



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Rodrigo Santa Rita de Jesus

**SISTEMA DE CONTROLE DE
DESLOCAMENTO ANGULAR VISANDO O
AUMENTO DE DESEMPENHO DE PAINÉIS
SOLARES EM TRANSPORTE FLUVIAL**

Manaus
2015

Rodrigo Santa Rita de Jesus

**SISTEMA DE CONTROLE DE
DESLOCAMENTO ANGULAR VISANDO O
AUMENTO DE DESEMPENHO DE PAINÉIS
SOLARES EM TRANSPORTE FLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador Me. Charles Luiz Silva de Melo

Manaus
2015

Rodrigo Santa Rita de Jesus

**SISTEMA DE CONTROLE DE DESLOCAMENTO
ANGULAR VISANDO O AUMENTO DE
DESEMPENHO DE PAINÉIS SOLARES EM
TRANSPORTE FLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em 13 de Junho de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Me. Charles Luiz Silva de Melo
Orientador

**Dr. Walter Andres Vermehren
Valenzuela**
Presidente da banca

Dra. Marlene Araujo de Faria
Convidado 1

Prof. Marivan Silva Gomes
Convidado 2

Manaus
2015

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha mãe Maria de Jesus, que é minha inspiração para ser uma pessoa melhor e que esteve presente em todas as etapas da minha vida, me ajudando a levantar em momentos difíceis e celebrando minhas vitórias. Ela é uma guerreira que sempre lutou pelo meu crescimento e que me deu suporte em todas as minhas conquistas.

A todos meus amigos de graduação, em especial a Dilermando Ferreira, Filipe Máximo, Lucas Bonetti, Talita Vilela, Dianny Pontes, Izoneide Leite, Nilteomar Nascimento, Daniel Castro, Eiji Maeda e Rafael Goulart que estiveram presentes nesta luta diária pelo alcance dos nossos objetivos, deixando de lado quaisquer individualidades, trabalhando como irmãos. Jamais teria chegado aonde cheguei sem eles.

Um agradecimento especial para Antonio Benjamim e Isabelle Stoco que me ajudaram em diversos momentos, orientando tanto na parte técnica como na formatação deste trabalho. Agradeço a Ana Carolina Sampaio, que se disponibilizou para me ajudar na revisão desta monografia. A Francisco Pereira, meu supervisor de estágio, por sua compreensão e ajuda no período em que escrevi a monografia. A Carla Michiles, pela ajuda no desenvolvimento do sistema seguidor solar. Agradeço a Ingrid Santos que sempre me motivou com seus conselhos.

Agradeço aos meus amigos Dudes, Rhay, Viadjulio, Tião e Leo, que apesar da distância me incentivaram muito na realização deste projeto.

Agradeço a Francisco Terto que me auxiliou na configuração da impressora 3d.

A todos que de forma direta ou indireta me ajudaram, com uma palavra de apoio, ou conselho.

Obrigado a Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação e seus professores, em especial ao meu orientador Charles Melo, que por meio da Universidade do Estado do Amazonas, deu subsídios para a realização deste projeto.

*“E se quiser saber pra onde eu vou
Pra onde tenha sol,
É pra lá que eu vou.”
(Jota Quest)*

Resumo

A utilização de energia solar fotovoltaica vem crescendo cada vez mais no Brasil, apresentando-se de forma concentrada na região Nordeste. Infelizmente a eficiência energética deste tipo de geração de energia ainda é considerada baixa. Assim como no Nordeste, a região Norte se situa numa área com alto potencial para uso desta energia. Esta monografia apresenta um sistema de controle como proposta de melhoria no aproveitamento desta energia em embarcações. O sistema se trata de um seguidor de luz que tem como diferencial a utilização de um acelerômetro e magnetômetro, tornado possível a utilização de painéis solares em ambientes que se encontram em movimento. Um controlador P se mostrou suficiente para gerar uma resposta satisfatória do sistema dentro das condições de contorno. Foi percebida uma melhoria de mais de 50% de geração de energia nos horários em que a angulação do sol era maior. De modo geral o aumento registrado foi de 20 a 25%, quando comparado ao fixo. O sistema se mostrou satisfatório para implementação em embarcações fluviais.

Palavras-chaves: Sistema de Controle, Energia Solar Fotovoltaica, Servomotores, Micro-controlador.

Abstract

The use of photovoltaic solar energy has been growing strongly in Brazil, particularly in the Northeast. Unfortunately the energy efficiency of this type of power generation is still considered low. As in the Northeast, the Northern region is located in an area with great potential for using this energy. This paper presents a control system as a proposed improvement for the use of this energy in ships. The system is a sunlight follower which uses an accelerometer and magnetometer, allowing the installation of solar panels in moving environments. A P controller proved sufficient to generate a satisfactory response of the system within the boundary conditions. An improvement of more than 50% of power generation at times when the sun angle was greater was perceived. Generally speaking the increase recorded was 20 to 25%, when compared to fixed. The system proved to be suitable for implementation in river boats.

Key-words: Control System, Photovoltaic Solar Energy, Servomotors, Microcontroller.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Evolução das Diferentes Fontes de Energia (Energia Solar em Amarelo)	13
Figura 2	– Produção Mundial de Células Fotovoltaicas	17
Figura 3	– Mapa Brasileiro da Média de Irradiação Solar Anual	18
Figura 4	– Funcionamento da Célula Fotovoltaica	19
Figura 5	– Célula Solar Fotovoltaica	20
Figura 6	– Rodovias na Região Norte	21
Figura 7	– Hidrovias na Região Norte	21
Figura 8	– Chuvas em Manaus no Ano de 2014	22
Figura 9	– Chuvas em Eurinepé no Ano de 2014	22
Figura 10	– Gráfico Comparativo da Energia Gerada em Sistema Fixo e Sistema de Dois Eixos	23
Figura 11	– Seguidor Passivo	24
Figura 12	– Comparação da Energia Produzida de um Sistema Usando Diferentes Seguidores	25
Figura 13	– Seguidor de Dois Eixos	26
Figura 14	– Estrutura de um Microcontrolador	27
Figura 15	– Componentes de um Servomotor	28
Figura 16	– Funcionamento do PWM	29
Figura 17	– Malha fechada	30
Figura 18	– Diagrama Elétrico de um Servomotor	30
Figura 19	– Funcionamento acelerômetro	31
Figura 20	– Funcionamento do Magnetômetro	32
Figura 21	– Simbologia do LDR	33
Figura 22	– Roda Solar da JPM	35
Figura 23	– <i>Sunny Beam</i>	35
Figura 24	– Suporte Utilizado por Cortez et al. (2014)	36
Figura 25	– Comportamento do Suporte em Relação à Luz do Sol	37
Figura 26	– Comparação de Potencia e Energia Geradas	37
Figura 27	– Foto do servomotor e engrenagens	39
Figura 28	– Fotos do Protótipo Durante os Testes	40
Figura 29	– Etapas de Execução do Projeto	41
Figura 30	– Funcionamento do Sistema	42
Figura 31	– Célula com Com eixos N-S e L-O Definidos	42
Figura 32	– Arduino Mega 2560®	44
Figura 33	– IDE Arduino	45
Figura 34	– LSM303DLM e Sua Pinagem	46
Figura 35	– Referencia do Norte para Calibrar o Sistema	47
Figura 36	– LDR Usado no Projeto	48

Figura 37 – LDR's Posicionados no Suporte	49
Figura 38 – Conexão entre LDR's e Arduino	50
Figura 39 – Servomotor MG995	51
Figura 40 – Identificação dos Servomotores no Protótipo	52
Figura 41 – Conexão dos Servomotores no Microcontrolador	53
Figura 42 – Circuito do Sistema Seguidor	54
Figura 43 – Fluxograma de Funcionamento	55
Figura 44 – Circuito Utilizado na Identificação do Modelo do Servomotor	56
Figura 45 – Ângulos Recebidos na Porta COM3	56
Figura 46 – <i>Ident</i> MATLAB®	57
Figura 47 – <i>Interface</i> de Ajuste de Parâmetros	58
Figura 48 – Interface de definição de Controlador	58
Figura 49 – Resposta do Controlador Tipo P	59
Figura 50 – Resposta do Controlador Tipo PI	59
Figura 51 – Resposta do Controlador Tipo PID	60
Figura 52 – Suporte da Base	61
Figura 53 – Suporte da Placa	61
Figura 54 – Visão dos Suportes no Repetier	62
Figura 55 – Impressão do Suporte da Placa	63
Figura 56 – Estrutura Montada	64
Figura 57 – Teste do Seguidor Com Luz Artificial	65
Figura 58 – Teste do Seguidor Com Luz Solar	65
Figura 59 – Teste Bússola	66
Figura 60 – Diagrama de Blocos no Simulink	67
Figura 61 – Resposta da Planta Sem Controladores	68
Figura 62 – Planta com Controlador P	68
Figura 63 – Planta com Controlador PI ou PID	68
Figura 64 – Comparação Entre as Potências Geradas	69

Lista de tabelas

Tabela 1	– Empreendimentos de Geração de Energia em Operação	19
Tabela 2	– Comparação Entre a Energia Gerada em Ambos os Sistemas	36
Tabela 3	– Geração com Quatro Módulos Fotovoltaicos em Cada Conjunto	38
Tabela 4	– Especificações da Célula Solar	43
Tabela 5	– Características do Arduino Mega 2560@	44
Tabela 6	– Características e Aplicações do LSM303DLM	46
Tabela 7	– Especificações do Sensor LDR 5mm	49
Tabela 8	– Especificações MG995	51
Tabela 9	– Energia Gerada	70

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problemática	13
1.2	Motivação	13
1.3	Justificativa	14
1.4	Objetivo	14
1.5	Metodologia	15
1.6	Estrutura do trabalho	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Energia solar fotovoltaica	17
2.1.1	Radiação solar no Amazonas	18
2.1.2	Painéis solares	19
2.2	Transporte fluvial no Amazonas	20
2.3	Chuvas na região Amazônica	22
2.4	Sistemas seguidores de luz solar	23
2.4.1	Seguidores passivos	24
2.4.2	Seguidores ativos	24
2.4.2.1	Seguidor de dois eixos	25
2.5	Microcontroladores	26
2.6	Servomotores	27
2.7	Sensores acelerômetros e magnetômetros	30
2.8	Sensor de intensidade de luz LDR	32
3	ESTADO DA ARTE	34
3.1	Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica	34
3.2	Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com segui- dor solar azimuthal	38
3.3	Seguidor solar de um único eixo inclinado	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	Célula solar fotovoltaica	42
4.2	Microcontrolador Arduino	43
4.3	Sensor acelerômetro e magnetômetro	45
4.4	Sensor de luminosidade	48
4.5	Servomotores	50

4.6	Ilustração da conexão dos componentes e fluxograma de funcionamento	53
4.7	Estimação do modelo do servomotor	55
4.7.1	Ferramenta de identificação de sistemas	57
4.7.2	Obtenção do controlador do sistema	58
4.8	Construção do protótipo	60
4.8.1	Desenho das peças	60
4.8.2	Software de impressão	62
4.8.3	Confecção das peças e montagem da estrutura	63
4.9	Testes práticos	65
5	SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1	Controlador	67
5.2	Geração de energia	69
6	CONCLUSÕES	71
6.1	Dificuldades encontradas	71
6.2	Trabalhos futuros	72
	Referências	73

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias para geração de energia por meio de fontes renováveis vem sendo impulsionado cada vez mais no Brasil. O Ministério de Minas e Energia (2007) informa que a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira no ano de 2005 foi de 44,5% do total, enquanto na matriz mundial esta participação foi de apenas 14%. Como cenário futuro para o ano de 2030, é previsto o aumento da parcela de energias renováveis para 46,6%, reduzindo de forma mais acentuada a utilização do petróleo e seus derivados. Recentemente uma destas fontes renováveis vem ganhando destaque, trata-se da energia solar fotovoltaica.

De acordo com o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Espírito Santo CREA-ES (2015), o uso da energia solar cresce 30% ao ano no mundo. Além disso, governos e cientistas de todo o mundo estão empenhados para desenvolver tecnologias acessíveis e limpas de energia solar. Com esse recurso, praticamente inesgotável, a sustentabilidade irá aumentar e a poluição também irá reduzir. Vale lembrar que a região Amazônica se situa numa área de alto potencial para uso de energia solar.

Este projeto propõe a otimização da utilização de painéis solares em embarcações fluviais, por meio de um sistema de controle de ajuste de posição angular, que orienta o painel solar para um ponto onde há maior intensidade de luz solar, compensando assim as perdas de potência causadas pelo deslocamento da embarcação, e pela mudança da angulação entre o Sol e a Terra durante o dia.

De acordo com Barbosa et al. (2014) o transporte fluvial no Amazonas tem uma importância socioeconômica bastante significativa para toda a região, gerando emprego, renda e continuidade do transporte de passageiros e carga. Vale ressaltar que o transporte fluvial é o responsável pelo transporte de maioria dos passageiros e da carga no interior do estado do Amazonas; diferentemente de outros estados brasileiros que utilizam o transporte rodoviário com maior frequência.

Oliveira (2013) explica que barcos solares são embarcações que utilizam módulos fotovoltaicos para captar a energia solar. Essa energia pode ou não ser armazenada por baterias, e será convertida por um motor elétrico em energia cinética para locomover a embarcação. Além dos barcos puramente solares, existem também modelos híbridos que utilizam a energia solar para suprir energia para elementos secundários como iluminação. O transporte fluvial no Amazonas seria beneficiado de forma significativa por meio da utilização de este tipo de embarcação.

Embarcações são objetos móveis, logo para utilização de energia solar é necessário criação de métodos para aumentar a captação luz solar pelos módulos fotovoltaicos, que possuem eficiência de conversão energética relativamente baixa.

1.1 Problemática

A navegação fluvial é o meio de transporte mais utilizado na região norte, dada a grande rede de rios navegáveis e a precariedade dos demais meios. Paralelamente a este fato, a região Amazônica possui um alto potencial para utilização de painéis solares como fonte de energia elétrica.

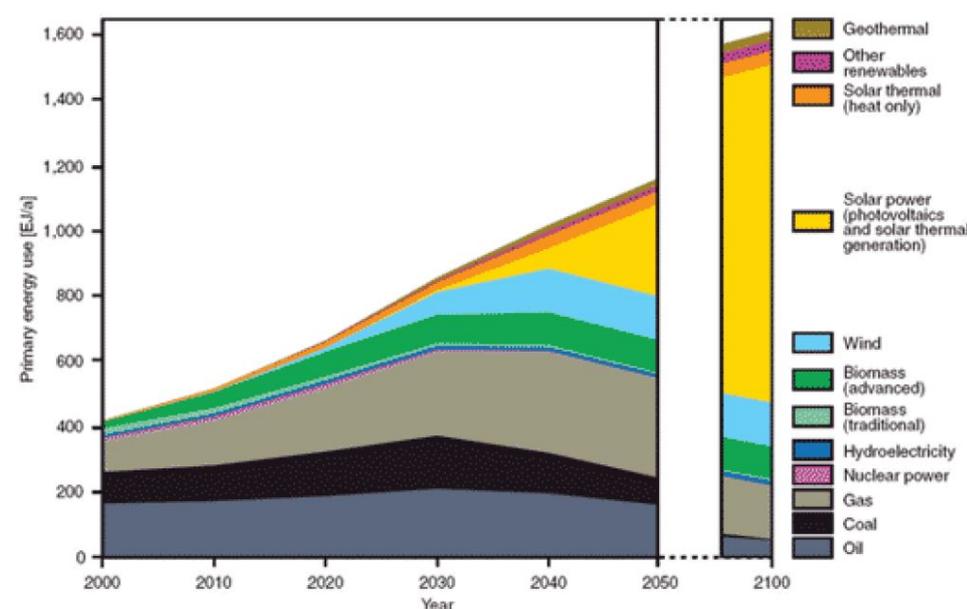
No entanto, no campo da geração de energia elétrica, existem barreiras técnicas a serem enfrentadas em relação à eficiência desse tipo de geração de energia. Segundo Shahidian et al. (2014) a tecnologia atual de painéis fotovoltaicos permite transformar essa energia em eletricidade com uma eficiência de cerca de 14-15%.

Com base no descrito acima, este trabalho propõe a otimização da utilização de painéis solares em embarcações fluviais, por meio de um sistema de controle de ajuste de posição angular, que orienta o painel solar para um ponto onde há maior intensidade de luz solar, compensando assim as perdas de potência causadas pelo deslocamento da embarcação.

1.2 Motivação

A tecnologia solar fotovoltaica vai ser alvo de estudo nesta monografia. Cortez et al. (2014) explica que tal tecnologia pode se tornar uma das fontes energéticas com maior crescimento no futuro como se pode ver na Figura 1.

Figura 1 – Evolução das Diferentes Fontes de Energia (Energia Solar em Amarelo)



Fonte: Cortez et al. (2014)

De acordo com Castro (2007) instalações de sistemas fotovoltaicos, autônomos e principalmente os conectados à rede de energia elétrica têm crescido em todos os continentes.

A maior parte destes sistemas é utilizado em ambientes imóveis, desta forma, caso fossem implantados em sistemas móveis, não seria obtido o melhor aproveitamento de luz solar.

1.3 Justificativa

A construção de um sistema de ajuste de posição angular envolve a utilização de vários conceitos estudados nas disciplinas de Engenharia de Controle e Automação, tais como: Circuitos Elétricos I e II; Linguagem de Programação I e II; Controle e Automação I; Microprocessadores e Microcontroladores; Sistemas Dinâmicos; Eletrônica Analógica; Eletrônica Digital.

Cortez et al. (2014) explica que o preço de painéis fotovoltaicos está caindo gradativamente, este fato, somado à procura que se tem sentido por este tipo de tecnologia, tornou o investimento em tecnologias que possam aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos viável.

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos depende de vários aspectos entre os quais os seguintes; qualidade das células fotovoltaicas, sombreamento nas células, capacidade de seguimento do Sol de forma a maximizar a incidência da radiação solar, a temperatura, entre outros. A análise destes fatores para a criação de um seguidor de luz capaz de se adaptar a ambientes móveis, possibilita a utilização desta tecnologia em transporte fluvial, o meio de transporte mais utilizado no Amazonas.

1.4 Objetivo

Objetivo geral

Construir protótipo onde será embarcado sistema controle de ajuste de posição angular de painel solar, com uso voltado para transporte fluvial, utilizando servomotores, microcontrolador Arduino®, sensores de luz LDR, e sensor acelerômetro/magnetômetro. Realizar teste comparativos e analisar seus resultados para validação do protótipo.

Objetivos específicos

- Identificar as melhores teorias utilizadas relacionadas ao tema proposto;
- Projetar sistema de comunicação do hardware envolvido (todos os sensores, o microcontrolador e os servomotores);
- Especificar e projetar partes e peças para estrutura do protótipo;
- Estimar com auxílio de ferramentas de software a modelagem matemática dos servomotores;

- Projetar com auxílio de ferramentas de software o controlador e gerar o algoritmo de controle;
- Desenvolver o protótipo em fase final ;
- Avaliar os resultados obtidos.

1.5 Metodologia

O primeiro passo na execução deste projeto é o levantamento bibliográfico sobre o tema abordado nesta monografia, desta maneira é possível determinar um objetivo mais claro, além de analisar materiais e metodologias já utilizadas por outros autores, estes itens servem como base para a escolha dos materiais, o planejamento e para a execução do projeto.

O levantamento dos materiais a serem utilizados foi realizado no início do projeto, desta forma as limitações do projeto ficam estabelecidas, facilitando o planejamento. Este projeto faz uso de microcontrolador Arduino®, sensor de luz e acelerômetro/magnetômetro, célula solar e servomotores. Testes em cada um dos componentes do sistema foram realizados para garantir um bom funcionamento do protótipo.

O projeto trata de controle de servomotores, para isso faz-se necessário o estudo do funcionamento dos mesmos e utilizando-se de ferramentas de software são obtidas as informações necessárias para obtenção de uma função de transferência aproximada do modelo utilizado. A partir destes valores é gerado, também com uso de software, a equação do controlador do sistema. Todas estas informações são implementadas no microcontrolador utilizando algoritmos de controle do sistema.

Para construção do protótipo fez-se necessário utilização de impressora 3d para confecção das peças onde serão fixados os servomotores e célula solar. Depois de montado, foram realizados testes para analisar o funcionamento do protótipo, a partir de tal análise é possível concluir se o sistema opera de maneira satisfatória.

1.6 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho está composta em seis capítulos dispostos da seguinte maneira:

No capítulo 1 é exposto uma introdução do trabalho, suas justificativas, motivações, objetivo a ser alcançado e a metodologia a ser utilizada. No fim do mesmo há uma visão organizacional do projeto.

No segundo capítulo o referencial teórico é explorado, com a contextualização do problema e das teorias a serem utilizadas no desenvolvimento, bem como a descrição das tecnologias utilizadas.

O capítulo 3 apresenta trabalhos que estão relacionados com o projeto e os pontos importantes para a realização do mesmo. É descrito os métodos utilizados pelos autores e os resultados por eles obtidos.

No capítulo 4 são apresentados os materiais utilizados e como os mesmos se relacionam, abordando as comunicações e os algoritmos implementados para garantir o funcionamento do sistema.

No capítulo 5 são mostrados as simulações e testes e o estudo das respostas. Parâmetros de desempenho são inclusos nas análises para a verificação da efetividade do modelo empregado.

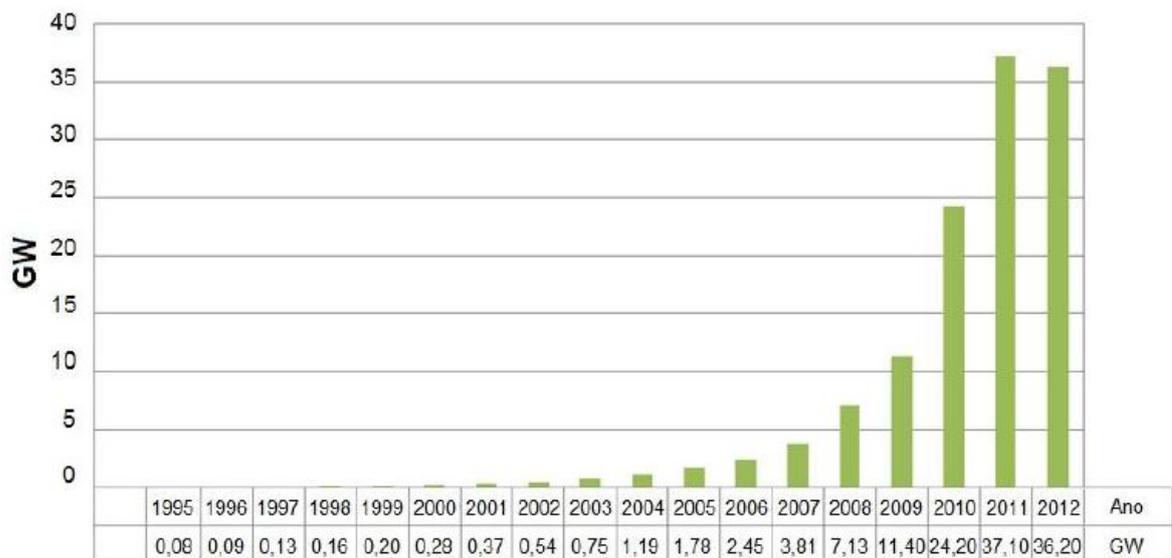
No capítulo 6 são feitas as conclusões do projeto referentes aos dados obtidos, além de expor as dificuldades encontradas e as sugestões para melhorias em trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica está sendo uma opção renovável muito usada nos dias de hoje, este uso vem da evolução nas pesquisas de novas tecnologias para melhoria dessa tecnologia. De acordo com Pinho e Galdino (2014) o maior mercado de módulos fotovoltaicos tem sido a Alemanha, seguida da Itália, sendo que, apenas na Europa, encontram-se instalados aproximadamente 74% da produção mundial. A Figura 2 apresenta a potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo no período de 2000 a 2012.

