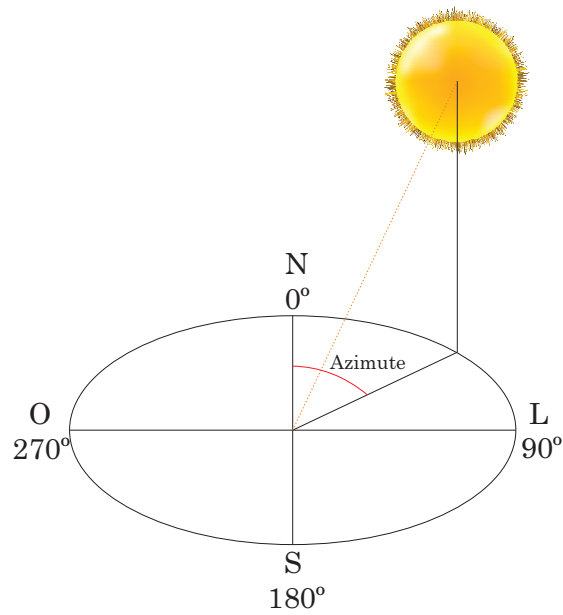
Entretanto, durante o desenvolvimento deste trabalho, não foi encontrado qualquer citação a algum sistema fotovoltaico onde fosse possível os painéis se deslocarem, nem mesmo através de robôs.

## 2.3 Sistema Horizontal de Coordenadas

No campo da astronomia existem sistemas de coordenadas celestes. Dentre os sistemas existentes, o que trabalharemos aqui é o Sistema Horizontal de Coordenadas. Segundo Filho e Saraiva (2012), o Sistema Horizontal possui esse nome pois utiliza como plano fundamental o horizonte celeste.

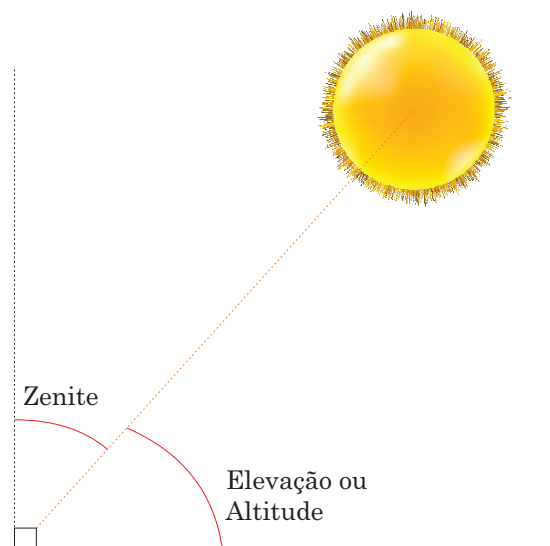
O Sistema Horizontal é um sistema local, ou seja, é fixo na Terra, de forma que possui duas coordenadas, sendo elas Azimute e Altura (ou Elevação ou Altitude). Tais coordenadas dependem da posição e do instante de observação na Terra.

Azimute é o ângulo formado da projeção da posição do Sol no plano da Terra, em relação ao Norte, como visto na Figura 2.1.

**Figura 2.1:** Representação do ângulo Azimute.

Fonte: Do autor.

Zenite é o ângulo formado entre o vetor normal ao plano da Terra e o Sol, como pode ser visto na Figura 2.2. O ângulo complementar ao Zenite é o ângulo de elevação, ou ângulo de altitude.

**Figura 2.2:** Representação dos ângulos Zenite e Elevação/Altitude.

Fonte: Do autor.

## 2.4 Efeito Fotoelétrico

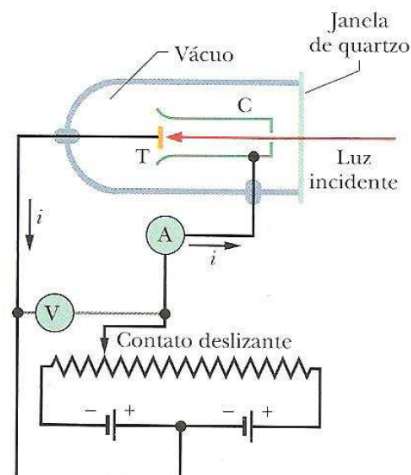
Quando uma superfície metálica é iluminada por um raio luminoso de comprimento de onda suficientemente pequeno, a luz faz com que os elétrons desse metal sejam emitidos. Essa é a denominação de efeito fotoelétrico. No início da pesquisa sobre este efeito, foram realizados dois experimentos iniciais de grande importância neste campo. Ambos são sobre uma montagem em que uma luz de frequência  $f$  incide em um alvo T e o coletor C usado para recolher os elétrons, chamados de fotelétrons.

O primeiro experimento consiste em ajustar o potencial elétrico  $V$  usando o contato deslizante visto na Figura 2.3 para que o coletor C fique ligeiramente negativo em relação ao alvo T (HALLIDAY, 2009). Esse potencial reduz a velocidade dos elétrons ejetados. Então elevamos  $V$  até  $V_{corte}$ , que é o valor em que a corrente medida pelo amperímetro da Figura 2.3 é nula. A energia cinética dos elétrons é dada pela Eq. 2.1.

$$K_{max} = eV_{corte} \quad (2.1)$$

onde ' $e$ ' é a carga do elétron. Esse experimento mostra que para uma luz de determinada frequência, o valor de  $K_{max}$  não depende da intensidade da luz incidente.

**Figura 2.3:** Montagem usada para experimento do efeito fotoelétrico.



Fonte: (HALLIDAY, 2009).

O segundo experimento consiste em medir  $V_{corte}$  para várias frequências  $f$  da luz incidente. Esse experimento mostra que há uma frequência mínima  $f_0$  que é necessária para o efeito fotoelétrico, ou seja, ele só é observável se a frequência for

maior que  $f_0$  (HALLIDAY, 2009). Einstein resumiu os resultados dos experimentos na Eq. 2.2.

$$hf = K_{max} + \Phi \quad (2.2)$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $h = 6.63 \times 10^{-34} [J \cdot s]$ ), e  $\Phi$  é a função de trabalho do alvo. Através de manipulações algébricas, e levando em conta o princípio da conservação da energia, obtemos a Eq. 2.3.

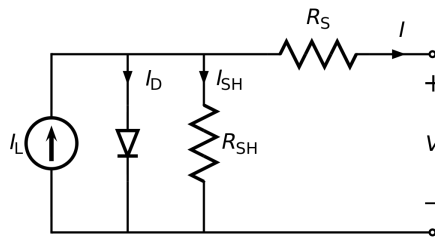
$$V_{corte} = \frac{h}{e}f - \frac{\Phi}{e} \quad (2.3)$$

Assim como  $h$ ,  $e$ , e  $\Phi$  são constantes, temos que  $V_{corte}$  depende linearmente da frequência da luz incidida.

## 2.5 Modelo do painel solar

Um painel solar pode ser representado como o circuito elétrico visto na figura 2.4. O modelo citado neste texto é o mesmo encontrado em Lorenzo (1994), que considera um diodo, uma resistência *shunt* (ou paralela), e uma resistência em série.

**Figura 2.4:** Modelo elétrico de um painel solar.



Fonte: (LORENZO, 1994).

O diodo representa a junção p-n da célula solar, possuindo corrente de saturação  $I_0$ , fator de idealidade  $m$  e corrente de fonte ideal  $I_L$ .

As resistências representam certos comportamentos de uma célula solar. A resistência paralela representa o escoamento de corrente proporcional a tensão do painel solar, e nem sempre pode ser representado por uma resistência de valor constante. A resistência paralela tem seu efeito mais intensificado quando a tensão do painel tende a valores mais baixos, ou seja, quando a corrente que passa pelo diodo é insignificante. O escoamento mencionado pode ser originado das quinas das células fotovoltaicas. Embora seu cálculo seja demasiado complexo, na

maioria dos casos práticos, essa resistência possui menor relevância em condições normais de operação.

A resistência em série, por outro lado, se deve graças a resistência nos contatos metálicos dos semicondutores além de suas próprias resistências intrínsecas. A Equação (2.4), representa o modelo apresentado nesta seção.

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{e(V+IR_S)}{mkT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.4)$$

## 2.6 Equações de Ângulos do Sistema Horizontal de Coordenadas

Para o cálculo dos ângulos solares, são utilizadas equações que possuem primariamente como parâmetro de entrada a posição local em latitude e longitude, o horário local e fuso-horário. No trabalho de Grena (2012), ainda há mais parâmetros de entrada, como pressão atmosférica e temperatura, utilizados para realizar correção nos ângulos devido a refração. Aqui utilizaremos o conjunto de equações de Duffie e Beckman (2013) para o cálculo dos ângulos solares necessários.

Ao se medir o tempo convencionalmente, as regiões do planeta são divididas em zonas de tempo, que definem os fusos horários de grande parte do mundo. Entretanto, nestas zonas, ao meio dia não é necessariamente o horário em que o Sol se encontra em seu ponto mais alto no céu. O momento em que o Sol se encontra no seu ponto mais alto será chamado de LST (*Local Solar Time* - Hora Solar Local). Da mesma maneira, outros instantes como o nascer e o por do Sol, também não ocorrem de maneira linear e uniforme em cada zona. Embora tais diferenças não alteram como nossa sociedade vive, elas são significantes ao calcular a posição do Sol.

O primeiro passo para o cálculo dos ângulos solares é o cálculo do LSTM (*Local Standard Time Meridian* - Meridiano de Tempo Local Padrão), que é o meridiano de referência para alguma zona em especial, visto na Eq. 2.5, onde  $\Delta T_{GMT}$  é a diferença entre a hora local e a hora do meridiano de Greenwich em horas.

$$LSTM = 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT} \quad (2.5)$$

Em seguida, calculamos o termo  $E$  (*Equation of Time* - Equação do Tempo), dada em minutos, para correções em função da excentricidade da órbita elíptica

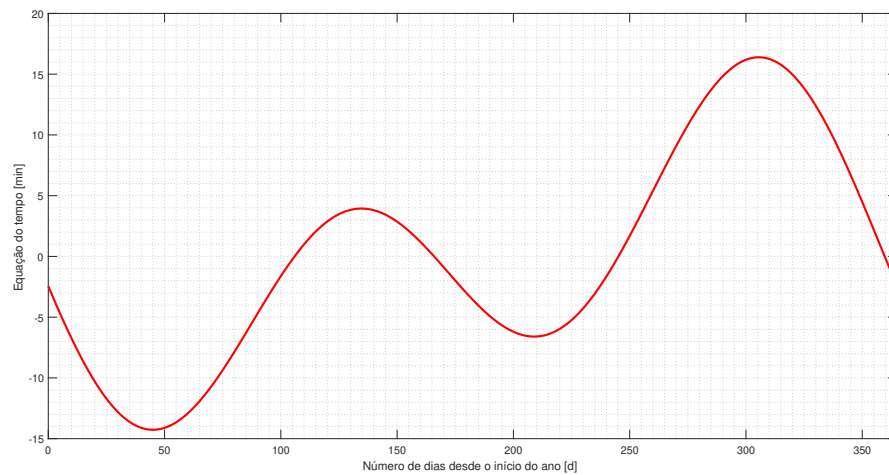
da Terra e da inclinação de seu eixo, como visto na Eq. 2.6.

$$E = 229,2[0,000075 + 0,001868\cos(B) - 0,032077 \sin(B) - 0,014615\cos(2B) - 0,04089 \sin(2B)] \quad (2.6)$$

Sendo que o termo  $B$  é dado pela Eq. 2.7 e  $n$  é o número de dias que se passaram desde o início do ano atual. Na Figura 2.5 vemos o gráfico da resposta da Eq. 2.6.

$$B = 360^\circ \frac{(n - 1)}{365} \quad (2.7)$$

**Figura 2.5:** Gráfico da Eq. 2.6, onde o eixo vertical é a EoT em minutos, e o eixo horizontal é o número de dias desde o início do ano.



Fonte: Do autor.

O passo seguinte, é calcular o TC (*Time Correction Factor* - Fator de Correção do Tempo), dado em minutos, que pode ser visto na Eq. 2.8. Ele ajusta uma possível variação no LST em uma dada zona, levando em conta também o EoT, sendo que  $L_{lon}$  é a longitude.

$$TC = 4(LSTM - L_{lon}) + EoT \quad (2.8)$$

Com estes valores, podemos obter o LST, dado pela Eq. 2.9, onde  $LT$  é a hora local.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (2.9)$$

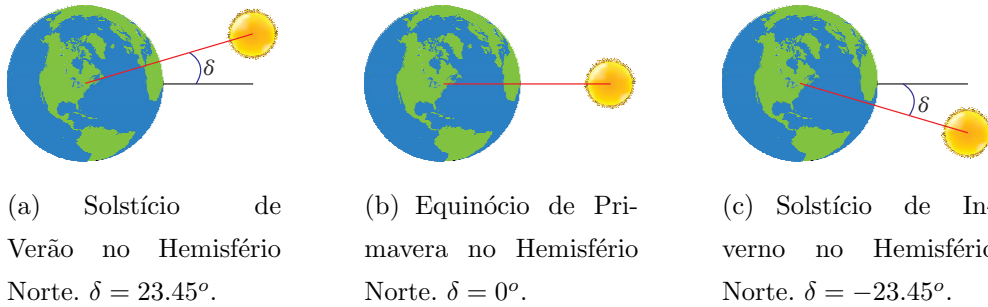
O próximo termo a ser calculado é o HRA (*Hour Angle* - Ângulo de Hora), representado aqui pelo símbolo  $\omega$ , e representado pela Eq. 2.10. Ele converte o LST no número de graus que o Sol se move pelo céu. Por definição, ele vale  $0^\circ$

quando o Sol está a pino. Como a Terra possui um movimento angular de  $15^\circ$  por hora, cada hora que passa é um movimento de  $15^\circ$  do Sol no céu. Durante a manhã o valor de  $\omega$  é negativo e durante a tarde é positivo.

$$\omega = 15^\circ(LST - 12) \quad (2.10)$$

Outro argumento a ser calculado é o Ângulo de Declinação ( $\delta$ ). Ele é o ângulo formado entre a linha do equador e uma linha que passa do centro da Terra ao centro do Sol, e pode ser observado na Figura 2.6.

**Figura 2.6:** Representação gráfica do Ângulo de Declinação.



Fonte: Do autor.

O cálculo de  $\delta$  é dado pela Eq. 2.11.

$$\delta = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left( \frac{284 + n}{365} 360^\circ \right) \quad (2.11)$$

Com os argumentos supracitados devidamente calculados, é possível obter os ângulos de elevação, azimute, e zênite. O ângulo de elevação, aqui chamado de  $\alpha$  é dado por pela Eq. 2.12, onde  $L_{lat}$  é a latitude local (positiva no hemisfério Norte e negativa no hemisfério Sul).

$$\alpha = \operatorname{sen}^{-1} [\operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(L_{lat}) + \cos(\delta) \cos(L_{lat}) \cos(\omega)] \quad (2.12)$$

O ângulo de azimute é dado pela Eq. 2.13.

$$\gamma_{Az} = \cos^{-1} \left[ \frac{\operatorname{sen}(\delta) \cos(L_{lat}) - \cos(\delta) \operatorname{sen}(L_{lat}) \cos(\omega)}{\cos(\alpha)} \right] \quad (2.13)$$

O ângulo da distância do zenite é dado pela Eq. 2.14.

$$\gamma_{Ze} = \cos^{-1} [\operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(L_{lat}) + \cos(\delta) \cos(L_{lat}) \cos(\omega)] \quad (2.14)$$

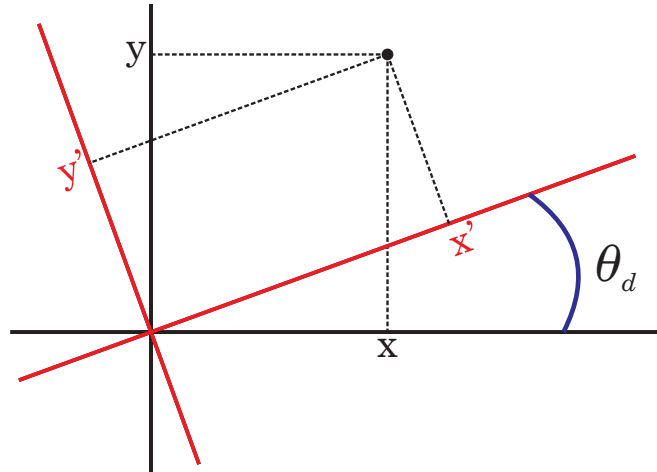
Outra representação da Eq. 2.14 é a Eq. 2.15.

$$\gamma_{Ze} = 90^\circ - \alpha \quad (2.15)$$

## 2.7 Rotação de Eixos

Rotação de eixos é uma maneira de remapear coordenadas no plano  $x$ - $y$  em um plano  $x'$ - $y'$ , rotacionando um ângulo  $\theta_d$ , como visto na Figura 2.7.

**Figura 2.7:** Um sistema de coordenadas  $x$ - $y$  rotacionado em  $\theta_d$  para um sistema  $x'$ - $y'$ .



Fonte: Do autor.

Para obter a referência do ponto ao rotacionar, primeiramente deve-se realizar uma conversão em coordenadas polares, como visto na Eq. 2.16 e na Eq. 2.17.

$$x = r \cos(\theta) \quad (2.16)$$

$$y = r \sin(\theta) \quad (2.17)$$

Para rotacionar como visto na Figura 2.7, as equações acima são defasadas pelo ângulo  $\theta_d$ , se tornando a Eq. 2.18 e a Eq. 2.19.

$$x' = r \cos(\theta - \theta_d) = r \cos(\theta) \cos(\theta_d) + r \sin(\theta) \sin(\theta_d) = x \cos(\theta_d) + y \sin(\theta_d) \quad (2.18)$$

$$y' = r \sin(\theta - \theta_d) = r \sin(\theta) \cos(\theta_d) - r \cos(\theta) \sin(\theta_d) = y \cos(\theta_d) - x \sin(\theta_d) \quad (2.19)$$

Representando na forma matricial, obtemos a Eq. 2.20.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_d) & \sin(\theta_d) \\ -\sin(\theta_d) & \cos(\theta_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Neste trabalho, a função vetorial de rotação será chamada de  $R(x, y, \theta_d)$  de

acordo com a Eq. 2.21.

$$\mathbf{R}(x, y, \theta_d) = [x \cos(\theta_d) + y \operatorname{sen}(\theta_d)]\hat{i} + [y \cos(\theta_d) - x \operatorname{sen}(\theta_d)]\hat{j} \quad (2.21)$$

## 2.8 Filtro Média Móvel

Média móvel é um tipo de filtro muito simples e comum no processamento digital de sinais. Seu propósito é o de reduzir ruído aleatório enquanto mantém uma boa resposta ao degrau, e embora apresente um péssimo desempenho para sinais codificados no domínio da frequência, ele é um dos melhores para sinais codificados no domínio do tempo (SMITH, 2013).

