

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

WELLINGTON RODRIGO GALLO

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO COM
MONITORAMENTO REMOVO VIA WEB

Joinville
2018

WELLINGTON RODRIGO GALLO

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO COM
MONITORAMENTO REMOVO VIA WEB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, no curso Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Diego Santos Greff

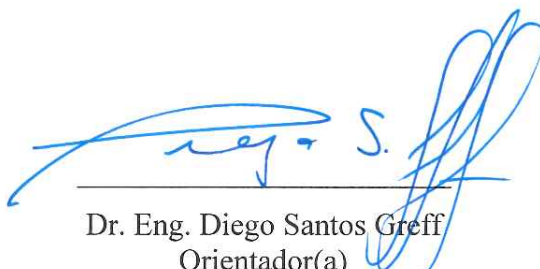
Joinville
2018

WELLINGTON RODRIGO GALLO

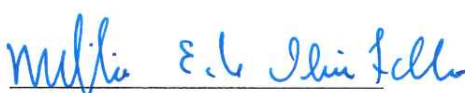
ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO COM
MONITORAMENTO REMOTO VIA WEB.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.


Banca Examinadora:



Dr. Eng. Diego Santos Greff
Orientador(a)
Presidente



Dr. Eng. Milton Evangelista de Oliveira Filho
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina



Me. Eng. Benjamin Grando Moreira
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

A otimização da captação de energia via fontes alternativas e renováveis é tema de constante pesquisa e desenvolvimento das companhias de energia elétrica e indústria de tecnologia, não só pelo aumento do consumo de energia a nível mundial devido principalmente ao desenvolvimento da tecnologia e ao acesso facilitado da população as mesmas, mas é também uma questão de sustentabilidade, uma vez que as fontes de energias fósseis, utilizadas até então massivamente, são esgotáveis. Nesse contexto a energia solar é uma das fontes em maior abundância no planeta, já que na grande parte do mesmo a incidência solar é de pelo menos 10h a cada dia. Entretanto, apesar da alta disponibilidade desse tipo de energia, algumas barreiras como alto custo dos equipamentos de captação e principalmente a ineficiência dos mesmo, a torna uma das fontes de energia menos utilizadas. Há pelo menos duas principais deficiências que podem ser destacadas desses dispositivos sendo ligadas as propriedades mecânicas dos dispositivos (baixa incidência da radiação solar nos painéis de captação devido ao movimento natural de terra), e químicas (material de fabricação dos painéis). Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar e desenvolver um sistema fotovoltaico, que seja capaz de minimizar a deficiência mecânica por meio do controle inteligente da posição e orientação do painel solar para que este aproveite a máxima incidência de radiação solar nas células fotovoltaicas.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica. Painel Solar. Seguidor Solar.

ABSTRACT

The optimization of energy capture via alternative and renewable sources is a constant theme of research and development of electric energy companies and technology industry, not only by the increase of the world energy consumption mainly due to the development of the technology and to the easy access of the population, but it is also a question of sustainability, since the sources of fossil energies, used until then massively, are exhaustible. In this context, solar energy is one of the sources in greatest abundance in the planet, however, despite the high availability of this type of energy, some barriers such as the high cost of the capture equipment and especially its inefficiency, solar energy is one of the least used energy sources. There are at least two major deficiencies that can be detached from these devices being linked to the mechanical properties of the devices (low incidence of solar radiation on the pickup panels due to the natural movement of earth), and chemical (panel manufacturing material). Thus, the objective of this work is to analyze and develop a photovoltaic system that is able to minimize its mechanical deficiency by means of the intelligent control of the position and orientation of the solar panel so that it takes advantage of the maximum incidence of solar radiation in the photovoltaic cells.

Keywords: Photovoltaic Energy. Solar Panel. Solar Tracker.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Descrição de Funcionamento de Uma Célula Fotovoltaica	16
Figura 2 – Perdas de Radiação Solar na Atmosfera Terrestre	20
Figura 3 – Movimento da Terra ao Redor do Sol	21
Figura 4 – Posição do Sol descrita pelo o ângulo de altitude e azimutal	22
Figura 5 – Modelo Elétrico Equivalente para uma Célula Fotovoltaica	23
Figura 6 – Curva Características dos Painéis Fotovoltaicos	23
Figura 7 – Comparação de um Sistema Fixo com um Seguidor Solar de Dois Eixos	24
Figura 8 – Comparação da produção anual estimada de energia de um sistema fotovoltaico de 1kWp (kWh / kWp) usando várias estratégias de seguimento solar	25
Figura 9 – Diagrama de Blocos do Sistema do Protótipo de Controle	27
Figura 10 – Diagrama de Blocos do Sistema do Protótipo de Experimento	28
Figura 11 – Curvas características obtidas às 16h de um dia nublado	31
Figura 12 – Curvas características obtidas às 13h de um dia ensolarado	32
Figura 13 – Diagrama de Caso de Uso para o Sistema Embarcado	36
Figura 14 – Esquemático de Funcionamento do Sensor LM35	38
Figura 15 – Sensor de Temperatura LM35	38
Figura 16 – Relação entre a Tensão de Saída e Temperatura para o LM35	39
Figura 17 – Esquemático de Aplicação do sensor LM35 com o microcontrolador	40
Figura 18 – Diagrama de bloco funcional para o sensor TSL2561	41
Figura 19 – Esquemático de Aplicação do sensor TSL2561 com o microcontrolador	42
Figura 20 – Luxímetro TSL2561 em um Módulo de Avaliação	42
Figura 21 – Resposta Espectral do TSL2561	43
Figura 22 – Esquemático de Funcionamento do INA219	44
Figura 23 – Configuração de pinos do INA219	45
Figura 24 – Módulo de Avaliação do INA219	46
Figura 25 – Esquemático de Aplicação do INA219 com o Painel Solar	46
Figura 26 – Espectro da Radiação Solar na Terra	48
Figura 27 – Resposta Espectral para Painéis Solares de Silício	49
Figura 28 – Circuito de Medição para a Matriz de Fototransistores	51
Figura 29 – Circuito Para Cálculo das Soma de Tensões dos Fototransistores	52
Figura 30 – Circuito de Análise de Correção para a Orientação do Painel Solar	53