Figura 2 – Produção Mundial de Células Fotovoltaicas



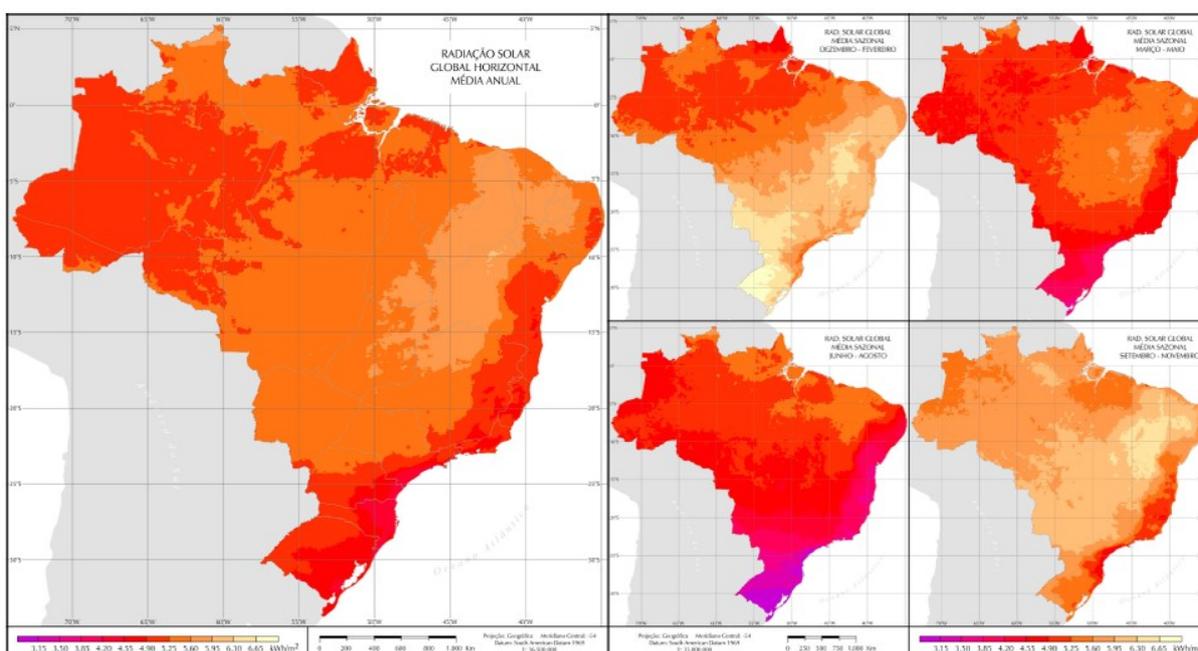
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Pinho e Galdino (2014) afirmam ainda que um desafio paralelo para a indústria é o desenvolvimento de acessórios e equipamentos complementares para sistemas fotovoltaicos, com qualidade e vida útil comparáveis às dos módulos (fabricantes de módulos de silício cristalino garantem os seus produtos por 25 anos). Os autores também informam que a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, em razão, tanto dos seus custos decrescentes, quanto dos custos crescentes das demais formas de produção de energia, inclusive em função da internalização de fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

2.1.1 Radiação solar no Amazonas

Pinho e Galdino (2014) mostram de forma clara que o potencial Solar disponível no Brasil é maior quando comparado com países da Europa, onde a conversão fotovoltaica já é utilizada largamente. Pereira et al. (2006) observa também que em todo o território brasileiro há disponibilidade de irradiação solar equivalente ou melhor que nos países do Sul da Europa e superando países como, por exemplo, a Alemanha, país com capacidade instalada significativa de sistemas de geração fotovoltaica. A Figura 3 apresenta média anual de radiação solar no Brasil.

Figura 3 – Mapa Brasileiro da Média de Irradiação Solar Anual



Fonte: Pereira et al. (2006)

Analisando a Figura 3 percebe-se que o Amazonas se encontra numa área com alto potencial de irradiação solar variando entre 5 e 5,6 kWh/m^2 , perdendo apenas para parte da região Nordeste e Centro-Oeste, porém essa diferença não afetaria de forma significativa a geração de energia nos painéis solares.

"Todavia, mesmo com ostensiva capacidade de utilização dos benefícios da energia solar o Brasil ainda não considerou essa opção como prioritária" (VAZ, 2012). Porém, um grande avanço no uso dessa energia vem acontecendo. Segundo Vaz (2012), apenas 08 Usinas Fotovoltaicas (UFV) apareciam no banco de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2012. A tabela 1 mostra que o número de usinas subiu para 317 em 2015 .

Tabela 1 – Empreendimentos de Geração de Energia em Operação

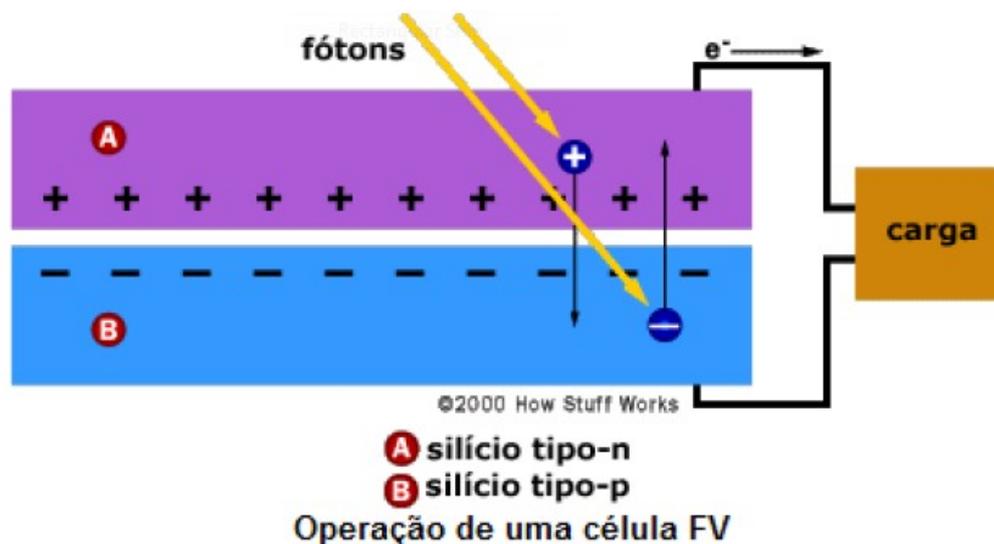
Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	496	324.546	326.443	0,24
EOL	266	5.966.761	5.862.249	4,3
PCH	477	4.827.148	4.797.722	3,52
UFV	317	19.179	15.179	0,01
UHE	201	87.308.965	84.778.838	62,16
UTE	2.509	40.083.968	38.620.191	28,32
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,46
Total	4.268	140.520.567	136.390.622	100

Fonte: ANEEL (2015)

2.1.2 Painéis solares

Castro (2007) explica que células fotovoltaicas são constituídas por um material semicondutor – o silício (Si) – ao qual são adicionadas substâncias, ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência eléctrica DC. Os elementos usados para a dopagem são o fósforo (P) e boro (B). O funcionamento de uma célula solar pode é representado na Figura 4.

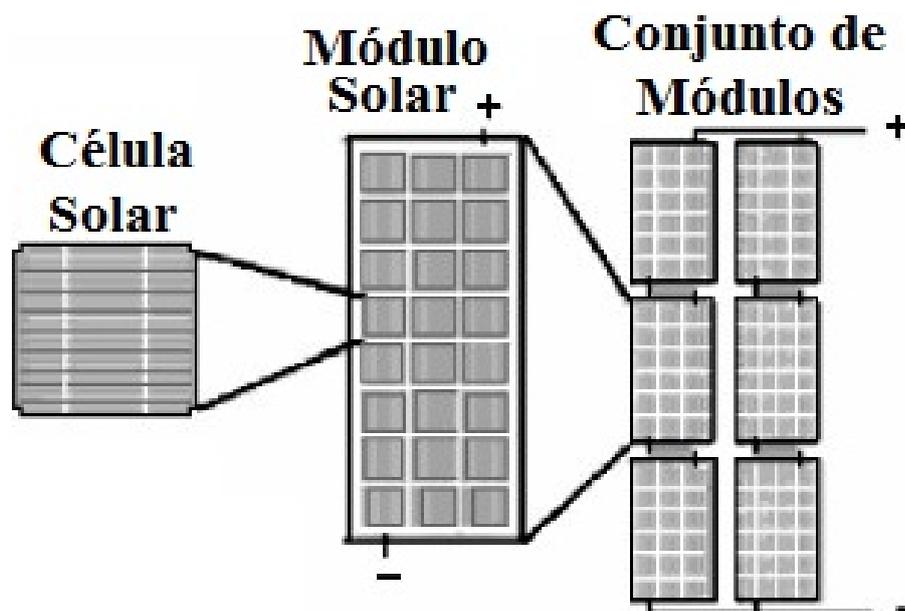
Figura 4 – Funcionamento da Célula Fotovoltaica



Fonte: <http://goo.gl/JOd7DZ>

Proença (2007) afirma que um painel fotovoltaico é formado por pequenas células onde ocorre esse fenômeno, geralmente células de 1,5W; 0,5V; 3A. Castro (2007) complementa que para obter potências maiores, as células são ligadas em série e/ou em paralelo, formando módulos (tipicamente com potências da ordem de 50 a 100 W) e painéis fotovoltaicos (com potências superiores), como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Célula Solar Fotovoltaica



Fonte: <http://goo.gl/xWAf8Y>

Segundo Rosemback (2004), o Sol fornece $1,5 * 10^{18} kWh$ de energia anualmente à Terra em forma de luz e calor, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial no mesmo período.

“Normalmente estruturas metálicas (alumínio anodizado ou aço inox) são utilizados para a fixação dos módulos nos telhado ou no solo” (PERLOTTI et al., 2013).

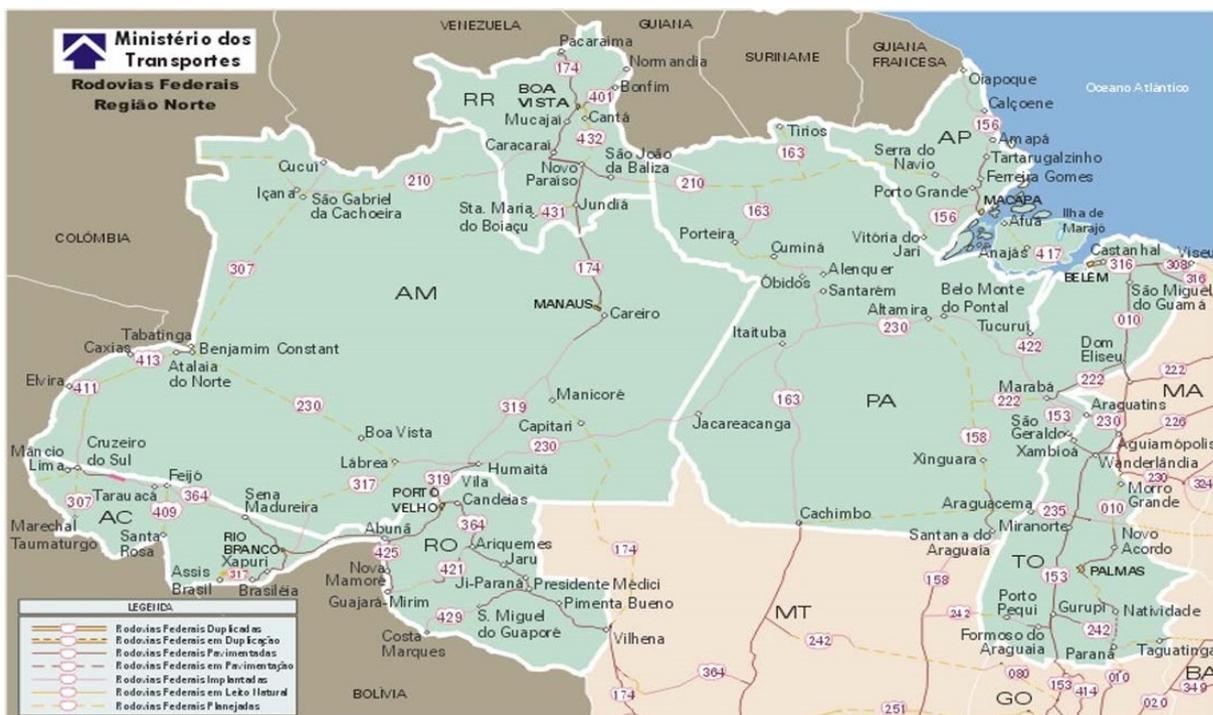
Em alguns casos, estes suportes podem estar acoplados a dispositivos projetados para acompanhar movimento aparente do sol para maximizar a produção de energia. De acordo com Perlotti et al. (2013), o ganho econômico decorrente do aumento na produção de energia deve superar o incremento no custo decorrente da instalação dos eixos móveis (um dois eixos) somado ao incremento no custo de operação e manutenção do sistema.

2.2 Transporte fluvial no Amazonas

De acordo com Santos, Cardoso e Moita (2011) a rede de transportes na Amazônia, embora estabelecida por poucas alternativas de transporte, desempenha um papel fundamental dentro do contexto econômico, social e ambiental. A Região, por suas características geográficas, tem um sistema de transporte com predominância no transporte aquaviário (marítimo, fluvial e rodo-fluvial) e aeroviário.

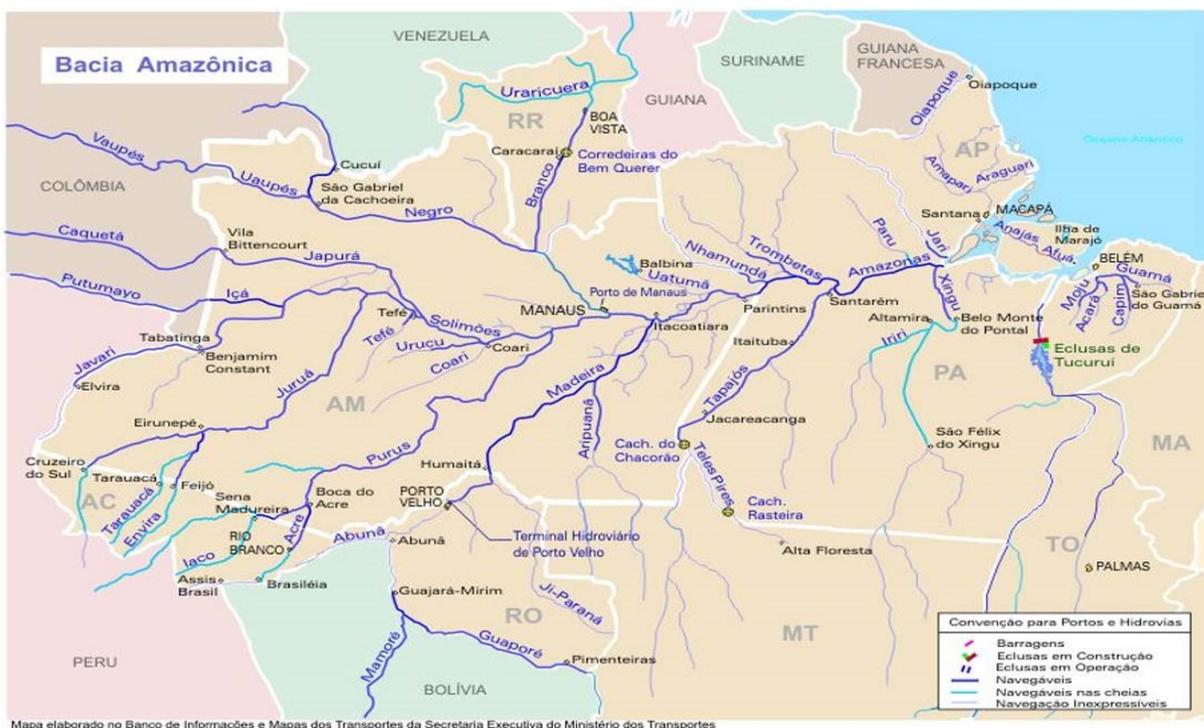
O transporte aquaviário é muito mais utilizado no Amazonas, pois o estado possui poucas rodovias e muitas hidrovias, estas informações podem ser observadas nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Rodovias na Região Norte



Fonte: Ministério dos Transportes. Disponível em <http://goo.gl/H9iDEY>

Figura 7 – Hidrovias na Região Norte

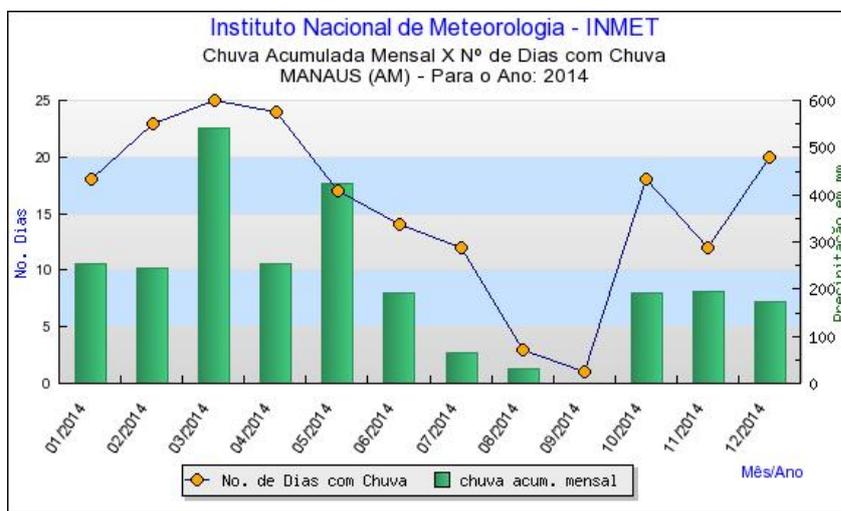


Fonte: Ministério dos Transportes. Disponível em <http://goo.gl/eePFO2>

2.3 Chuvas na região Amazônica

O Instituto Nacional de Meteorologia -INMET apresenta na Figura 8 o número de dias de chuva na região de Manaus no ano de 2014.

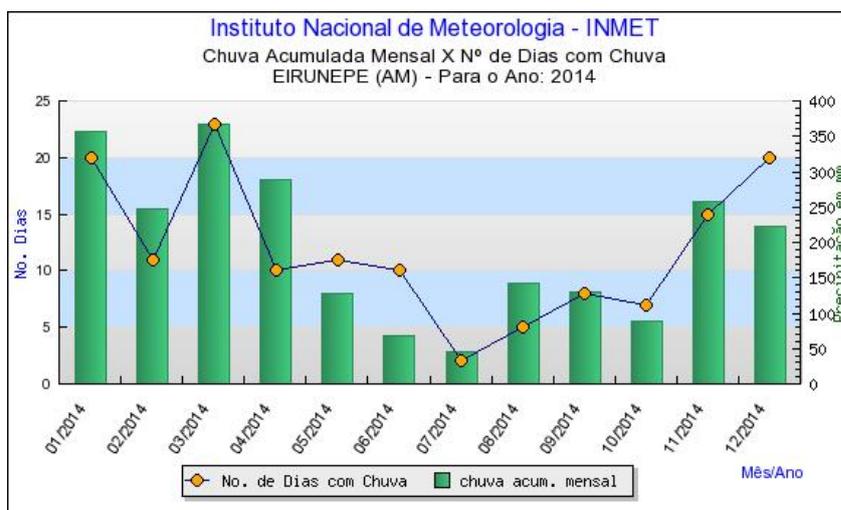
Figura 8 – Chuvas em Manaus no Ano de 2014



Fonte: INMET. Disponível em <http://goo.gl/N4enCW>

Analisando o gráfico, nota-se que na região existem muitos dias de chuva, 189 para ser exato. Isto significa que o aproveitamento de luz solar seria de 100% em 176 dias por ano. Nos demais dias haveriam perdas significativas de conversão. Vale lembrar que muitas destas chuvas são chuvas fortes, porém rápidas. Outro exemplo é o município de Eurinepé, que fica no Sudoeste do estado, mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Chuvas em Eurinepé no Ano de 2014



Fonte: INMET. Disponível em <http://goo.gl/EeSqYE>

Outro ponto que se deve destacar é o fato de a Alemanha se o país com maior utilização de energia solar, mesmo estando numa região com média de radiação baixa, quando

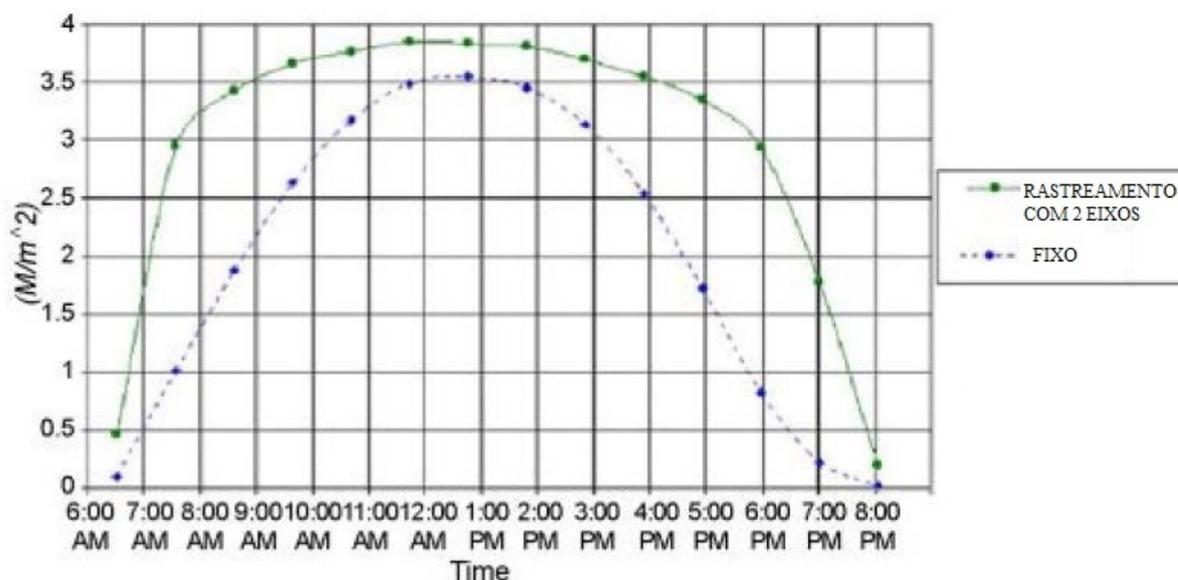
comparada ao Brasil. Além disso este país possui invernos rigorosos, com muitas nevascas, o que jamais aconteceria na região Amazônica.

2.4 Sistemas seguidores de luz solar

Seguidor solar, de acordo com Oliveira (2008) é um dispositivo utilizado para orientar um painel ou arranjo de painéis fotovoltaicos, concentradores de energia, ou coletor solar, de forma que estejam sempre voltados para o Sol, para que haja uma maior incidência de raios solares perpendiculares à superfície dos mesmos. Deste modo, o rendimento do sistema aumenta com a maior incidência de luz sobre o mesmo por mais tempo. Gil et al. (2009) explica que o custo de um sistema seguidor de luz solar, ao se levar em conta o valor do projeto de um sistema fotovoltaico é de um incremento de 20% desse valor, mas é preciso atentar que um sistema deste tipo pode vir a aumentar as receitas geradas em cerca de 40%.

Na Figura 10, pode ver-se um gráfico com a comparação da energia produzida entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos.

Figura 10 – Gráfico Comparativo da Energia Gerada em Sistema Fixo e Sistema de Dois Eixos



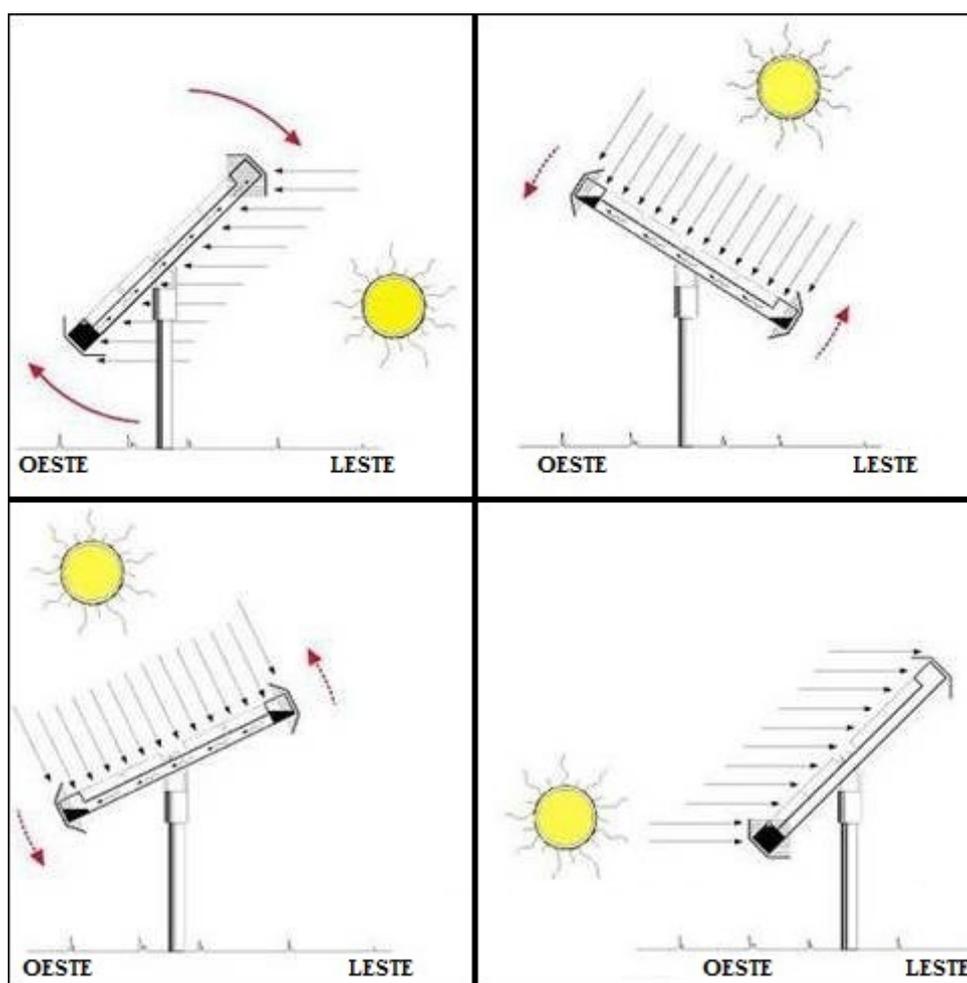
Fonte: Cortez et al. (2014)

Existem muitos tipos de seguidores solares, estes variam em custo, complexidade e funções. Os mesmos podem fazer o seguimento por meio de um ou mais eixos e garantir diferentes níveis de precisão. Podem ser classificados, em relação ao modo de seguimento, em dois tipos: Seguidores passivos e seguidores ativos.