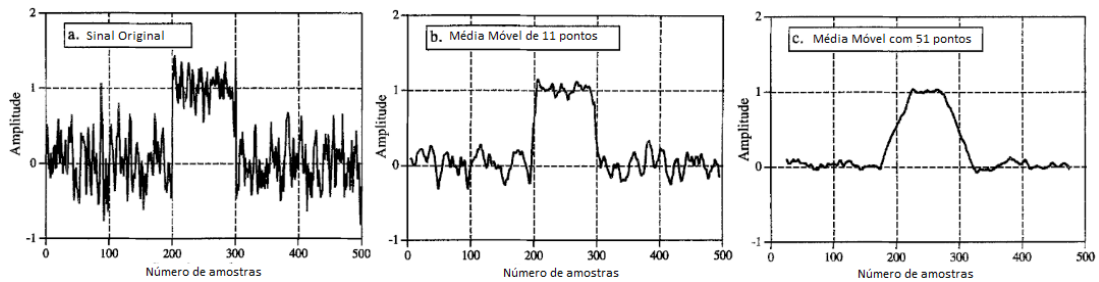
Como o próprio nome diz, o filtro média móvel opera calculando a média de um certo número de pontos do sinal de entrada para produzir cada ponto no sinal de saída. A representação em forma de equação pode ser vista na Eq. 2.22.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k] \quad (2.22)$$

O filtro média móvel equivale a realizar uma convolução do sinal com uma janela de  $N$  impulsos com magnitude  $\frac{1}{N}$ . Como exemplo, um filtro de 4 pontos seria equivalente a  $(\dots, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, 0, 0, \dots)$ . Ou seja, o pulso retangular possui área igual a 1.

Como exemplo de aplicação do filtro média móvel, podemos observar a Figura 2.8. Nela vemos um sinal e seu resultado após a aplicação de um filtro média móvel com 11 pontos e com 51 pontos respectivamente.

**Figura 2.8:** Exemplo de filtro média móvel, onde (a) é o sinal original, (b) é o sinal com filtrado com média móvel de 11 pontos e (c) é a filtragem com 51 pontos.

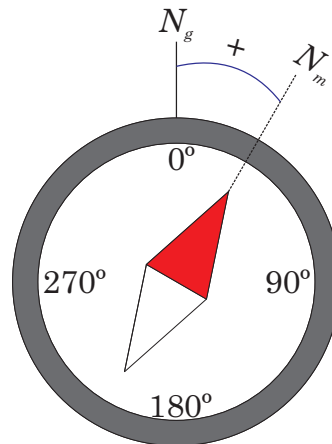


Fonte: Adaptado de Smith (2013).

## 2.9 Declinação Magnética

Existe uma diferença angular entre o Norte geográfico e o Norte magnético. Essa diferença se chama declinação magnética, e pode ser vista na Figura 2.10.

**Figura 2.9:** Exemplo de declinação magnética positiva, onde  $N_g$  é o Norte geográfico e  $N_m$  é o Norte magnético.



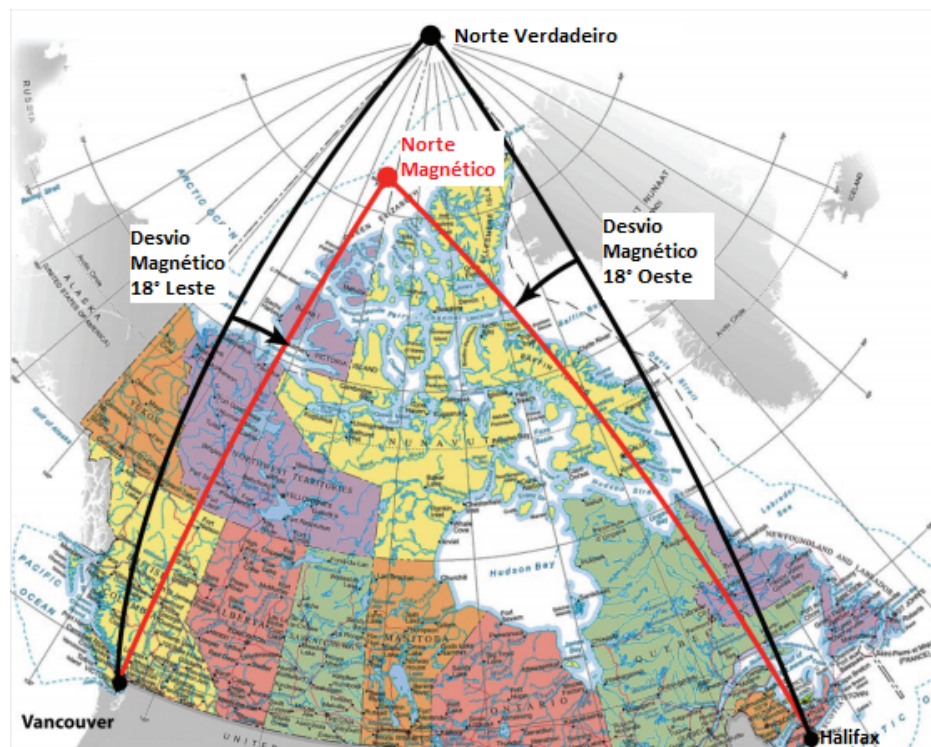
Fonte: Do autor.

O Norte geográfico, também chamado de Norte verdadeiro junto com o sul verdadeiro, são pontos por onde cruza o eixo de rotação da Terra (PRINET, 2016). Todos os meridianos na Terra convergem para o Norte verdadeiro.

O movimento da lava sobre o núcleo de ferro da Terra gera um fluxo elétrico, que por sua vez cria campos magnéticos. Essas linhas de campo magnético saem da Terra pelo Norte magnético e retornam ao sul magnético, próximo ao polo Sul. Pelos últimos milhares de anos, o Norte magnético esteve na região Norte do Canadá, porém nos últimos séculos tem se movido sentido Norte-Noroeste a uma taxa de 50km/ano (PRINET, 2016). Na Figura 2.10, podemos observar em um mapa a diferença entre o Norte magnético e o Norte verdadeiro.

Bússolas eletrônicas nada mais são do que magnetômetros que detectam o campo magnético da terra e nos apontam o Norte magnético. Tendo conhecimento do ângulo de declinação magnético ao redor do mundo, é possível corrigir essa defasagem e obter a posição do Norte geográfico, que por sua vez é a informação de interesse neste trabalho para obter a posição do Sol.

Figura 2.10: Polos Norte Verdadeiro e Magnético.



Fonte: Adaptado de Prinnet (2016).

## 2.10 GPS

Nesta seção, serão abordados os tópicos pertinentes GPS, como seu histórico e funcionamento, e também sobre o padrão da informação por este transmitida.

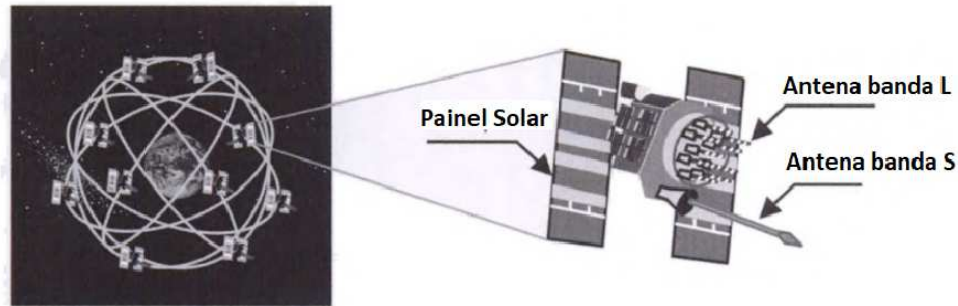
### 2.10.1 Histórico e Funcionamento

GPS (*Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global) é um sistema de navegação baseado em satélites desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos no início da década de 70. Este sistema fornece continuamente informações sobre tempo e posição em qualquer local do globo terrestre.

Ele consiste nominalmente de uma constelação de 24 satélites operacionais. Essa constelação chamada de IOC (*Initial Operational Capability* - Capacidade Operacional Inicial) foi completada e anunciada em 1993. Para garantir cobertura em escala mundial, os satélites são organizados de modo que 4 satélites sejam alocados a cada 6 planos orbitais, como visto na Figura 2.11. Com essa geometria de constelação, de 4 até 10 satélites, serão visíveis em qualquer parte do mundo. O sistema de GPS foi oficialmente declarado ter sua capacidade operacional com-

pleta (FOC - *Full Operational Capability*) em 1995, garantindo a disponibilidade de pelo menos 24 satélites operacionais, não experimentais (EL-RABBANY, 2002).

**Figura 2.11:** Constelação do GPS.



Fonte: Adaptado de El-Rabbany (2002).

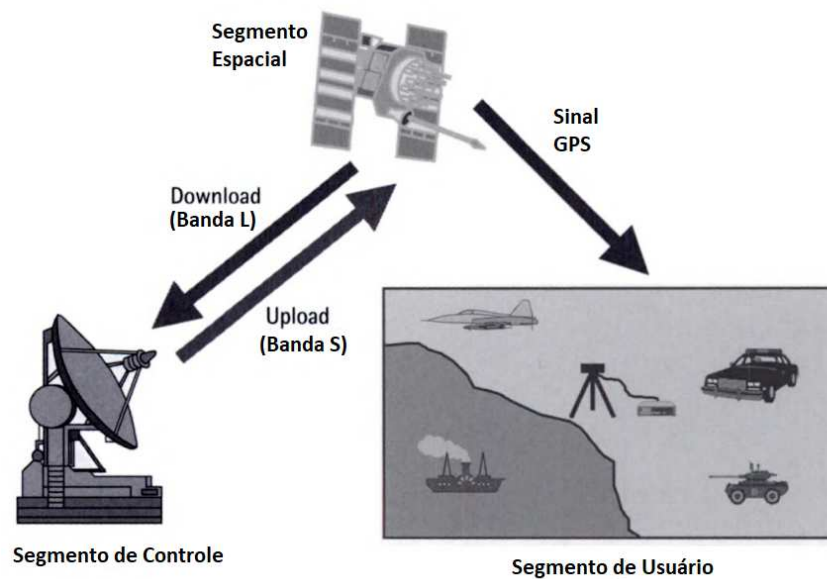
O sistema GPS consiste em três segmentos: O espacial, o de controle, e o de usuário. Estes segmentos podem ser vistos na Figura 2.12. O segmento espacial consiste na constelação de satélites supracitada. Cada satélite transmite um sinal composto por: Duas ondas senoidais portadoras, dois códigos digitais e uma mensagem de navegação. Os códigos e as mensagens de navegação são adicionados as portadoras como modulação binária bifásica. As portadora e os códigos são utilizados para determinar a distância entre o receptor do usuário e os satélites. (EL-RABBANY, 2002).

A mensagem de navegação contem, além de outras informações, as coordenadas dos satélites em função do tempo. Os sinais são controlados por relógios atômicos de alta precisão nos satélites.

O segmento de controle do GPS consiste de uma rede de estações de rastreamentos, com uma estação de controle mestre (MCS - *Master Control Station*) localizada em Colorado Springs, no estado do Colorado nos EUA. A principal tarefa deste segmento é localizar os satélites de modo a determinar e prever as localizações dos satélites, integridade do sistema, comportamento dos relógios atômicos dos satélites, dados atmosféricos, o almanaque do satélite, que é um conjunto de informações sobre o estado de integridade física de toda a constelação, e dados brutos sobre todas as órbitas de satélite, além de outras informações. Essas informações são enviadas aos satélites através de um *link* de banda S.

O segmento de usuários inclui tanto usuários civis quanto militares. Com um

Figura 2.12: Segmentos do GPS.



Fonte: Adaptado de El-Rabbany (2002).

receptor GPS conectado a antena GPS, um usuário pode receber os sinais GPS, que podem ser usados para determinar sua posição em qualquer lugar do mundo. Atualmente o sistema GPS está disponível para todos os usuários sem cobrança direta.

### 2.10.2 Padrão NMEA 0183

A sigla NMEA significa *National Marine Electronics Association*, que em português é "Associação Nacional de Eletrônica Marinha". Ela foi fundada em 1957 por um grupo de comerciantes na área de eletrônica que se conheceram em um evento em Nova York com o fim de fortalecer as relações entre fabricantes de eletrônicos (NMEA, 2018).

Nesse meio tempo, a NMEA criou laços com a FCC (*Federal Communications Commission* - Comissão Federal de comunicações), a Guarda Costeira dos Estados Unidos e a RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services* - Comissão Técnica de Rádio para Serviços Marítimos).

A NMEA por sua vez, desenvolveu um tipo de especificação chamado NMEA 0183. NMEA 0183 é um conjunto de especificação de dados para comunicação entre computadores e dispositivos de navegação, como anemômetros, ecolocalizadores, girocompassos, piloto automático, receptores GPS, entre outros.

A maioria dos computadores e dispositivos que fornecem posição em tempo

real compreendem e esperam receber dados nesse formato. Esses dados fornecem posição, velocidade e tempo calculados pelo dispositivo em questão. O conceito estabelecido pela NMEA é de enviar uma linha de dados chamada frase (em inglês *sentence*). Essa frase é fechada independente de qualquer outra frase. Existem frases padrão para cada tipo de dispositivo, sendo estas definidas por um prefixo (no caso de um GPS, o prefixo é GP). Após o prefixo há um código de 3 letras que define o tipo de conteúdo da frase. Além disso, a NMEA permite que fabricantes criem códigos próprios além dos padrão, de acordo com a sua necessidade.

Cada frase começa com o caractere '\$', e se encerra com um "Nova Linha", que seria o equivalente a pressionar a tecla "Enter" ao digitar um texto em um computador pessoal, ou ainda o comando '\n' para imprimir em comunicação RS-232, sendo que a frase deve conter no máximo 80 caracteres de texto visível. Os dados contidos na frase são separados entre si por vírgulas. Os dados são texto em formato ASCII, e programas que leem as frases utilizam as vírgulas para distinguir uma informação da outra dentro da frase. Ao final de cada frase, antes da "Nova Linha", há dois dígitos hexadecimais que é o *byte* de *checksum*, que é o resultado de uma operação lógica XOR de todos os caracteres da frase, com exceção do '\$', das vírgulas e do próprio *checksum*.

A conexão em *hardware* recomendada pela NMEA é a EIA-422 (Antiga RS-422), porém ainda há compatibilidade com o padrão RS-232. A velocidade é ajustável, mas o padrão estipulado é de 4800 b/s (bits por segundo), com 8 bits de dados, sem paridade, e um *stop bit* (bit de parada). Os dispositivos GPS com padrão NMEA podem enviar dados a cada 2 segundos, a cada 1 segundo ou assim que um novo dado é coletado. No dispositivo utilizado neste trabalho, as configurações utilizadas pelo fabricante são a de taxa de envio de 1 segundo e baud rate de 9600 b/s.

Cada frase NMEA contém uma informação diferente de outras frases de códigos distintos. As frases fornecidas pelo dispositivo GPS (SIRF TECHNOLOGY, INC., 2005) e utilizadas neste trabalho são: RMC, VTG, GGA, GSA, GSV, GLL.

A frase RMC significa *Recommended Minimum* (Mínimo Recomendado), e fornece posição, velocidade e tempo, sendo esta frase uma versão própria e essencial do padrão NMEA. Na Tabela 2.1 há um exemplo desta frase com seu determinado prefixo fornecido pelo dispositivo GPS.

**Tabela 2.1:** Exemplo de frase RMC.

\$GPRMC, 134759.00, A, 2319.68361, S, 05112.15109, W, 0.019, , 170518, , , A * 78	
Elemento da frase	Significado
134759.00	Horário no meridiano de Greenwich (13h47min59s)
A	Status (A significa ativado e V é vazio)
2319.68361,S	Latitude 23.1968361° Sul
05112.15109,W	Longitude 51.1215109° Oeste
0.019	Velocidade sobre a superfície em nós;
170518	Data (17 de Maio de 2018);
*78	<i>Checksum</i> dos dados da frase

A frase VTG significa *Velocity Made Good* que nos fornece o vetor da velocidade de deslocamento na forma angular. Na Tabela 2.2 há um exemplo.

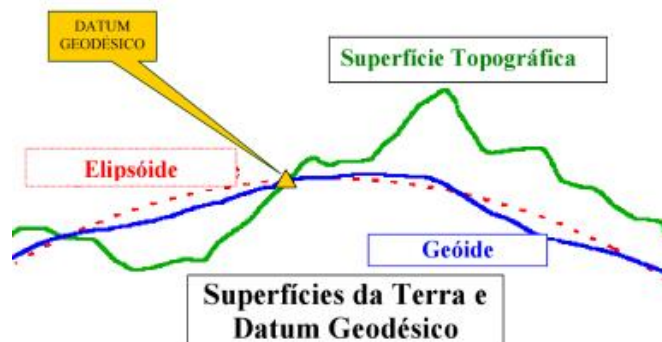
**Tabela 2.2:** Exemplo de frase VTG, onde as medidas de ângulos são dadas em graus.

\$GPVTG, 054.7, T, 034.4, M, 005.5, N, 010.2, K * 48	
Elemento da frase	Significado
054.7,T	Ângulo do vetor de velocidade em relação ao Norte geográfico
034.4,M	Ângulo do vetor de velocidade em relação ao Norte magnético
005.5,N	Velocidade terrestre em nós
010.2,K	Velocidade terrestre em quilômetros por hora
*48	<i>Checksum</i> dos dados da frase

A frase GGA fornece todos os dados de posicionamento e condição dos satélites. Segue como exemplo a Tabela 2.3.

**Tabela 2.3:** Exemplo de frase GGA.

\$GPGGA, 123519, 4807.038, N, 01131.000, E, 1, 08, 0.9, 545.4, M, 46.9, M, , *47	
Elemento da frase	Significado
123519	Horário (12h35min19s)
4807.038,N	Latitude (48°07.038') Norte
01131.000,E	Longitude (11°31.000') Leste
1	Qualidade do Sinal segundo a Tabela 2.4
08	Número de satélites rastreados
0.9	Diluição horizontal de posição
545.4,M	Altitude em metros acima do nível do mar
46.9,M	Altitude acima do elipsoide WGS84, visto na Figura 2.13
*47	Checksum dos dados da frase

**Figura 2.13:** Elipsoide WGS84 que ocupa a porção média da superfície topográfica mundial.

Fonte: Parzzanini (2006).