Figura 31 – Circuito de Medição para a Matriz de Fototransistores com ADC Externo	54
Figura 32 – Digrama de Bloco do ADS1015	55
Figura 33 – Módulo de Avaliação do ADS1015	56
Figura 34 – Referenciais de Orientação para o Acelerômetro e Giroscópio do MPU9250	57
Figura 35 – Referenciais de Orientação para o Magnetômetro do MPU9250 . . .	59
Figura 36 – Módulo de Avaliação do MPU-9250	60
Figura 37 – Diagrama de bloco funcional para a IMU modelo MPU-9250	61
Figura 38 – Esquemático de Aplicação do MPU-9250 com o microcontrolador .	62
Figura 39 – Configuração de pinos da MPU-9250	62
Figura 40 – Motor de passo 28byj-48-5V	63
Figura 41 – Configuração de pinos do driver ULN2003	64
Figura 42 – Módulo de Avaliação do ULN2003	64
Figura 43 – Esquemático de Aplicação do Motor de Passo com o ULN2003 e com o microcontrolador	65
Figura 44 – Configuração de pinos do RTC DS1307	66
Figura 45 – Módulo de Avaliação do DS1307	66
Figura 46 – Diagrama de bloco funcional para o RTC DS1307	67
Figura 47 – Esquemático de Aplicação do DS1307 com o microcontrolador . . .	67
Figura 48 – Diagrama de bloco funcional para o transceptor NRF24L01+	68
Figura 49 – Esquemático de Aplicação do nRF24L01+ com o microcontrolador .	69
Figura 50 – Configuração de pinos do transceptor NRF24L01+	69
Figura 51 – Módulo de Avaliação do NRF24L01+	70
Figura 52 – Módulo de Avaliação do Gravador microSD	71
Figura 53 – Esquemático de Aplicação do Módulo Gravador microSD com o microcontrolador	71
Figura 54 – Descrição dos componentes no módulo gravador microSD	72
Figura 55 – Módulo de Avaliação do Bluetooth HC-05	73
Figura 56 – Esquemático de Aplicação do HC-05 com o microcontrolador	74
Figura 57 – Módulo de Avaliação ESP-01 do Microchip ESP8266	75
Figura 58 – Esquemático de Aplicação do ESP-01 com o microcontrolador . . .	76
Figura 59 – Circuito Esquemático de Regulação de Tensão	80
Figura 60 – Primeira Proposta de Circuito Esquemático para a Placa de Circuito Impresso Superior	82
Figura 61 – Segunda Proposta de Circuito Esquemático para a Placa de Circuito Impresso Superior	83
Figura 62 – Circuito Esquemático para a Placa de Circuito Impresso Principal .	84
Figura 63 – Imagem utilizada no processo de termotransferência para a placa principal	85

Figura 64 – Imagem utilizada no processo de termotransferência para a placa superior	86
Figura 65 – Localização dos componentes na placa de circuito impresso principal	86
Figura 66 – Localização dos componentes na placa de circuito impresso superior	87
Figura 67 – Placa de Circuito Impresso Superior Confeccionada Artesanalmente	88
Figura 68 – Placa de Circuito Impresso Superior Montada	89
Figura 69 – Placa de Circuito Impresso do Protótipo de Controle	90
Figura 70 – Placa de Circuito Impresso do Protótipo de Experimento	91
Figura 71 – Vista em perspectiva frontal do protótipo	96
Figura 72 – Vista em perspectiva inferior do protótipo	97
Figura 73 – Vista em perspectiva e em corte do protótipo	98
Figura 74 – Impressora 3D Cloner©	100
Figura 75 – Cilindro (11) impresso	101
Figura 76 – Plataforma fixa (12) impressa	101
Figura 77 – Eixo (E12) impresso	102
Figura 78 – Base móvel (2) impressa	102
Figura 79 – Elementos estruturais (3A e 3B) impressos	103
Figura 80 – Caixa (40) impresso	103
Figura 81 – Engrenagem (E11 ou E21), engrenagem (E20) e o eixo (E22) impressos	104
Figura 82 – Protótipo Seguidor Solar Montado	104
Figura 83 – Interface USB para Serial	106
Figura 84 – Página WEB para Configuração Wi-Fi em Ponto de Acesso Gerado	113
Figura 85 – Página WEB para Autenticação no Servidor WEB	115
Figura 86 – Página WEB de Sensoriamento em Teste Unitário	117
Figura 87 – Conteúdo do email recebido do ESP8266 durante teste unitário . . .	120
Figura 88 – Captura de Tela do Terminal Bluetooth	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração de Endereço para o TSL2561	41
Tabela 2 – Configuração de Endereço para o INA219	45
Tabela 3 – Configuração de Endereço para o MPU9250	61
Tabela 4 – Portas de Entrada e Saídas Exigidas no Microcontrolador	76
Tabela 5 – Requisitos cumpridos pelo Microcontrolador ATmega328p	77
Tabela 6 – Conectividade com as portas do microcontrolador ATmega328p . .	78
Tabela 7 – Critérios de Alimentação dos Componentes Eletrônicos	79
Tabela 8 – Alimentação Proposta para Cada Componente	79
Tabela 9 – Endereçamentos de Comunicação I2C Possíveis dos Componentes	81

LISTA DE SIGLAS

ADC Analog-to-Digital Converter

AH Ângulo Horário

CAD Computer-Aided Design

CE Chip Enable

CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

CSN Chip Select Not

DC Direct Current ou Corrente Contínua

FIFO First In, First Out

FIR Response to Finite Impulse

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying

GND Ground

GPIO General Purpose Input/Output

HTML Hypertext Markup Language

I²C Inter-Integrated Circuit

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMU Inertial Measurement Unit

ISM Industrial Scientific and Medical

LDR Light Dependet Resistor

LSB Least Significant Bit

MCM Multi-Chip Module

MEMS Microelectromechanical Systems

MISO Master Input, Slave Output

MOSI Master Output, Slave Input

nm Nanômetro

NTP Network Time Protocol

PCB Printed Circuit Board

RFE Requisito Funcional Estrutural

RFSE Requisito Funcional para o Sistema Embarcado

RNFE Requisito Não Funcional Estrutural

RNFSE Requisito Não Funcional para o Sistema Embarcado

RTC Real Time Clock

SCK SPI Serial Clock

SCL I2C Serial Clock Line

SCLK SPI Serial Clock

SD Secure Digital

SDA I2C Serial Data Line

SDHC Secure Digital High Capacity

SDI SPI Serial Data Input

SDO SPI Serial Data Output

SMB System Management Bus

SMBus System Management Bus

SPI Serial Peripheral Interface

SSID Service Set Identifier

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UML Unified Modeling Language