2.4.1 Seguidores passivos

Este tipo de seguidor é baseado na expansão térmica de um fluido do tipo Freon. Cortez et al. (2014) explica que este tipo de gás aumenta de volume quando sujeito ao aumento de temperatura, o gás ao expandir vai provocar o movimento dos painéis solares de uma forma já definida no sentido de os apontar para o sol. A Figura 11 ilustra o funcionamento deste tipo de seguidor.

Figura 11 – Seguidor Passivo



Fonte: Cortez et al. (2014)

O problema deste tipo de seguidor é o fato de ter baixa precisão ter aplicabilidade limitada a locais que sofram uma variação térmica suficiente para provocar a expansão do gás. A vantagem é o fato de ser muito simples e de não usar motores para o movimento.

2.4.2 Seguidores ativos

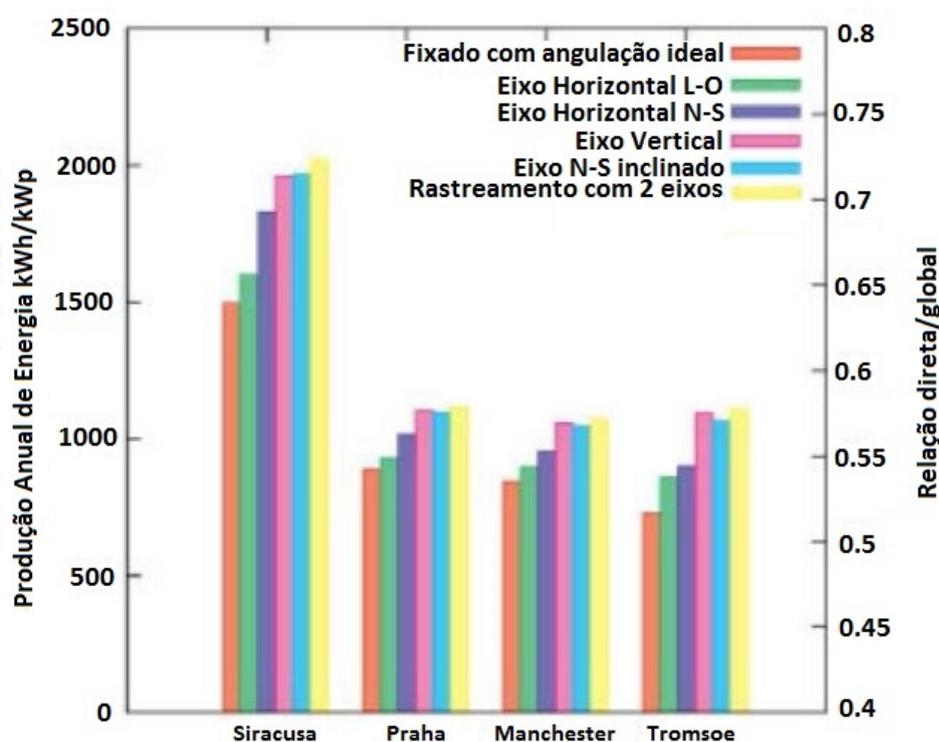
São seguidores que podem fazer o seguimento por diferentes métodos, podem utilizar sensores ou algoritmos cronológicos do "movimento" do sol e vão ser responsáveis por fazer

o seguimento do sol de forma ativa ao fazer atuar algum tipo de motor. A sua classificação pode ser feita em relação ao seu movimento eixo, da seguinte forma:

- Seguidor de Eixo Horizontal
- Seguidor Polar de Eixo Único
- Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute
- Seguidor de dois Eixos
- Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

A Figura 12 é um gráfico comparativo da geração de energia de módulos solares usando diferentes seguidores.

Figura 12 – Comparação da Energia Produzida de um Sistema Usando Diferentes Seguidores



Fonte: Cortez et al. (2014)

Neste projeto, o seguimento de luz solar é realizado com um protótipo seguidor de plataforma rotativa de dois eixos.

2.4.2.1 Seguidor de dois eixos

Este seguidor tem um poste vertical que vai permitir movimento segundo o eixo Leste-Oeste e um poste horizontal que vai permitir movimento segundo o eixo Norte-Sul. A armação sobre a qual os painéis vão ser montados está presa ao poste que permite o

movimento N-S. Até hoje são o tipo de seguidor mais comum, usado principalmente nos parques solares e em instalações de grandes dimensões. Alguns deles podem suportar uma área de colheita até 300 metros quadrados. A grande desvantagem deste tipo de seguidor é o esforço a que estão sujeitos, principalmente devido ao seu peso e ao facto de que tem que ser bloqueados sempre que se registar muito vento. Em muitas aplicações, devido à complexidade mecânica que é necessária para este tipo de seguidor não se tornam competitivos quando comparados com um seguidor vertical. A Figura 13 mostra um exemplo de seguidor de dois eixos.

Figura 13 – Seguidor de Dois Eixos



Fonte: Cortez et al. (2014)

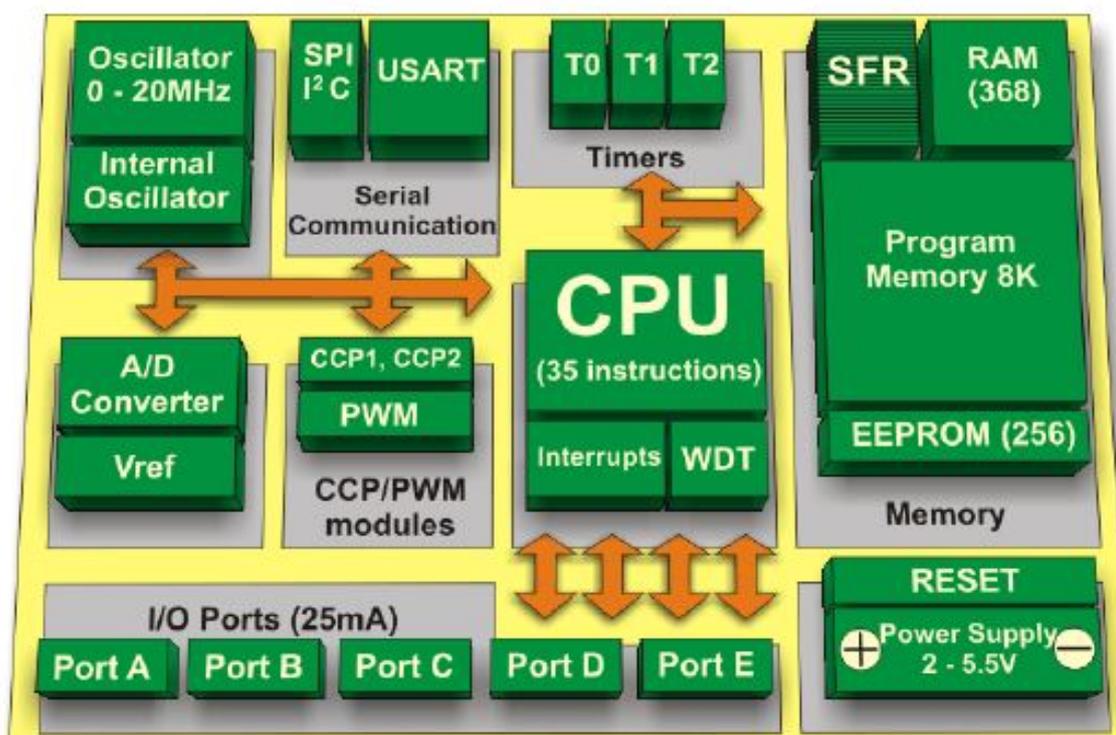
2.5 Microcontroladores

De acordo com Nisolosi (2009), o microcontrolador é um elemento eletrônico desenvolvido para executar tarefas específicas, com linguagens de comando específicas. Para ler as instruções que devem ser executadas utiliza a Memória de Programa (*Code Memory – ROM*) e para armazenar temporariamente informações de uso próprio das instruções, enquanto essas informações devem ser armazenadas, utiliza a Memória de Dados (*Data Memory – RAM*).

Para fazer uso do Microcontrolador é necessário desenvolver, além do programa que controla determinado processo, um hardware responsável pela interface entre o mundo

externo e o Microcontrolador, adaptando os níveis de tensão e corrente. Porém, para aplicações mais simples e de valores de tensão e corrente próximos aos valores nominais do Microcontrolador pode-se utilizar seus pinos de I/O diretamente interligados ao sistema. A Figura 14 apresenta a estrutura padrão de um microcontrolador.

Figura 14 – Estrutura de um Microcontrolador



Fonte: Sena (2008)

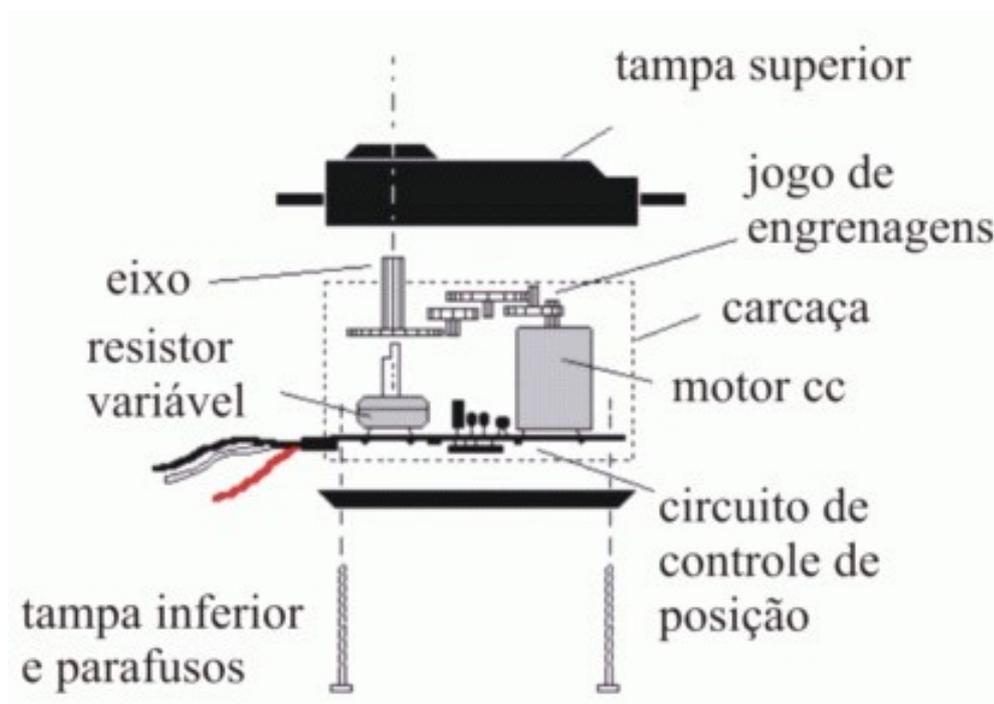
De acordo com Soares (2013) apesar de seu funcionamento exigir uma frequência de *clock* em MHz, o que é pouco comparado aos microprocessadores modernos, sua utilização é perfeitamente adequada para utilizações típicas. Estes dispositivos consomem pouca energia, algo em torno de miliwatts, possuem a capacidade de “hibernar” enquanto aguardam o acontecimento de um evento que o colocará em funcionamento novamente, ideal para circuitos alimentados a baterias químicas pois seu consumo reduz para algo em torno de nanowatts. São componentes de baixo custo e compactos.

2.6 Servomotores

Santos (2009) explica que servomotor é um dispositivo eletromecânico que, a partir de um sinal elétrico em sua entrada, pode ter seu eixo posicionado em uma determinada posição angular. Por serem pequenos e compactos, além de permitir um posicionamento preciso de seu eixo, os servomotores são largamente utilizados em robótica e modelismo.

O servomotor é um atuador rotativo com alta precisão de controle para posicionamento angular. É composto por um motor acoplado a um sensor de posição para realimentação. Para completar o sistema é necessário um servodrive. Este drive utiliza o sinal de realimentação do sensor para controlar a posição angular do motor de forma precisa. Isto é chamado de controle de malha fechada. Com o sistema rodando em malha fechada, o servomotor é uma solução de alto desempenho em aplicações onde motores de passo ou motores de indução não correspondem a necessidade. Na Figura 15 são ilustrados os componentes de um servomotor.

Figura 15 – Componentes de um Servomotor



Fonte: <http://goo.gl/L9WIOF>

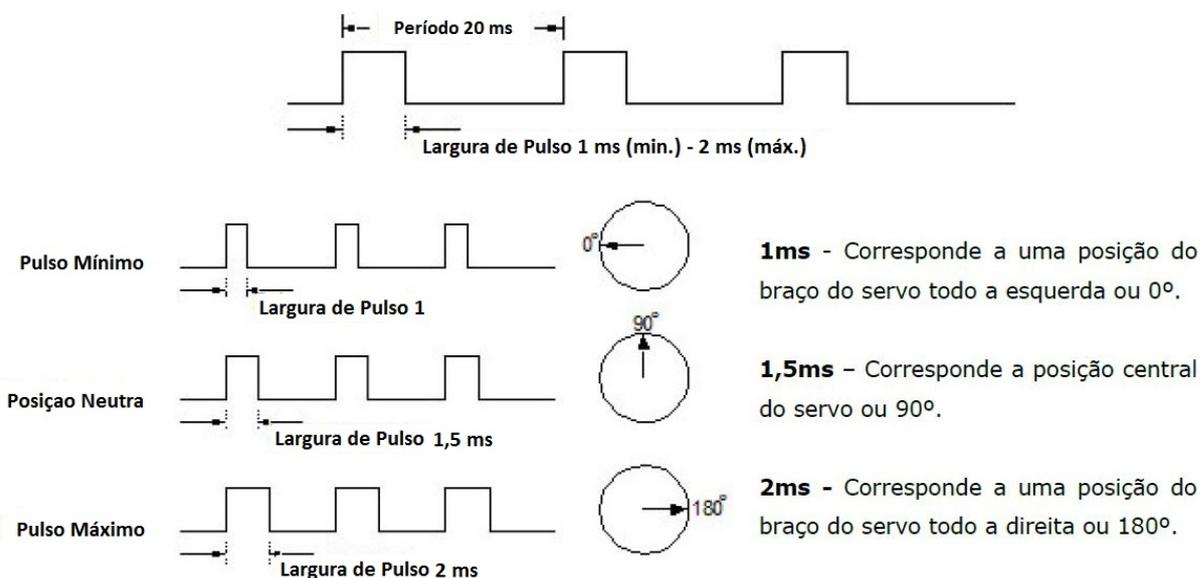
Os componentes descritos na Figura 15 possuem as seguintes funções:

- Circuito de Controle de Posição – responsável pelo monitoramento do potenciômetro e acionamento do motor visando obter uma posição pré-determinada.
- Potenciômetro (resistor variável) – ligado ao eixo de saída do servo, monitora a posição do mesmo.
- Motor de corrente contínua (cc) – movimenta as engrenagens e o eixo principal do servo.
- Engrenagens – reduzem a rotação do motor, transferem mais torque ao eixo principal de saída e movimentam o potenciômetro junto com o eixo.

- Caixa do Servo – formada pelas tampas superior e inferior e pela carcaça do servomotor. No interior da caixa são posicionados todos os componentes do servomotor citados anteriormente.

O sinal de controle é recebido por um dos três fios que normalmente alimentam um servomotor. Os outros dois são para a alimentação. Este sinal de controle utiliza a modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*). O funcionamento deste tipo de modulação está representado na Figura 16.

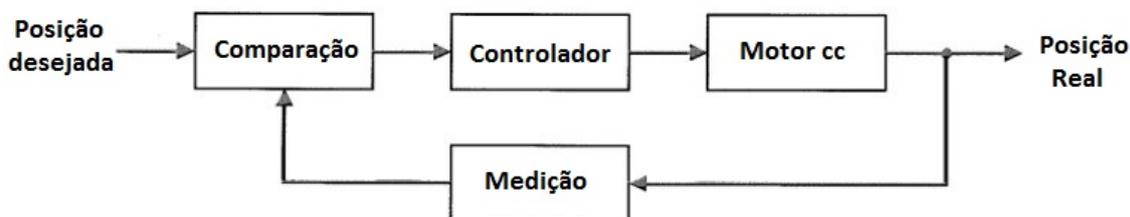
Figura 16 – Funcionamento do PWM



Fonte: Santos (2009)

Uma vez que o servomotor recebe um sinal de, por exemplo, 1,5ms, ele verifica se o potenciômetro encontra-se na posição correspondente, se estiver ele não faz nada. Se o potenciômetro não estiver na posição correspondente ao sinal recebido, o circuito de controle aciona o motor até o potenciômetro estar na posição certa. A direção de rotação do motor do servo vai depender também da posição do potenciômetro, o motor vai girar na direção que mais rápido levar o potenciômetro até a posição certa. Desta forma o servomotor se comporta como um sistema de controle de malha fechada, onde sua posição final é alterada de acordo com uma comparação entre seu valor e um valor de referência, conforme representado na Figura 17.

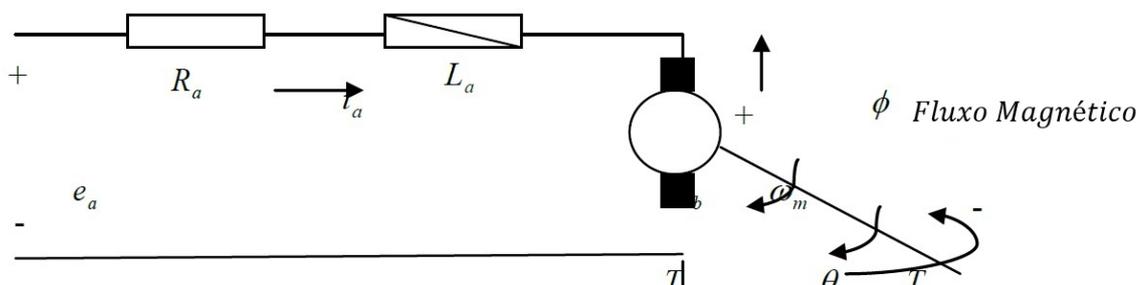
Figura 17 – Malha fechada



Fonte: Autor

O esquema elétrico de um servomotor, bem como os itens necessários para obter sua modelagem matemática são mostrados na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama Elétrico de um Servomotor



- | | |
|---|--|
| $\omega_m(t)$ = Velocidade Angular do Rotor | R_a = Resistência da Armadura |
| e_a = Tensão Aplicada | L_a = Indutância da Armadura |
| K_i = Constante de Torque | K_b = Constante de Força Contra Eletromotriz |
| J_m = Inércia do rotor | B_m = Coeficiente de Atrito – Aderência |

Fonte:Original de Roy (2011), Adaptado pelo Autor

De acordo com Roy (2011), o modelo matemático do servomotor , após realizadas todas as interações entre os itens , fica simplificado como mostrado na equação 2.1.

$$G(\text{motor}) = \frac{K_i}{J_m L_a s^2 + (J_m R_a + B_m R_a + B_m L_a) s + K_i K_b} \tag{2.1}$$

2.7 Sensores acelerômetros e magnetômetros

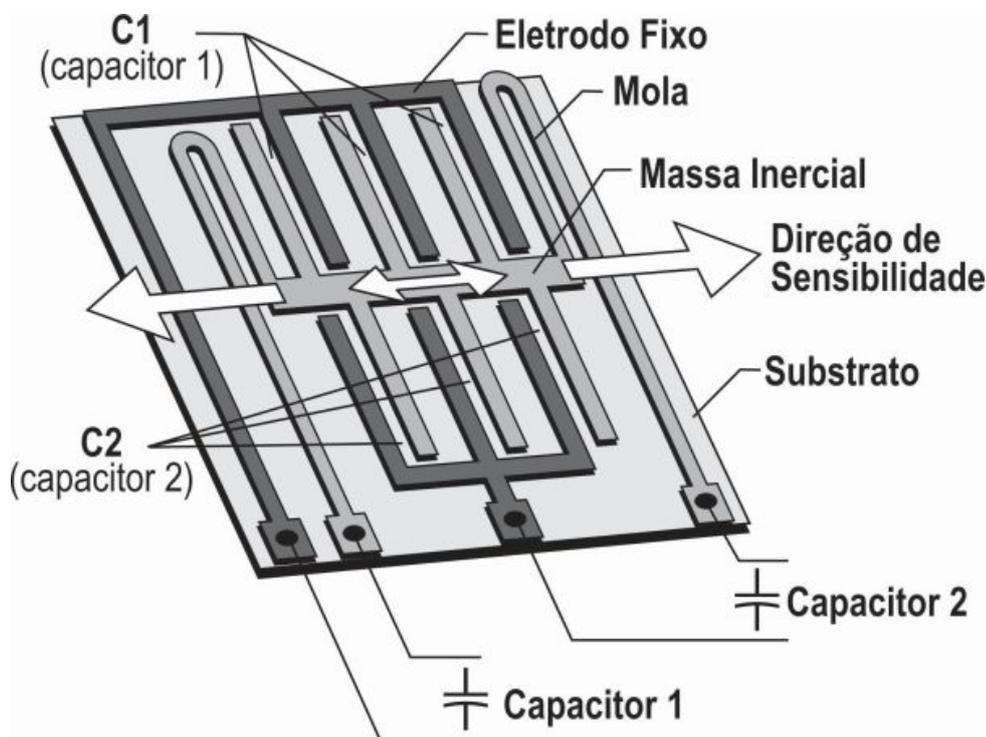
De acordo com Mascarenhas, Lima e Jacobina (2004) o acelerômetro é um dispositivo usado para medir a aceleração própria. A aceleração própria difere da aceleração (no sentido convencional de taxa de mudança de velocidade) pois está atrelada a sensação de peso medida em um dado referencial. Acelerômetros mais modernos são capazes detectar a queda livre de um objeto. Dentro de cada acelerômetro existe um circuito de controle que desempenha as funções de medição, calibração, filtragem e amplificação do sinal produzido, fazendo com que a interface com o microcontrolador seja simples.

Esses dispositivos são usados principalmente em sistemas de posicionamento, sensores de inclinação, bem como sensores de vibração.

Uma aplicação bastante conhecida de acelerômetros são as telas de aparelhos celulares que se ajustam de acordo com o ângulo que fazem em relação à aceleração da gravidade. Sua aplicação em larga escala na indústria automotiva promoveu a redução do preço e popularização da tecnologia, que pode ser encontrada até em relógios de pulso, alguns aparelhos de telefonia móvel e videogames.

De acordo com Manavella (2014) acelerômetros micro-maquinados semicondutores do tipo capacitivo possuem uma massa sísmica ou inercial (eletrodo semicondutor móvel) que é suportada por 2 molas com suas terminações ancoradas no substrato. Os filetes em ambos os lados do eletrodo móvel formam 2 capacitores com os filetes dos eletrodos fixos ao substrato. Por ação da aceleração na direção do eixo de sensibilidade do sensor, a massa inercial se desloca, modificando a posição relativa dos filetes o que resulta numa variação da capacidade do conjunto de forma que, quando aumenta a capacidade de um dos capacitores, diminui a do outro. Repare que dependendo do sentido da aceleração/desaceleração, os filetes da massa inercial se aproximam dos filetes fixos de um dos capacitores (aumento da capacidade) e simultaneamente, se afastam dos do outro (diminuição da capacidade). A Figura 19 ilustra o funcionamento de um acelerômetro.

Figura 19 – Funcionamento acelerômetro



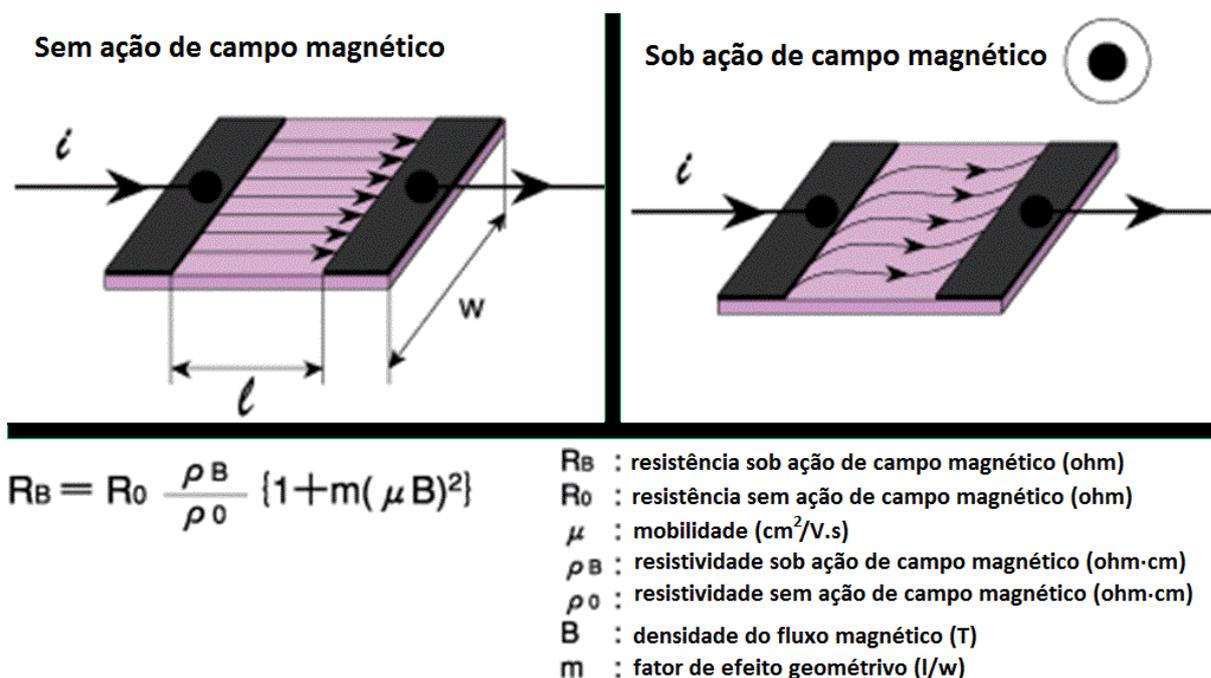
Fonte: Manavella (2014)

Branco (2012) explica que um magnetômetro é um instrumento científico que mede os campos magnéticos. Além de determinar a força de um campo magnético, um magnetômetro

também pode determinar a orientação e direção dos campos magnéticos.