**Tabela 2.4:** Qualidade do sinal para a frase GGA.

Código	Significado
0	Sinal inválido
1	Sinal inválido
2	Sinal GPS adquirido
3	Sinal DPGS adquirido, onde DGPS significa GPS Diferencial e é uma abordagem mais precisa que o GPS, porém não está disponível no mundo inteiro
4	Cinemática em tempo real, que é uma técnica onde uma estação fornece correções em tempo real melhorando a precisão com erro na ordem de cm
5	Cinemática em tempo real flutuante, que é uma técnica semelhante a anterior, porém com um erro maior, entre 20cm e 100cm
6	Sinal estimado, quando não é possível obter exatamente as coordenadas, elas são estimadas pelo ponto de origem e suas variações de velocidade, direção e tempo decorrido;
7	Modo de entrada manual, onde o sinal não é fornecido por satélites, mas inserido manualmente
8	Modo de simulação

A frase GSA fornece informações a respeito dos satélites ativos, e também diluição de precisão e seus respectivos PRN (*Pseudorandom Noises* - Ruídos Pseudoaleatórios). Como exemplo podemos observar a Tabela 2.5.

**Tabela 2.5:** Exemplo de frase GSA.

\$GPGSA, A, 3, 04, 05, , 09, 12, , , 24, , , , 2.5, 1.3, 2.1 * 39	
Elemento da frase	Significado
A	Seleção de 3D ou 2D automática (M caso seja manual)
3	Número de dimensões rastreadas
03, 05	PRN dos satélites utilizados
2.5	PDOP (Diluição de precisão em 3 dimensões)
1.3	HDOP (Diluição de precisão horizontal)
2.1	VDOP (Diluição de precisão vertical)
*39	<i>Checksum</i> dos dados da frase

A frase GSV significa *Satellites in View*, ou, Satélites Visualizados. Dependendo da quantidade de satélites visualizados, essa frase pode se repetir algumas vezes para poder fornecer toda a informação disponível, já que cada frase suporta informações suficientes para até 4 satélites. Ela fornece o número do PRN do satélite, sua posição em azimute e elevação e sua SNR (*Signal Noise Ratio* - Razão Sinal Ruído), que quanto maior melhor. Segue como exemplo a Tabela 2.6.

**Tabela 2.6:** Exemplo de frase GSV.

\$GPGSV, 2, 1, 08, 01, 40, 083, 46, 02, 17, 308, 41, 12, 07, 344, 39, 14, 22, 228, 45 * 75	
Elemento da frase	Significado
2	Número de vezes que a frase se repete para fornecer toda a informação disponível
1	Índice da frase GSV
08	Número de satélites visualizados
01	Número de PRN do satélite
40	Ângulo de elevação da posição do satélite em graus
083	Ângulo de azimute do satélite em graus
46	SNR do satélite
02	Número de PRN do segundo satélite
17	Ângulo de elevação do segundo satélite em graus
308	Ângulo de azimute do segundo satélite em graus
41	SNR do segundo satélite
12	Número de PRN do terceiro satélite
07	Ângulo de elevação do terceiro satélite em graus
344	Ângulo de azimute do terceiro satélite em graus
39	SNR do terceiro satélite
14	Número de PRN do quarto satélite
22	Ângulo de elevação do segundo quarto em graus
228	Ângulo de azimute do segundo quarto em graus
45	SNR do quarto satélite
*75	<i>Checksum</i> dos dados da frase

A frase GLL significa *Geographic Latitude and Longitude* - Latitude e Longitude Geográfica, e fornece a posição em latitude, longitude e o horário, como visto na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7:** Exemplo de frase GLL.

\$GPGLL, 4916.45, N, 12311.12, W, 225444, A, *1D	
Elemento da frase	Significado
4916.45,N	Latitude 49°16.45' Norte
12311.12,W	Longitude 123°11.12' Oeste
225444	Horário (22 h 54 min 44 s)
A	Dados Ativos (Caso seja V, o sinal está vazio)
*1D	<i>Checksum</i> dos dados da frase

## 2.11 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foram abordados diversos conceitos, como histórico da energia solar, os sistemas de coordenadas celestes. Com estes conceitos bem estabelecidos, é possível compreender melhor as metodologias aplicadas no desenvolvimento destes trabalho.

## 3 Metodologias Utilizadas

As metodologias utilizadas neste trabalho, visam otimizar a captação solar de painéis fotovoltaicos, melhorando o desempenho de diversos sistemas dependentes de energia solar, desde sistemas de pequeno porte até usinas elétricas. O foco principal é o desenvolvimento de metodologias que melhorem a produção de energia solar utilizando robôs móveis como plataformas de deslocamento de painéis fotovoltaicos. Neste capítulo podemos ver as duas principais abordagens utilizadas. Uma com LDRs e outra com coordenadas fornecidas por um GPS.

### 3.1 Dispositivos e Componentes Utilizados

Nesta seção estão listados os principais componentes e dispositivos utilizados neste trabalho, e suas características mais relevantes.

#### 3.1.1 Painel solar, Controlador e Bateria

O painel solar utilizado neste trabalho possui potência máxima de 10 W, tensão máxima de saída de 18 V, e corrente de pico de 560 mA. O painel pode ser visto na Figura 3.1.

**Figura 3.1:** Foto do painel solar utilizado neste trabalho.



Fonte: Do autor.

Também foi utilizada uma bateria selada de 12 V e carga de 7 Ah.

**Figura 3.2:** Foto da bateria utilizada.



Fonte: Do autor.

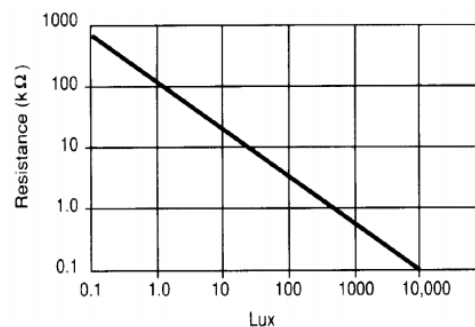
Para conectar e controlar o sistema com o painel e a bateria, foi utilizado um controlador de carga de painel solar, que pode ser visto na Figura 3.3. De acordo com as informações do fabricante, conecta-se tanto a bateria, quanto o painel solar e a carga utilizada neste controlador, e ele manterá a tensão de saída em 12 V. Este controlador é amplamente utilizado em sistemas fotovoltaicos e além de realizar um controle da tensão entre painel solar, bateria e carga, ele também proteções para curto-circuito, sobretensão, subtensão, e tensão reversa.

**Figura 3.3:** Foto do controlador utilizado.

Fonte: Do autor.

### 3.1.2 LDR

O LDR (*Light Depending Resistor* - Resistor Dependente de Luz), também chamado de Fotorresistor, é um componente semicondutor, com alta resistência, construído de sulfeto de cádmio (CaS), cuja resistência diminui quando aumenta a incidência de radiação luminosa, como visto na Figura 3.4.

**Figura 3.4:** Resistência em função da iluminação.

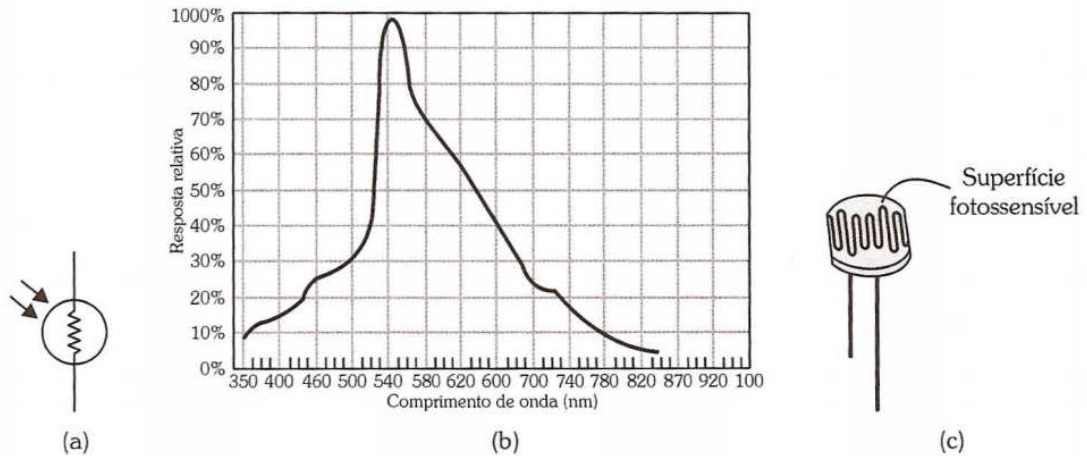
Fonte: (SUNROM TECHNOLOGIES, 2008).

Se a luz incidida no componente possui uma frequência alta o suficiente, os fótons absorvidos dão aos elétrons fixos energia suficiente para saltar para a banda de condução, resultando em um elétron livre e sua respectiva lacuna, que conduzem eletricidade, assim diminuindo a resistência (PRINCETON.EDU, 2018).

Na Figura 3.5 podemos observar algumas características do componente.

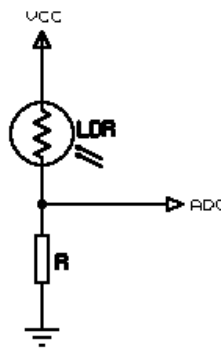
A forma mais comum de se obter uma leitura da quantidade de luz incidida em um LDR utilizando um ADC, é através de um circuito divisor de tensão.

**Figura 3.5:** Algumas informações do LDR, entre elas: (a) Símbolo, (b) Resposta espectral, (c) Aspecto físico.



Fonte: (ALBUQUERQUE; SEABRA, 2009).

**Figura 3.6:** Exemplo de circuito divisor de tensão com LDR.

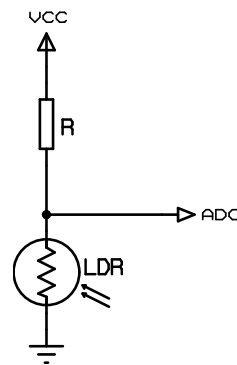


Fonte: Do autor.

A desvantagem do circuito da Figura 3.6, é que caso a luz incidida no LDR seja muito intensa, ele terá uma resistência muito baixa, e tenderá a um curto circuito, o que pode fazer com que haja um elevado fluxo de corrente para o ADC. Uma forma de contornar isso, é simplesmente trocar o LDR e a resistência do divisor, como visto na Figura 3.7. Neste trabalho, entre o divisor de tensão e o ADC, há um circuito multiplexador 4051 e, segundo o *datasheet* do fabricante, sua impedância de entrada é elevada ( $Z_{in} \approx 18M\Omega$ ).

Desta forma, a tensão do LDR lida pelo ADC será dada pela Eq. 3.1.

$$V_{LDR} = V_{CC} \frac{LDR}{R + LDR} \quad (3.1)$$

**Figura 3.7:** Circuito alternativo ao da Figura 3.6.

Fonte: Do autor.

### 3.1.3 Servomotor

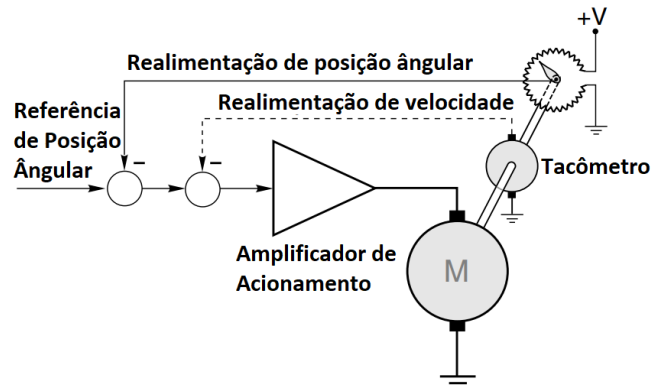
Segundo Hughes (2006), a definição do termo "servo", no contexto de motores e seus acionamentos, não possui uma definição clara e direta. De maneira geral, o termo implica que é um tipo de acionamento de motores específico para controle em malha fechada ou realimentação, normalmente controlando torque, velocidade ou posição. Neste trabalho foi utilizado um servomotor com controle de posição.

Uma característica do servomotor em relação ao motor comum, é que o servomotor é utilizado em aplicações que requerem aceleração e desaceleração rápidas, de forma que consomem um valor relativamente elevado de corrente em tais situações.

O controle de posição de um servomotor é feito com um sistema de malha fechada (visto na seção B.1) onde a posição angular do eixo de saída é proporcional a um valor de tensão de referência. Um potenciômetro acoplado ao eixo de saída fornece uma tensão de realimentação proporcional a posição real do eixo de saída como visto no exemplo da Figura 3.8.

A tensão de realimentação (representando a posição angular atual do eixo do motor) é subtraída da tensão de referência (representando a posição angular desejada do eixo do motor), e esse valor é amplificado e usado para acionar o motor para girar o eixo de saída até a posição desejada. Quando o eixo alcança tal posição o erro passa a ser nulo, e nenhuma tensão é aplicada ao motor e o eixo se mantém em repouso. Caso ocorra alguma tentativa de mover o eixo de saída da posição desejada, um sinal de erro é criado e um torque é aplicado ao

**Figura 3.8:** Controle de posição em malha fechada utilizando motor DC e realimentação de posição angular utilizando potenciômetro próprio para servomotores.



Fonte: (HUGHES, 2006).

motor para recuperar sua posição.

O servomotor utilizado neste trabalho é um motor que permite o controle da posição de seu eixo através de um sinal de comando. Possui três terminais, sendo estes os de alimentação positiva, alimentação negativa, e sinal de controle, sendo que os terminais de alimentação são responsáveis por grande parte da corrente do motor. Comumente, desde os anos 90, o controle deste tipo de servomotor é feito com um sinal PWM aplicado no seu respectivo terminal de controle (SAWICZ, 2018). De acordo com o período de tempo em que o sinal ficou em nível alto, ou seja, dependendo de sua razão cíclica, ele muda sua posição. O sinal PWM com razão cíclica de 5% equivale a posição  $0^\circ$  no servomotor e a razão cíclica 10% equivale a posição  $180^\circ$ .

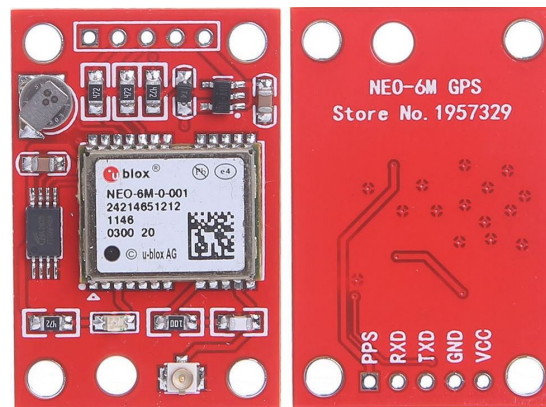
### 3.1.4 Módulo GPS NEO-6M

O CI NEO-6M-0-001 fabricado pela *ublox<sup>TM</sup>* é um receptor GPS que possui diversos e possíveis protocolos e interfaces de comunicação, entre elas UART, USB, SPI. Neste trabalho foi utilizada uma placa de circuito que utiliza este CI configurado de forma que se comunica com uma interface UART utilizando o protocolo NMEA, visto na Seção 2.10.2. Esta placa de circuito pode ser vista na Figura 3.9.

De acordo com o *datasheet* do fabricante u-blox (2011), a grande vantagem deste CI é seu baixo consumo de energia, pois é capaz de operar na faixa de tensão entre 2,7 V e 3,6 V, sendo vantajoso tanto para dispositivos móveis quanto outras formas de sistemas embarcados. Ele possui a capacidade de a localização

de satélites através de busca de modulações temporais e em frequência no espaço.

**Figura 3.9:** Placa de circuito do dispositivo GPS utilizado.



Fonte: Extraído de

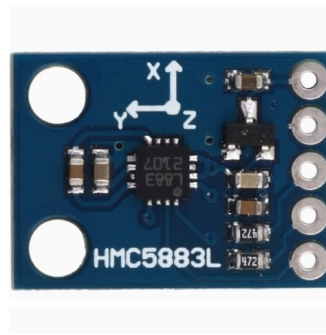
<<https://hacktronics.co.in/gps-sensors/gy-neo-6mv2-gps-module-neo-6m>>  
(Acessado em 29/07/2018).

O dispositivo possui uma acurácia de 2,5 m e em condições normais, leva até 26 segundos para obter os primeiros dados, e pode utilizar uma antena tanto passiva quanto ativa. O CI permite uma comunicação externa com um dispositivo EEPROM, com o fim de armazenar as configurações do dispositivo de forma permanente.

Na configuração da placa eletrônica deste dispositivo, é utilizado o protocolo UART com uma taxa de 9600 bauds, e taxa de atualização de dados de 1 Hz.

### 3.1.5 Bússola Digital

Como foi visto no Capítulo 2.9, uma bússola digital funciona como um magnetômetro, e fornece a posição do norte magnético em relação a superfície do circuito nas coordenadas cartesianas X, Y e Z. Segundo dados do fabricante QST Corporation (2016), as coordenadas são fornecidas pelo circuito através de protocolo de comunicação I2C. Então, utilizando as operações matemáticas vistas no capítulo 2.7 em conjunto com o valor de declinação magnética que pode ser obtido em diversos *sites*, por exemplo, (['http://www.magnetic-declination.com/'](http://www.magnetic-declination.com/)), é possível obter as coordenadas do norte geográfico. A placa de circuito utilizada neste trabalho pode ser vista na Figura 3.10.

**Figura 3.10:** Placa de circuito da bússola digital.

Fonte: Extraído de

<<https://www.filipeflop.com/produto/modulo-bussola-eletronica-hmc5883l/>>  
(Acessado em 29/07/2018).

### 3.1.6 Sistema de Controle Embarcado

Para controle do sistema foi utilizado um kit de desenvolvimento com o microcontrolador ARM STM32F407 da *ST Microelectronics*. Esse microcontrolador possui até 15 interfaces de comunicação, entre elas, as utilizadas neste trabalho, 6 USARTS e 3 I2Cs. Também possui 17 timers, 12 conversores ADC de 12 bits e 12 conversores DAC (ST MICROELECTRONICS, 2016).