USB Universal Serial Bus

VDD Tensão de Alimentação Positiva

WEB World Wide Web

WPA Wi-Fi Protected Access

WPA2 – PSK Wi-Fi Protected Access II Pre-Shared Key

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO TEÓRICA	19
2.1	Radiação Solar	19
2.2	Movimentação da Terra em redor do Sol	20
2.3	Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica	22
2.4	Seguidores Solares	23
3	METODOLOGIA CIENTÍFICA	26
4	ESCOLHA DO PAINEL SOLAR	29
4.1	Levantamento das Curvas Características	29
5	SISTEMA EMBARCADO	33
5.1	Análise de Requisitos para o Sistema Embarcado	33
5.1.1	Requisitos Funcionais para o Sistema Embarcado	33
5.1.2	Regras de Negócio para o Sistema Embarcado	34
5.1.3	Requisitos Não Funcionais para o Sistema Embarcado	34
5.1.4	Diagrama de Caso de Uso	35
5.2	Sensoriamento e Instrumentação	37
5.2.1	Avaliação da Energia Solar Recebida	37
5.2.1.1	Sensor de Temperatura	37
5.2.1.2	Sensor de Iluminância	40
5.2.1.3	Monitor de Potência Elétrica	43
5.2.2	Orientação do Painel Solar	47
5.2.2.1	Fototransistor	47
5.2.2.2	Acelerômetro	56
5.2.2.3	Giroscópio	57
5.2.2.4	Magnetômetro	58
5.2.2.5	Unidade de Medição Inercial	59
5.2.2.6	Motores de Passo	62
5.3	Datalogger	65
5.3.1	Relógio de Tempo Real	65
5.3.2	Transceptor de Rádio-Frequência	67

5.3.3	Gravador e Leitor de Cartões Secure Digital	70
5.4	Interface Remota e Depuração	72
5.4.1	Interface Serial Bluetooth	72
5.4.2	Servidor WEB	74
5.5	Definição do Microcontrolador	76
5.6	Alimentação de Componentes	78
5.7	Projeto dos Circuitos Eletrônicos	80
5.7.1	Circuitos Esquemáticos	82
5.7.2	Placas de Circuito Impresso	84
5.8	Programação do Sistema Embarcado	91
6	PROJETO MECÂNICO	94
6.1	Análise de Requisitos Estruturais	94
6.1.1	Requisitos Funcionais para a Estrutura	94
6.1.2	Requisitos Não Funcionais para a Estrutura	94
6.2	Desenvolvimento em CAD	95
6.3	Impressão 3D	100
7	VALIDAÇÃO DO SISTEMA	105
7.1	Testes Unitários	105
7.1.1	Teste da Interface Serial Bluetooth	105
7.1.2	Medição de Potência do Painel Solar	107
7.1.3	Teste de Leitura e Gravação de Hora no DS1307	108
7.1.4	Teste de Leitura de Orientação com o IMU	109
7.1.5	Teste da Medição dos Fototransistores	110
7.1.6	Teste de Controle dos Motores de Passo	111
7.1.7	Teste de Conectividade em Rede IEEE 802.11 b/g/n Criptografada	112
7.1.8	Teste da Página de Login do Servidor WEB	113
7.1.9	Teste da Página de Sensoriamento do Servidor WEB	115
7.1.10	Teste de Obtenção de Hora Online	118
7.1.11	Teste do Envio de Emails	118
7.1.12	Teste de Comunicação por Rádio-Frequência	120
7.1.13	Teste de Registro de Dados em Cartão microSDHC	121
7.2	Teste de Integração	121
7.2.1	Teste do Registro de Dados de Sensoriamento Geral	121
7.2.2	Teste do Servidor WEB Integrado ao Sistema em Funcionamento	123
7.2.3	Teste do Algoritmo de Correção de Orientação	124
7.3	Teste de Sistema	125
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126

8.1	Trabalhos Futuros	126
	REFERÊNCIAS	127

1 INTRODUÇÃO

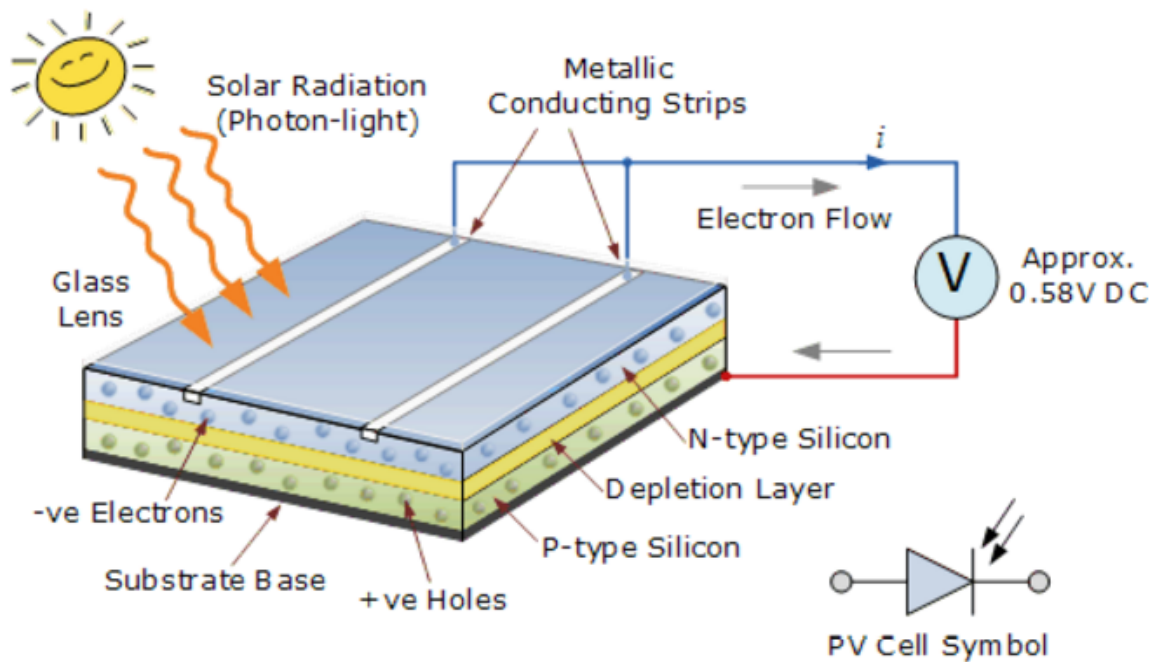
São consideradas *fontes renováveis de energia*, fontes inesgotáveis para os padrões humanos de utilização. São consideradas *fontes limpas de energia*, as fontes de energia que apresentem impacto ambiental nulo ou reduzido em comparação com os combustíveis fósseis, não originando ou emitindo poluentes. O Sol é considerado uma fonte limpa e inesgotável de energia, visto que é possível aproveitar a luz e calor transmitidos pelo Sol para converter em energia elétrica (AGRAFIOTIS et al., 2005).