Um magnetômetro eletrônico baseia-se no fenômeno Anisotrópico de Magnetoresistência. Basicamente, a um campo magnético interage com o caminho da corrente que flui através de um material ferroso. De acordo com a lei de Lorentz, conseqüentemente, a resistência do material parece mudar para o observador, como se a barra de material ferroso crescesse, aumentando a sua resistência elétrica. Portanto, medindo a alteração na resistência pode-se estimar o campo magnético. Este fenômeno é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Funcionamento do Magnetômetro



Fonte: Electronics (2013)

2.8 Sensor de intensidade de luz LDR

Segundo Tubino e Queiroz (2007) o LDR é um resistor que varia sua resistência de acordo com a incidência de luz.

Esse componente não só informa se há ou não luz sobre ele, mas o quanto de luz há: pequenas variações na intensidade da luz irão provocar pequenas variações no valor da resistência, permitindo, assim, saber exatamente o quanto de intensidade luminosa há sobre um LDR. É também chamado de fotoresistor.

Em espectrometria, o LDR é tratado como um dispositivo de estado sólido que tem como propriedade a variação da resistência elétrica em função da absorção de radiação eletromagnética.

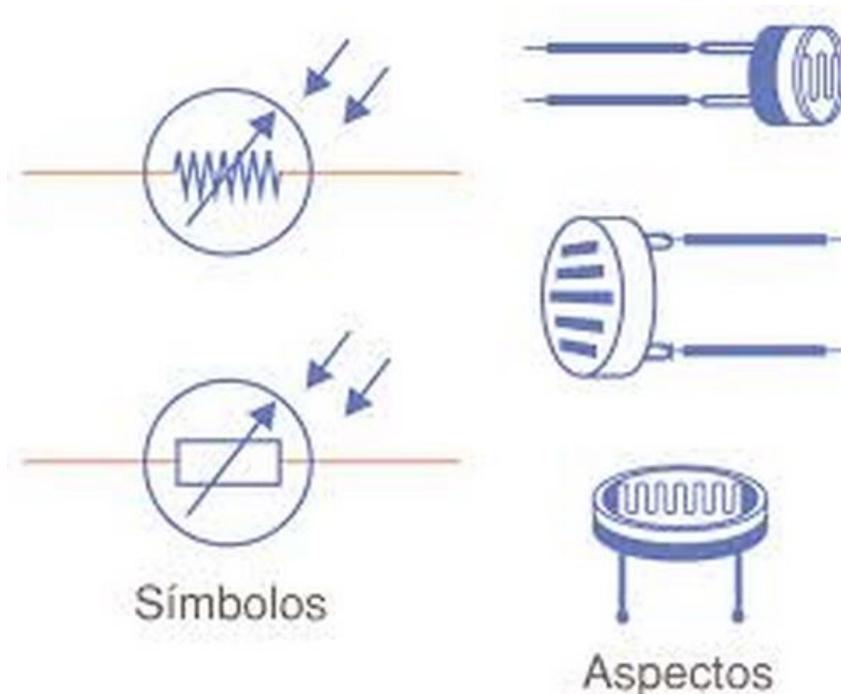
Cortez et al. (2014) afirma que LDR's são normalmente feitos de sulfeto de cádmio (CdS) ou de selenito de cádmio (CdSe) e costumam ser utilizados em várias aplicações, desde sistemas de detecção de cores até sensores de controle de luzes automáticas.

O LDR é , segundo Seng, Kita e Sugihara (2007),um dispositivo eletrônico acessível comercialmente, suas características têm largo potencial uso em sistemas fotométricos e são sensores normalmente usados como fotodetectores.

De acordo com Campos e Moura (2014) o LDR é construído a partir de material semicondutor com elevada resistência elétrica. Quando a luz que incide sobre o semicondutor em uma frequência suficiente, os fótons que incidem sobre ele libertam elétrons para a banda condutora que irão melhorar sua condutividade e assim diminuir a resistência. Dependendo do tipo, um LDR pode ser sensível às faixas de luz: Infravermelhos (IR), Luz visível ou Ultravioleta(UV).

A Figura 21 mostra a simbologia utilizada para representar o sensor LDR.

Figura 21 – Simbologia do LDR



Fonte:Campos e Moura (2014)

3 ESTADO DA ARTE

A energia solar fotovoltaica, como já foi mostrado anteriormente, vem sendo utilizada cada vez mais, e uma consequência desse crescimento é o aumento de pesquisas relacionadas à este tipo de energia, dentro deles os seguidores solares. Este capítulo apresenta três trabalhos acadêmicos envolvendo seguidores solares, cada um deles com seus diferenciais. Alguns das técnicas utilizadas por estes autores serviram como base para o desenvolvimento do projeto apresentado neste trabalho.

3.1 Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica

Na dissertação de Cortez et al. (2014), na época participante de Mestrado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto localizada em Portugal, realizou uma pesquisa com seguidores solares.

A proposta consiste num estudo sobre seguidores solares, em particular de um seguidor solar já existente e comercializado pela empresa JPM, uma empresa com negócios na áreas da energias renováveis. O sistema da JPM trata-se de um seguidor de eixo azimutal com a forma de uma roda onde estão instalados os painéis solares. O seguidor da JPM faz o seguimento por meio do uso de um calendário astronômico, em malha aberta em que usa um algoritmo para determinar a posição do solar e deste modo passar a informação de qual deve ser o deslocamento da roda para ficar voltada para o sol.

Neste trabalho foram estudadas alternativas a este sistema, sendo implementada uma alternativa que usa sensores para a determinação da posição do sol. Ao longo de sua dissertação foi documentado o trabalho realizado e as conclusões obtidas possibilitando fazer uma comparação entre os dois sistemas de detecção do Sol. A solução implementada faz uso de sensores para realizar o seguimento, os sensores usados são fotodiodos e os resultados obtidos foram significativos com uma melhoria quando comparados com uma instalação fixa de entre 5% e 9% .

O sistema em estudo é uma roda solar onde estão posicionados os painéis fotovoltaicos responsáveis pela geração da energia elétrica. A roda tem um diâmetro de aproximadamente 9 m, e é composta por três linhas de painéis fotovoltaicos, sendo que duas das linhas são composta por oito painéis e uma delas por 6 painéis. Além disso, sistema possui um inversor da SMA modelo SB380. Como o objetivo desta dissertação está relacionado com o sistema de rastreamento utilizado, não é feita uma explicação muito pormenorizada deste componente do sistema.

O controle e movimento da roda é feito por vários componentes, esses componentes são

um CLP, um variador de velocidade e um motorreductor. Juntos estes três componentes serão responsáveis pelo sistema de rastreamento implementado, sistema esse que tem por fim colocar a roda voltada para o sol de forma a maximizar a radiação colhida pelos painéis. A programação utilizada no sistema foi a linguagem Ladder. O sistema da JPM pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Roda Solar da JPM



Fonte: Cortez et al. (2014)

A roda da JPM possui um sistema de supervisão que permite saber a potência gerada a cada momento pelos painéis fotovoltaicos. O sistema da JPM é um *Sunny Beam*, trata-se de um sistema de supervisão que transmite os dados por Bluetooth®, e que é capaz de guardar os dados enviados pelo inversor por um período de até 90 dias. É capaz de fazer gráficos da potência gerada, diários e da energia mensal. A interface humano máquina do *Sunny Beam* pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 – *Sunny Beam*



Fonte:Cortez et al. (2014)

Usando o *Sunny Beam*, o autor fez uma comparação entre o sistema ativo e inativo, ou seja, com painéis em posições fixas, e com os mesmos painéis se movimentando de acordo com o calendário astronômico. Estas comparações foram feitas nos dias 14 e 21 de Janeiro, e seus resultados podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2 – Comparação Entre a Energia Gerada em Ambos os Sistemas

	Dia 14	Dia 21
Fixa	9.77 kWh	5.6 kWh
Roda	8.1 kWh	5.35 kWh
Diferença	1.67 kWh	0.25 kWh

Fonte: Cortez et al. (2014)

O que se nota ao analisar os dados é que a energia gerada na instalação fixa é superior à da roda, algo que não deveria acontecer. Destes dados torna-se possível observar que o rastreamento efetuado pelo sistema da JPM não está a funcionar da forma mais correta.

A utilização de algoritmos astronômicos para a determinação da posição do Sol apresenta uma série de problemas com grau de complexidade elevados para uma aplicação deste tipo.

Deste modo foi apresentada à JPM a solução de se utilizarem sensores para a determinação da melhor posição para onde orientar a roda, Assim o controle da roda passaria a ser feito não utilizando um algoritmo astronômico, mas por meio dos sinais recebidos pelos sensores. Tal configuração permitiria ao sistema ter um monitoramento em malha fechada do que se estava a passar.

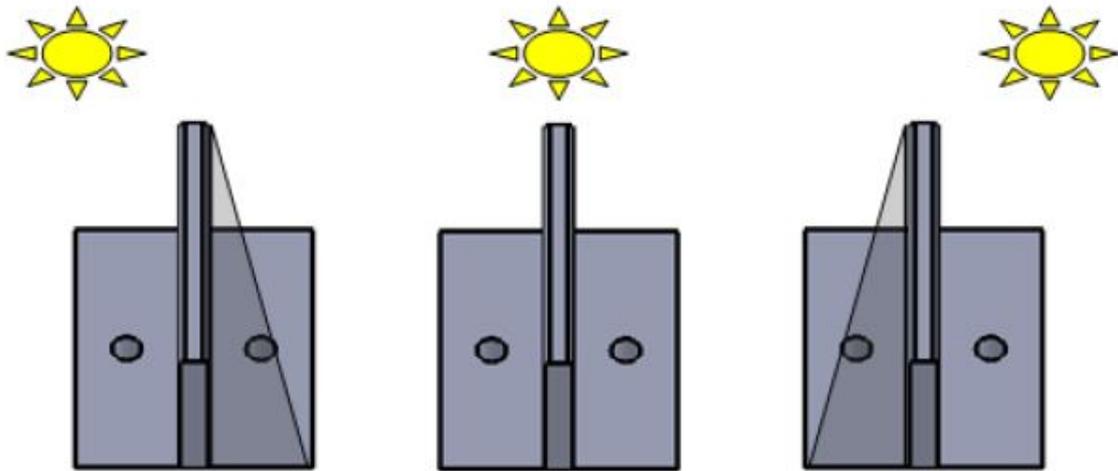
Após uma pesquisa comparativa de sensores, o autor chegou a conclusão de fotodiodos seria a melhor opção. Foi então desenvolvido um suporte com a função de garantir a proteção dos mesmos e ao mesmo tempo garantir que, em caso de muito mau tempo, os sensores não são desviados da sua posição inicial. O suporte deve realizar ainda uma outra função, a de sombrear um dos sensores sempre que a roda não esteja alinhada. O suporte, e seu comportamento em relação à luz do sol podem ser vistos nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Suporte Utilizado por Cortez et al. (2014)



Fonte: Cortez et al. (2014)

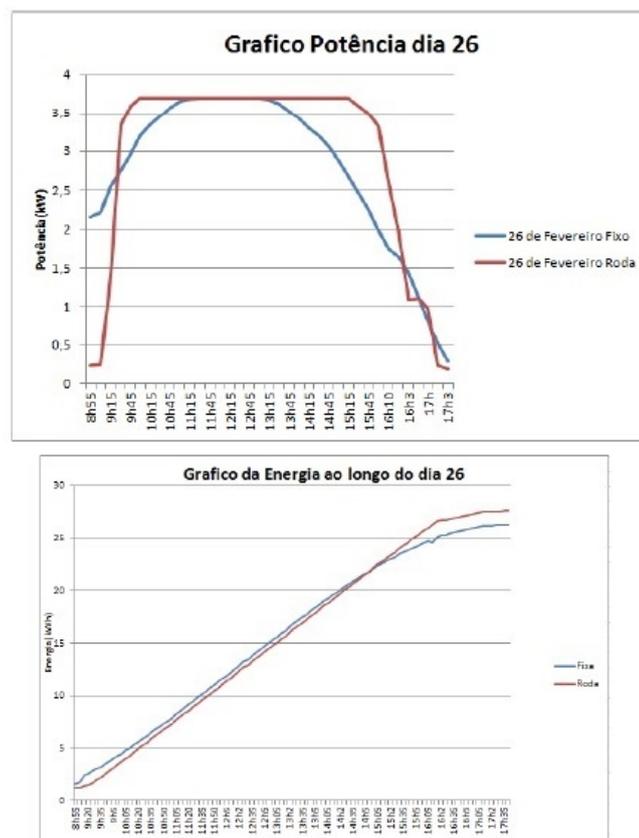
Figura 25 – Comportamento do Suporte em Relação à Luz do Sol



Fonte: Cortez et al. (2014)

Além disso, o autor utilizou um microcontrolador Arduino Uno para fazer o controle do seu sistema, substituindo assim o CLP. A comparação do sistema fixo, e sistema com a alternativa de controle criada pelo autor são mostrados na Figura 26, os gráficos foram gerados a partir dos valores coletados no dia 26 de Fevereiro de 2014.

Figura 26 – Comparação de Potencia e Energia Geradas



Fonte: Cortez et al. (2014)

O autor concluiu que o sistema de rastreamento apresenta vantagens em relação a um sistema fixo, com resultados superiores em produção de energia entre os 9% e os 5% quando tido em conta o dia todo, e uma melhoria na ordem dos 10% para o período sem sombreamento das linhas.

3.2 Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal

No trabalho de Oliveira (2008) descreve a montagem de um seguidor solar azimutal (eixo vertical móvel) aplicado a módulos fotovoltaicos e compara a produção energética do mesmo com um sistema fixo. Os parâmetros monitorados para comparação foram: corrente fotogerada pelo sistema fixo e móvel, irradiância sobre o conjunto fixo e móvel, radiação global e temperatura dos módulos. Ambos os sistemas foram montados com inclinação igual à latitude local (30°). O ganho energético com a utilização do seguidor azimutal chegou a 24% em dias de céu parcialmente limpo, quando ocorre alto índice de radiação direta.

O seguimento solar é realizado a cada 15 minutos ($3,75^\circ$), um sensor óptico com haste de sombreamento determina se o conjunto está voltado para o Sol. A posição de retorno (leste) no final do dia, $\frac{1}{2}$ dia (norte) e final de curso (oeste) é determinada por sensores magnéticos. O aumento de produtividade alcançado pelo conjunto com seguimento solar em períodos fora do central (das 11h às 13h) chegou a 38% em relação ao fixo.

O sistema que foi adotado para este trabalho é baseado no movimento aparente do Sol, ou seja, leste-oeste. Usa-se uma haste de sombreamento sobre um único sensor que fica no lado oeste do conjunto, sempre que houver luz sobre o sensor o controlador aciona o motor de movimentação na direção oeste até que haja sombra sobre o sensor, ou seja, os painéis estarão voltados para o Sol.

Diferentemente de Cortez, o equipamento de Oliveira (2008) usa três sensores magnéticos, que determinam, por meio de ajuste prévio, a posição leste, meio-dia e oeste e um sensor óptico (fototransistor) com haste de sombreamento para posicionar o conjunto em frente ao Sol. O mesmo sensor óptico com mudança de sua polarização pelo microcontrolador determina se é dia e se o índice de radiação é satisfatório.

A diferença da geração de energia entre o sistema fixo e o sistema seguidor solar é mostrada na tabela 3.

Tabela 3 – Geração com Quatro Módulos Fotovoltaicos em Cada Conjunto

Energia Diária		
Conjunto Móvel (4 módulos)	2428	Wh/dia
Conjunto fixo (4 módulos)	1963	Wh/dia

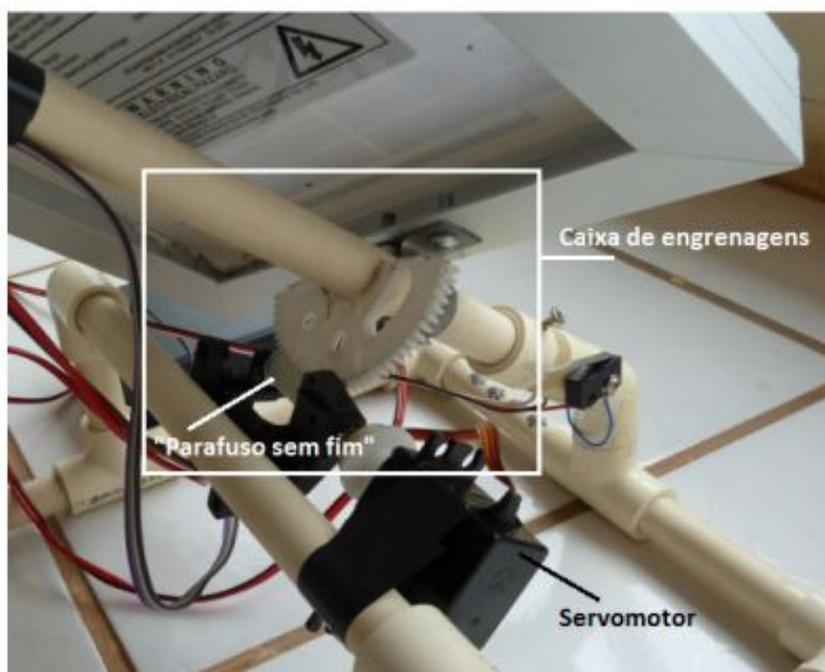
Fonte:Oliveira (2008)

3.3 Seguidor solar de um único eixo inclinado

No trabalho de Moraes (2012) é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de Seguidor Solar de único eixo inclinado. Foram utilizados LDR's (Resistores dependentes de luz) para construir um sensor capaz de coletar informações sobre a posição do sol em relação à superfície do painel fotovoltaico, um Arduino Duemilanove® para realizar o controle de automação do sistema, e um servomotor alterado para trabalhar com giro contínuo. Um painel fotovoltaico foi instalado sobre um eixo inclinado ligado a engrenagens conectadas ao servomotor. As informações coletadas pelo sensor construído com LDR's são processadas pelo microcontrolador que identifica a necessidade de ajuste do painel e envia sinais ao servomotor para mover o painel em direção ao Sol. Toda energia utilizada para o funcionamento do sistema é fornecida por uma bateria carregada pela energia gerada pelo painel fotovoltaico. O controle de alimentação e carregamento da bateria é feito por um controlador de carga.

Para realização do movimento do painel fotovoltaico, foi instalado um servomotor abaixo do eixo de rotação. Este servomotor aciona uma engrenagem chamada de “Parafuso sem fim”, que por sua vez aciona outra engrenagem presa ao eixo de rotação. O uso de engrenagens foi necessário para diminuir a força exercida sobre o eixo de rotação do servomotor e para que o painel permanecesse inclinado, mesmo sem o acionamento do motor, funcionando como um freio. Na Figura 27, é apresentado o modo como esta implementação foi realizada.

Figura 27 – Foto do servomotor e engrenagens



Fonte: Moraes (2012)

O resultado obtido do projeto pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Fotos do Protótipo Durante os Testes



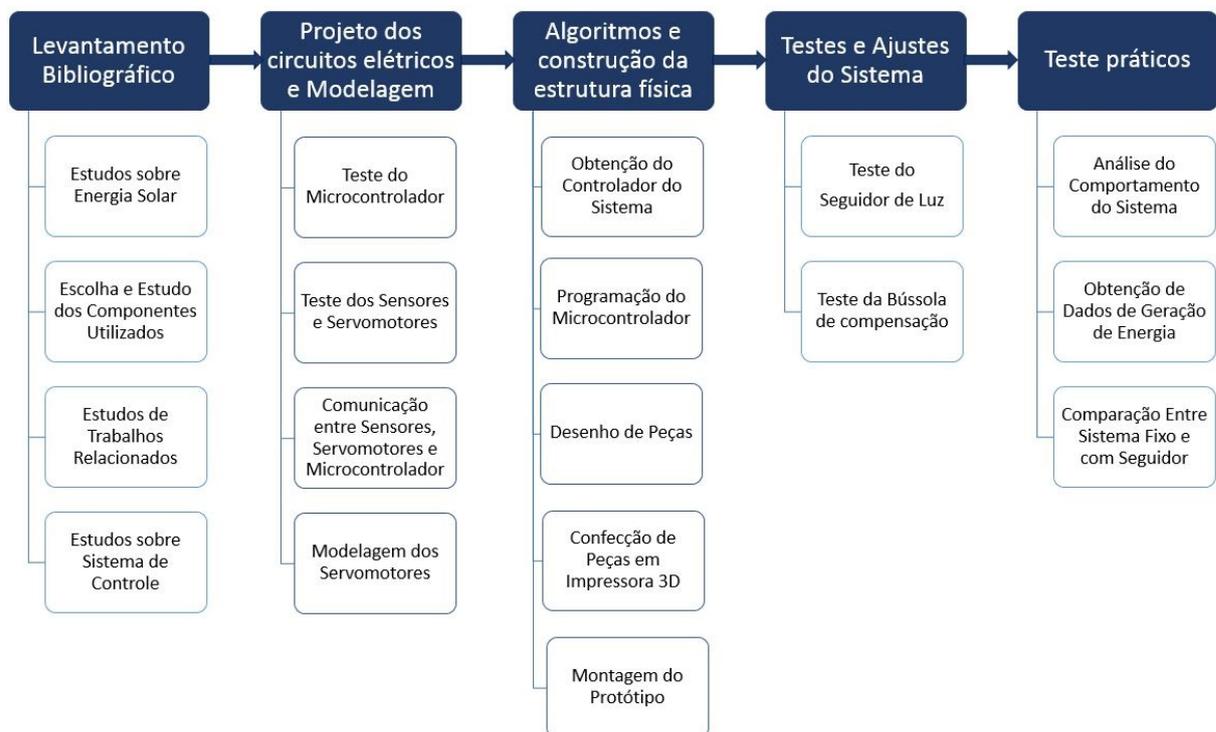
Fonte: Moraes (2012)

Ao final do desenvolvimento do protótipo, com a análise de resultados dos testes, foi comprovado que o sistema construído foi capaz de regular a posição de painel fotovoltaico de acordo com a posição instantânea do Sol.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os componentes utilizados no projeto. Cada componente possui suas respectivas limitações, gerando assim as condições de funcionamento para que o protótipo seja montado. Métodos de obtenção de modelos e controladores utilizados neste projeto estão apresentados também neste capítulo, bem como o fluxograma de ações lógicas utilizados pelo microcontrolador do sistema. A metodologia utilizada para a execução deste projeto é apresentada em forma de diagrama de blocos na Figura 29.

Figura 29 – Etapas de Execução do Projeto

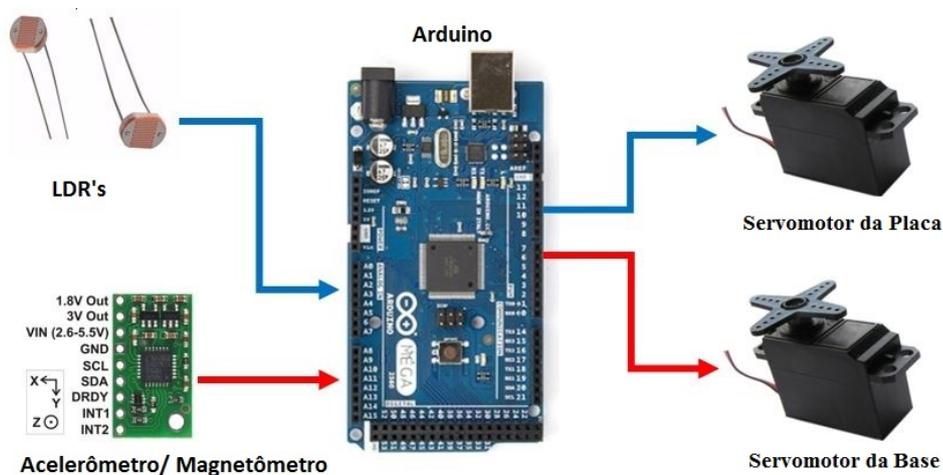


Fonte: Autor

O levantamento bibliográfico, realizado para entender as tecnologias atuais relacionadas com o tema do projeto, foi utilizado para decidir que tipo de seguidor solar seria utilizado. Além disso, o levantamento bibliográfico auxiliou na decisão de componentes utilizados para a construção do protótipo.