Estes recursos, utilizados com os sensores citados nos capítulos anteriores, conseguem realizar o acionamento dos dispositivos do sistema para que o painel solar tenha seu alinhamento com a luz solar.

O kit de desenvolvimento utilizado pode ser visto na Figura 3.11.

## 3.2 Modelagem do LDR em relação ao ângulo de incidência da luz

Primeiramente foi realizada uma avaliação da resposta do LDR em função do ângulo de incidência da luz. Foram coletadas amostras e partir destas, modelada uma equação exponencial, com a ferramenta *MATLAB<sup>TM</sup>*, que ajustasse os pontos obtidos. Desta forma, a equação que modela a resistência do LDR em função de seu ângulo é dada pela Eq. 3.2.

$$R_{LDR}(\theta) = 8,06e^{0,1421\theta} + 1,528e^{-0,005786\theta}, \quad 0^\circ \leq \theta < 90^\circ \quad (3.2)$$

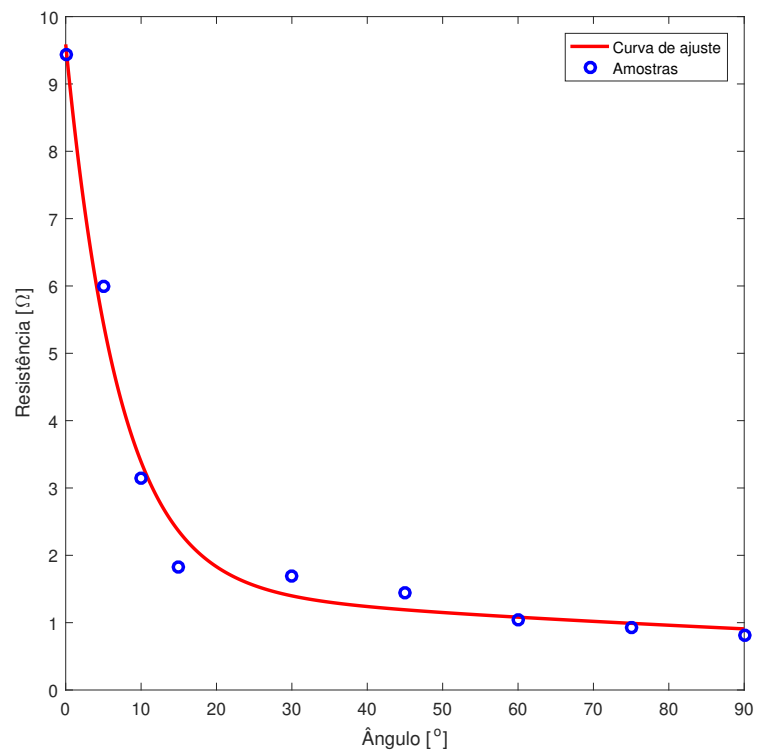
O gráfico contendo as amostras e a curva de ajuste está na Figura 3.12.

Figura 3.11: Placa de circuito do microcontrolador.



Fonte: Extraído e adaptado do catalogo do fabricante.

Figura 3.12: Superfície de isopor com os LDRs posicionados.



Fonte: Do autor.

### 3.3 Montagem da Matriz de LDRs

Um dos meios de obter a posição do Sol neste trabalho é através de sensores LDR. Para isso, 20 LDRs foram posicionados simetricamente em uma abóbada de isopor de forma simétrica. O posicionamento foi determinado por marcações existentes da fabricação do próprio isopor, totalizando em 20 LDRs. Na Figura 3.13 é possível observar a superfície de isopor em questão.

**Figura 3.13:** Superfície de isopor com os LDRs posicionados.



Fonte: Do autor.

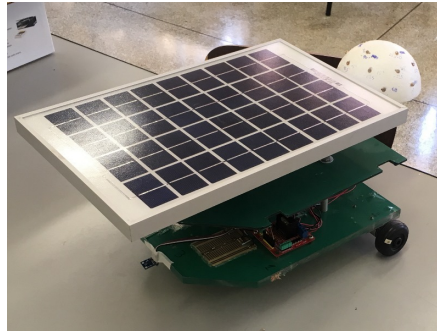
Todos os LDRs tiveram um de seus terminais conectados no mesmo nó de alimentação. Os outros terminais dos LDRs foram conectados em um conjunto de divisores de tensão. Esses divisores de tensão por sua vez, foram conectados nas entradas dos multiplexadores. Foram utilizados 3 Multiplexadores, cada um com capacidade de multiplexação de até 8 canais.

### 3.4 Estrutura física e mecânica do robô móvel

O robô consiste de uma superfície de acrílico onde estão anexos seus motores, roda de apoio, bateria, circuitos eletrônicos (Controladores de tensão, microcontroladores, GPS, bússola), sensores, motores, servomotor e painel solar. O sistema pode ser observado na Figura 3.14. A transmissão do robô consiste de duas rodas no mesmo eixo de tração controladas por dois motores. Essa transmissão é a responsável por posicionar o robô móvel de forma a orientar seu painel solar para a melhor posição possível. Com o painel posicionado acima do robô, e dada as dimensões de ambos, o painel se desloca até  $32^\circ$  no sentido de sua seção frontal,

e  $18^\circ$  no sentido de sua seção traseira, ou seja, a amplitude total de movimento do painel, em graus, é de  $50^\circ$ .

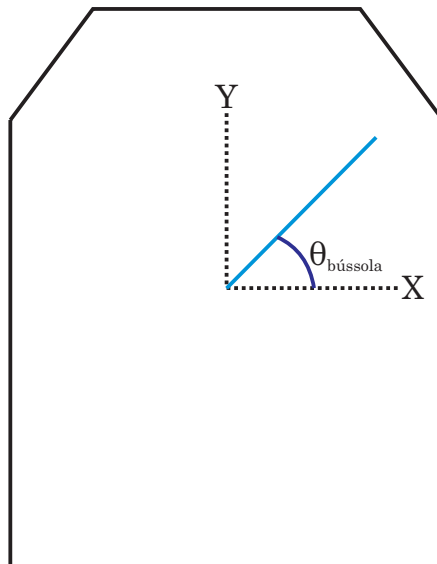
**Figura 3.14:** Foto do robô móvel.



Fonte: Do autor.

A bússola utilizada trabalha com um sistema de coordenadas cartesianas. O circuito da bússola foi posicionado na estrutura do robô de forma que a orientação da direção norte se comportasse de acordo com a Figura 3.15, onde o ângulo  $\theta_{Bússola}$  é o ângulo entre o robô e o norte geográfico.

**Figura 3.15:** Referência da bússola eletrônica em relação ao robô.



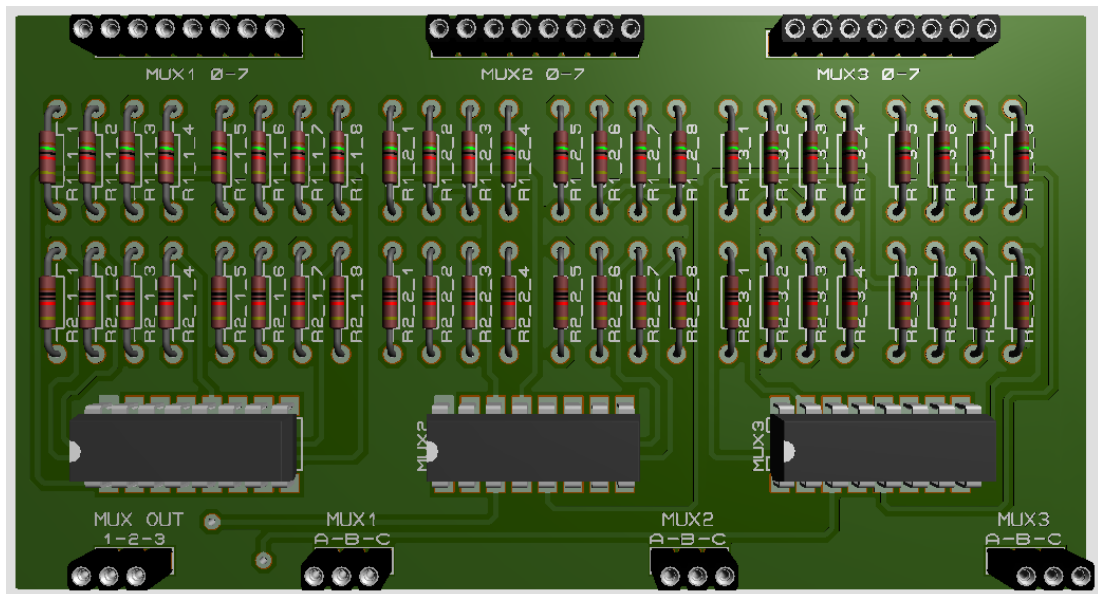
Fonte: Do autor.

### 3.5 Circuito de Interface entre LDRs e Microcontrolador

Para transmissão e condicionamento dos sinais dos LDRs, foi utilizado o circuito de interface da Figura 3.16. Este circuito possui pinos de entrada para os LDRs, multiplexadores, e resistores para atuarem como divisor de tensão. Como visto na Seção 3.1.2, quando o LDR é incidido por uma luz de alta intensidade, ele tende a se tornar um curto circuito. Como a alimentação dos LDRs é de 5 V, e a entrada do conversor A/D do microcontrolador possui como tensão máxima 3,3 V, o sinal do LDR é aplicado no divisor de tensão. Os resistores escolhidos no divisor de tensão são de 15 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$ , pois ao realizar o divisor de tensão considerando o LDR como um curto-circuito, obtemos o resultado visto na Eq. (3.3).

$$V_{ADC}^{MAX} = 5,0V \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 15k\Omega} = 3,0V \quad (3.3)$$

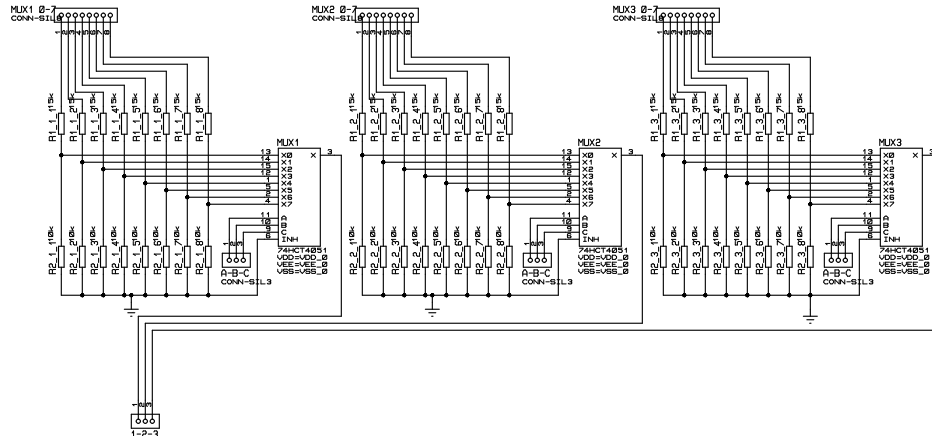
**Figura 3.16:** Circuito multiplexador de interface entre os LDRs e o microcontrolador.



Fonte: Do autor, feito com *software Proteus*.

Na Figura 3.16 ainda podemos ver os pinos de controle dos multiplexadores, e os pinos de saída. Os pinos de controle são conectados a saídas digitais do microcontrolador que determinam qual LDR será lido em determinado instante. E os pinos de saída, que são saídas dos divisores de tensão, por sua vez são conectados aos pinos dos ADCs do microcontrolador. O esquemático do circuito de interface pode ser visto na Figura 3.17.

**Figura 3.17:** Diagrama do circuito multiplexador de interface entre os LDRs e o microcontrolador.



Fonte: Do autor, feito com *software Proteus*.

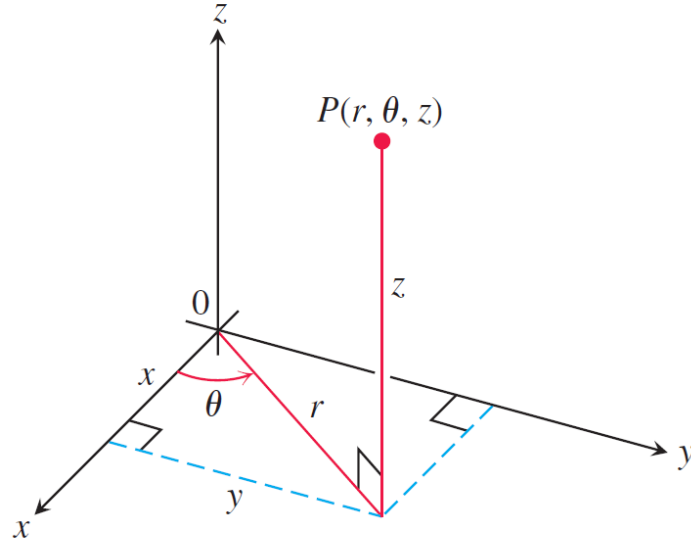
### 3.6 Cálculo de Posicionamento através dos LDRs

Na montagem realizada, cada LDR representa um vetor normal a superfície onde estavam inseridos, onde seu módulo era determinado pelo valor lido no conversor A/D e sua posição era representada em coordenadas esféricas. A convenção utilizada para as coordenadas espaciais pode ser observada na figura 3.18. Nela a componente  $\rho$  representa a distância entre a origem e o ponto em questão, a componente  $\phi$  é o ângulo formado entre o eixo z e o segmento de reta da origem até o ponto, e a componente  $\theta$  é o ângulo formado da porção positiva do eixo x até reta formada entre a origem e a projeção do ponto no plano x-y.

Como os LDRs possuem um alto ruído para uma leitura analógica, foi aplicado um filtro do tipo média móvel, visto na Seção 2.8, para sua correção. Neste trabalho, o valor filtrado dos LDRs é dado por  $L(\theta, \phi)$ . Embora a média móvel seja uma solução simples que atende a necessidade deste trabalho, existe também a possibilidade de usar um filtro mais complexo, como um Filtro de Kalman, que consiste basicamente de um estimador para problemas quadrático-lineares (GREWAL; ANDREWS, 2014). O autor sugere a implementação deste filtro em trabalhos futuros para uma comparação de desempenho com um filtro média móvel, para avaliar o quão significativa pode ser uma eventual melhora para reduzir os ruídos dos LDRs.

Os LDRs foram representados como um conjunto de vetores tridimensionais, dados pela Eq. 3.4, onde  $\phi$  e  $\theta$  representam a posição em coordenadas esféricas

**Figura 3.18:** Coordenadas esféricas  $\rho$ ,  $\phi$  e  $\theta$  e sua relação com  $x$ ,  $y$  e  $z$  (cartesianas) e  $r$ (polar).



Fonte: (THOMAS; WEIR; HASS, 2012).

de cada LDR na superfície e isopor.

$$\mathbf{\Lambda}(\theta, \phi) = W(\theta, \phi) \sin(\phi) \cos(\theta)\hat{i} + W(\theta, \phi) \sin(\phi) \sin(\theta)\hat{j} + W(\theta, \phi) \cos(\phi)\hat{z} \quad (3.4)$$

E a função  $W(\theta, \phi)$  representa o valor processado lido pelo conversor A/D, cujo sinal é dado pela função  $L(\theta, \phi)$ , correspondente ao LDR da respectiva posição  $\theta$  e  $\phi$ , dividido pela média da leitura de todos os LDRs, dada por  $\overline{L(\theta, \phi)}$ , resultando na Eq. 3.5, onde o sobrescrito representa a média dos elementos.

$$W(\theta, \phi) = \left( \frac{L(\theta, \phi)}{\overline{L(\theta, \phi)}} \right)^2 \quad (3.5)$$

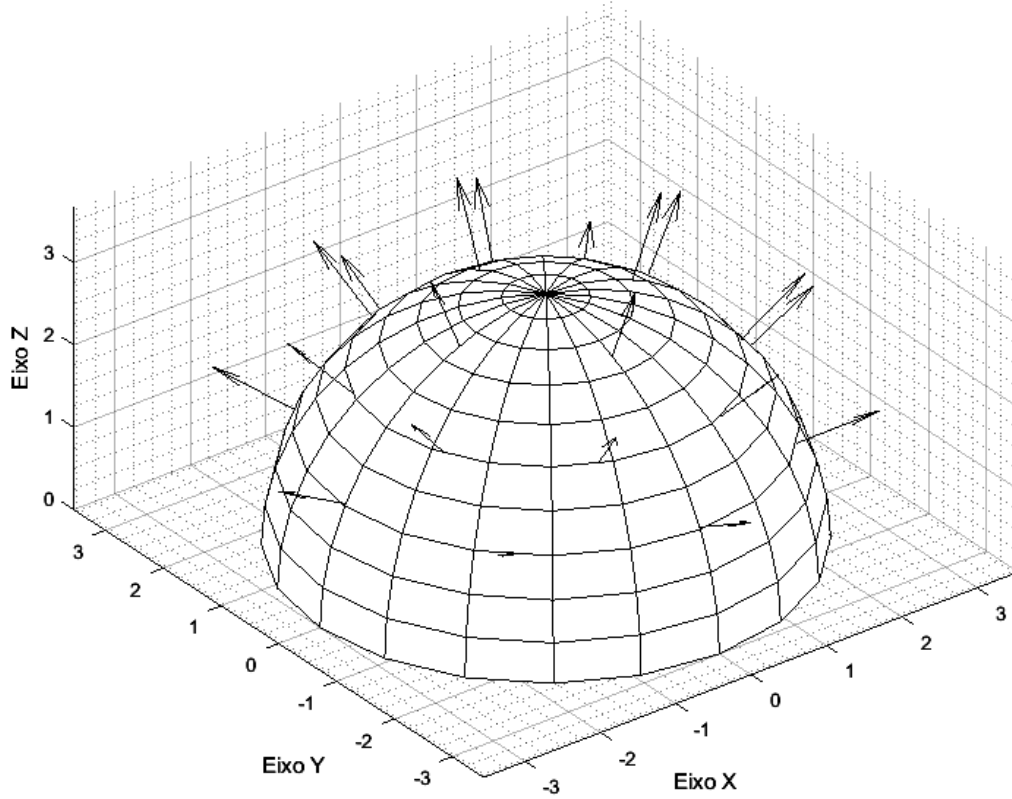
A possível faixa de valores do conversor A/D é dada pela Eq. 3.6.

$$0 \leq L(\theta, \phi) \leq 4081 \quad (3.6)$$

Sendo que os possíveis valores para o ângulo  $\phi$  são:

$$\phi \in \left\{ \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8} \right\} \quad (3.7)$$

**Figura 3.19:** Modelo 3D da superfície utilizada com vetores normais as posições de cada LDR utilizado.



Fonte: Do autor utilizando Matlab.