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $5,445 \times 10^{24}$ joules, ou $1,5125 \times 10^{18}$ kWh de energia. A transmissão da energia do Sol para a Terra se dá através da radiação eletromagnética, sendo que 97% da radiação solar está contida entre comprimentos de onda de 0,3 a 3,0 m, o que caracteriza como uma radiação de ondas curtas (FADIGAS, 2012).

O efeito fotoelétrico (i.e. efeito fotovoltaico) é a emissão de elétrons por um material quando exposto a uma radiação eletromagnética. Este efeito é o princípio básico de funcionamento de uma célula solar (i.e. célula fotovoltaica), que se trata de um dispositivo elétrico de estado sólido, cujo propósito é converter a luz solar incidente em energia elétrica (VILLALVA, 2015).

A Figura 1 descreve o funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Figura 1 – Descrição de Funcionamento de Uma Célula Fotovoltaica



Fonte: Tutorials (2017)

Um módulo fotovoltaico, ou placa solar, ou painel solar, são termos que possuem o mesmo significado e são usados na literatura para descrever um conjunto empacotado de células fotovoltaicas. Um módulo é constituído de um conjunto de células conectadas em série e paralelo, de forma a obter a tensão e corrente desejada (VILLALVA, 2015).

Os sistemas fotovoltaicos são divididos nas categorias a seguir: (FADIGAS, 2012)

- Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Isolados:
 - para cargas de corrente contínua;
 - para cargas de corrente alternada;
- Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica;

Enquanto o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica opera em paralelismo à rede de eletricidade, como forma de reduzir os custos relativo ao consumo de energia da rede pública, o sistema fotovoltaico autônomo isolado, ou simplesmente sistema fotovoltaico isolado, descreve o sistema em que uma carga não está conectada à rede elétrica de distribuição, porém depende totalmente de um sistema fotovoltaico de energia, por exemplo, um equipamento de camping para refrigeração de alimentos, que possua um sistema fotovoltaico como única forma de obtenção de energia elétrica para sua alimentação (FADIGAS, 2012). Este equipamento (carga) pode estar preparado para operar diretamente através de uma alimentação DC, como também pode ser um equipamento eletrodoméstico convencional que dependa de uma alimentação alternada de 220V/60Hz como ocorre na maior parte do Brasil, desta forma fica claro

que a especificação da carga que será utilizada é crucial no desenvolvimento de um sistema fotovoltaico isolado (VILLALVA, 2015).

Em sistemas fotovoltaicos, a eficiência fica limitada, entre outras coisas, às especificações dos fabricantes das células fotovoltaicas, dos módulos, componentes de controle (reguladores, conversores) e acumuladores associados aos mesmos (OLIVEIRA, 2008). A eficiência de uma célula/módulo é descrita pela Equação 1.1.

$$\eta = \frac{\text{Potência elétrica fornecida}}{\text{Potência contida na radiação solar incidente}} \quad (1.1)$$

A eficiência dos modelos comerciais de módulos fotovoltaicos são geralmente de até 20% (FADIGAS, 2012), ou seja, as células comerciais costumam desperdiçar até 80% da energia solar que incide sobre esta, assim, destaca-se a importância em aprimorar o uso destas células de forma a obter seu máximo potencial.

A corrente gerada por um módulo pode ser descrita pela Equação 1.2, onde I_0 representa a corrente gerada com o ângulo de incidência do sol normal à superfície horizontal do módulo, e θ representa o ângulo de incidência do sol com relação à normal do módulo.

$$I = I_0 \times \cos(\theta) \quad (1.2)$$

Como pode-se observar na Equação 1.2 ao alterar apenas a inclinação do painel solar, já é possível garantir maior rendimento do efeito fotovoltaico. Um seguidor solar é um dispositivo mecânico que tem por objetivo garantir que os painéis fotovoltaicos fiquem sempre na posição mais favorável a captar o máximo de radiação solar possível (CORTEZ, 2013, p. 15). Geralmente, um sistema deste tipo pode vir a aumentar as receitas geradas por um sistema fotovoltaico em cerca de 40% (SIMÓN-MARTÍN et al., 2009).

Presente trabalho visa projetar e desenvolver a estrutura e o sistema embarcado para atuação e sensoriamento em um protótipo de um seguidor solar ativo de dois eixos. Sendo a orientação do painel solar garantida através de motores devidamente instalados na estrutura, a eficiência e desempenho do seguidor solar ativo é avaliada com o uso de dois protótipos idênticos, onde um dos protótipos opera como seguidor solar ativo de dois eixos enquanto o outro protótipo atua como um sistema fotovoltaico fixo em posição ótima definida, desta forma em condições idênticas de testes torna-se possível avaliar e comparar o desempenho obtido em cada protótipo para validar o sistema de seguidor solar proposto.

Assim, as principais entregas deste trabalho consistirão: no projeto e execução do sistema de controle e posicionamento da estrutura de suporte do painel fotovoltaico; instrumentar e supervisionar remotamente o sistema e seus resultados de operação, e.g. tensão e corrente gerada, bem como radiação solar recebida pelos painéis fotovoltaicos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral identifica qual a meta principal de todo este projeto, enquanto os objetivos específicos descrevem as etapas necessárias para poder cumprir o objetivo geral.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver o sistema de controle de posicionamento do painel solar de forma a garantir otimizada incidência de radiação solar no painel fotovoltaico.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Desenvolver um controle de orientação com dois graus de liberdade para o painel fotovoltaico;
- b. Projetar e instalar o sistema embarcado responsável pelo sensoriamento remoto e registro de dados;
- c. Coletar dados experimentais de ambos os protótipos de controle (cujo painel fotovoltaico está em posição fixa) e de experimento (cujo painel fotovoltaico mantém-se perpendicular ao sol) atuando simultaneamente em condições idênticas de radiação solar;
- d. Validar o seguidor solar proposto através da análise dos dados coletados;

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo destaca os assuntos primordiais a serem compreendidos para o desenvolvimento do protótipo final proposto visto os fenômenos físicos envolvidos.