Por meio do levantamento bibliográfico, dos trabalhos citados no capítulo 3 e levando em consideração as limitações do projeto, os seguintes materiais foram selecionados: Uma célula solar, um microcontrolador Arduino Mega®, um sensor acelerômetro/magnetômetro, sensores de intensidade de luz LDR e dois servomotores. O seguidor é movimentado pelos servomotores por meio de comandos enviados do microcontrolador, estes comandos são resultados do processamento de informações enviadas pelos sensores, como ilustra a Figura 30.

Figura 30 – Funcionamento do Sistema



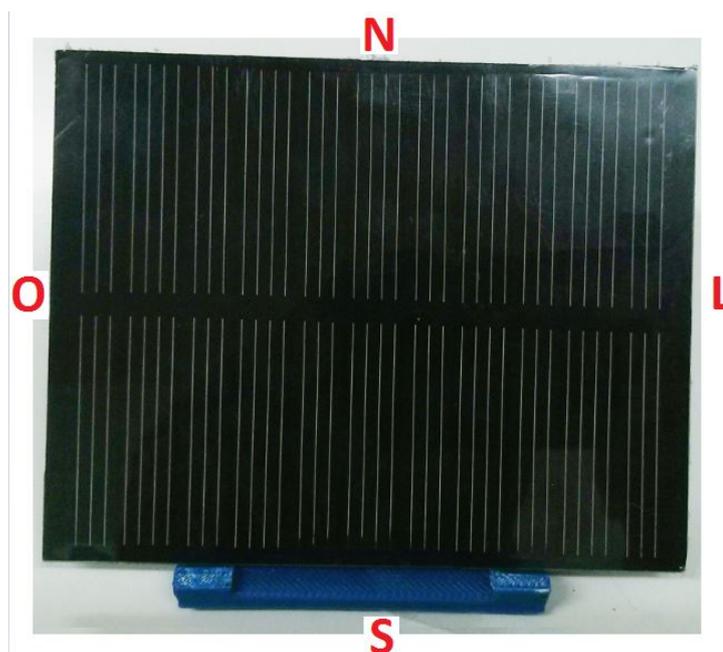
Fonte: Autor

Uma descrição detalhada de cada componente, bem como o modo que estes interagem no protótipo é apresentada no decorrer deste capítulo.

4.1 Célula solar fotovoltaica

Neste projeto, uma célula solar de 1 Watt e dimensões 80x100 mm modelo POW111D2P é utilizada para representar um módulo solar acoplado ao protótipo seguidor solar. A Figura 31 apresenta a célula solar utilizada no projeto, na Figura estão indicados os eixos nos quais a célula sofrerá deslocamento, que são utilizados como parâmetros de referência.

Figura 31 – Célula com Com eixos N-S e L-O Definidos



Fonte: Autor

Esta célula solar é feita de material cristal único que executa alta eficiência de transformação da energia solar em 17%. Tem uma superfície de resina fina e fundo resistente adequado para ambientes ao ar livre. A tensão típica de circuito aberto é de aproximadamente 5V, dependendo da intensidade da luz. Em dias de verão com céu sem nuvens, o pico de tensão de circuito aberto pode chegar a até 10V. Para evitar qualquer dano às placas que aceitam uma estreita faixa de tensão de entrada, é recomendável verificar se a tensão de circuito aberto é segura antes de qualquer ligação. Características mais específicas desta célula são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Especificações da Célula Solar

Características	
Pico de potência típico	0.935 W
Tensão no pico de potência	5.5 V
Corrente no pico de potência	170 mA
Dimensões	100x80x1.5 mm
Peso	33g
Eficiência	17%

Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/ldhsMQ>

O eixo N-S será mantido paralelo em relação ao eixo Norte- Sul da Terra, este ajuste será realizado por meio de movimentos do servomotor de base, que é controlado pelo Arduino usando sinais de referência vindouros do sensor acelerômetro/magnetômetro LSM303DLM. O eixo L-O será movimentado de forma angular em relação ao eixo N-S, esse deslocamento se dá por meio de sinais de referência dos sensores LDR que são utilizados para o controle de posição do servomotor que movimenta o suporte da célula solar. Por meio destes movimentos, a face da célula solar se manterá perpendicular à luz do sol, garantindo geração de maior potência do circuito.

4.2 Microcontrolador Arduino

O microcontrolador utilizado neste projeto é o Arduino Mega 2560®. O Arduino Mega 2560® é uma placa de microcontrolador baseada no ATmega2560®. Ele possui 54 pinos de entradas/saídas digitais, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP e um botão de reset. Ele contém tudo o que é necessário para dar suporte ao microcontrolador; basta conectar a um computador com um cabo USB ou a uma fonte de alimentação e já está pronto para começar. O Arduino Mega é compatível com a maioria dos *shields* desenhados para os Arduino Uno, Duemilanove e para o Diecimila.

No que se diz respeito a controle, é possível implementar controlador tipo PID utilizando este microcontrolador. De forma mais detalhada, pode-se citar as seguintes características deste microcontrolador na tabela 5:

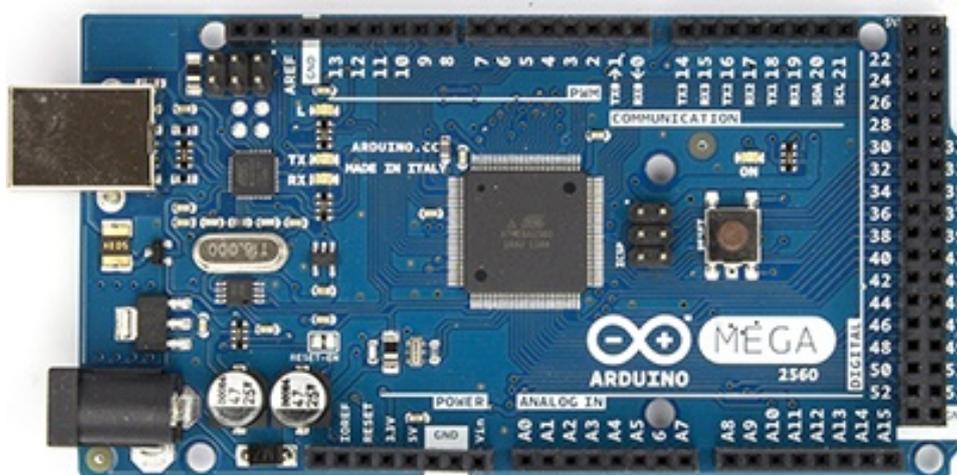
Tabela 5 – Características do Arduino Mega 2560®

Características	
Microcontrolador	ATmega2560
Voltagem de alimentação	5V
Voltagem de entrada (recomendada)	7-12V
Voltagem de entrada (limites)	6-20V
Pinos digitais I/O	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente contínua por pino I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino 3.3V	50 mA
Memória Flash	256 KB onde 4 KB é usado pela inicialização
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/PytJfu>

O Arduino será responsável pelo controle do sistema, recebendo informações dos sensores e enviando informações para os servomotores. O modelo do microcontrolador Arduino Mega 2560® pode ser visto na Figura 32.

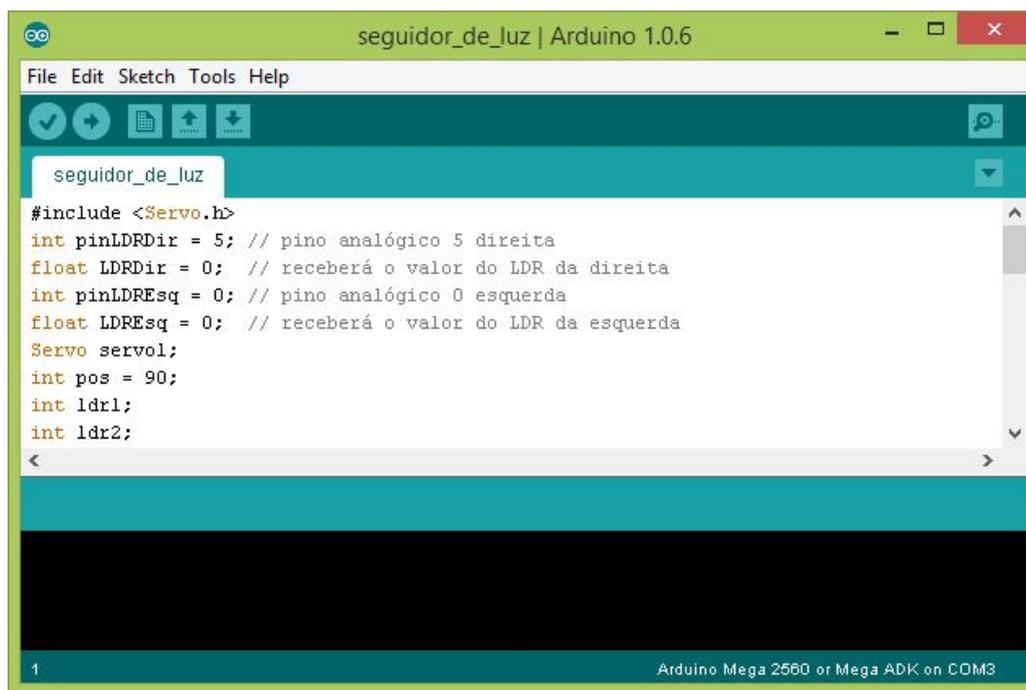
Figura 32 – Arduino Mega 2560®



Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/PytJfu>

O fabricante do microcontrolador Arduino disponibiliza em seu site um software aberto chamado Arduino, que é um IDE (*Integrated Development Environment*) ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado. Neste projeto a versão utilizada deste software é a 1.0.6. A função deste software é a transferência dos algoritmos feitos em computador para a memória interna do microcontrolador. A Figura 33 apresenta a interface deste IDE.

Figura 33 – IDE Arduino



```
seguidor_de_luz
#include <Servo.h>
int pinLDRDir = 5; // pino analógico 5 direita
float LDRDir = 0; // receberá o valor do LDR da direita
int pinLDREsq = 0; // pino analógico 0 esquerda
float LDREsq = 0; // receberá o valor do LDR da esquerda
Servo servol;
int pos = 90;
int ldr1;
int ldr2;
```

1 Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM3

Fonte: Autor

Este software possui bibliotecas já instaladas e com programas de exemplo que mostram como utilizar o Arduino em diversas situações. A biblioteca mais utilizada neste projeto é chamada de Servo, que permite o controle dos servomotores. Além disso, foi necessário adicionar uma biblioteca para utilização do sensor acelerômetro/magnetômetro.

4.3 Sensor acelerômetro e magnetômetro

O sensor LSM303DLM é usado como referência no ajuste de um dos servomotores neste projeto. O modelo LSM303DLM além de um acelerômetro, também tem a função de magnetômetro, e no caso do projeto funciona como uma bússola.

Este sensor possui diversas características de funcionamento e aplicações que estão apresentadas na tabela 6.

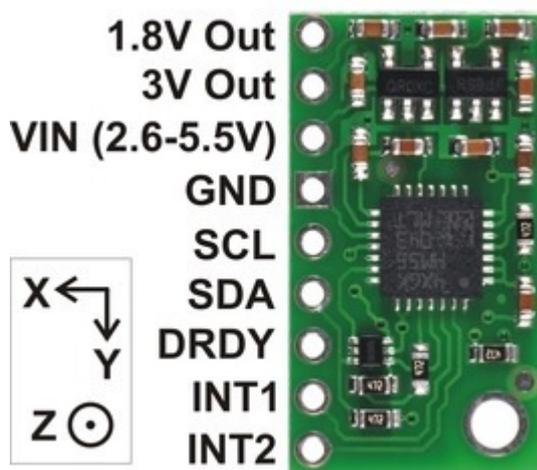
Tabela 6 – Características e Aplicações do LSM303DLM

Características do sensor	Aplicações do Sensor
Tensão de alimentação analógica: 2.16 V até 3.6 V	Bússola de compensação
Tensão de alimentação de entradas e saídas digitais: 1,8 V	Mapa de rotação
Modo de economia de energia	Detecção Posição
Acelerômetro e Magnetômetro de 3 eixos cada	Funções ativadas por movimento
Escala de campo magnético de ± 1.3 até ± 8.1 Gauss	Detecção de queda livre
Interface serial I2C	Economia de energia inteligente para dispositivos portáteis
2 geradores de interrupções programáveis independentes para a queda-livre e de detecção de movimento	Dispositivos de entrada de jogos e realidade virtual
Função acelerômetro para sair do modo <i>stand by</i> na presença de movimento	Reconhecimento Impacto e extração de madeira
Detecção de orientação 6D	Monitoramento de vibração e compensação

Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/OCifaj>

A Figura 34 mostra este componente e sua pinagem.

Figura 34 – LSM303DLM e Sua Pinagem



Fonte: Fabricante. Disponível em <https://goo.gl/5DMSVr>

Como visto nos capítulos 2 e 3, existem diversos métodos para ajustar posições de painéis solares de forma a aproveitar com maior eficiência a radiação solar. Destes métodos o que se mostra mais eficiente é a utilização do sistema de rastreamento com 2 eixos, seguido do seguidor de eixo vertical ou azimutal e o terceiro tipo no quesito é o seguidor do tipo polar, ou eixo Norte-Sul (N-S) inclinado. De acordo com Cortez et al. (2014), é possível afirmar que um seguidor vertical vai colher menos 7% da radiação que um seguidor de dois eixos e mais 4% do que um seguidor polar.

Uma das soluções mais utilizadas para a instalação de painéis solares é adequar a posição de seus eixos em relação ao eixo Norte-Sul (N-S). Trata-se de uma solução simples

e prática, principalmente na implantação de painéis solares em sistemas fixos, pois uma vez instalados a sua posição em relação ao eixo N-S não sofre alterações. No caso de ambientes móveis, como uma embarcação navegando o rios do Amazonas, a posição dos eixos do sistema com relação ao eixo N-S varia de acordo com a direção da trajetória.

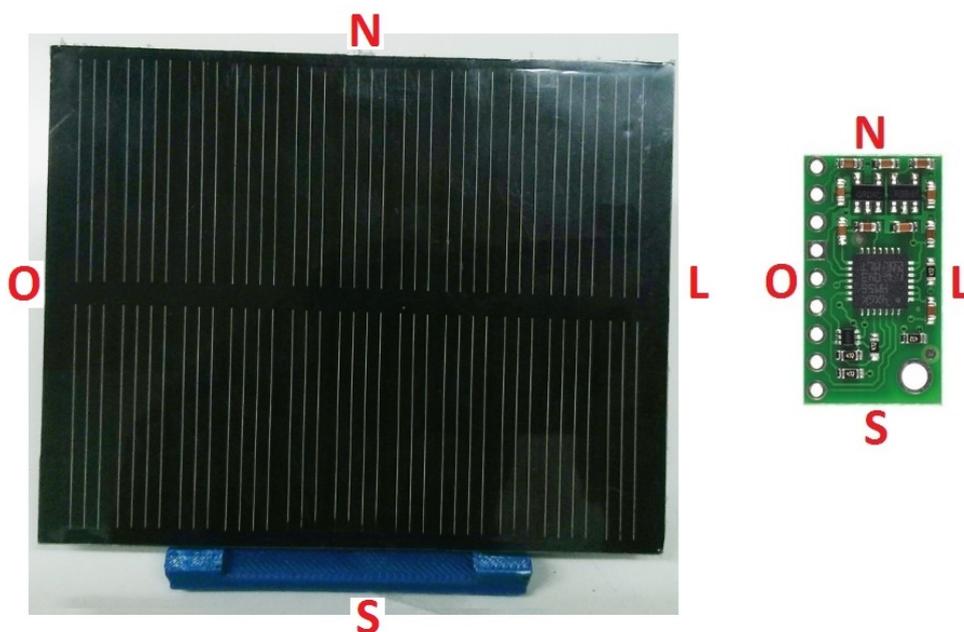
O diferencial deste projeto é a instalação de painéis solares em ambientes móveis, para isso faz-se necessário encontrar uma solução de forma a compensar a posição dos eixos do seguidor solar em relação ao eixo N-S da Terra.

Como mencionado anteriormente, o sensor LSM303DLM é usado neste projeto como uma bússola. Isto é possível porque os dados enviados pelos pinos do sensor relacionados ao magnetômetro informam vetores contendo valores que representam a posição de um dos eixos do sensor em relação ao Norte. Desta forma, utilizando um algoritmo no Arduino, esses valores são processados e utilizados para gerar comandos de ajuste ao Servomotor da Base.

Na montagem do protótipo é necessário ter atenção para que o eixo do sensor, cuja angulação em relação ao norte sofre alterações na movimentação da embarcação, seja posicionado perpendicularmente ao eixo Leste-Oeste da célula solar, isto deve ocorrer aproximadamente no meio do percurso do servomotor. A precisão neste posicionamento garante que os dados enviados pelo sensor sejam coerentes para um ajuste satisfatório na angulação do Servomotor da Base, além de proporcionar maior liberdade de movimento para o servomotor.

A Figura 35 mostra os eixos escolhidos para a célula e para o sensor magnetômetro.

Figura 35 – Referencia do Norte para Calibrar o Sistema



Fonte: Autor

A interação entre este sensor e o microcontrolador Arduino acontece usando os pinos

SCL (*Serial Clock*) ou entrada de *Clock* da comunicação Serial e SDA (*Serial Data*) ou entrada de Dados Seriais, de ambos os dispositivos. Ou seja o pino SCL do Sensor, que segundo o *Datasheet* do mesmo corresponde ao pino 20, se conecta por meio de um fio ao pino SCL do Arduino correspondente ao pino digital 21. De forma semelhante o pino SDA do sensor correspondente ao pino 19 se conecta ao SDA do Arduino que se localiza no pino digital 20. Isso finaliza a conexão física entre estes elementos.

A conexão física, entretanto, não é suficiente para uma troca de dados coerentes, para isto é necessário adicionar parâmetros lógicos de comunicação para que o microcontrolador seja capaz de interpretar e processar os dados do sensor. Estes parâmetros são encontrados em uma biblioteca lógica que deve ser adicionada ao Arduino, trata-se da biblioteca LSM303. Esta biblioteca cria uma interface de comunicação entre sensor e microcontrolador muito mais simples. A biblioteca também inclui uma função para calcular a compensação de inclinação para quem quer usar o LSM303DLM como uma bússola com compensação de inclinação, que é o caso deste projeto.

4.4 Sensor de luminosidade

Um componente essencial para o projeto é o sensor capaz de perceber mudanças na luminosidade do ambiente em que se encontra. Para fazer a leitura da intensidade de luz solar são usados dois sensores LDR (*Light Dependent Resistor*) de 5 mm ou resistores dependentes de luz, que mudam sua resistência em função da intensidade de luz.

O modelo utilizado no projeto pode ser visto na Figura 36. Este modelo possui resistência de aproximadamente 1.000 Ohms em ambientes bem iluminados e resistência de 10.000 Ohms em ambientes escuros.

Figura 36 – LDR Usado no Projeto



Fonte: Fabricante. Disponível em <https://goo.gl/O9O0jK>

As características do modelo utilizado estão descritas na tabela 7.

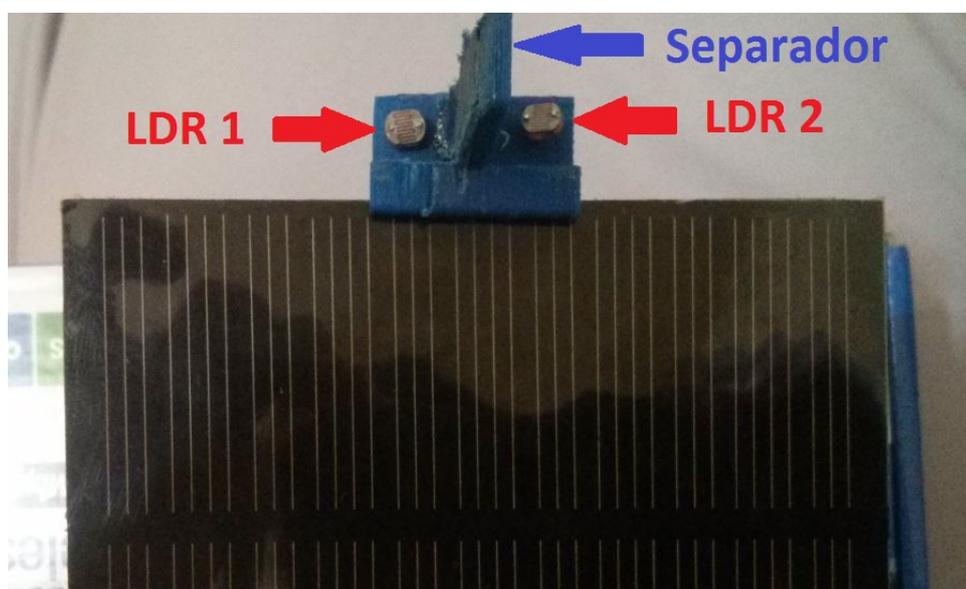
Tabela 7 – Especificações do Sensor LDR 5mm

Características do Sensor LDR	
Resistencia quando há luz	~1k Ohm
Resistencia no escuro	~10kOhm
Tensão máxima	150V
Potência máxima	100mW
Temperatura de Funcionamento	-30 ~ +75 °C

Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/8hTF10>

A peça de suporte para célula solar possui um espaço reservado para fixação de dois sensores LDR's que ficam separados por um elemento que funciona como um bloqueador de luz, este elemento faz com que um dos LDR's fique com sombra no caso de não perpendicularidade da face da placa com a luz solar. O sombreamento causado implica em uma diferença na intensidade de luz recebida pelo LDR, fazendo com que sua resistência aumente. Sendo assim, a posição da placa em relação ao Sol se mostra ideal quando a resistência de ambos os sensores forem equivalentes. Na Figura 37 estão indicados os sensores LDR's e espaço onde estes estão posicionados na peça de suporte da célula solar.

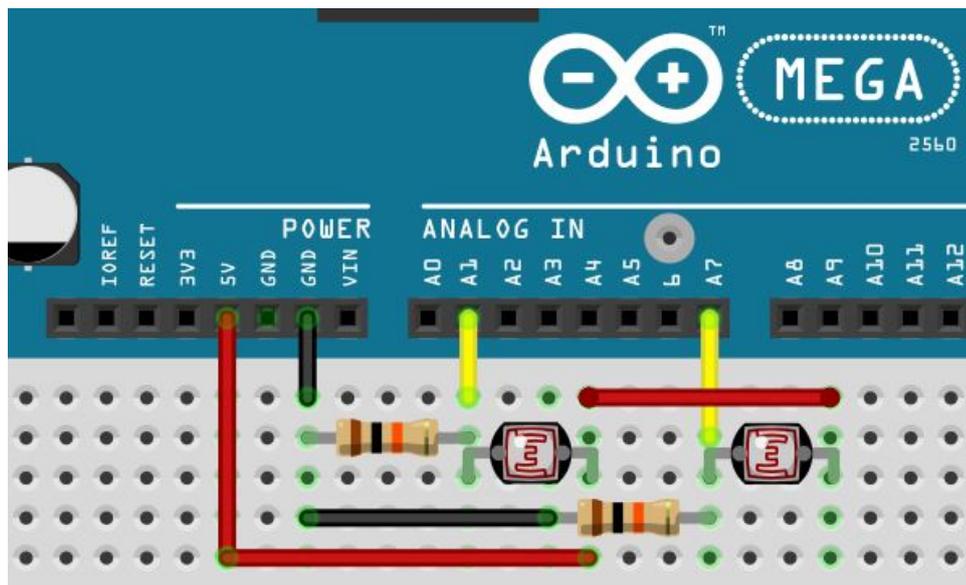
Figura 37 – LDR's Posicionados no Suporte



Fonte: Autor

A conexão entre este sensor e o Microcontrolador Arduino deve ser realizada como ilustrado na Figura 38, usando um resistor de 10 k Ω para cada LDR.

Figura 38 – Conexão entre LDR's e Arduino



Fonte: Autor

Na configuração ilustrada, cada LDR está conectado com um resistor de $10\text{ k}\Omega$, o ponto de conexão é então ligado a uma entrada analógica do Arduino. Nos terminais restantes os LDR's são conectados ao pino de alimentação de 5V e as pontas livres dos resistores são ligadas ao ponto comum, ou GND. Usando esta configuração sempre que o valor de resistência de algum LDR apresenta alteração, o sinal enviado à porta analógica correspondente apresenta alteração proporcional.

O sinal analógico reconhece valores de 0 a 1023 vindos dos sensores de luz, onde 0 significa escuridão e 1023 luminosidade máxima lida pelo sensor. O Arduino é responsável por identificar estas variações, processá-las, e enviar sinais para o servomotor da placa de forma a fazer movimento direcionado para a posição angular onde as resistências dos LDR's tendem à igualdade. A função utilizada para isso no ambiente de desenvolvimento do Arduino é a `map()`, que no caso deste projeto interpreta valores de 0 a 1023 vindouros de entradas analógicas e os converte para valores de 0 a 180 correspondentes ao ângulo para o qual o servomotor deve ser deslocado.