E para o ângulo  $\theta$ :

$$\theta \in \left\{ 0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{8}, \pi, \frac{9\pi}{8}, \frac{5\pi}{4}, \frac{11\pi}{8}, \frac{3\pi}{2}, \frac{13\pi}{8}, \frac{7\pi}{4}, \frac{15\pi}{8} \right\} \quad (3.8)$$

A soma vetorial dos LDRs resulta no vetor normal a superfície cuja direção representa o ângulo de incidência do Sol, apresentado na Eq. 3.9.

$$\Lambda(\theta_f, \phi_f) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^{15} \Lambda \left( \frac{\pi i}{8}, \frac{\pi j}{8} \right) \quad (3.9)$$

Em seguida, aplica-se uma média móvel de 10 elementos na Eq. 3.9 para reduzir o ruído dos LDRs. Esta média móvel utiliza como tempo de amostragem o tempo de *clock* do próprio microcontrolador.

Sendo que para:

$$(i = 1) \wedge (j \in \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15\}) \quad (3.10)$$

$$(i = 2) \wedge (j \in \{0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14\}) \quad (3.11)$$

$$(i = 3) \wedge (j \in \{1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15\}) \quad (3.12)$$

A função  $\Lambda(\theta, \phi)$  se torna:

$$\Lambda\left(\frac{\pi i}{8}, \frac{\pi j}{8}\right) = 0 \quad (3.13)$$

Assim, o valor do ângulo final  $\phi_f$  é dado por:

$$\phi_f = \cos^{-1}\left(\frac{\Lambda(\theta_f, \phi_f) \cdot \hat{k}}{\sqrt{(\Lambda(\theta_f, \phi_f) \cdot \hat{i})^2 + (\Lambda(\theta_f, \phi_f) \cdot \hat{j})^2 + (\Lambda(\theta_f, \phi_f) \cdot \hat{k})^2}}\right) \quad (3.14)$$

E o ângulo final  $\theta_f$  é dado por:

$$\theta_f = \tan^{-1}\left(\frac{\Lambda(\theta_f, \phi_f) \cdot \hat{j}}{\Lambda(\theta_f, \phi_f) \cdot \hat{i}}\right) \quad (3.15)$$

Totalizando em 20 possíveis valores diferentes de 0, que é a quantidade de LDRs utilizados.

### 3.7 Cálculo de Posicionamento através do GPS

Para o cálculo da posição utilizando o GPS é necessário além do dispositivo GPS, uma bússola digital. O dispositivo GPS fornece os dados de data, horário e posição geográfica, que são necessários para calcular os ângulos solares, utilizando as equações da Seção 2.6. Como a referência do ângulo de azimute é em relação ao norte geográfico, para obter a posição do norte, utiliza-se a bússola digital para criar uma referência.

Os dados fornecidos pelo dispositivo GPS são as frases NMEA vistas na Seção 2.10.2. O microcontrolador as interpreta, e com isso obtém as informações de latitude, longitude, data e hora. Com tais informações, os ângulos de azimute e zênite são calculados.

Para analisar qual abordagem possui melhor eficiência na captação de energia solar, será feita uma comparação da potência lida no painel solar ao longo de algumas horas. A leitura da potência será feita utilizando um amplificador operacional para se obter a tensão, e um sensor de corrente de efeito Hall para se obter a corrente. Serão então realizadas pelo menos três amostragens, sendo uma delas com o painel fixo, uma com a orientação feita através das informações

dos LDRs e outra com as informações do GPS.

### **3.8 Conclusão do capítulo**

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias utilizadas para implementação do sistema, desde a montagem da estrutura de LDRs e seu circuito de interface, as equações utilizadas para a leitura dos LDRs e do GPS, além análise de desempenho para avaliar o desempenho do sistema.

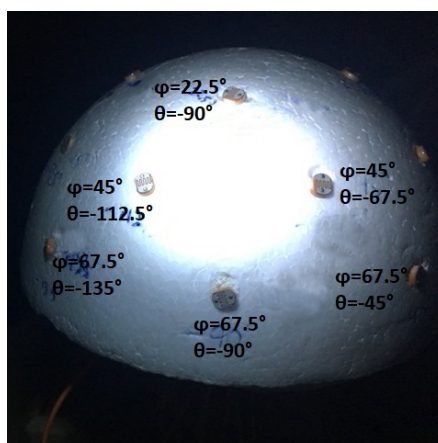
## 4 Resultados Experimentais

### 4.1 Ângulos obtidos com sensores LDRs utilizando Luz Artificial

Os testes iniciais com os sensores LDRs foram feitos com uma lanterna direcionada em certas posições da superfície de LDRs em um ambiente ausente de outras fontes de luz artificiais. Os testes desta seção são utilizados para demonstrar tanto a variação dos sensores quanto o cálculo dos valores processados dos ângulos.

Na Figura 4.1, podemos observar onde a luz foi incidida na superfície e quais LDRs foram mais iluminados.

**Figura 4.1:** Foto da amostragem número 1 com luz artificial da superfície de LDRs.



Fonte: Do autor.

Na Tabela 4.1 os valores lidos pelos conversores A/D, sendo que NA significa que não há um LDR na respectiva posição. Com esses dados obtidos, aplicamos a Eq. (3.5), onde os valores são normalizados e em seguida, elevados ao quadrado.

**Tabela 4.1:** Dados Brutos da Posição da Matriz de LDRs

$L(\theta, \phi)$			
$\theta \backslash \phi$	<b>22,5°</b>	<b>45°</b>	<b>67,5°</b>
<b>0°</b>	2580	NA	840
<b>22,5°</b>	NA	481	NA
<b>45°</b>	NA	NA	429
<b>67,5°</b>	NA	361	NA
<b>90°</b>	914	NA	281
<b>112,5°</b>	NA	292	NA
<b>135°</b>	NA	NA	154
<b>157,5°</b>	NA	1673	NA
<b>180°</b>	2647	NA	1151
<b>202,5°</b>	NA	3080	NA
<b>225°</b>	NA	NA	2478
<b>247,5°</b>	NA	3674	NA
<b>270°</b>	3616	NA	3433
<b>292,5°</b>	NA	3668	NA
<b>315°</b>	NA	NA	2371
<b>337,5°</b>	NA	1667	NA

Como resultado, obtemos a Tabela 4.2, que contem os dados brutos normalizados e elevados ao quadrado.

**Tabela 4.2:** Dados Processados da Posição da Matriz de LDRs

$W(\theta, \phi)$			
$\theta \backslash \phi$	$22,5^\circ$	$45^\circ$	$67,5^\circ$
$0^\circ$	2,0786	NA	0,2203
$22,5^\circ$	NA	0,0722	NA
$45^\circ$	NA	NA	0,0575
$67,5^\circ$	NA	0,0407	NA
$90^\circ$	0,2609	NA	0,0247
$112,5^\circ$	NA	0,0266	NA
$135^\circ$	NA	NA	0,0074
$157,5^\circ$	NA	0,8740	NA
$180^\circ$	2,1880	NA	0,4137
$202,5^\circ$	NA	2,9624	NA
$225^\circ$	NA	NA	1,9175
$247,5^\circ$	NA	4,2152	NA
$270^\circ$	4,0831	NA	3,6803
$292,5^\circ$	NA	4,2014	NA
$315^\circ$	NA	NA	1,7555
$337,5^\circ$	NA	0,8678	NA

Utiliza-se a Eq. (3.4) na Tabela 4.2, e com isso, obtêm-se a Tabela 4.3.

**Tabela 4.3:**  $\Lambda(\theta, \phi)$  da Matriz de LDRs

$\Lambda(\theta, \phi)$			
$\theta \backslash \phi$	<b>22, 5°</b>	<b>45°</b>	<b>67, 5°</b>
<b>0°</b>	$0,7954\hat{i}+1,9204\hat{k}$	NA	$0,1954\hat{i}+0,1017\hat{k}$
<b>22, 5°</b>	NA	$0,0472\hat{i}+0,0196\hat{j}+0,0511\hat{k}$	NA
<b>45°</b>	NA	NA	$0,0360\hat{i}+0,0360\hat{j}+0,0265\hat{k}$
<b>67, 5°</b>	NA	$0,0110\hat{i}+0,0266\hat{j}+0,0288\hat{k}$	NA
<b>90°</b>	$0,0998\hat{j}+0,2410\hat{k}$	NA	$0,0219\hat{j}+0,0114\hat{k}$
<b>112, 5°</b>	NA	$-0,0072\hat{i}+0,0174\hat{j}+0,0188\hat{k}$	NA
<b>135°</b>	NA	NA	$-0,005\hat{i}+0,0046\hat{j}+0,0034\hat{k}$
<b>157, 5°</b>	NA	$-0,5710\hat{i}+0,2365\hat{j}+0,6180\hat{k}$	NA
<b>180°</b>	$-0,8373\hat{i}+2,0214\hat{k}$	NA	$-0,3670\hat{i}+0,1910\hat{k}$
<b>202, 5°</b>	NA	$-1,9352\hat{i}-0,8016\hat{j}+2,0947\hat{k}$	NA
<b>225°</b>	NA	NA	$-1,2027\hat{i}-1,2027\hat{j}+0,8854\hat{k}$
<b>247, 5°</b>	NA	$-1,1406\hat{i}-2,7537\hat{j}+2,9806\hat{k}$	NA
<b>270°</b>	$-1,5625\hat{j}+3,7723\hat{k}$	NA	$-3,2645\hat{j}+1,6994\hat{k}$
<b>292, 5°</b>	NA	$1,1369\hat{i}-2,7447\hat{j}+2,9708\hat{k}$	NA
<b>315°</b>	NA	NA	$1,1011\hat{i}-1,1011\hat{j}+0,8106\hat{k}$
<b>337, 5°</b>	NA	$0,5669\hat{i}-0,2348\hat{j}+0,6136\hat{k}$	NA

Somando todos os vetores da Tabela 4.3, ou seja, aplicando a Eq. 3.9, o vetor resultante da posição na matriz de LDRs é obtido, e dado pela Eq. 4.1.

$$\Lambda(\theta_f, \phi_f) = -2,1756\hat{i} - 13,2032\hat{j} + 21,0611\hat{k} \quad (4.1)$$

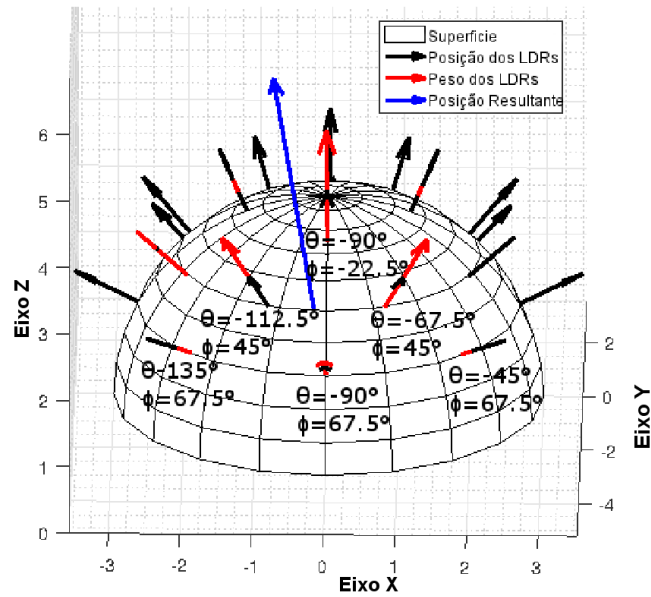
Aplicando a Eq. 3.14 e a Eq. 3.15, obtém-se as coordenadas do ponto onde a luz incide, resultando na Eq. 4.2 e na Eq. 4.3.

$$\phi_f = 38,555257^\circ \quad (4.2)$$

$$\theta_f = -97,442222^\circ \quad (4.3)$$

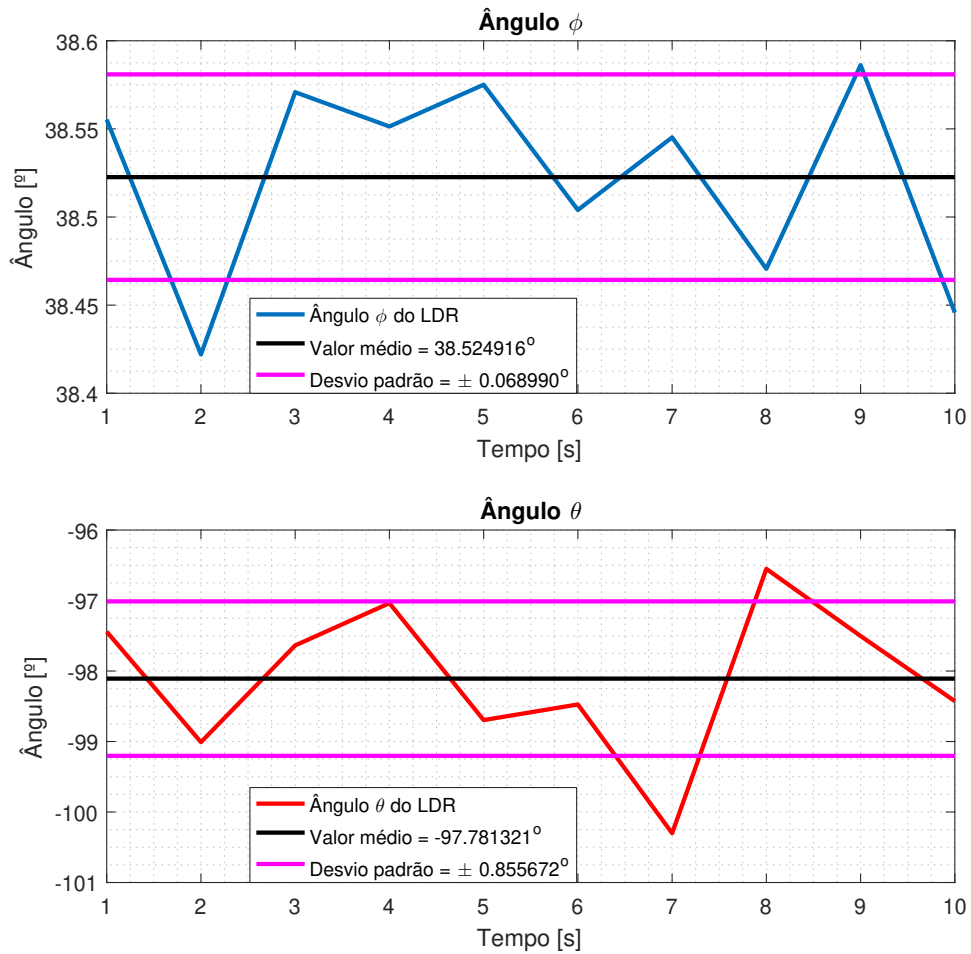
A Figura 4.2 contém uma representação gráfica em 3 dimensões dos LDRs, e a posição resultante.

**Figura 4.2:** Modelo 3D dos LDRs e resultante indicando posição de incidência da luz na superfície.



Fonte: Do autor.

A medida do segundo '1' na Figura 4.3 representa os valores calculados nesta seção utilizando os dados da tabela 4.2. Nesta mesma figura é possível observar mais 9 segundos de amostra e o valor médio e desvio obtidos.

**Figura 4.3:** Desvio das medidas de ângulos utilizando LDRs.

Fonte: Do autor.

## 4.2 Amostragem dos sensores LDRs com luz solar

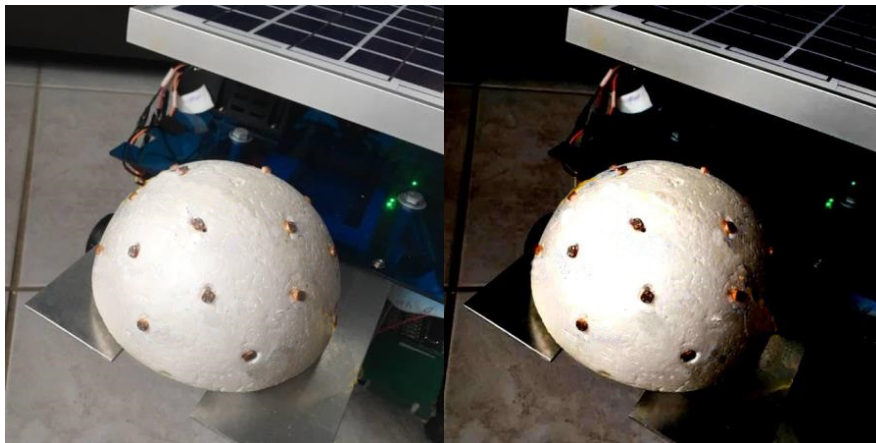
As amostras desta seção foram obtidas com luz solar natural incidida sobre a superfície dos LDRs, e foi utilizada como ferramenta de coleta o *STMStudio*. Nos dados coletados é possível observar graficamente a variação dos lidos ao longo do tempo. A Figura 4.4 e a Figura 4.5 contêm fotos da superfície durante a amostragem em questão. A alteração de contraste nas fotos foi feita com o objetivo de evidenciar melhor a luz incidida nos LDRs.

**Figura 4.4:** Vista superior dos LDRs na amostra atual. Foto original e com contraste.



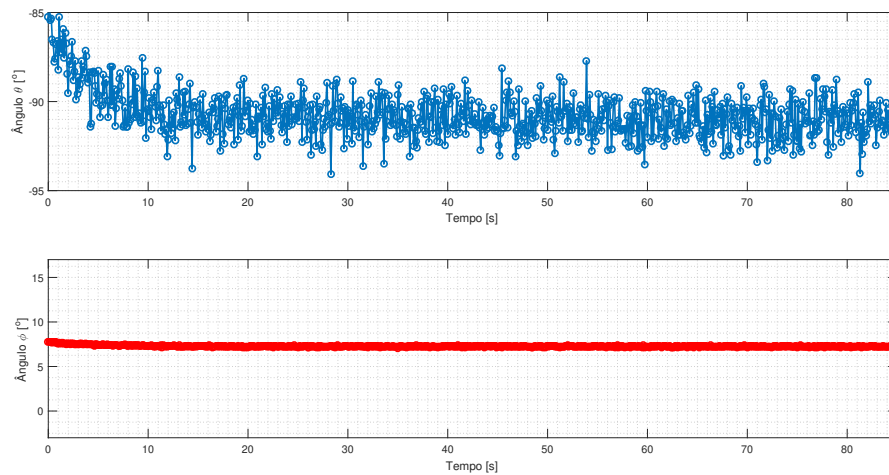
Fonte: Do autor.