2.1 Radiação Solar

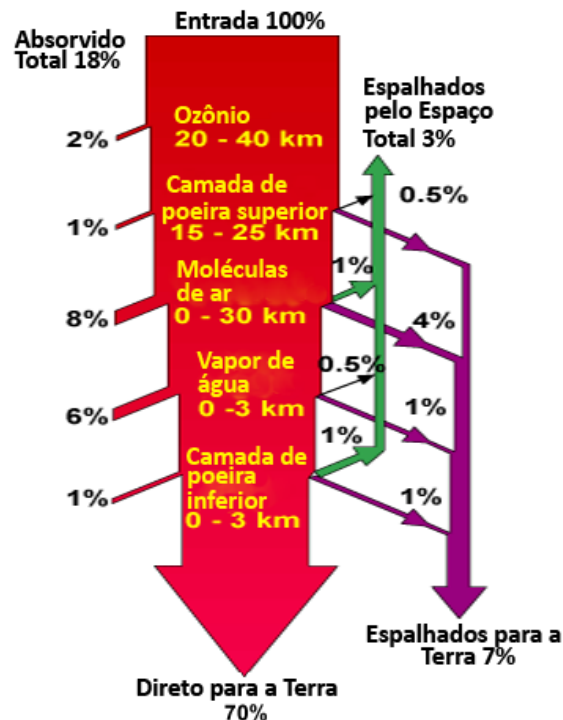
A radiação que alcança a atmosfera da Terra, constitui a radiação incidente. A radiação incidente na atmosfera terrestre é relativamente constante, mas a radiação que alcança a superfície da terra vai variar devido a vários fatores:

- Efeitos atmosféricos de absorção e reflexão;
- Variações locais a nível da atmosfera, como níveis de vapor de água, nuvens e poluição;
- A latitude do local;
- A estação do ano, a data e a hora do dia;

Tais fatores necessitam ser levados em consideração, visto que a cada hora, o sol irradia mais energia na Terra do que ela precisa para satisfazer as necessidades energéticas globais por um ano inteiro (GEOGRAPHIC, 2012).

Uma estimativa de tais perdas pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Perdas de Radiação Solar na Atmosfera Terrestre



Fonte: Adaptado de Chenming e White (1983)

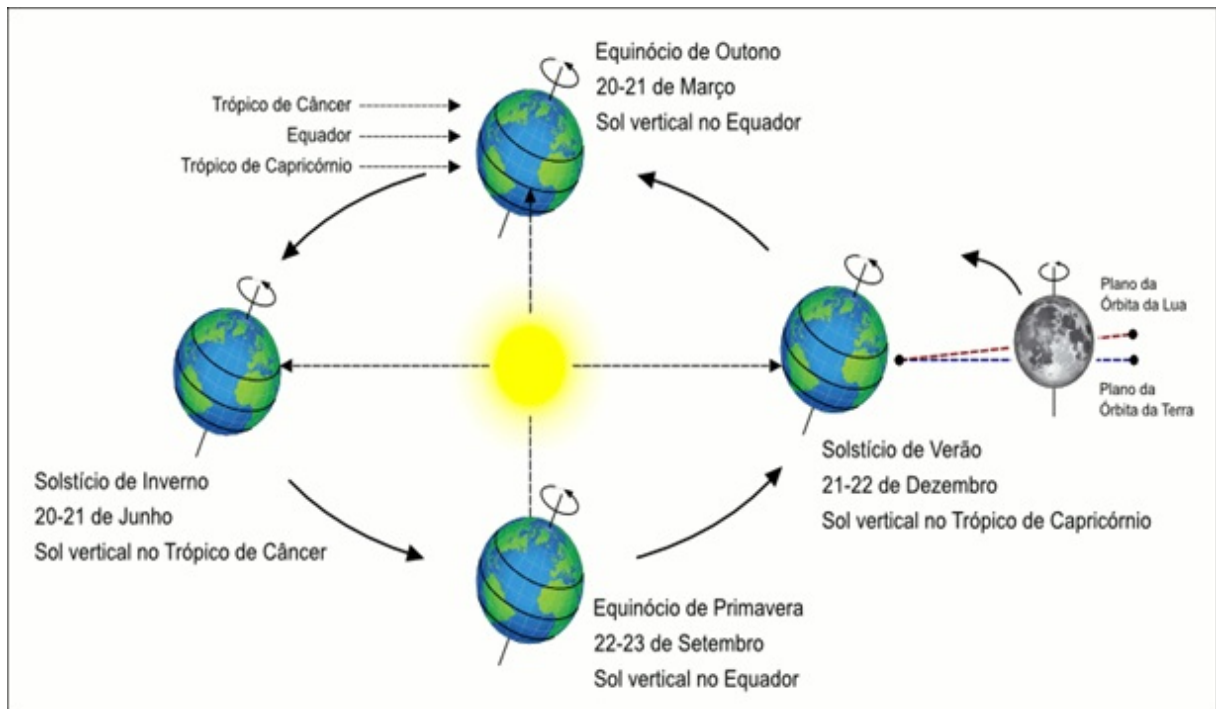
A radiação solar é a energia radiante emitida pelo Sol, que é medida em unidades de kW/m^2 , e varia durante o dia desde $0 kW/m^2$ até um máximo de $1 kW/m^2$, durante o período de maior radiação e sua variação é altamente dependente da localização e do tempo local (CORTEZ, 2013).

2.2 Movimentação da Terra em redor do Sol

O ângulo em que a componente direta da luz atinge a Terra varia conforme o movimento da Terra em redor do Sol, além de ocorrer um aumento nas horas de luz durante o verão e o inverso (uma diminuição) durante o inverno, tais variações devem ser levadas em consideração durante o desenvolvimento do sistema de seguimento solar (CORTEZ, 2013).

A Figura 3 apresenta uma representação do movimento da Terra ao redor do Sol, destacando a inclinação do eixo da Terra.

Figura 3 – Movimento da Terra ao Redor do Sol



Fonte: Escolar (2009)

A radiação solar atinge a Terra com uma inclinação de $-23,45^\circ$ no solstício de inverno e de $23,45^\circ$ no solstício de verão (CORTEZ, 2013).