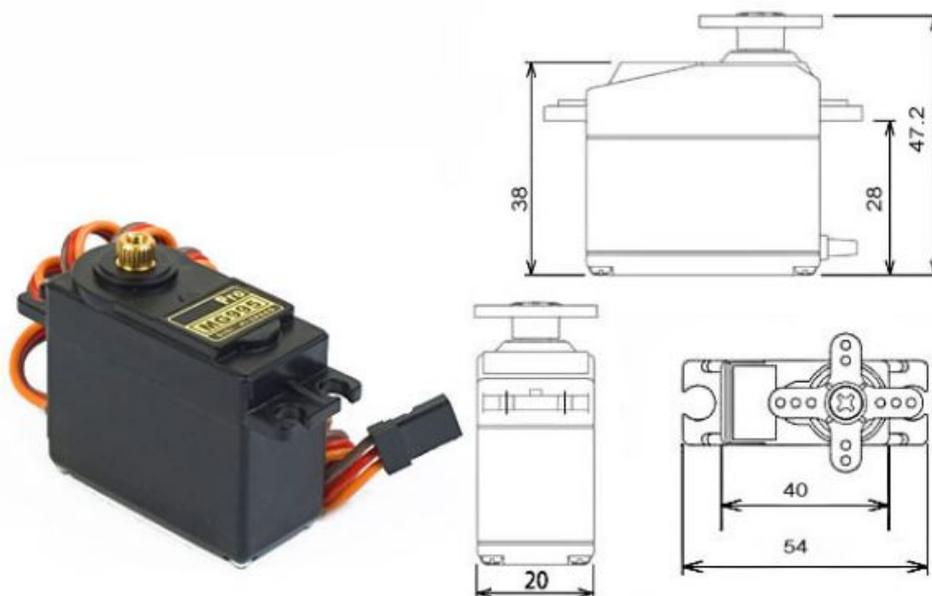
Os sensores possuem uma pequena margem de erro, então faz-se necessário utilizar uma margem mínima de diferença entre os valores das portas analógicas que no caso deste projeto tem valor de mais ou menos 10, ou seja, o sistema só entra em ação caso a diferença de intensidade de luz entre os sensores for no mínimo 10.

4.5 Servomotores

Neste projeto os componentes atuadores do sistema são dois servomotores TowerPro modelo MG995 mostrado na Figura 39 com suas dimensões informadas em milímetros.

Estes motores serão responsáveis pelo deslocamentos angulares da célula solar fotovoltaica ao receber comandos do microcontrolador.

Figura 39 – Servomotor MG995



Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/BTqvr9>

As especificações mais importantes deste modelo de servomotor são apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 – Especificações MG995

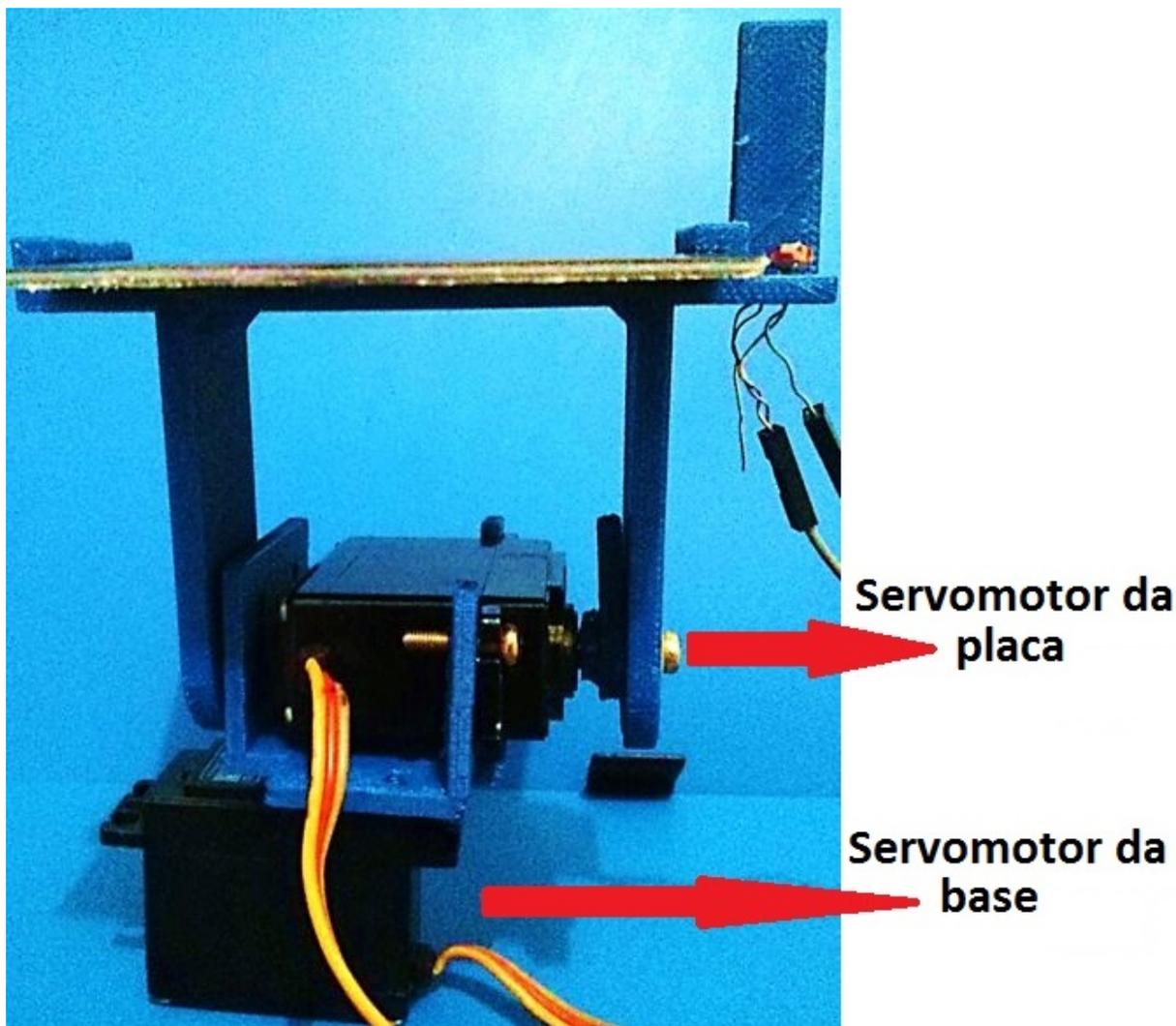
Características MG995	
Dimensões	1.57" x 0.79" x 1.44" (40 x 20 x 36.5mm)
Peso	55g
Velocidade de operação (4.8V sem carga)	0.17seg / 60 graus
Velocidade de operação (6V descarregada)	0.13seg / 60 graus
Pare de torque (4.8V)	13kg/cm
Parar Torque (6.0V)	15kg/cm
Faixa de temperatura:	0 até +55 graus C

Fonte: Fabricante. Disponível em <http://goo.gl/BTqvr9>

Cada servomotor tem sua função diferenciada. O primeiro servomotor, chamado de servomotor de base, é responsável por movimentar toda a estrutura, este servomotor é fixo, a rotação de seu eixo é referenciada pelo sensor magnetômetro e nele é acoplado o suporte do servomotor da placa. Neste suporte está fixado o segundo servomotor, chamado de servomotor da placa, neste último são acoplados o suporte da célula solar e os sensores de intensidade de luz, sendo desse servomotor a característica de seguidor de luz.

A Figura 40 identifica os servomotores do sistema, com seus suportes já acoplados.

Figura 40 – Identificação dos Servomotores no Protótipo



Fonte: Autor

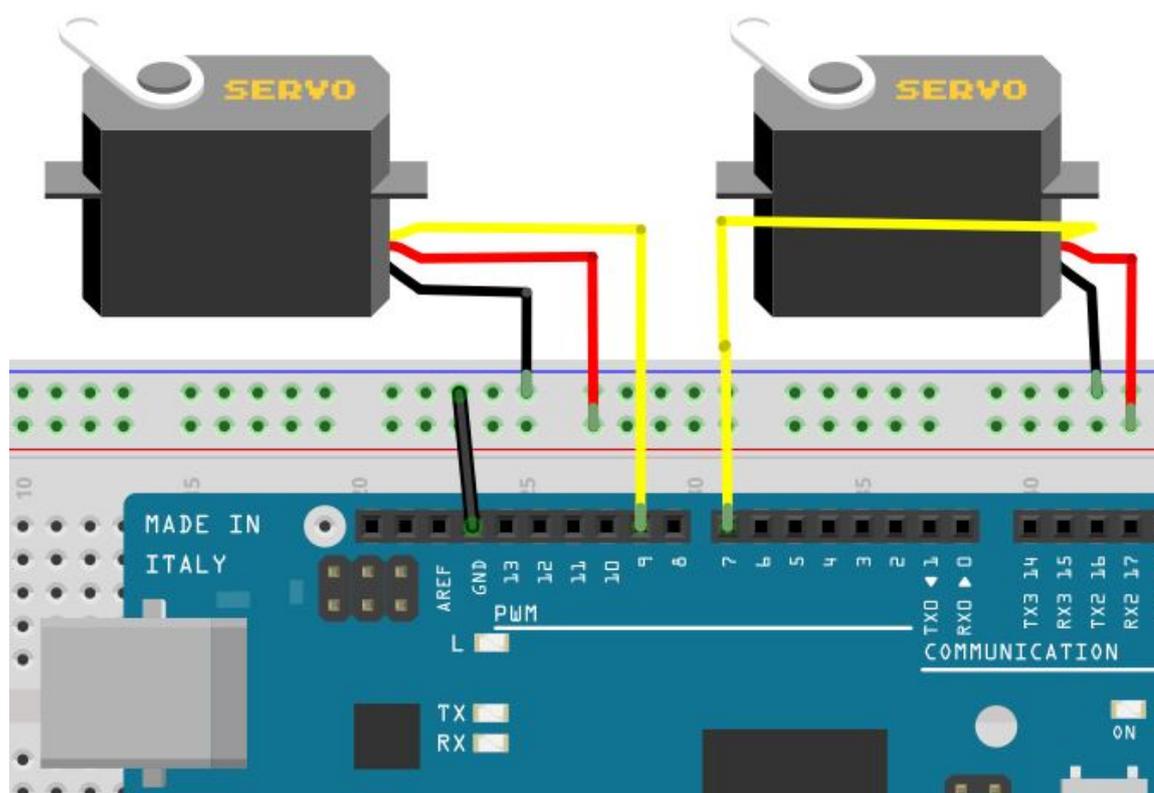
O servomotor da placa é controlado usando a referência dos sensores de intensidade de luz, sendo ele o atuador responsável por direcionar a face da célula solar para a posição de melhor aproveitamento de luz solar.

O servomotor da base é controlado pelo Arduino por meio do sinal de referência do sensor magnetômetro LSM303DLM, logo este servomotor é responsável por manter o eixo N-S da célula solar na mesma direção do eixo N-S da Terra. Apesar de suportar a estrutura inteira, este servomotor não sofre tanto esforço pois os componentes são leves e o centro de massa da estrutura está concentrado em cima de seu eixo de rotação, que é feito de metal.

Neste projeto, por se tratar de um sistema em escala reduzida, os servomotores movimentam uma estrutura com uma célula solar, entretanto, como foi mostrado no capítulo 3 desta monografia, um servomotor de mesmo porte pode ser utilizado para movimentar módulos solares inteiros com auxílio de engrenagens para redução do esforço, tornando desnecessário a utilização de motores maiores e mais potentes, reduzindo assim os custos de projeto e o consumo de energia.

A conexão entre o servomotor e o microcontrolador acontece por meio do cabeamento dos motores. No caso do servomotor MG995 o cabeamento é composto por três fios, o de cor vermelha é conectado à uma alimentação de 5V; o de cor preta vai conectado ao pino GND. O cabo laranja recebe o sinal de PWM, que é processado pelo sistema de controle interno do servomotor. Neste projeto os cabos de PWM dos servomotores são conectados nos pinos digitais 7 e 9 do Arduino para os servomotores da placa e da base respectivamente. A Figura 41 ilustra a conexão entre servomotores e Arduino.

Figura 41 – Conexão dos Servomotores no Microcontrolador

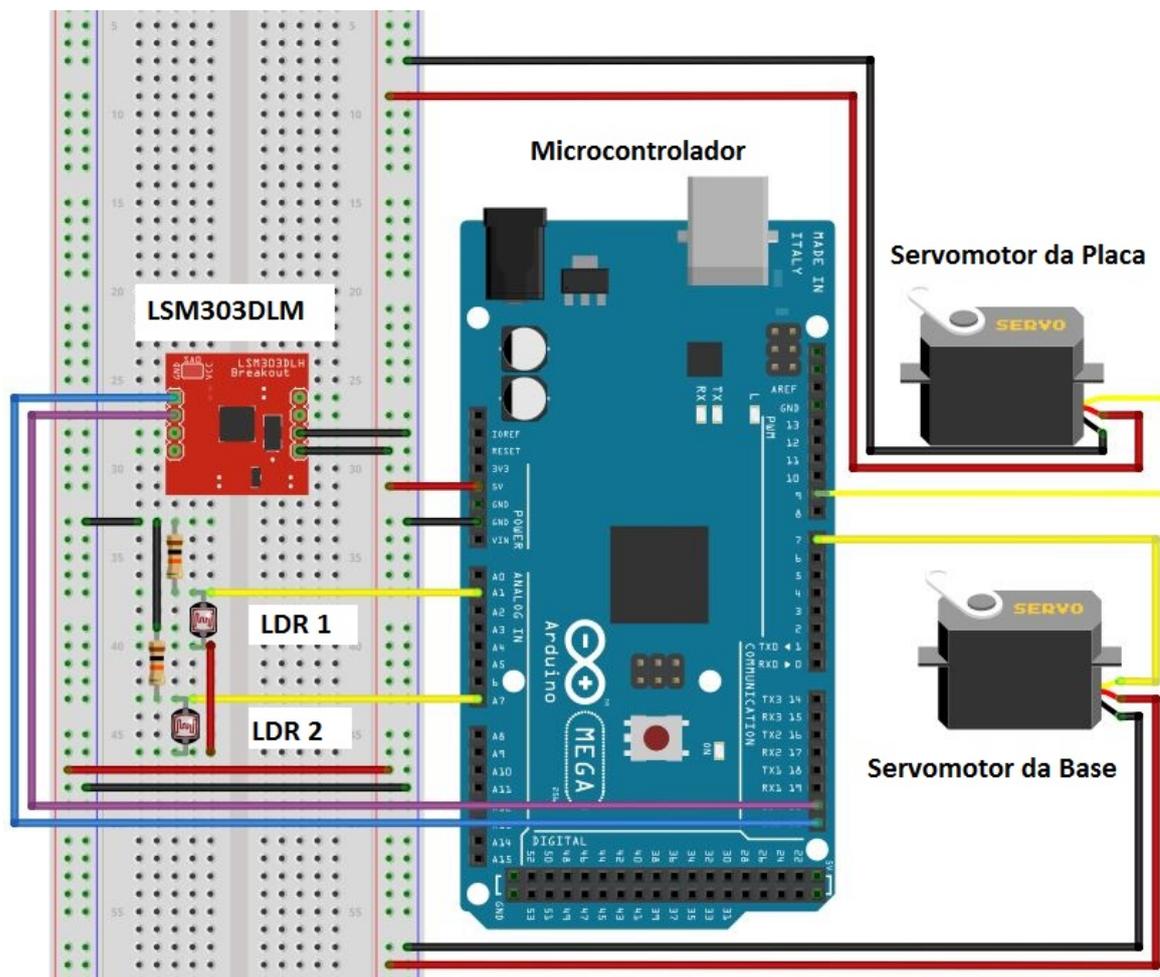


Fonte: Autor

4.6 Ilustração da conexão dos componentes e fluxograma de funcionamento

Todos os itens mencionados anteriormente são conectados em um circuito, com exceção da célula solar, pois esta representa um módulo solar que seria uma fonte de energia com um circuito diferenciado. Uma ilustração do circuito do sistema pode ser vista na Figura 42. Esta foi a configuração utilizada para realização dos testes de caráter elétrico dos componentes, garantindo que todos os componentes funcionam adequadamente e que o microcontrolador consegue processar todas as informações dos sinais dos sensores e usar essas informações para enviar sinais de controle para os servomotores.

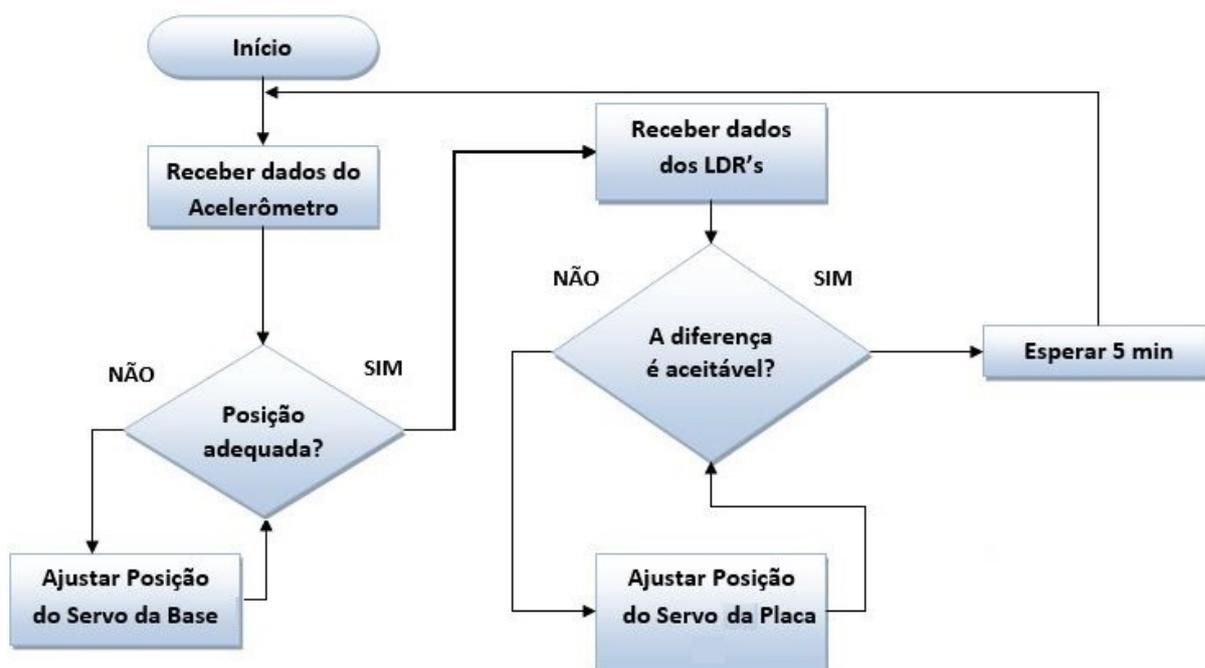
Figura 42 – Circuito do Sistema Seguidor



Fonte: Autor

Para fazer a programação para os seguidores solar foi decidido que o sinal enviado pelo sensor magnetômetro tem prioridade sobre o sistema, desta forma o servomotor da placa só se movimenta quando o servomotor de base se encontra em posição satisfatória, evitando gastos desnecessários de energia. Além disso, no momento em que o servomotor de placa é ajustado numa posição adequada, o sistema entra num estado de espera de 5 minutos, isso acontece para evitar movimentação desnecessária dos servomotores. Uma vez que embarcações estão sempre sujeitas à movimentação angular causada pelas ondulações das águas a espera de 5 minutos evita que sinais de distúrbios pequenos ativem os servomotores. Na Figura 43 é apresentado o fluxograma de funcionamento do sistema, este fluxograma indica as prioridades do sistema seguidor solar.

Figura 43 – Fluxograma de Funcionamento



Fonte: Autor

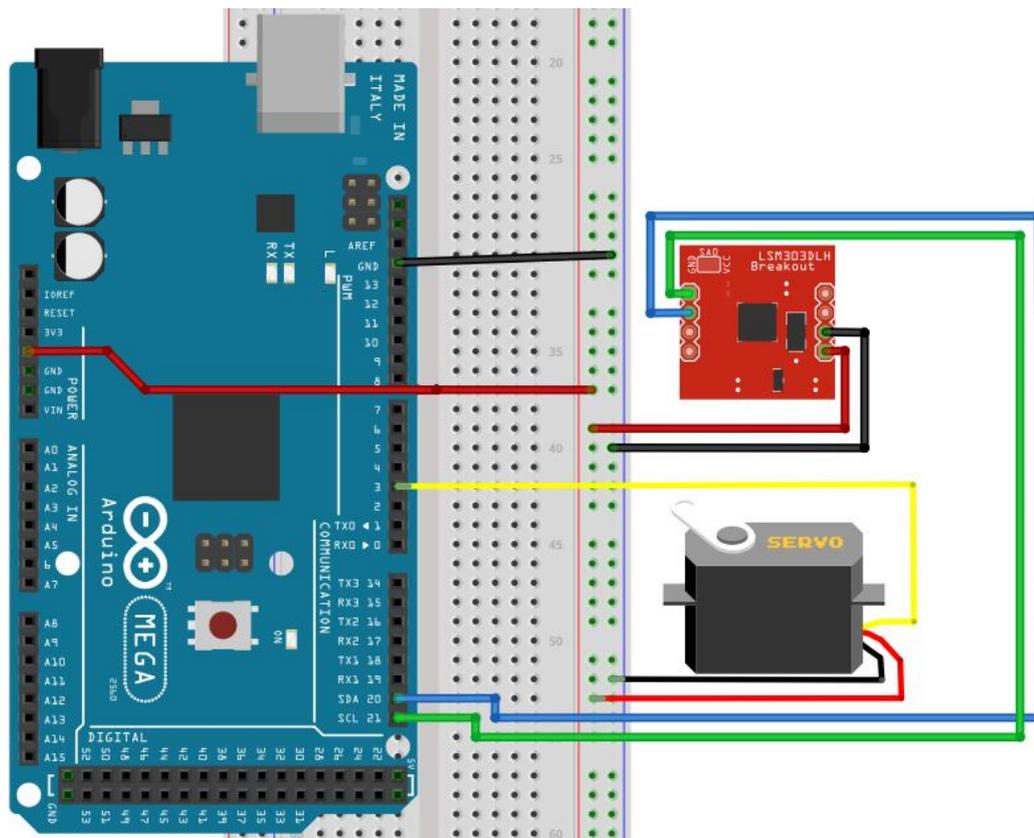
4.7 Estimação do modelo do servomotor

Neste projeto o servomotor funciona como se fosse uma planta de trabalho que possui uma função de transferência, e o microcontrolador é o elemento de controle que ajusta a resposta da planta de acordo com uma referência. O modelo matemático do servomotor não é informado pelo fabricante, então para identificação do modelo foi criado um circuito com um dos servomotores e o sensor acelerômetro, onde suas entradas e saídas são analisadas pela ferramenta de identificação de sistemas do MATLAB®, a *Ident*.

Na Figura 44 é apresentado o circuito utilizado para realização do experimento de identificação do modelo dos servomotores.

Neste circuito, em que o microcontrolador se encontra conectado a um computador por meio de cabo USB, o sensor magnetômetro é posicionado em cima do eixo do servomotor, e serve como referência para a angulação. O eixo N-S do sensor e a posição correspondente a 0 graus do servomotor devem estar alinhados entre si e paralelos ao eixo N-S da Terra. O microcontrolador então envia um ciclo de pulsos de PWM que começa com 1 ms de período, sendo incrementado em 0.00125 a cada repetição deste ciclo, finalizando num pulso de 2 milissegundos. Este processo faz com que o servomotor se desloque de 0 a 180 graus em 800 movimentos.

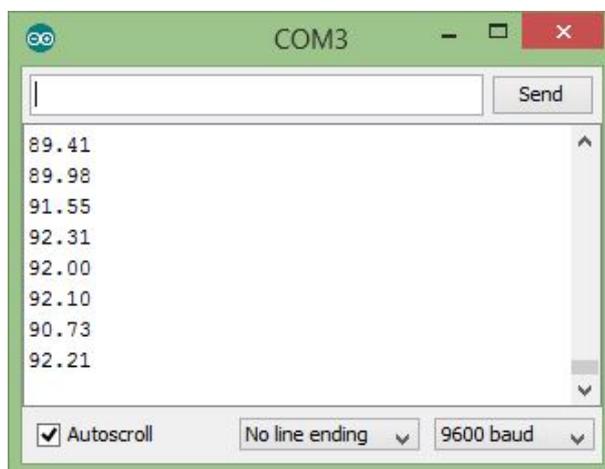
Figura 44 – Circuito Utilizado na Identificação do Modelo do Servomotor



Fonte: Autor

A cada movimento do servomotor é realizado uma leitura do sinal do sensor magnetômetro, que informa o ângulo de deslocamento de seu eixo N-S em relação ao Norte da Terra. Os ângulos correspondentes a cada deslocamento são enviados à porta serial COM3, os dados recebidos nesta porta podem ser vistos pela IDE do microcontrolador Arduino como mostra a Figura 45.