**Figura 4.5:** Vista traseira inclinada dos LDRs na amostra atual. Foto original e com contraste.



Fonte: Do autor.

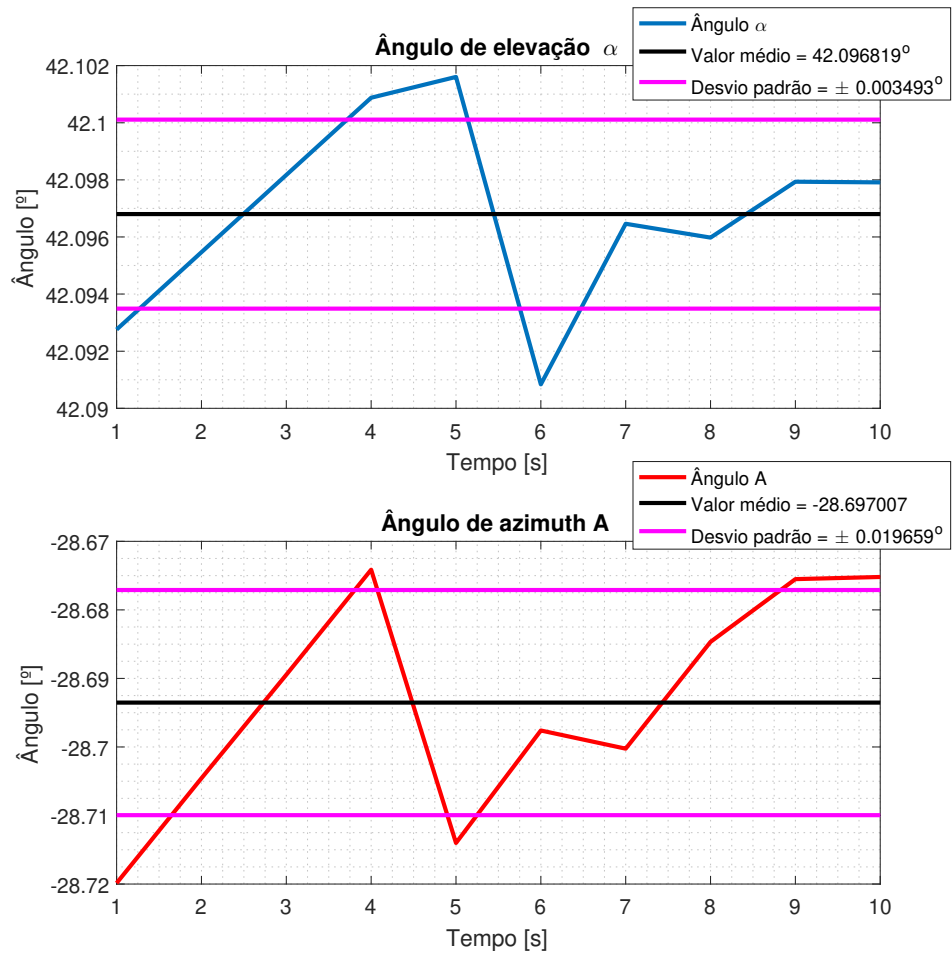
A Figura 4.6 contem as amostragens, onde possuem como valor médio e desvio padrão, respectivamente,  $\mu_\theta = -91^\circ$ ,  $\mu_\phi = 7,25^\circ$ ,  $\sigma_\theta \approx 1,2^\circ$ ,  $\sigma_\phi \approx 0,25^\circ$ .

**Figura 4.6:** Amostras dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$  obtidos pelos LDRs.

Fonte: Do autor.

### 4.3 Amostragem da posição do Sol com GPS e magnetômetro

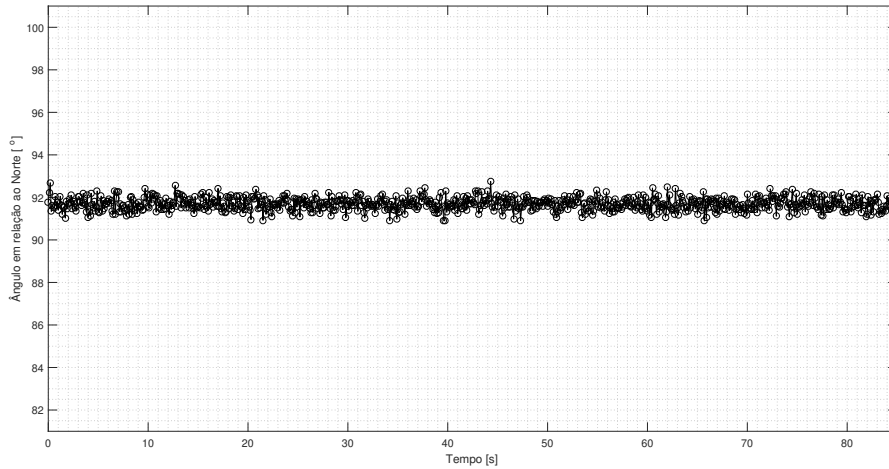
Nesta seção encontram-se os dados do cálculo de posição do Sol utilizando informações fornecidas pelo dispositivo GPS e pela bússola eletrônica. Na Figura 4.7 podemos observar a variação da leitura do GPS em posição fixa em um período de 10 segundos. Nela, podemos observar que a variação é menor quando comparada a variação dos LDRs, como visto na Figura 4.3 e na Figura 4.6.

**Figura 4.7:** Amostras das coordenadas celestes obtidas através do GPS.

Fonte: Do autor.

Na Figura 4.8, podemos observar a amostragem da bússola eletrônica com o robô em posição fixa. Nela observamos a variação da leitura do dispositivo, indicando a posição do Norte geográfico em relação ao robô móvel, que afeta diretamente a coordenada de azimuth do Sol a ser calculada pelo microcontrolador. Obtêm-se o valor médio  $\mu_{Bússola} = 91,8^\circ$ , e a variação aproximada de  $\sigma_{Bússola} = 0,6^\circ$

**Figura 4.8:** Amostras da leitura da bússola digital mostrando posição angular do norte geográfico em relação ao robô móvel.



Fonte: Do autor.

## 4.4 Testes parciais sem coleta de dados

Após a montagem de todo o sistema, e ajustes do código do microcontrolador utilizado, foram realizados os primeiros testes em área aberta. Nestes testes, o robô se moveu até alinhar a posição do painel com o azimute do Sol, e simultaneamente seu servomotor ajustou a inclinação de forma que coincidissem com o ângulo de elevação do Sol, deixando-o perpendicular ao mesmo. Este teste foi realizado na Universidade Estadual de Londrina, próximo ao CCA (Centro de Ciências Agrárias) no dia 27 de Julho de 2018 às 10 h 42 min. As coordenadas geográficas deste local são latitude  $-23,328489^\circ$  e longitude  $-51,203567^\circ$ . Com estas informações é possível utilizar as equações da Seção 2.6 e obter os ângulos solares azimute e elevação. O ângulo de azimute obtido é de  $95,7212^\circ$  e o ângulo de zênite, que é o ângulo complementar ao de elevação é de  $34,7978^\circ$ .

Na Figura 4.9 podemos observar o alinhamento da sombra no robô que corresponde ao alinhamento do azimute solar.

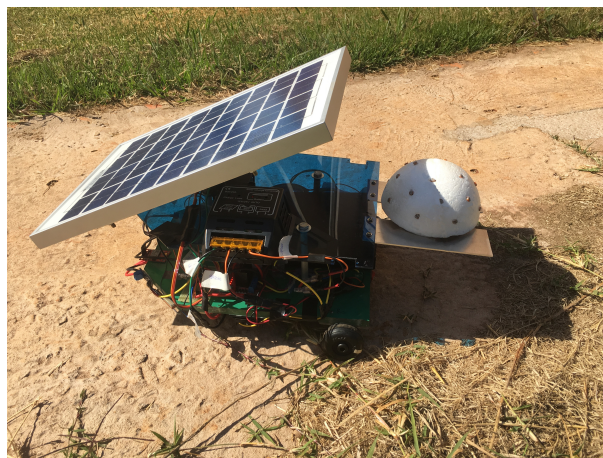
**Figura 4.9:** Foto do robô móvel em relação a sombra no chão para demonstrar alinhamento com o azimute do Sol.



Fonte: Do autor.

Na Figura 4.10, é possível observar com mais clareza a inclinação do painel de forma que este obtivesse uma posição perpendicular ao Sol.

**Figura 4.10:** Foto da inclinação do painel solar durante operação.



Fonte: Do autor.

## 4.5 Amostragem de potência

Foram realizadas amostragens da potência do sistema em 3 situações. Com o robô fixo, com a orientação dos LDRs e com a orientação do GPS.

Na abordagem do painel fixo, ele foi mantido com sua face apontada para o norte geográfico com uma inclinação de  $45^\circ$ . Tanto nesta, quanto nas demais abordagens, foram feitas durante 3 dias consecutivos (30 de Novembro de 2018,

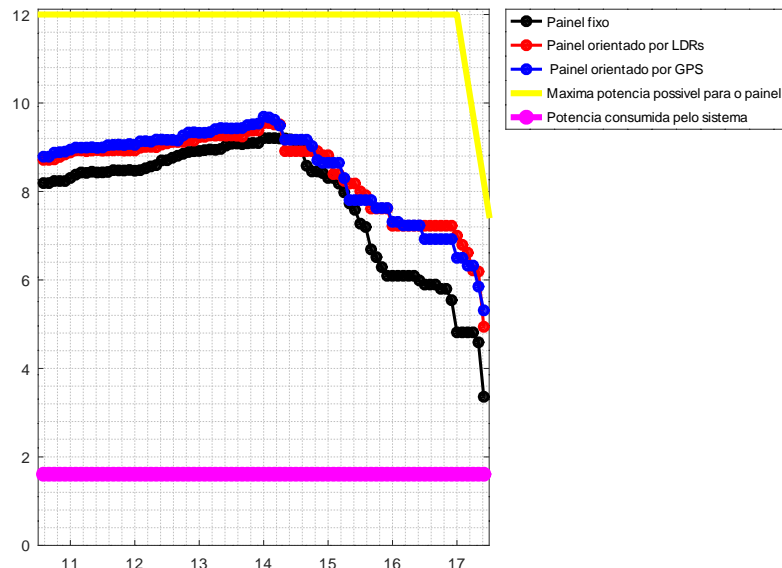
01 de Dezembro de 2018 e 02 de Dezembro de 2018) na cidade de Joinville, no estado de Santa Catarina, no Brasil.

Os intervalos entre cada medição foram de 5 minutos. Essa escolha foi baseada no tempo de amostragem utilizado por European Commission (2018), que utiliza o intervalo de medição de 15 minutos, ou seja, esse tempo foi utilizado como critério para determinar um tempo mínimo de amostragem. O período de amostragem escolhido foi feito de forma a aumentar a resolução dos dados e facilitar a filtragem de eventuais ruídos.

Na Figura 4.11, podemos observar os 3 comportamentos. Nela, observa-se que o desempenho utilizando LDRs ou GPS mostrou-se mais eficaz comparado ao painel fixo, apresentando um ganho de aproximadamente 2,5 W, o que representa um valor significativo em termos de potência para um robô de baixo porte.

Também podemos observar qual seria a curva ideal de potência para o robô. A curva em amarelo foi obtida relacionando dados sobre a irradiação solar incidida na cidade de Londrina, fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a área útil do painel solar e a potência máxima fornecida por este.

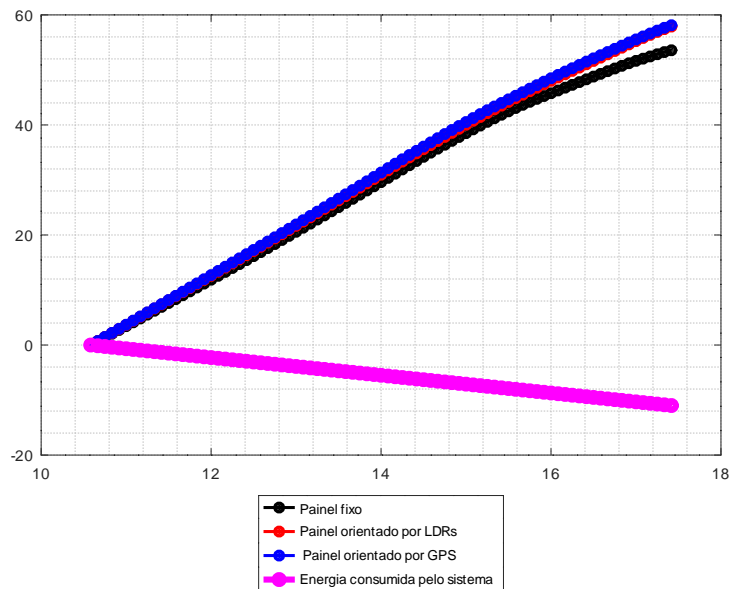
**Figura 4.11:** Amostras da leitura de potência do painel solar em 3 abordagens diferentes e sua potência coletada e consumida, dado em  $W$ .



Fonte: Do autor.

Na Figura 4.12 pode-se observar a energia do sistema ao longo do tempo, dado em  $W \cdot h$ .

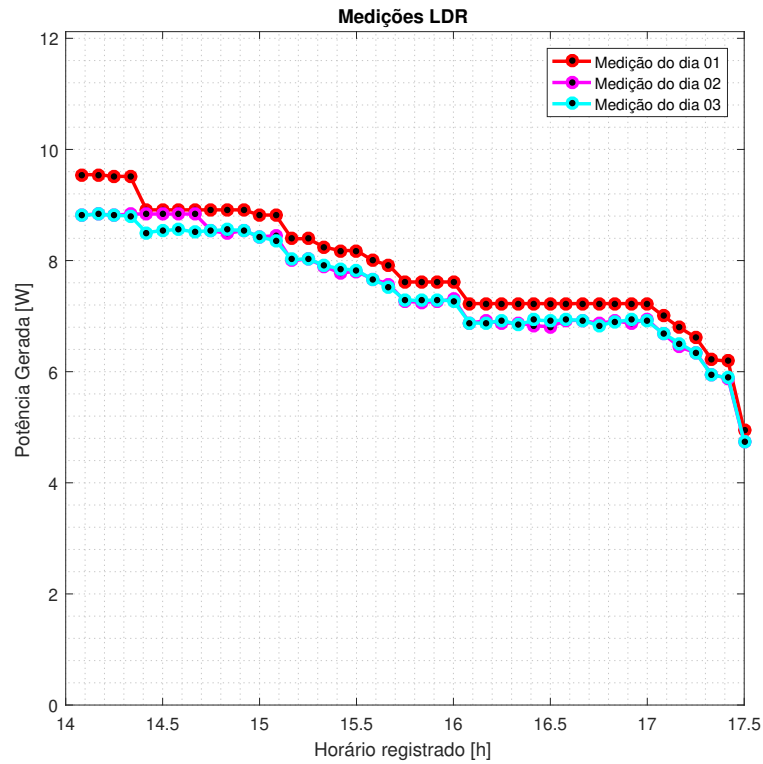
**Figura 4.12:** Amostras da leitura da energia acumulada coletada pelo painel solar em 3 abordagens diferentes.



Fonte: Do autor.

A Figura 4.13 mostra a amostragem de potência utilizando LDRs durante 3 dias diferentes, sendo que a data da medição do dia 1 é a mesma da Figura 4.11, e as datas dos dias 2 e 3 são respectivamente 9 e 10 de Março de 2019.

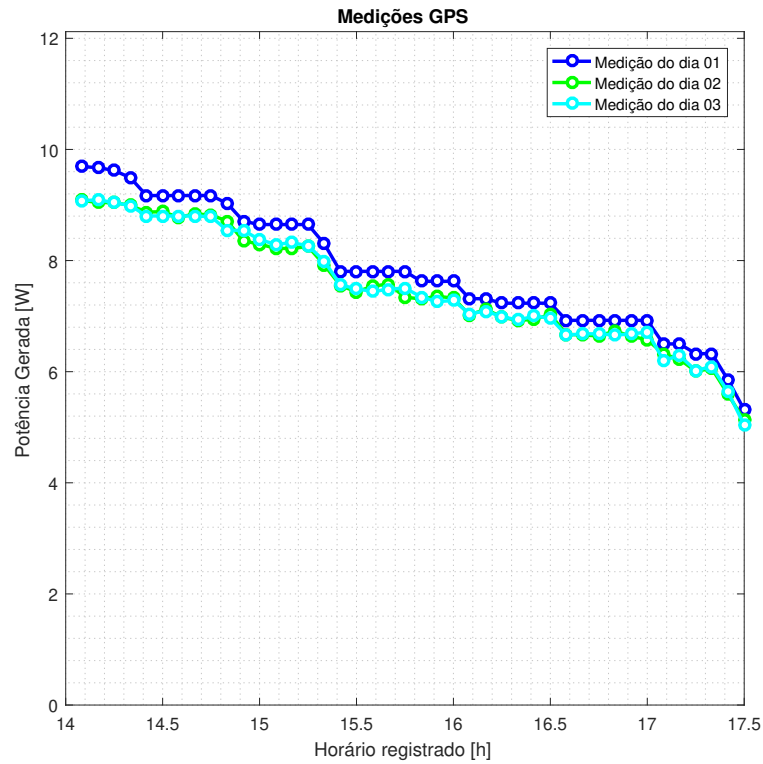
**Figura 4.13:** Amostras da leitura de potência do painel solar de 3 dias utilizando LDRs.



Fonte: Do autor.

A Figura 4.14 mostra a amostragem de potência utilizando GPS durante 3 dias diferentes, sendo que a data da medição do dia 1 também é a mesma da Figura 4.11, e as datas dos dias 2 e 3 são respectivamente 16 e 17 de Março de 2019.