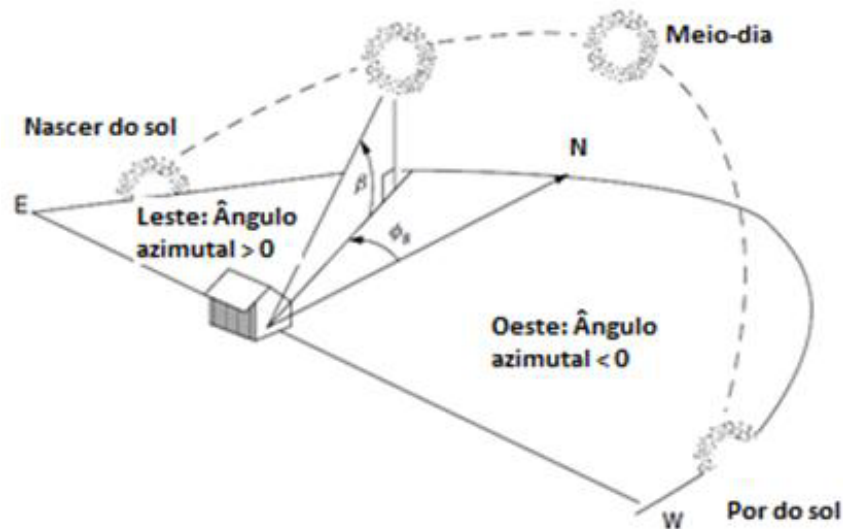
A Equação 2.1 descreve o ângulo de declinação (desvio do Sol medido diretamente a partir do Equador) δ em função do dia do ano n (ARGESEANU; RITCHIE; LEBAN, 2009).

$$\delta = 23,45^\circ \left[\frac{360(n - 180)}{365} \right] \quad (2.1)$$

O desenvolvimento de um sistema rastreador necessita de considerações em relação à variação da radiação, que é diretamente relacionada a posição geográfica. Mas o princípio básico de um seguidor solar é permitir que o ângulo de incidência dos raios solares seja sempre perpendicular ao plano do módulo. Isso permite um melhor aproveitamento da energia solar incidente (ANTÔNIO; RIBEIRO; PEREIRA, 2014).

A posição do sol pode ser obtida tendo em conta o ângulo da altitude e o ângulo de azimute, como pode-se observar na Figura 4.

Figura 4 – Posição do Sol descrita pelo o ângulo de altitude e azimutal



Fonte: Adaptado de Masters (2013)

O ângulo Zenital descrito na Equação 2.2 é o ângulo formado entre os raios solares e a vertical (Zênite) e corresponde ao ângulo que é necessário corrigir no painel para este formar um angulo de 90° face aos raios solares (CORTEZ, 2013).

$$Zenital = 90^\circ - asin[\sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\phi)\cos(AH)] \quad (2.2)$$

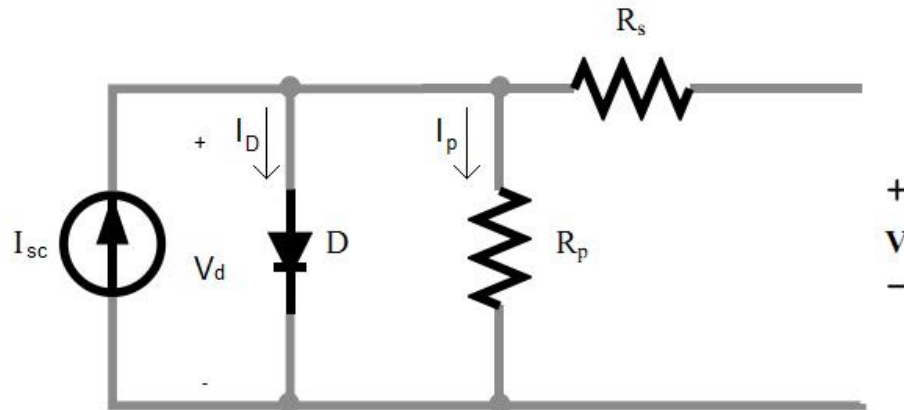
Onde:

- δ é o ângulo de declinação descrito na Equação 2.1;
- ϕ é a latitude;
- AH é o ângulo horário;

2.3 Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica

Uma célula fotoelétrica pode ser representada através de um circuito com uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e um resistor, tendo uma resistência em série na saída de tensão, conforme descrito na Figura 5.

Figura 5 – Modelo Elétrico Equivalente para uma Célula Fotovoltaica



Fonte: Cortez (2013)

Ao aplicar a 1ª lei de Kirchhoff a corrente de saída pode ser representada pela Equação 2.4.

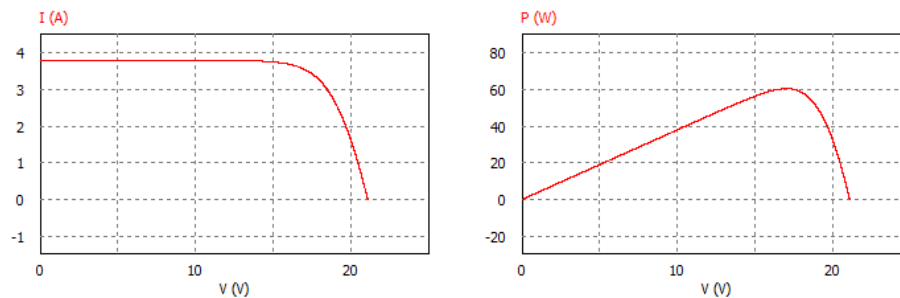
$$I_{\text{saída}} = I_{sc} - I_D - I_p \quad (2.3)$$

Na condição de temperatura e radiação fixa a característica de tensão e corrente desse modelo pode ser expressa por:

$$I_{\text{saída}} = I_{sc} - I_D \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V + IR_s}{R_s} \right] \quad (2.4)$$

A Figura 6 apresenta a curva típica de corrente e tensão em um painel fotovoltaico.