Figura 45 – Ângulos Recebidos na Porta COM3

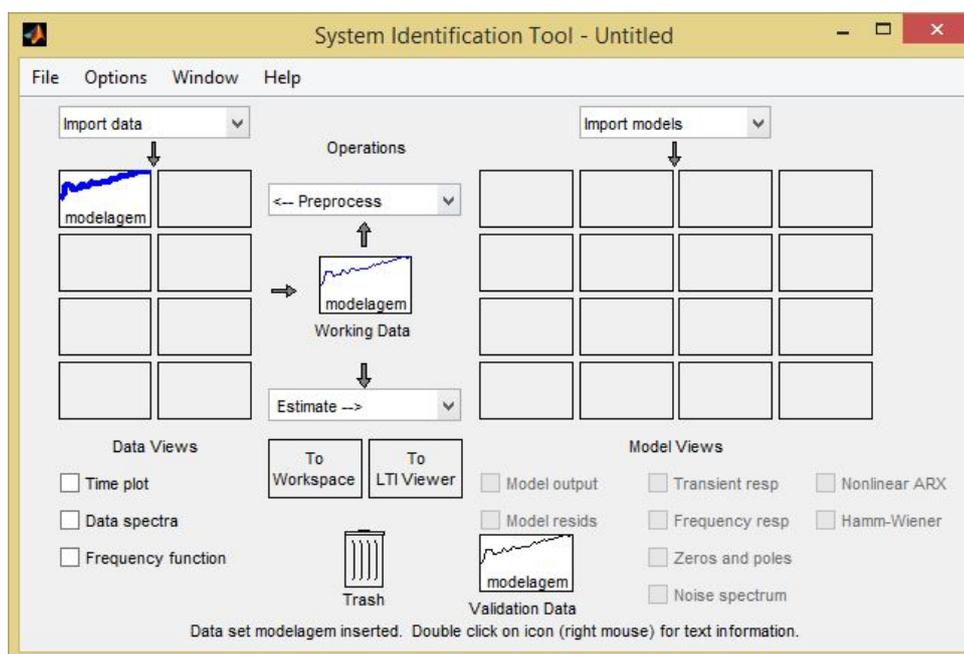


Fonte: Autor

4.7.1 Ferramenta de identificação de sistemas

Para identificar os parâmetros de controle do sistema é necessário estimar a função de transferência dos servomotores, que pode ser obtida com o uso da ferramenta de identificação de sistemas do MATLAB® (*Ident*). Esta ferramenta gera uma aproximação da função de transferência de um sistema qualquer por meio da análise do comportamento de entradas e saídas neste sistema. A interface principal desta ferramenta é apresentada na Figura 46.

Figura 46 – *Ident* MATLAB®

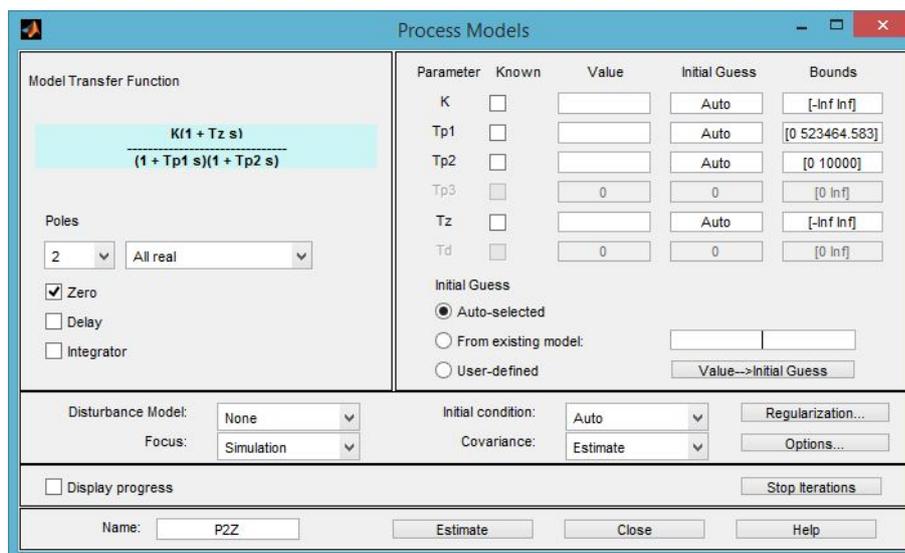


Fonte: Autor

As entradas no caso desta modelagem são os pulsos enviados do microcontrolador ao servomotor e as saídas são os ângulos informados pelo sensor magnetômetro. Como se tratam de 800 movimentos, esses dados são analisados pela ferramenta *Ident* como duas tabelas de uma coluna e oitocentas linhas cada. A ferramenta analisa esses dados e faz uma estimação que pode ser totalmente automática, ou com a entrada de alguns parâmetros conhecidos.

Como foi visto no capítulo 2 a equação de modelagem de um servomotor tem uma forma característica. Este formato característico é informada pelo usuário à ferramenta de identificação, que a partir desses parâmetros estima uma função de transferência para o modelo do servomotor. A Figura 47 mostra a interface onde são adicionados os parâmetros conhecidos do modelo real para a estimação do modelo matemático aproximado.

Figura 47 – Interface de Ajuste de Parâmetros



Fonte: Autor

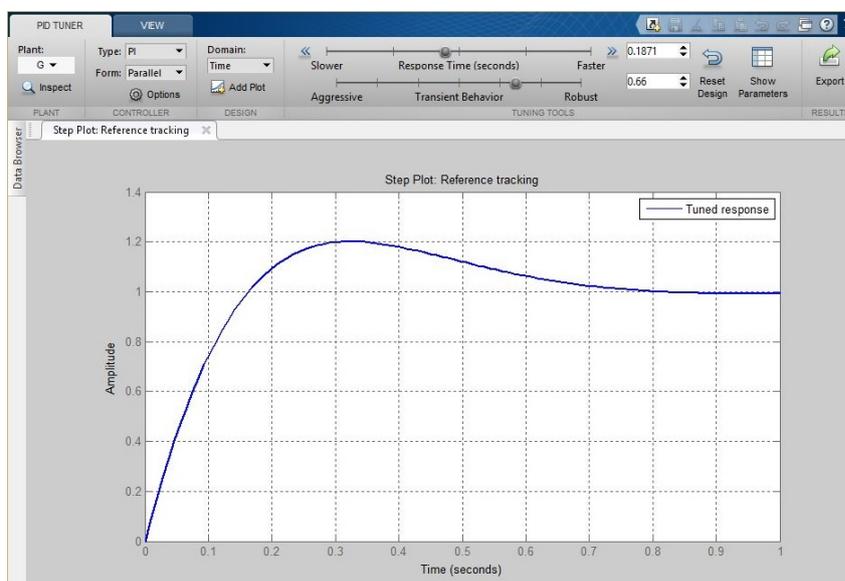
A função de transferência foi gerada e é apresentada na equação 4.1:

$$G(\text{motorIdentificado}) = \frac{0.00384s + 0.0001997}{s^2 + 0.1552s + 0.0001423} \quad (4.1)$$

4.7.2 Obtenção do controlador do sistema

A partir da função de transferência da equação 4.1 é possível obter a equação do controlador utilizando a ferramenta pidtool do MATLAB®. Com esta ferramenta é possível analisar as respostas geradas por controladores diferentes. A Figura 48 apresenta a interface onde os parâmetros do controlador são definidos.

Figura 48 – Interface de definição de Controlador

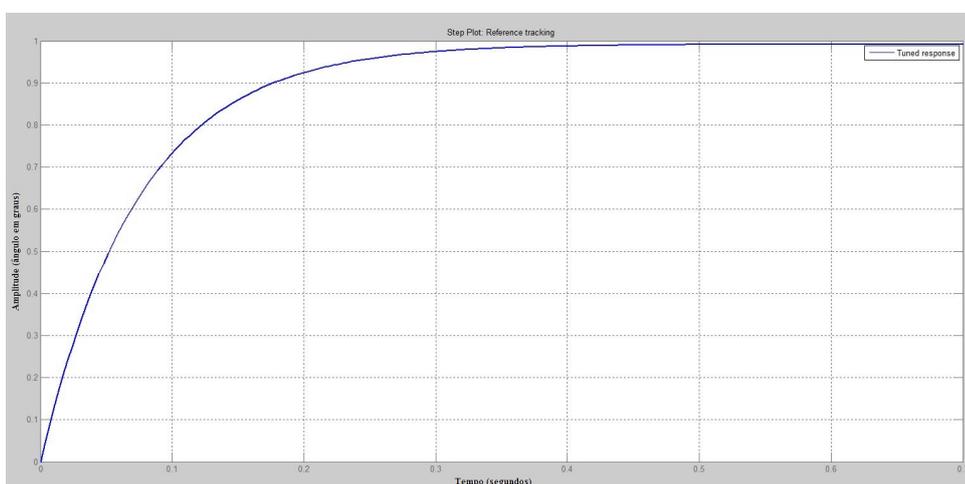


Fonte: Autor

Na ferramenta pidtool do MATLAB® é possível analisar o comportamento da resposta do controlador de forma interativa. A função de transferência do sistema é enviada para interface executando o comando `'pidtool(G(motorIdentificado))'`, após ser carregada, o usuário estabelece valores de tempo de resposta e comportamento transitório. Com esses valores definidos, no canto superior esquerdo, abaixo da *'VIEW'* é escolhido o tipo de controlador a ser utilizado. Os parâmetros do controlador são então gerados automaticamente, e podem ser visualizados no botão *'Show Parameters'* e a resposta à uma referência do sistema controlado é visualizada em um gráfico no centro da interface, que tem como eixos a amplitude do sinal em função do tempo.

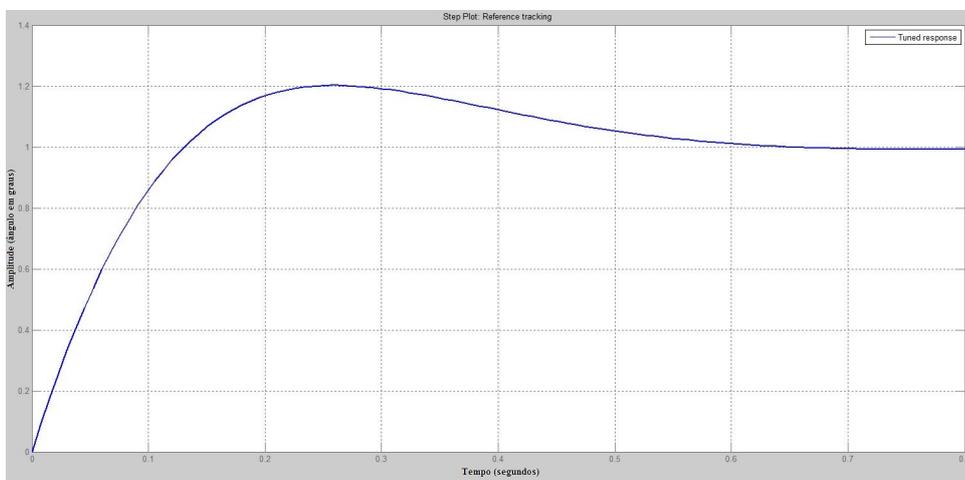
Nas Figuras 49, 50 e 51 observam-se as respostas dos controladores tipo P, PI e PID respectivamente.

Figura 49 – Resposta do Controlador Tipo P



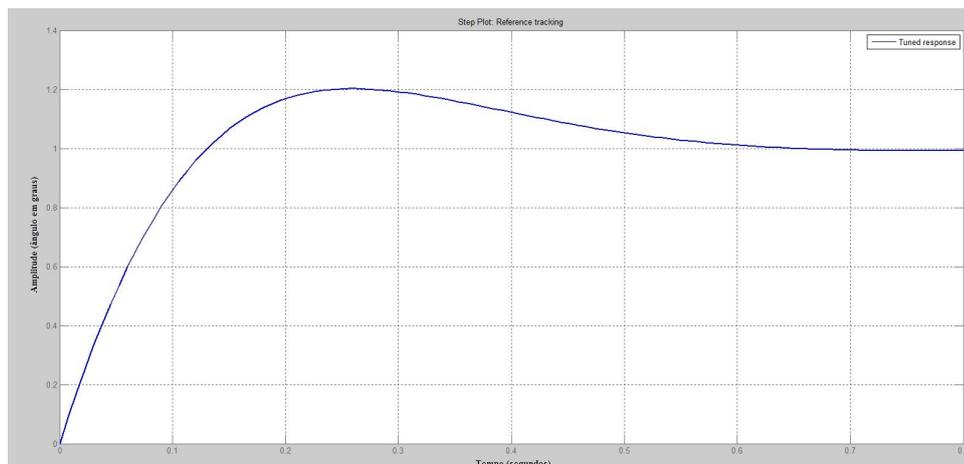
Fonte: Autor

Figura 50 – Resposta do Controlador Tipo PI



Fonte: Autor

Figura 51 – Resposta do Controlador Tipo PID



Fonte: Autor

Os parâmetros para os controladores P, PI e PID são apresentados nas equações , respectivamente.

$$C(P) = 2784 \quad (4.2)$$

$$C(PI) = 2520 + \frac{31800}{s} \quad (4.3)$$

$$C(PID) = 2520 + \frac{31800}{s} \quad (4.4)$$

As equações dos controladores PI e PID são iguais, pois para o sistema o ganho derivativo que seria do tipo $Kd * s$ é desconsiderado pela interface, pois aferiria a resposta de forma negativa.

4.8 Construção do protótipo

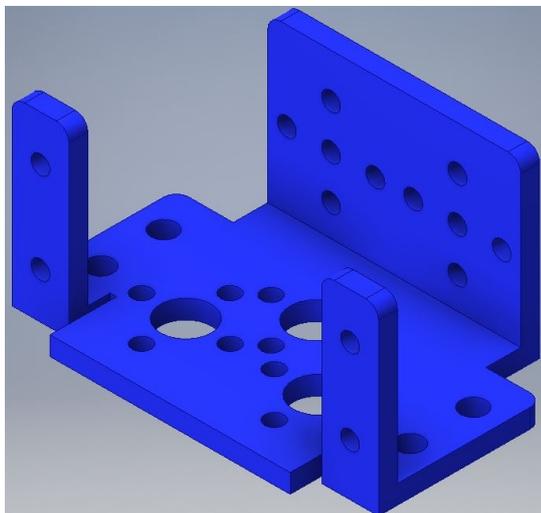
Para construir o protótipo com todos os componentes, é necessário uma estrutura que sustente todos estes itens e que seja articulada de forma a permitir os movimentos dos servomotores do sistema. Para isso foram desenhadas peças adequadas para a criação desta estrutura, estas peças foram confeccionadas com o auxílio de uma impressora 3d localizada no núcleo de robótica da Escola Superior de Tecnologia.

4.8.1 Desenho das peças

As peças foram desenhadas no software *Autodesk Inventor Professional*® 2016 versão estudante. Foram desenhadas 2 peças para a estrutura, uma das peças sustenta os sensores LDR e a célula solar, esta peça é acoplada ao servomotor da placa. A segunda peça é acoplada ao servomotor de base e sustenta o servomotor da placa, ou seja, esta peça

sustenta a estrutura por inteiro. Ilustrações das peças de suporte são apresentadas nas Figuras 52 e 53.

Figura 52 – Suporte da Base



Fonte: Autor

O suporte de base, que sustenta toda a estrutura, possui vários furos para facilitar o encaixe de servomotores. O servomotor da placa é fixado nele através de parafusos localizados na face frontal. A base deste suporte possui furo para passagem de um parafuso que é fixado no eixo do servomotor da base. O furo se encontra próximo ao centro de massa da estrutura, reduzindo o esforço em cima do suporte. Tanto o Suporte da base quanto o suporte da placa foram feitos com espessura de 3mm para obter uma maior resistência à esforços.

Figura 53 – Suporte da Placa



Fonte: Autor

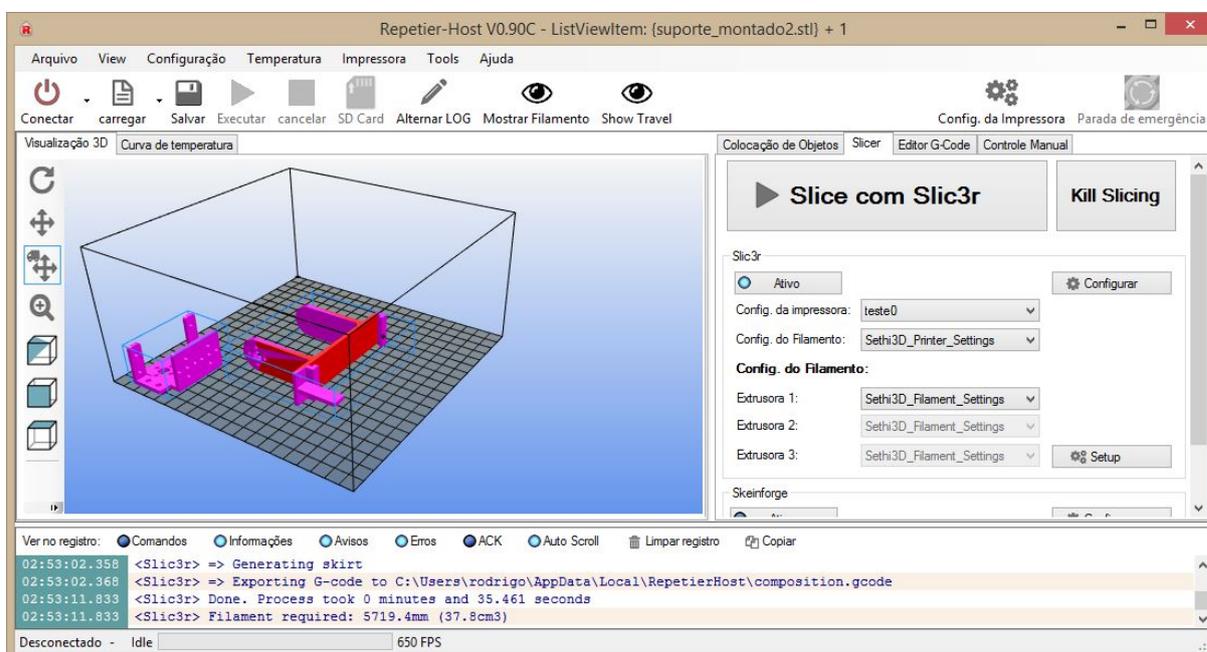
A peça de suporte da placa foi desenvolvida pensando na sustentação da célula solar, esta peça possui a haste separadora que é responsável pelo sombreado dos sensores de intensidade de luz no caso de não perpendicularidade com a luz solar. Além disso a peça possui 4 furos na sua face superior onde são passados os terminais dos sensores LDR.

Para encaixar a célula solar é necessário deslizar o componente entre as garras laterais que sustentam a célula depois de encaixada. O suporte tem formato de U e uma das pontas arredondadas do suporte existem 5 furos, o furo de maior raio é utilizado para a passagem de um parafuso que é fixado no eixo do servomotor da placa, na outra ponta existe um furo por onde passa um pino guia, ligando o suporte da placa ao suporte de base.

4.8.2 Software de impressão

Para a impressão das peças, é necessário uma interface de comunicação entre o computador e a impressora 3d, o programa aberto Repetier-Host® fornece esta interface. Os desenhos das peças devem ser exportados para extensão .stl, que é reconhecida pelo programa. Os desenhos das peças são então carregados na área de visualização 3D do software por meio do botão carregar. A Figura 54 apresenta a o software com os suportes carregados na área de visualização 3D.

Figura 54 – Visão dos Suportes no Repetier



Fonte: Autor

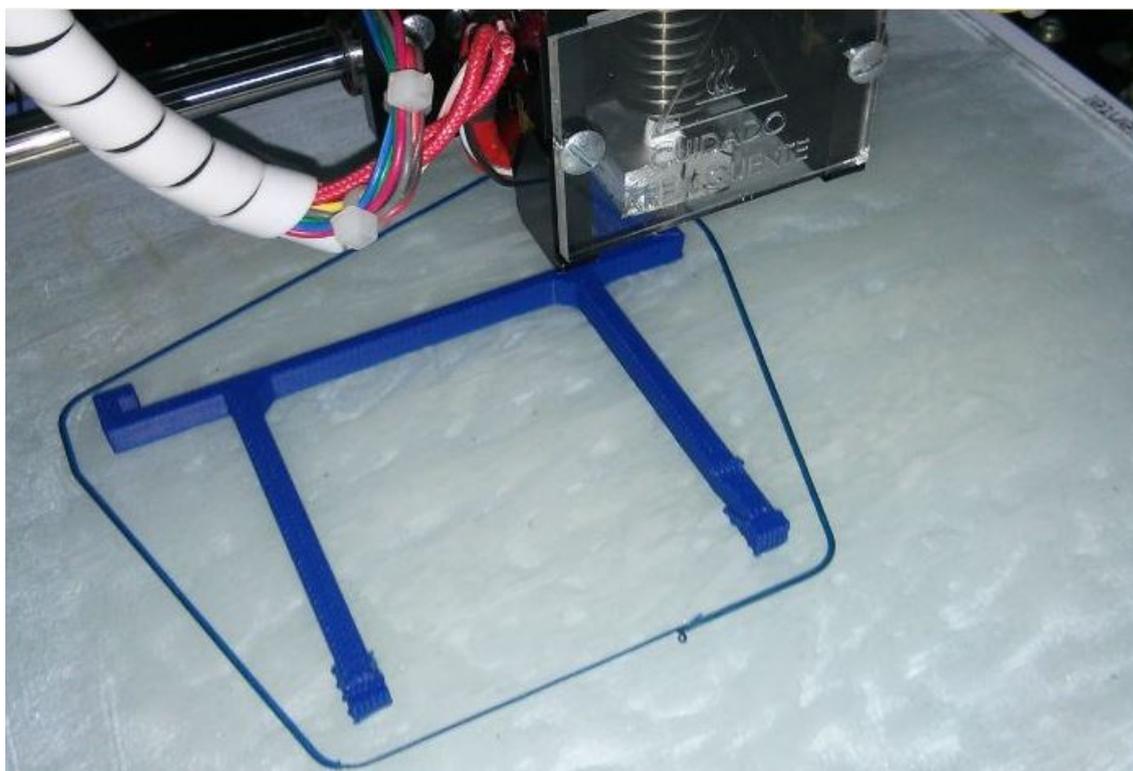
O botão "Slice com Slic3r" gera um código chamado G-code, semelhante a uma programação CNC. Ao final do processo de geração deste código, é informado também o tempo necessário para confeccionar a peça. O botão executar envia sinal para impressora iniciar sua operação.

4.8.3 Confeccção das peças e montagem da estrutura

A impressora utilizada é recomendada para pequenas peças, como no caso dos suportes do sistema. Esta impressora funciona utilizando um rolo de material ABS que é usado para confecção das peças, este material pode ser encontrado em diferentes cores, a cor do ABS utilizado no projeto é azul.

A impressora contém uma ponta extrusora que fica aquecida em 200 ° C, por onde sai o material de impressão, além disso a base da impressora também é aquecida durante a operação na temperatura de 110 ° C, na base deve ser aplicado cola do tipo bastão para aumentar a aderência entre a peça impressa e a base. Tanto a base quanto a ponta extrusora da impressora se movimentam, aumentando a velocidade da impressão. A Figura 55 mostra o processo de impressão do suporte da placa.