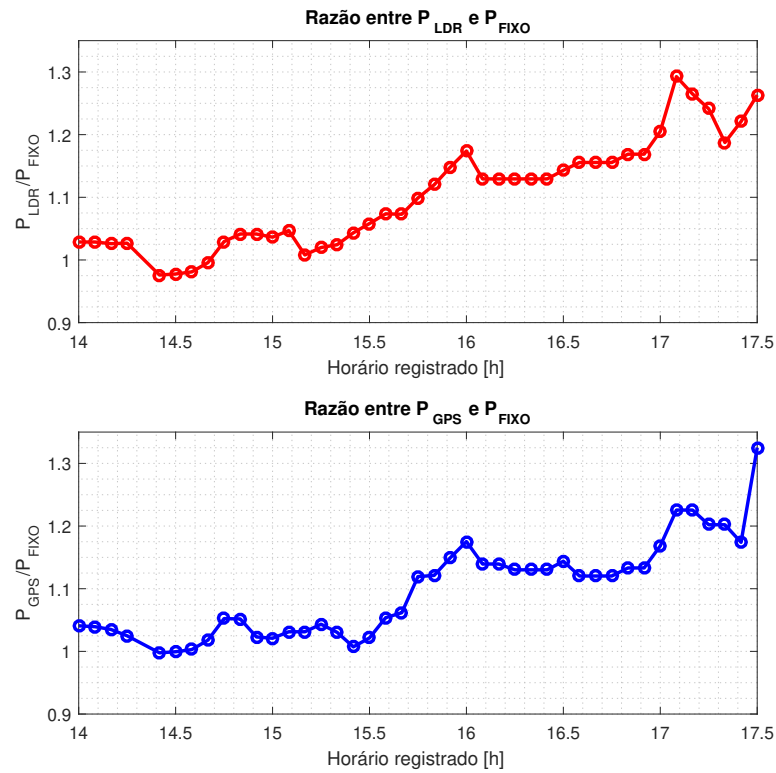
**Figura 4.14:** Amostras da leitura de potência do painel solar de 3 dias utilizando GPS.



Fonte: Do autor.

Na Figura 4.15, podemos observar a razão entre a potência obtida com a orientação GPS sobre a potência com painel fixo, e também a potência obtida com o sistema de LDRs sobre a potência do painel fixo.

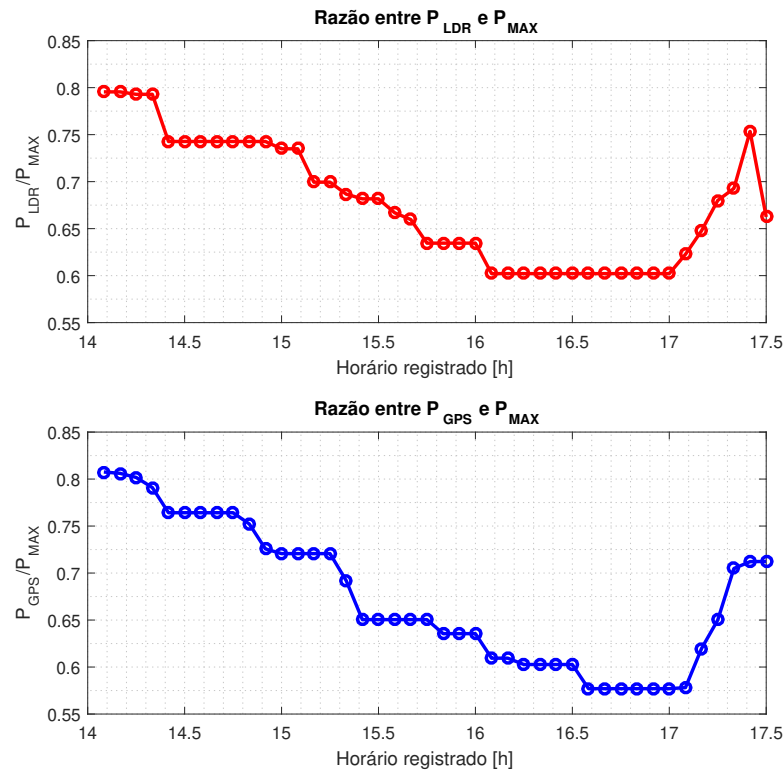
**Figura 4.15:** Razão entre as potências obtidas com orientação sobre a potência sem orientação.



Fonte: Do autor.

A relação entre as amostras obtidas e a potência ideal pode ser observada na Figura 4.16.

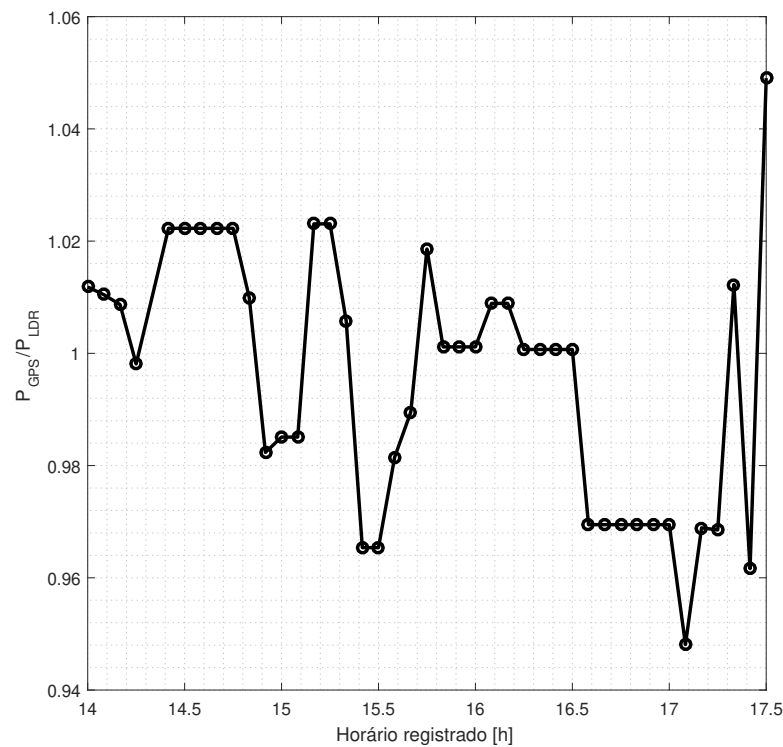
**Figura 4.16:** Razão entre as potências obtidas com orientação sobre a potência ideal.



Fonte: Do autor.

Podemos observar que houve um ganho de desempenho de até 30% com os LDRs e de até 32.5% com o GPS. Também foi possível perceber, que com os sistemas de orientação a potência obtida foi até 80% da potência considerada ideal. Na Figura 4.17, temos a razão entre a potência obtida com a orientação do GPS sobre a potência obtida com a orientação do LDR. Nela é possível observar que a variação máxima entre as duas abordagens é de 5%, o que torna ambas abordagens vantajosas. Calculando o valor médio quadrático deste gráfico, obtêm-se o valor 0,9947. Com isso pode-se concluir que as duas abordagens possuem um valor aproximado entre si de 99,47%.

**Figura 4.17:** Razão entre as potências obtidas com orientação GPS sobre a potência com orientação LDR.



Fonte: Do autor.

## 4.6 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos deste trabalho, desde amostragem dos sensores utilizados para avaliar seu desempenho individualmente, amostragem do sistema em operação e uma análise da potência lida. Foi possível avaliar que um sistema fotovoltaico orientado, seja por LDR ou GPS, possui um desempenho superior a um sistema com painéis fixos.

Porém é necessário salientar que embora a leitura obtida do sistema com LDRs e do sistema com GPS apresentassem um desempenho semelhante, ambas possuem vantagens e desvantagens de operação que foram observadas durante a realização destes trabalho.

O GPS, embora tenha apresentado um erro menor quando comparado ao LDR, como visto na Seção 4.3, ele pode demorar uma quantidade considerável de tempo até obter seu posicionamento, após ser alimentado. Dependendo da localização atual, condições de tempo, e fatores externos, como a disponibilidade

de satélites, o tempo pode variar de 1 segundo até 40 minutos. Entretanto, após obter sua localização inicial, não houve nenhuma ocorrência neste trabalho em que essa localização fosse perdida posteriormente.

Os LDRs, por sua vez, apresentaram um erro um pouco maior que o GPS, mesmo com um filtro média móvel aplicado. Porém, como visto na Seção 4.5, seu desempenho final mostrou-se muito próximo ao do GPS. Ao longo deste trabalho, os LDRs mostraram-se levemente sensíveis a certos tipos de interferência, como uma nuvem movendo-se a uma velocidade moderada.

## 5 Conclusões

Neste capítulo há uma breve revisão do trabalho realizado em suas diversas etapas, e em seguida são apresentadas as considerações finais, onde é feita uma avaliação quantitativa e qualitativa dos resultados obtidos e, por fim, é apresentada uma seção com sugestões para trabalhos futuros que possam ser baseados neste presente documento.

### 5.1 Revisão do projeto

Neste trabalho foi desenvolvido sistema de orientação de painel fotovoltaico utilizando LDRs, GPS e um robô móvel, com o fim de otimizar a energia fornecida pelo painel.

Inicialmente foi feita uma pesquisa sobre o estado da arte, visto no capítulo 2.1 e em paralelo foram realizadas as montagens do robô móvel, do sistema da matriz de LDRs, e do sistema de painel fotovoltaico. Em seguida foram realizados testes nos componentes, como o módulo GPS e a bússola eletrônica.

Também foi feita uma revisão sobre os diversos conceitos necessários para a compreensão deste documento no capítulo 2, desde a explicação sobre o funcionamento de certos componentes até conceitos matemáticos e físicos envolvidos.

Para a matriz de LDRs, após sua montagem, foi realizada uma modelagem na forma de vetores, que pode ser vista na seção 3.6. Em paralelo a todos estes passos, os testes eram realizados no microcontrolador e seu código atualizado a cada teste feito. No capítulo 4 encontram-se os resultados obtidos e as análises realizadas nestes.

### 5.2 Considerações Finais

Com este trabalho foi possível avaliar que a eficácia de um painel solar com um sistema de orientação, seja este por LDRs ou por GPS, melhora seu desempenho,

sendo que cada abordagem para orientar o painel possui vantagens e desvantagens. Como citado no capítulo 4, o LDR, embora possua um custo mais baixo e também maior simplicidade em sua implementação, mostrou-se mais sensível a eventuais interferências luminosas. Já o GPS mostrou-se um sistema com um custo um pouco mais elevado e com uma implementação mais complexa, além de ocasionalmente levar uma quantidade considerável de tempo para obter sua localização. Entretanto, possui um erro de posicionamento muito menor quando comparado ao LDR.

O GPS também mostrou que caso seja necessário otimizar a captação de um painel solar orientado, porém em localidade fixa, é necessário somente um relógio, como por exemplo, um dispositivo RTC (*Real Time Clock*), em conjunto com o sistema microcontrolado, pois com uma posição geográfica fixa, apenas as informações de data e hora tornam-se necessárias.

### 5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

A execução e documentação deste trabalho puderam demonstrar o grande potencial existente na energia solar e a pesquisa envolvida nesta área, sendo este potencial não apenas para aplicações em sistemas de potência, mas também em sistemas mais individualizados, como um robô móvel, *drones*, e diversos outros tipos de veículos. Uma outra possível aplicação seria a de um sistema autônomo para instrumentação meteorológica. O trabalho feito por Mendonça et al. (2018) utiliza LDRs como um alternativa de baixo custo a piranômetros comuns. Ou seja, há uma possibilidade de utilizar os mesmo LDRs que orientam o painel solar para operarem simultaneamente como um piranômetro, e também implementar outros sensores, como de umidade e temperatura, para o desenvolvimento de uma centro de instrumentação meteorológica autônomo. Uma outra possibilidade para trabalhos futuros é a análise de outros filtros digitais (Por exemplo, filtro de Kalman) na matriz de LDRs, com o fim de avaliar o ruído atenuado do sistema.

As possibilidades e oportunidades neste ramo de pesquisa tendem a crescer nos próximos anos, o que torna este trabalho uma contribuição para futuros trabalhos envolvendo tanto autonomia de robôs móveis quanto diversos outros sistemas alimentados por energia solar.

# Referências

- ABNT. *NBR11704 - Sistemas Fotovoltaicos - Classificação*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- ALBUQUERQUE, R. O.; SEABRA, A. C. *Utilizando Eletrônica com AO, SCR, TRIAC, UJT, PIT, CI 555, LED, IGBT e FET de Potência*. 1. ed. São Paulo, SP, Brasil: Editora Érica, 2009. ISBN 978-85-365-0246-5.
- BALL, G. J. *Grid-Connected PV Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 2017. 511-529 p. ISBN 9781118927496. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118927496.ch46>>.
- BLAKERS, A.; ZIN, N.; MCINTOSH, K. R.; FONG, K. High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia*, v. 33, p. 1 – 10, 2013. ISSN 1876-6102. PV Asia Pacific Conference 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021300043X>>.
- CHAÏB, A.; KESRAOUI, M.; KECHADI, E. Pv panel positioning using a robot manipulator. In: *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- CHOBANOV, V. The impact of pv orientation in smart grids. In: *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1055–1059.
- DOLARA, A.; GRIMACCIA, F.; LEVA, S.; MUSSETTA, M.; FARANDA, R.; GUALDONI, M. Performance analysis of a single-axis tracking pv system. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 2, n. 4, p. 524–531, 10 2012. ISSN 2156-3381.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. [S.l.]: Wiley, 2013. ISBN 9780470873663.
- EL-RABBANY, A. *Introduction to GPS: The Global Positioning System*. Artech House, 2002. (Artech House mobile communications series). ISBN 9781580531832. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=U2JmghrrB8cC>>.
- European Comission. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. 2018. Disponível em: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>. Acesso em: 2018-11-21.
- FEI, Y.; LV, H. Design of the solar-driven module on modular mobile robot. In: *2012 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 470–473.
- FILHO, K. de S. O.; SARAIVA, M. de F. O. *Sistemas de Coordenadas*. 2012. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/coord.htm>>. Acesso em: 2018-07-05.

- FONSECA-CAMPOS, J.; FONSECA-RUIZ, L.; CORTEZ-HERRERA, P. N. Portable system for the calculation of the sun position based on a laptop, a gps and python. In: *2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.
- GARCÍA, M.; VERA, J. A.; MARROYO, L.; LORENZO, E.; PÉREZ, M. Solar-tracking pv plants in navarra: A 10 mw assessment. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 17, n. 5, p. 337–346, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.893>>.
- GÓMEZ-GIL, F. J.; SIMÓN-MARTÍN, M.; PELÁEZ-VARA, J.; RUIZ-CALVO, J. A review of solar tracker patents in spain. In: . [S.l.: s.n.], 2009.
- GRENA, R. Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110. *Solar Energy*, v. 86, n. 5, p. 1323 – 1337, 2012. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12000400>>.
- GREWAL, M.; ANDREWS, A. *Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB*. Wiley, 2014. (Wiley - IEEE). ISBN 9781118851210. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=s6KbBgAAQBAJ>>.
- HALLIDAY, D. *Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna*. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC, 2009. ISBN 978-8521616085.
- HUGHES, A. *Electric Motors and Drives*. 3. ed. Burlington, MA, E.U.A.: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-7506-4718-2.
- KALOGIROU, S. *Solar Energy Engineering: Process and Systems*. 1. ed. San Diego, CA, EUA: Elsevier Inc., 2009. ISBN 978-0-12-374501-9.
- LORENZO, E. *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. PROGENSA, 1994. ISBN 9788486505554. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=IYc53xZyxZQC>>.
- MENDONÇA, D. do C.; BARROS, R. de; AMORIM, W.; PEREIRA, H. Low-cost solar irradiance meter using ldr sensors. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- MUSTAFA, F. I.; AL-AMMARI, A. S.; AHMAD, F. F. Direct and indirect sensing two-axis solar tracking system. In: *2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.
- NMEA. *Organizational Profile*. 2018. Disponível em: <[http://www.nmea.org/content/about\\_the\\_nmea/about\\_the\\_nmea.asp](http://www.nmea.org/content/about_the_nmea/about_the_nmea.asp)>. Acesso em: 2018-13-04.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC, 1998. ISBN 978-85-2161-243-8.
- OLIVEIRA, S. V. G.; CASTELLAIN, D. A.; FISCHER, J. C. *Fontes de Energia Não Convencionais: Energia Solar*. Joinville, SC, Brasil: UDESC, 2015.
- PARZZANINI, P. D. *Geodésia Geométrica - Notas de Aula*. Belo Horizonte, MG, Brasil: FEAMIG, 2006.

- PLONSKI, P. A.; HOOK, J. V.; ISLER, V. Environment and solar map construction for solar-powered mobile systems. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 32, n. 1, p. 70–82, 02 2016. ISSN 1552-3098.
- PRINCETON.EDU. *Photoresistor*. 2018. Disponível em: <<http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Photoresistor.html>>. Acesso em: 2018-29-01.
- PRINET, D. F. *Coastal Navigation: for Class and Home Study*. 1. ed. Victoria, BC, Canadá: FriesenPress, 2016. ISBN 978-15255-0311-5.
- QST CORPORATION. *3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L*. Xangai, China, 02 2016.
- RAY, S.; TRIPATHI, A. K. Design and development of tilted single axis and azimuth-altitude dual axis solar tracking systems. In: *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- REZAEI, A.; HOSSEINI, S. M.; SHARIFI, S.; HEKMAT, M.; YEKTAY, N.; HOSSEIN, M.; BAYAZ, J. D. Analytical approaches for determining optimal tilt angle and orientation of pv modules considering regional climate conditions. In: *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1119–1124.
- SANGUINO, T. de J. M.; RAMOS, J. E. G. Smart host microcontroller for optimal battery charging in a solar-powered robotic vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 18, n. 3, p. 1039–1049, 06 2013. ISSN 1083-4435.
- SAWICZ, D. *Hobby Servo Fundamentals*. 2018. Disponível em: <<http://www.princeton.edu/~mae412/TEXT/NTRAK2002/292-302.pdf>>. Acesso em: 2018-13-04.
- SIRF TECHNOLOGY, INC. *NMEA Reference Manual*. San Jose, CA, E.U.A., 01 2005.
- SMITH, S. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Elsevier Science, 2013. (Demystifying technology series). ISBN 9780080477329. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=CdtQBAAAQBAJ>>.
- SOHAG, H. A.; HASAN, M.; KHATUN, M.; AHMAD, M. An accurate and efficient solar tracking system using image processing and ldr sensor. In: *2015 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 522–527.
- SOPORI, B.; FRIEDMAN, D. J. Improving silicon solar cell efficiency through advanced cell processing, highly uniform texturing, and thinner cells: Cooperative research and development final report, crada number crd-15-585. *U.S. Department of Energy - OSTI (Office of Scientific and Technical Information)*, 2 2019.
- ST MICROELECTRONICS. *STM32F407xx Datasheet*. 9 2016.