Figura 6 – Curva Características dos Painéis Fotovoltaicos



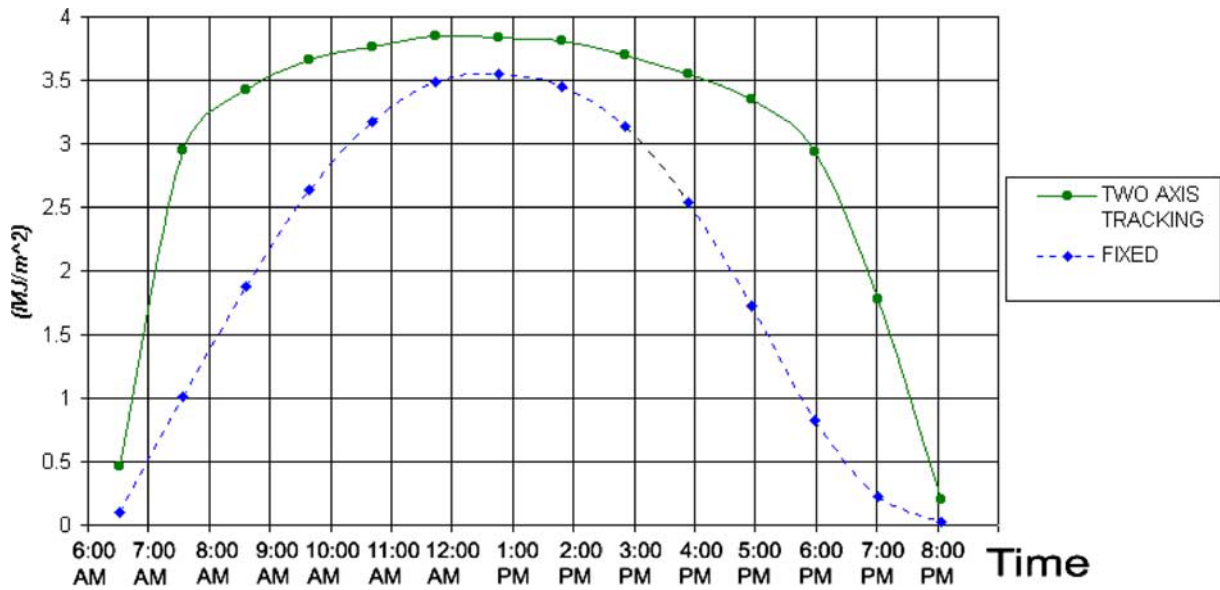
Fonte: Cortez (2013)

Esta curva foi obtida com um painel de 230Wp, para radiação de 1 kW/m^2 e temperatura 25°C .

2.4 Seguidores Solares

A Figura 7 apresenta um gráfico comparativo da energia captada em um sistema fotovoltaico onde o painel solar está fixo e um sistema fotovoltaico com um seguidor solar onde o painel solar pode se mover em dois eixos.

Figura 7 – Comparação de um Sistema Fixo com um Seguidor Solar de Dois Eixos



Fonte: Abdallah e Nijmeh (2004)

Existem muitos tipos de seguidores solares, estes variam em custo, complexidade e funções. Podem fazer o seguimento através de vários eixos e garantir diferentes níveis de precisão, estes podem ser classificados da seguinte forma (CORTEZ, 2013) :

- Seguidor Solar Passivo
 - 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

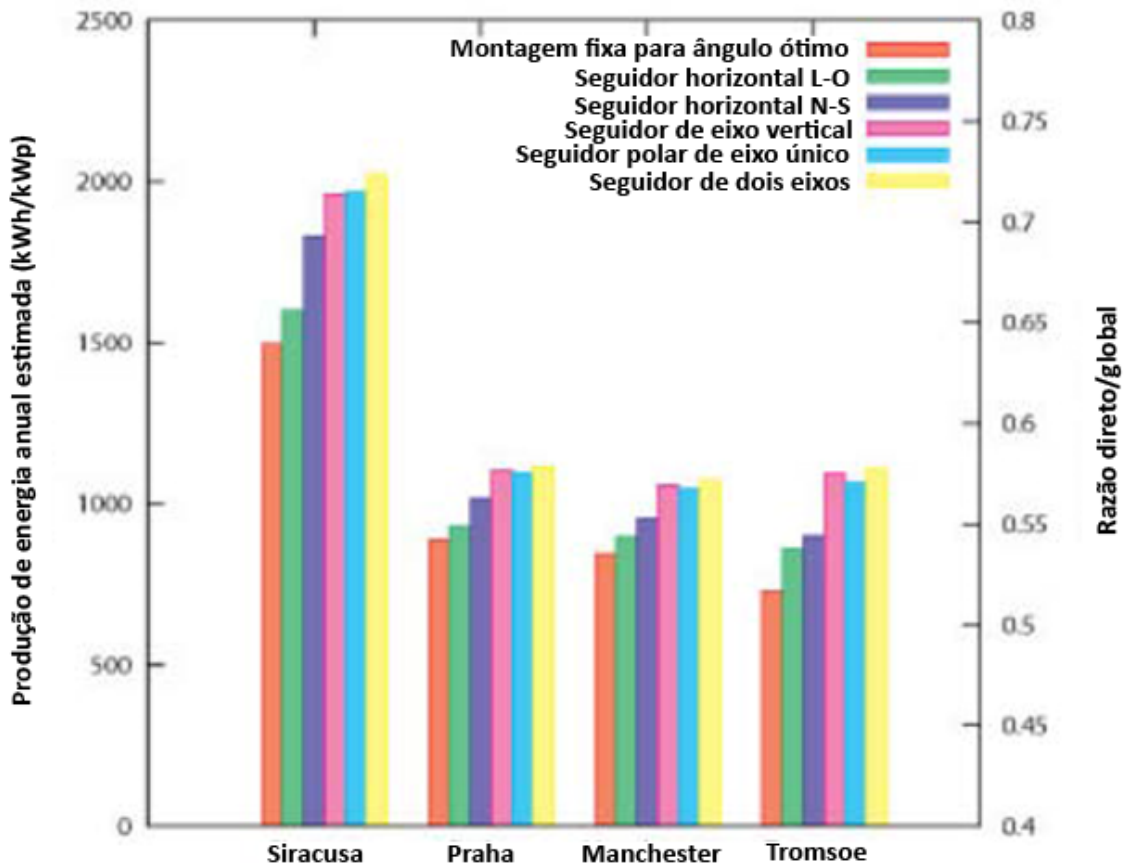
Um seguidor solar passivo é geralmente baseado na expansão térmica do gás Freon, de tal forma que sua expansão provoca o movimento dos painéis solares, onde o sistema é projetado de forma a garantir que tal movimento faça o painel apontar para o Sol (ALEXANDRU; POZNA, 2008).