Figura 55 – Impressão do Suporte da Placa



Fonte: Autor

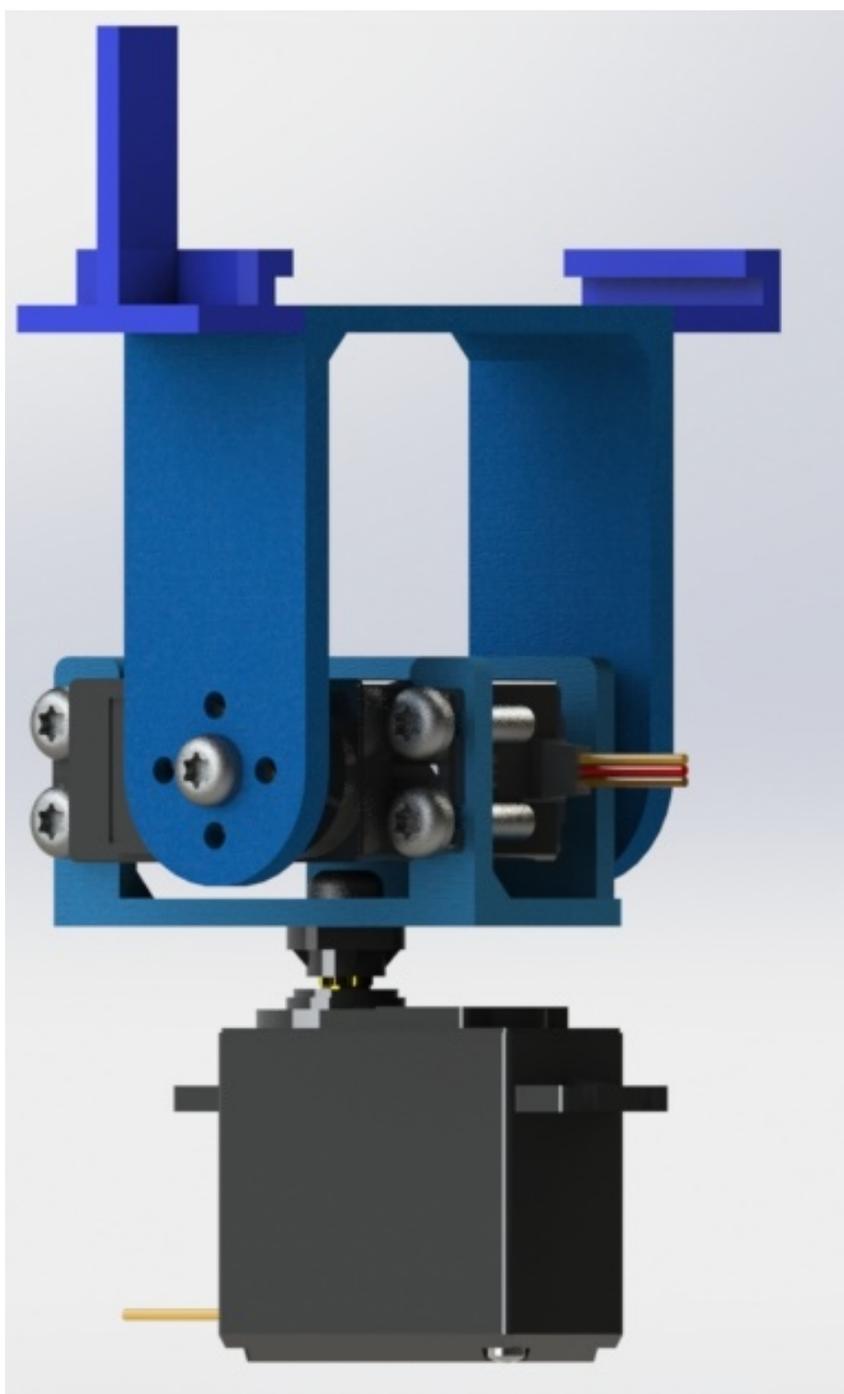
O tempo de impressão depende principalmente na quantidade de material utilizada para confecção das peças, ou seja, quanto mais material for demandado para a peça mais tempo é necessário para sua confecção, outro fator importante é a complexidade do desenho que pode aumentar drasticamente o tempo de sua confecção. O suporte da placa além de maior, é uma peça mais complexa em termos de impressão 3d, isso porque a haste separadora é trabalhada como uma parte suspensa da peça, pois a haste não se encontra junto à base da impressora. Para confeccionar a haste separadora, bem como as pontas arredondadas das peças, um material que sustenta peças suspensas é gerado pelo G-code

e confeccionado automaticamente pela impressora 3d. Este material , chamado material sustentação, é facilmente removível ao final da impressão.

Os suportes, apesar de serem pequenos, levam um período de tempo de 2 horas no caso do suporte da placa, e de 50 minutos no caso da base para serem finalizados pela impressora 3d.

Após finalizados, os suportes são acoplados nos servomotores conforme ilustra a Figura 56.

Figura 56 – Estrutura Montada



Fonte: Autor

4.9 Testes práticos

Para os testes do sistema são utilizados dois métodos, como cada tipo de sensor é referência para um único servomotor, os testes analisam os movimentos de cada servomotor separadamente.

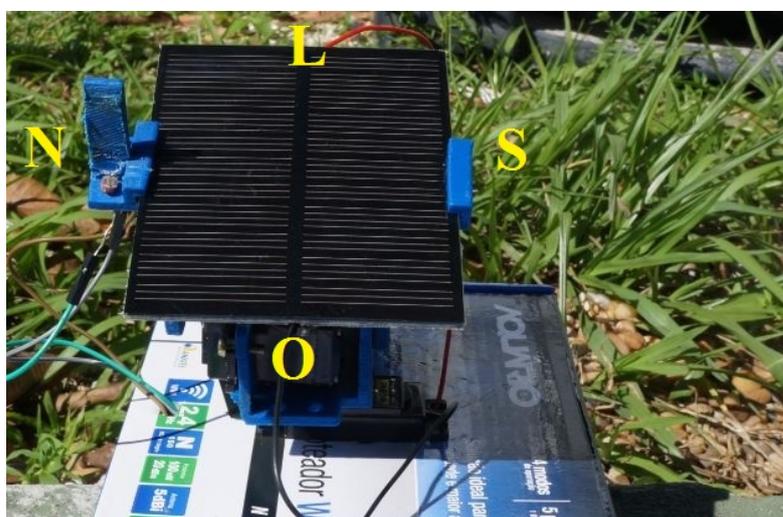
O primeiro teste é utilizado para verificar se os movimentos do servomotor da placa, que referenciado pelos sensores de intensidade de luz LDR, estão de acordo com o esperado, ou seja, verificar se o servomotor se desloca para a posição onde exista maior intensidade de luz. Este teste pode ser realizado utilizando tanto luz artificial quanto a luz do Sol. As Figuras 57 e 58 mostram os testes do seguidor de luz com luz artificial e natural, respectivamente.

Figura 57 – Teste do Seguidor Com Luz Artificial



Fonte : Autor

Figura 58 – Teste do Seguidor Com Luz Solar



Fonte: Autor

O teste de luz artificial, apesar de não proporcionar geração de energia da célula solar fotovoltaica, tem a vantagem de facilitar a análise do comportamento do movimento do servomotor da placa de forma acelerada, em condições normais o sistema levaria aproximadamente 12 horas para se deslocar do ângulo inicial ao ângulo final. Este deslocamento pode ser reduzido a poucos segundos usando a luz artificial, que pode ser uma lanterna, uma lâmpada comum ou, no caso da Figura 57, o flash de um celular. Durante os testes com luz artificial, notou-se que independente da luz ambiente, a célula deslocava-se para a direção do flash, isso significa que o sistema é capaz de funcionar de forma satisfatória mesmo com distúrbios causados por luz do ambiente.

O segundo teste é feito para analisar o comportamento do servomotor da base, referenciado pelo sensor magnetômetro LSM303DLM. O servo deve manter o eixo N-S da célula sempre paralelo ao eixo N-S da Terra, ou seja, na presença de algum deslocamento angular, o servomotor de base deve compensar este deslocamento por meio de movimento angular em sentido oposto e de mesma angulação.

No mesmo momento que foi realizado o teste com luz solar, a caixa foi rotacionada para o teste do ajuste do servomotor de base. O resultado pode ser visto na Figura 59.

Figura 59 – Teste Bússola



Fonte: Autor

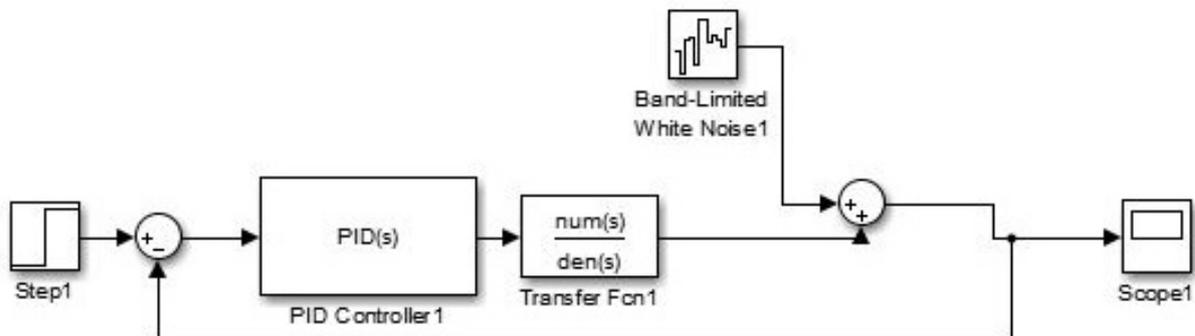
5 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são descritas as simulações e resultados obtidos do controlador e dos testes práticos que foram realizados no capítulo 4. Nestes testes foram analisados a resposta do sistema com distúrbios no caso do controlador, e a energia gerada pela célula no caso dos testes práticos do protótipo.

5.1 Controlador

Os controladores gerados com a ferramenta 'pidtool' foram comparados por meio da interface de simulação MATLAB Simulink[®]. Além dos elementos da função de planta do sistema, e do controlador, foram adicionados distúrbios ao sistema simulado. Desta forma é possível analisar como o sistema real se comportaria na presença de um deslocamento não programado, ou sombreamento. O diagrama de blocos do Simulink contendo os elementos do sistema simulado é apresentada na Figura 60.

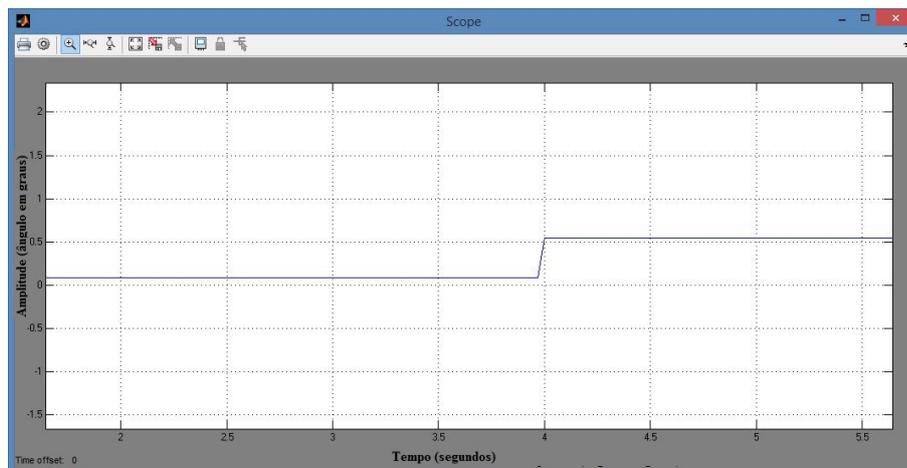
Figura 60 – Diagrama de Blocos no Simulink



Fonte: Autor

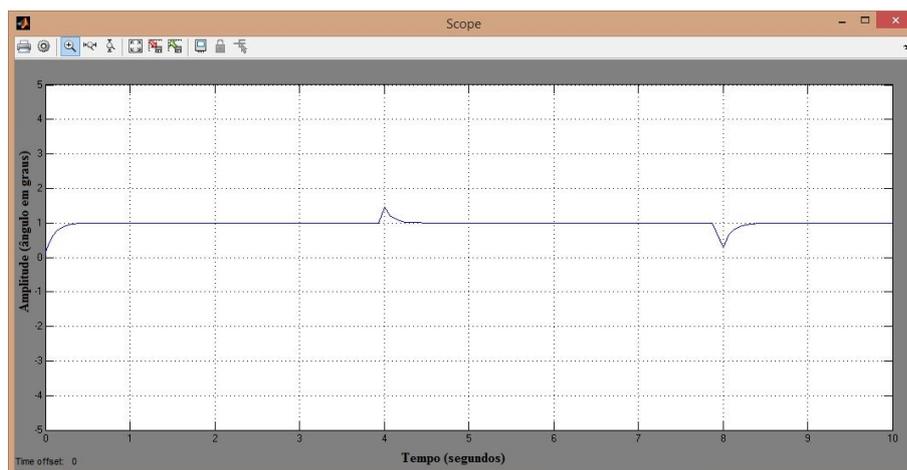
Para a criação dos distúrbios foi utilizada o bloco de ruído branco do Simulink. As respostas da planta sem controlador e com controladores P, PI e PID no sistema com presença de distúrbio são mostradas nas Figuras 61, 62 e 63.

Figura 61 – Resposta da Planta Sem Controladores



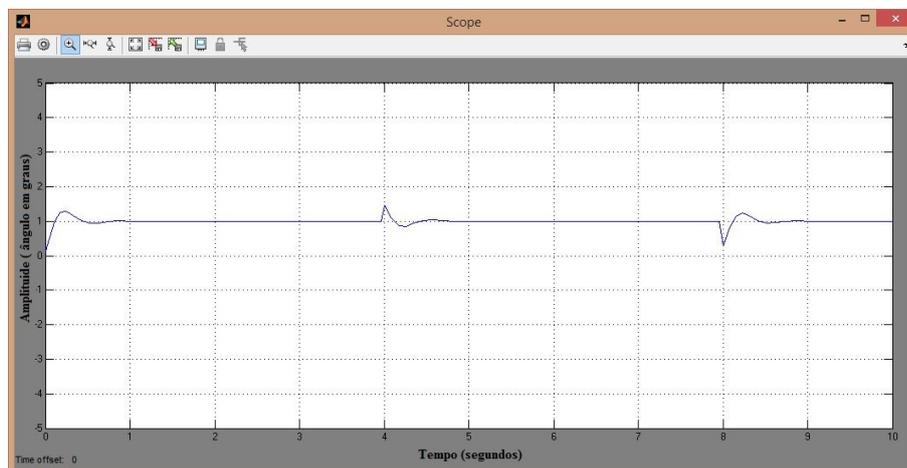
Fonte: Autor

Figura 62 – Planta com Controlador P



Fonte: Autor

Figura 63 – Planta com Controlador PI ou PID



Fonte: Autor

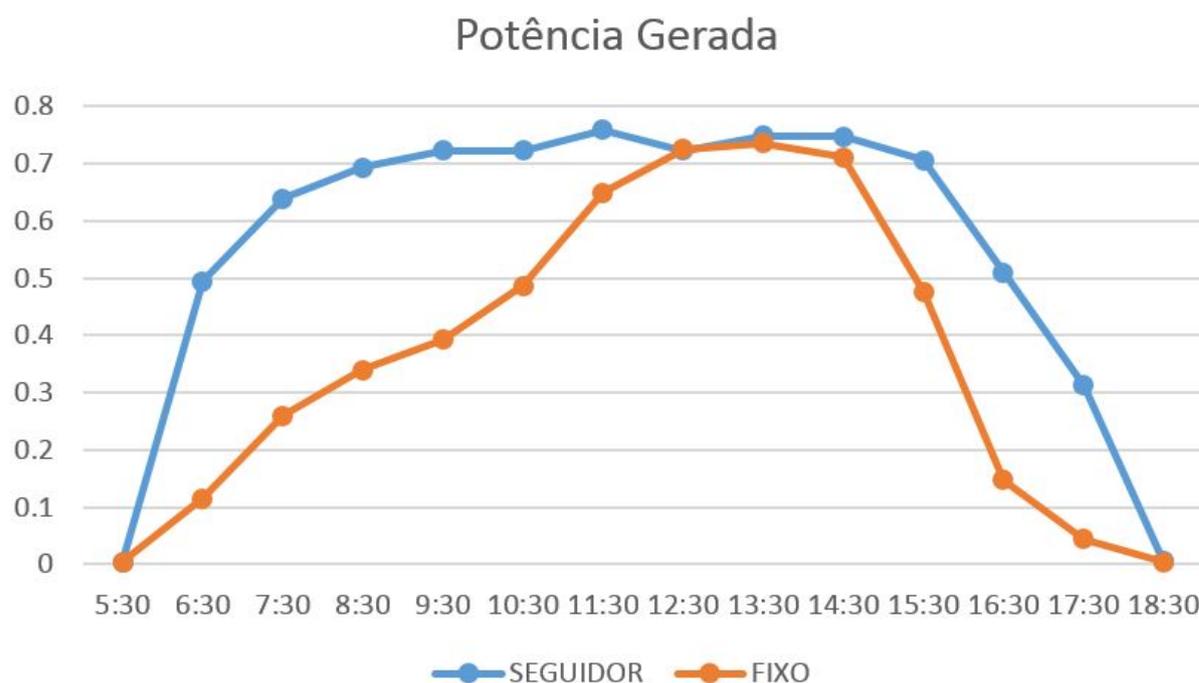
O controlador mais apropriado para o projeto é do tipo P, pois a resposta não apresenta sobressinal e o tempo de acomodação é menor que 1 segundo, além de corrigir a saída rapidamente na presença de distúrbios.

5.2 Geração de energia

Durante os testes práticos foram coletados dados de tensão e corrente gerados pela célula solar enquanto acoplada no seguidor de luz, estes resultados foram comparados com valores coletados da célula solar numa posição fixa ideal de 13 graus voltados para o Norte.

Os testes foram feitos em dias de condições similares. Com informação de tensão e corrente, é possível calcular a potência gerada através da relação $P = V * I$, onde P é a potência, V é a tensão gerada e I a corrente gerada. A Figura 64 mostra a potência gerada pela célula solar acoplada ao protótipo no período de 13 horas comparada com a célula fixa no mesmo período.

Figura 64 – Comparação Entre as Potências Geradas



Fonte: Autor

Como pode ser visto no gráfico, o fixo se equipara ao seguidor somente nos horários próximos ao meio dia, onde luz solar e placa se encontram de forma perpendicular. O seguidor faz com que esta perpendicularidade esteja presente o dia todo, e volta a se igualar ao fixo apenas na ausência de luz solar.

A tabela 9 mostra a energia média gerada em Watt-hora no teste com protótipo e com a célula fixa.

Tabela 9 – Energia Gerada

FIXO	0.4245	W.h
SEGUIDOR	0.6491	W.h
DIFERENÇA	0.2246	W.h

Fonte: Autor

Notou-se uma diferença de 0.2246 Wh, ou seja a cada hora a célula acoplada ao seguidor gera a cada hora 0.2246 Watts a mais do gerado quando ela numa posição fixa.

6 CONCLUSÕES

O protótipo seguidor solar de dois eixos proposto neste projeto foi construído e testado. Nos testes o seguidor se mostrou capaz de se adaptar a ambientes em movimento por meio da referência de um magnetômetro. Além disso o sistema apresentou resposta satisfatória mesmo na presença de distúrbios.

Comparado com os trabalhos apresentados no capítulo 3, o protótipo mostra um diferencial em relação aos demais por considerar ambientes em movimento.

O controlador mais apropriado é o controlador tipo P, isso porque existe uma relação linear entre o ângulo de rotação do servomotor e o sinal de referência proveniente dos sensores.

A estimação da modelagem do servomotor, resultou numa equação de função de transferência com formato similar ao identificado como característico no capítulo 2.

No que se diz respeito a melhoria de geração de energia, comparando a célula fixa com a mesma acoplada no protótipo, foi analisado um aumento de desempenho significativo de 0.2246 Watts-hora. Nos períodos onde a angulação entre a luz solar e a célula fixa são maiores, o sistema apresentou aumento de geração superiores a 50%. De modo geral o aumento registrado foi de 20 a 25%, quando comparado ao fixo.

Um ponto que se deve levar em consideração é que nas características da célula solar utilizada é informado que sua potência máxima é de 0.935 Watts, este valor nunca é alcançado nos testes. Isto ocorre devido a característica das células solares de perder eficiência de conversão de energia com o aumento de temperatura. A temperatura de uso mais adequado é 25 ° C, e no período de testes práticos a temperatura chegou a ultrapassar 35 ° C, com sensação térmica superior a 40° C. Mesmo com essa redução da eficiência os gráficos mostram comportamento similar aos apresentados no capítulo 3.

Todas as peças que compõem a estrutura do protótipo foram confeccionadas em impressora 3d, disponibilizada pelo núcleo de robótica localizado na Escola Superior de Tecnologia, reduzindo os custos de construção do projeto.

Analisando as características e resultados, o projeto se mostrou satisfatório para implementação em embarcações fluviais.

6.1 Dificuldades encontradas

A falta de informações detalhadas das características físicas do servomotor utilizado não permitiu a modelagem do mesmo por meios matemáticos, por isso foi necessário estimar seu modelo utilizando um circuito composto por servomotor, microcontrolador, magnetômetro e ferramentas de software disponíveis.

O desenho das peças e sua impressão gerou dificuldades por se tratar de um protótipo com elementos de diferentes tamanhos e com muitos fios. Antes do desenho das peças foram analisadas todas as dimensões dos componentes, com um cuidado maior nos detalhes dos servomotores, pois os suportes impressos seriam fixados neles por meio de parafusos. Outra dificuldade em relação a impressão foi o erro apresentado pela impressora, que confeccionava peças com tamanhos menores que o desenhado. Todas as peças foram redesenhadas para compensar este erro.

O protótipo foi desenvolvido para funcionar sem a necessidade de conexão com computador, porém a corrente fornecida pelo quando o microcontrolador não estava conectado ao computador via USB era insuficiente para movimentar dois servomotores, e modificava o controle do sistema, tornando-o instável. Esta dificuldade foi resolvida com a utilização de uma bateria exclusiva para os servomotores.

Por se tratar de um protótipo utilizando uma única célula solar, não foi possível implementar um sistema auto alimentado.

6.2 Trabalhos futuros

- Utilizar mais sensores de luz, para uma maior acuracidade de valores, evitando deslocamentos quando uma sombra fosse causada por algum fator externo como passagem de pessoas ou folhas caindo sobre o sensor.
- Criar uma interface com tela LCD informando *status* de luminosidade e angulação em relação ao Norte.
- Criar interface gráfica de monitoramento sem fio para o seguidor solar, utilizando tecnologia Bluetooth® ou ZigBee®.
- Realizar pesquisas sobre métodos para reduzir o efeito da alta temperatura na eficiência da conversão de energia.
- Utilização da característica de acelerômetro para melhoria na economia de energia e na precisão do sistema.
- Criar sistema auto alimentado.

Referências

- ANEEL, A. N. D. E. E. *BIG-Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica*. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. 19
- BARBOSA, E. B. et al. Transporte fluvial de passageiros: logística nos portos e itinerários do estado do Amazonas. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Grupo Eumed.net (Universidad de Málaga), n. 194, 2014. 12
- BRANCO, R. *Para que serve um magnetômetro*. 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/AmKTfc>>. 31
- CAMPOS, P.; MOURA, M. Veículo seguidor de trilha. 2014. 33
- CASTRO, R. M. Introdução à energia fotovoltaica. *DEEC/Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, 2007. 13, 19
- CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO ESPÍRITO SANTO CREA-ES. *Utilização da energia solar cresce 30 mundo*. 2015. Disponível em: <<http://www.creaes.org.br/creaes/PRINCIPAL/tabid/55/ctl/Details/mid/402/ItemID/2169/Default.aspx>>. 12
- CORTEZ, R. J. M. et al. Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica. 2014. 7, 13, 14, 23, 24, 25, 26, 32, 34, 35, 36, 37, 46
- ELECTRONICS, C. *Arduino: simple compass with HMC5883L + Library*. 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/4qovyl>>. 32
- GIL, F. J. G. et al. A review of solar tracker patents in Spain. In: *Proceedings of the 3rd WSEAS Int Conf on Renewable Energy Sources RES09*, pg. 292-297, WSEAS Press. [S.l.: s.n.], 2009. 23
- MANAVELLA, H. Aceleração e taxa de viragem em sistemas de estabilidade. *Oficina Brasil*, 2014. 31
- MASCARENHAS, A. W.; LIMA, A. M.; JACOBINA, C. B. Sensor integrado de posição, velocidade e vibração para máquinas rotativas. In: *CBA 2004-XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado*. [S.l.: s.n.], 2004. 30
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Plano Nacional de Energia 2030*. 2007. 12
- MORAES, E. P. d. Seguidor solar de um único eixo inclinado. 2012. 39, 40
- NISOLOSI, D. E. C. *Microcontrolador 8051: detalhado*. [S.l.]: Editora Érica, 2009. 26
- OLIVEIRA, M. A. N. de. *ANÁLISE DA VIABILIDADE DE EMBARCAÇÕES SOLARES PARA TRANSPORTE DE PASSAGEIROS*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. 12
- OLIVEIRA, M. M. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. 2008. 23, 38
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. [S.l.]: INPE, 2006. 18

- PERLOTTI, E. et al. *Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira: Estudo do grupo setorial de sistemas fotovoltaicos da abinne*. [S.l.]: São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2013. 20
- PINHO, J.; GALDINO, A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB*, 2014. 17, 18
- PROENÇA, E. *A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico—Universidade Técnica de Lisboa, 2007. 19
- ROSEMBACK, R. Conversor cc-cc bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico. *vol. Master. Juiz de Fora-MG: UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA*, 2004. 20
- ROY, A. *MATLAB based real time control implementation of DC servo motor using PCI card*. Tese (Doutorado) — National Institute of Technology Rourkela, 2011. 30
- SANTOS, A. *Servomotores*. 2009. 27, 29
- SANTOS, J. T. d. A. N.; CARDOSO, P.; MOITA, M. H. V. Atributos de paralisação como indicador de produtividade da operação portuária de cabotagem em manaus. *Journal of Transport Literature*, v. 5, n. 4, p. 70–87, 2011. 20
- SENA, A. S. *Microcontroladores PIC*. [S.l.]: Microchip, 2008. 27
- SENG, S.; KITA, M.; SUGIHARA, R. New analytical method for the determination of detergent concentration in water by fabric dyeing. *Journal of Chemical Education*, ACS Publications, v. 84, n. 11, p. 1803, 2007. 33
- SHAHIDIAN, S. et al. Rega com energia solar: Questões relacionadas com o dimensionamento. In: LIVRO DE RESUMOS DO V CONGRESSO DE REGA E DRENAGEM. [S.l.], 2014. p. 21. 13
- SOARES, H. N. Desenvolvimento de protótipo de veículo controlado por realidade virtual. 2013. 27
- TUBINO, M.; QUEIROZ, C. A. Flow injection visible diffuse reflectance quantitative analysis of nickel. *Analytica chimica acta*, Elsevier, v. 600, n. 1, p. 199–204, 2007. 32
- VAZ, L. Energia solar: Estudo de caso em prédio solar, catalão (go). *III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, 2012. 18