- SUNROM TECHNOLOGIES. *Light Dependent Resistor - LDR*. Ahmedabad, GJ, India, 07 2008.
- THOMAS, G. B.; WEIR, M. D.; HASS, J. *Cálculo Vol. 2*. 12. ed. São Paulo, SP, Brasil: Pearson, 2012. ISBN 978-85-8143-087-4.
- TIBERIU, T.; KREINDLER, L. Design of a solar tracker system for pv power plants. *Acta Polytechnica Hungarica*, v. 7, 04 2010.
- U-BLOX. *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules*. Thalwil, ZH, Suíça, 2011.
- VASTAV, B. K. S.; NEMA, S.; SWARNKAR, P.; RAJESH, D. Automatic solar tracking system using delta plc. In: *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 16–21.

## Apêndice A – Disseminações Científicas

### A.1 Trabalhos Publicados

TOGINHO, D.; ARCHELA, A.; de MELO, L. F., Solar Tracking System with Mobile Robot Using LDR Matrix and GPS, 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2018.

### A.2 Trabalhos Submetidos

TOGINHO, D.; ARCHELA, A.; de MELO, L. F. (2019), Analysis of the Solar Tracking System for a Mobile Robot Prototype, in A. Azizi (Eds.), Emerging Trends in Mechatronics. IntechOpen: London.

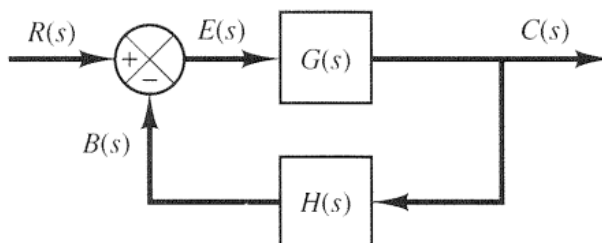
TOGINHO, D.; ARCHELA, A.; de MELO, L. F., Performance Evaluation of Solar Tracking System using LDR and GPS on a Mobile Robot. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019.

## Apêndice B – Sistemas de Controle

### B.1 Malha Fechada

Segundo Ogata (1998), um sistema com retroação é "Um sistema que mantém uma relação preestabelecida entre a grandeza de saída e a grandeza de referência, comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle, é dito um *sistema de controle com retroação*". Como exemplo, podemos citar um controlador de temperatura. Ele mede a temperatura ambiente e a compara com a temperatura desejada, e aciona um determinado equipamento para resfriar ou aquecer de acordo com a necessidade. Muitas vezes, os sistemas de controle com retroação são chamados de Sistemas de Controle em Malha Fechada.

**Figura B.1:** Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada.



Fonte: (OGATA, 1998).

De um ponto de vista mais pragmático, não há uma real distinção entre sistema com retroação e sistema em malha fechada. Em um sistema de malha fechada, temos que o sinal do erro, que é diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroação excita o controlador a fim de reduzir o erro, e fazer com que a saída tenha o valor desejado. A expressão controle em malha fechada implica em uso de retroação para minimizar o erro do sistema. Na figura B.1 podemos observar o diagrama de blocos de um sistema em malha fechada, onde a entrada é o sinal  $R(s)$ , o erro é o sinal  $E(s)$  e a saída é o sinal  $C(s)$ .

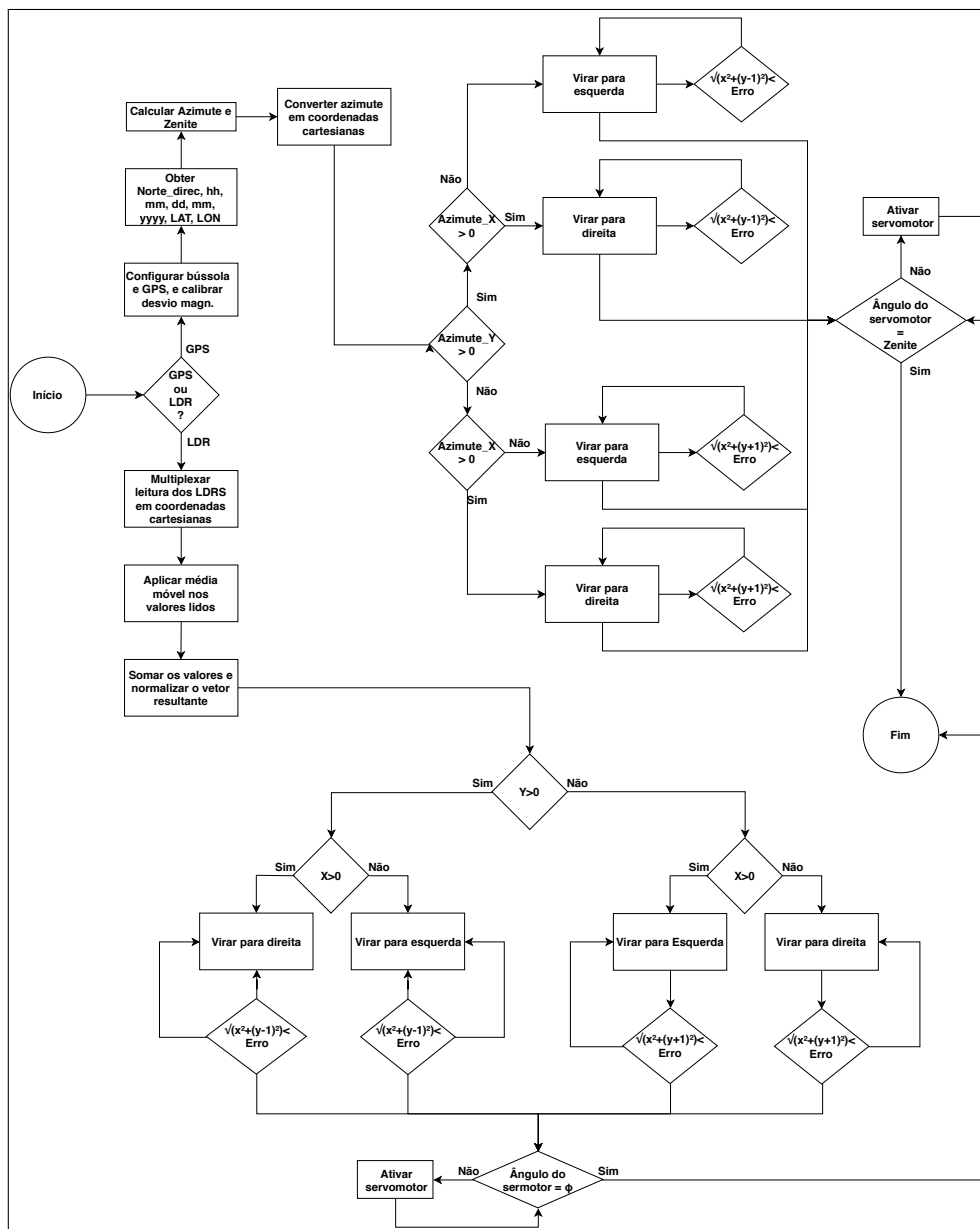
## B.2 Malha Aberta

Quando o sinal de saída não afeta a ação de controle de um sistema, este sistema é um sistema em malha aberta. Ou seja, o o sinal de saída não é medido nem comparado com a entrada. Ou seja, a cada sinal de referência na entrada, há uma condição de operação fixa, de forma que a exatidão do sistema depende de uma calibração. Em aplicações práticas, sistemas em malha aberta são usados quando as relações entre entrada e saída são conhecidas e quando não houverem distúrbios. Um exemplo bem comum são sistemas em que as ações de controle são diretamente uma função do tempo (OGATA, 1998).

## B.3 Conclusão da Seção

Uma vantagem em sistemas de malha fechada é que o uso de retroação diminui a sensibilidade da resposta do sistema a perturbações externas e variações internas. Quanto a estabilidade, há mais facilidade em construir sistemas de malha aberta pois são menos instáveis, diferente de sistemas de malha fechada que tendem pela correção de erros além do necessário, o que pode gerar oscilações de amplitude constante ou crescente com o tempo (OGATA, 1998).

## Apêndice C – Fluxograma do Sistema de Controle Embarcado



# Anexo A – Datasheet do GPS



NEO-6 - Data Sheet

## 1.14.3 Power Save Mode

Power Save Mode (PSM) allows a reduction in system power consumption by selectively switching parts of the receiver on and off.



**Power Save mode is not available with NEO-6P, NEO-6T and NEO-6V.**

## 1.15 Configuration

### 1.15.1 Boot-time configuration

NEO-6 modules provide configuration pins for boot-time configuration. These become effective immediately after start-up. Once the module has started, the configuration settings can be modified with UBX configuration messages. The modified settings remain effective until power-down or reset. If these settings have been stored in battery-backup RAM, then the modified configuration will be retained, as long as the backup battery supply is not interrupted.

NEO-6 modules include both **CFG\_COM0** and **CFG\_COM1** pins and can be configured as seen in Table 6. Default settings in bold.

CFG_COM1	CFG_COM0	Protocol	Messages	UARTBaud rate	USB power
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>NMEA</b>	<b>GSV, RMC, GSA, GGA, GLL, VTG, TXT</b>	<b>9600</b>	<b>BUS Powered</b>
1	0	NMEA	GSV, RMC, GSA, GGA, GLL, VTG, TXT	38400	Self Powered
0	1	NMEA	GSV <sup>14</sup> , RMC, GSA, GGA, VTG, TXT	4800	BUS Powered
0	0	UBX	NAV-SOL, NAV-STATUS, NAV-SVININFO, NAV-CLOCK, INF, MON-EXCEPT, AID-ALPSERV	57600	BUS Powered

Table 6: Supported COM settings

NEO-6 modules include a **CFG\_GPS0** pin, which enables the boot-time configuration of the power mode. These settings are described in Table 7. Default settings in bold.

CFG_GPS0	Power Mode
0	Eco Mode
<b>1</b>	<b>Maximum Performance Mode</b>

Table 7: Supported CFG\_GPS0 settings



Static activation of the **CFG\_COM** and **CFG\_GPS** pins is not compatible with use of the SPI interface.

## 1.16 Design-in

In order to obtain the necessary information to conduct a proper design-in, u-blox strongly recommends consulting the LEA-6/NEO-6/MAX-6 Hardware Integration Manual [1].

<sup>14</sup> Every 5<sup>th</sup> fix.



NEO-6 - Data Sheet

## 2 Pin Definition

### 2.1 Pin assignment

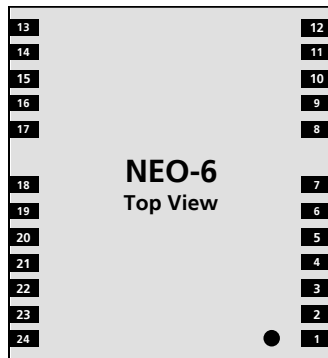


Figure 2 Pin Assignment

No	Module	Name	I/O	Description
1	All	Reserved	I	Reserved
2	All	SS_N	I	SPI Slave Select
3	All	TIMEPULSE	O	Timepulse (1PPS)
4	All	EXTINT0	I	External Interrupt Pin
5	All	USB_DM	I/O	USB Data
6	All	USB_DP	I/O	USB Data
7	All	VDDUSB	I	USB Supply
8	All	Reserved		See Hardware Integration Manual Pin 8 and 9 must be connected together.
9	All	VCC_RF	O	Output Voltage RF section Pin 8 and 9 must be connected together.
10	All	GND	I	Ground
11	All	RF_IN	I	GPS signal input
12	All	GND	I	Ground
13	All	GND	I	Ground
14	All	MOSI/CFG_COM0	O/I	SPI MOSI / Configuration Pin. Leave open if not used.
15	All	MISO/CFG_COM1	I	SPI MISO / Configuration Pin. Leave open if not used.
16	All	CFG_GPS0/SCK	I	Power Mode Configuration Pin / SPI Clock. Leave open if not used.
17	All	Reserved	I	Reserved
18	All	SDA2	I/O	DDC Data
19	All	SCL2	I/O	DDC Clock
20	All	TxD1	O	Serial Port 1
21	All	RxD1	I	Serial Port 1



NEO-6 - Data Sheet

No	Module	Name	I/O	Description
22	All	V_BCKP	I	Backup voltage supply
23	All	VCC	I	Supply voltage
24	All	GND	I	Ground

**Table 8: Pinout**

Pins designated Reserved should not be used. For more information about Pinouts see the LEA-6/NEO-6/MAX-6 Hardware Integration Manual [1].

## Anexo B – Datasheet da bussola digital

### 2 SPECIFICATIONS AND I/O CHARACTERISTICS

#### 2.1 Product Specifications

Table 2. Specifications (\* Tested and specified at 25°C except stated otherwise.)

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage	VDD	2.16		3.6	V
I/O Voltage	VDDIO	1.65		3.6	V
Standby Current	Total Current on VDD and VDDIO		3		μA
Continuous Mode Current	Low/High Power Mode (OSR=64 or 512)	ODR = 10Hz	75/100		μA
		ODR = 50Hz	150/250		μA
		ODR = 100Hz	250/450		μA
		ODR = 200Hz	450/850		μA
Peak Current in Active State	Peak Current on VDD and VDDIO During Measurement		2.6		mA
Sensor Field Range	Full Scale	-8		+8	Gauss
Dynamic Output Field Range	Programmable with 2 options	±2		±8	Gauss
Sensitivity <sup>(1)</sup>	Field Range = ±2G		12000		LSB/G
	Field Range = ±8G		3000		LSB/G
Linearity (Best fit linear curve)	Field Range = ±2G		0.1		%FS
Hysteresis	All Ranges		0.3		%FS
Cross Axis Sensitivity	Cross field = 1 Gauss, Happlied = ±2 Gauss		0.1		%/G
Offset			±10		mG
Sensitivity Tempco	Ta = -40°C ~85°C		±0.05		%/°C
Temperature Sensor Sensitivity	Ta = -40°C ~85°C		100		LSB/°C
Digital Resolution	Change with Gain	0.1		1.0	mGauss
Field Resolution	Standard deviation 100 Data, FS ±2G		5		mGauss
Output Data Rate	Programmable. 10Hz/50Hz/100Hz/200Hz	10		200	Samples/sec
X-Y-Z Orthogonality	Sensitivity Directions		90±1		degree
Operating Temperature		-40		85	°C
ESD	HB Model	2000			V
	Machine Model	200			

Note [1]: Sensitivity is calibrated at zero field, it is slightly decreased at high fields.

## 6 MODES OF OPERATION

### 6.1 Modes Transition

The device has two different operational modes, controlled by register (09H), mode bits. The main purpose of these modes is for power management. The modes can be transitioned from one to the other, as shown below, through I<sup>2</sup>C commands of changing mode bits. The default mode is Standby.

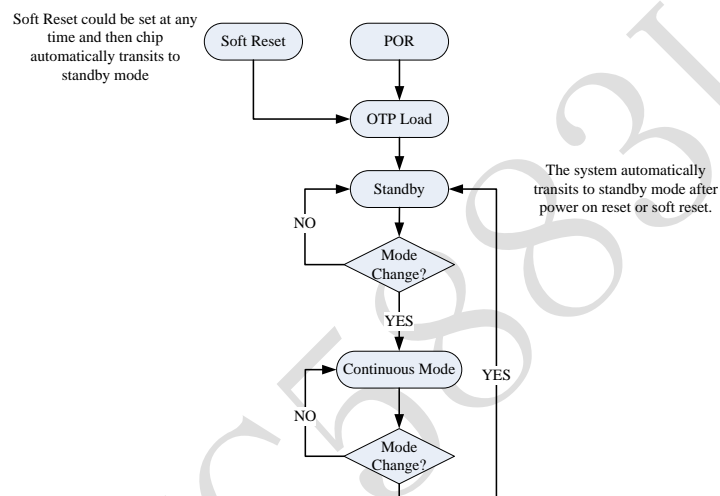


Figure 9. Modes Transition

### 6.2 Description of Modes

#### 6.2.1 Continuous-Measurement Mode

During the continuous-measurement mode (mode bits= 01), the magnetic sensor continuously makes measurements and places measured data in data output registers. The field range (or sensitivity) and data output rate registers are also located in the control register (09H), they should be set up properly for your applications in the continuous-measurement mode.

For example, if the application requires output data rate 50Hz, the ODR bit in control register (09H) should be 01. If the field range is +/-8 Gauss, the RNG =01.

The over sample rate is optional for you to use. The default is OSR=00, if your application has enough resolution and need low power consumption, you may reduce OSR to a lower number, such as OSR=10 (128) or OSR =11 (64).

In the continuous-measurement mode, the magnetic sensor data are automatically compensated for offset and temperature effects. The gains are calibrated in the factory.

##### 6.2.1.1 Normal Read Sequence

Complete magnetometer data read-out can be done as follow steps.

- ✧ Check DRDY pin or by polling DRDY bit in Register 06H
- ✧ Read DRDY bit in Register 06H (if polling, it's unnecessary)

#### 6.2.1.4 Data Locks Until Next Measurement Ends

Data lock is activated once any of the data register is accessed. If 05H (data unlock) is not accessed until next measurements ends, current data blocks next data to update data register. In this case, DOR bit is also set to "1" until 06H is accessed in next data read.

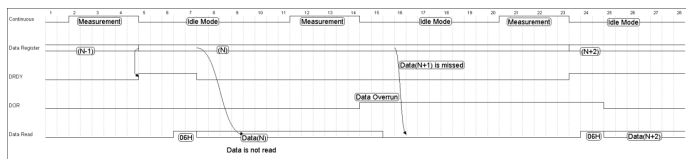


Figure 13. Sequence When Data Locks

#### 6.2.1.5 Interrupt

An interrupt is generated on DRDY pin each time that magnetic field is measured. The interrupt can be disabled by set 0AH[0] = 1.

#### 6.2.2 Standby Mode

Standby mode is the default state of QMC5883L upon POR and soft reset, only few function blocks are activated in this mode, which keeps power consumption as low as possible. In this state, register values are hold on by an ultra-low power LDO, I<sup>2</sup>C interface can be woken up by reading or writing any registers. There is no magnetometer measurement in the Standby mode. Internal clocking is also halted.

## 7 Application Examples

### 7.1 Continuous Mode Setup Example

- ✧ Write Register 0BH by 0x01 (Define Set/Reset period)
- ✧ Write Register 09H by 0x1D (Define OSR = 512, Full Scale Range = 8 Gauss, ODR = 200Hz, set continuous measurement mode)

### 7.2 Measurement Example

- ✧ Check status register 06H[0], "1" means ready.
- ✧ Read data register 00H ~ 05H.

### 7.3 Standby Example

- ✧ Write Register 09H by 0x00

### 7.4 Soft Reset Example

- ✧ Write Register 0AH by 0x80