Diferentemente de um seguidor solar passivo os seguidores ativos utilizam de sensores e/ou algoritmos que preveem o movimento do Sol de forma a atuar na movimentação do painel. A grande diferença entre os tipos de seguidores ativos está basicamente nos graus de liberdade possíveis para a movimentação do painel, por exemplo um seguidor de eixo horizontal consiste de um painel fixo sobre um eixo horizontal que pode rotacionar conforme seu sistema de controle, um seguidor polar de eixo único tem um princípio muito parecido com o seguidor de eixo horizontal, diferenciando que o eixo ao qual o painel está fixo está inclinado. Um seguidor de eixo vertical possui uma base rotativa, um seguidor de dois eixos é basicamente um seguidor

de eixo horizontal em cima de uma base rotativa, um seguidor de plataforma rotativa segue um princípio semelhante ao seguidor de dois eixos, porém trata-se de vários painéis solares fixos a eixos horizontais que estão dispostos em fileiras superiores em cima de uma plataforma rotativa (HULD et al., 2010).

A Figura 8 apresenta uma comparação da produção anual estimada de energia de um sistema fotovoltaico de 1kWp (kWh / kWp) usando diversas abordagens de seguimento solar ativo para quatro locais diferentes na Europa, representando condições climáticas do Mediterrâneo ao Ártico.

Figura 8 – Comparação da produção anual estimada de energia de um sistema fotovoltaico de 1kWp (kWh / kWp) usando várias estratégias de seguimento solar



Fonte: Adaptador de Huld et al. (2010)

Como pode-se observar na Figura 8, todos os seguidores solar ativos possuem maior eficiência que um sistema fotovoltaico sem seguidor solar, e destes sistemas o seguidor de dois eixos costuma obter melhores resultados.

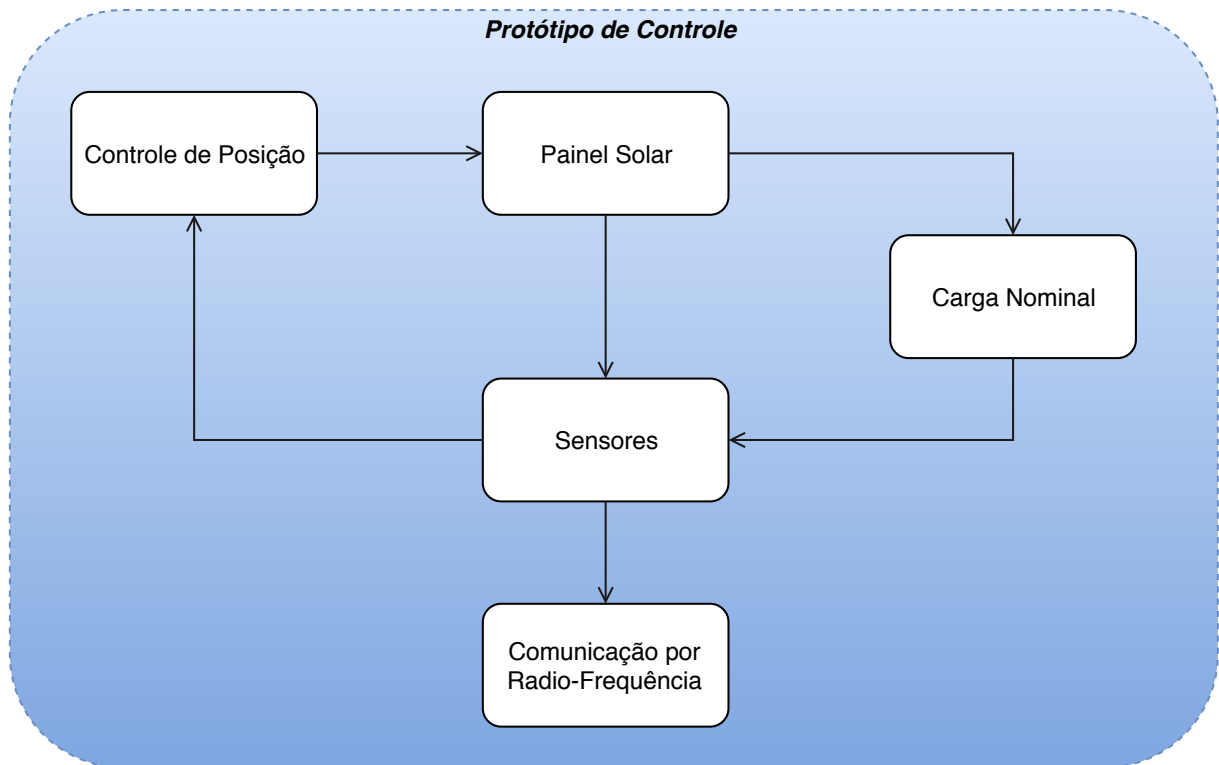
3 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Com o intuito de avaliar o desempenho de um sistema de controle de posicionamento do painel solar em uma estrutura com seguimento solar de dois eixos, torna-se obrigatório a construção de dois protótipos idênticos que possam ser avaliados simultaneamente sob as mesmas condições de radiação solar, estando o protótipo de experimento utilizando seus sensores que quantificam a regulação necessária na orientação do painel para garantir que o painel solar mantenha-se perpendicular a incidência de radiação solar. Assim, com um devido controle feito pelo microcontrolador deste protótipo, o sistema de controle de orientação do painel fotovoltaico será utilizado para garantir que o protótipo de experimento atue como um seguidor solar ativo. O protótipo de controle, apesar de ser idêntico ao protótipo de experimento, apenas utiliza o seu sistema de controle de orientação para garantir que o painel consiga manter a sua orientação já estabelecida durante todo o dia.

O protótipo de controle existe com o propósito de validar o sistema de seguimento solar ativo proposto e apresentado no protótipo de experimento. Este protótipo possui estrutura idêntica ao protótipo de experimento, possuindo apenas simplificações em seu sistema embarcado e seu sistema de controle de posição da estrutura que orienta o painel solar. O painel fotovoltaico utilizado em ambos os protótipos é o mesmo e a carga utilizada trata-se da carga nominal, assim garantindo que a escolha da carga ou painel fotovoltaico não seja responsável por manipular resultados avaliados pelos sensores integrados. Toda a informação obtida pelos sensores do protótipo de controle são transmitidas via um transceptor de rádio-frequência para o sistema embarcado do protótipo de experimento que irá registrar todas as informações de sensoriamento em mídia física além de apresentá-las em um servidor WEB, facilitando a comparação do desempenho do protótipo de controle com o protótipo de experimento proposto.

A Figura 9 apresenta o esquemático do sistema proposto no protótipo de controle.

Figura 9 – Diagrama de Blocos do Sistema do Protótipo de Controle

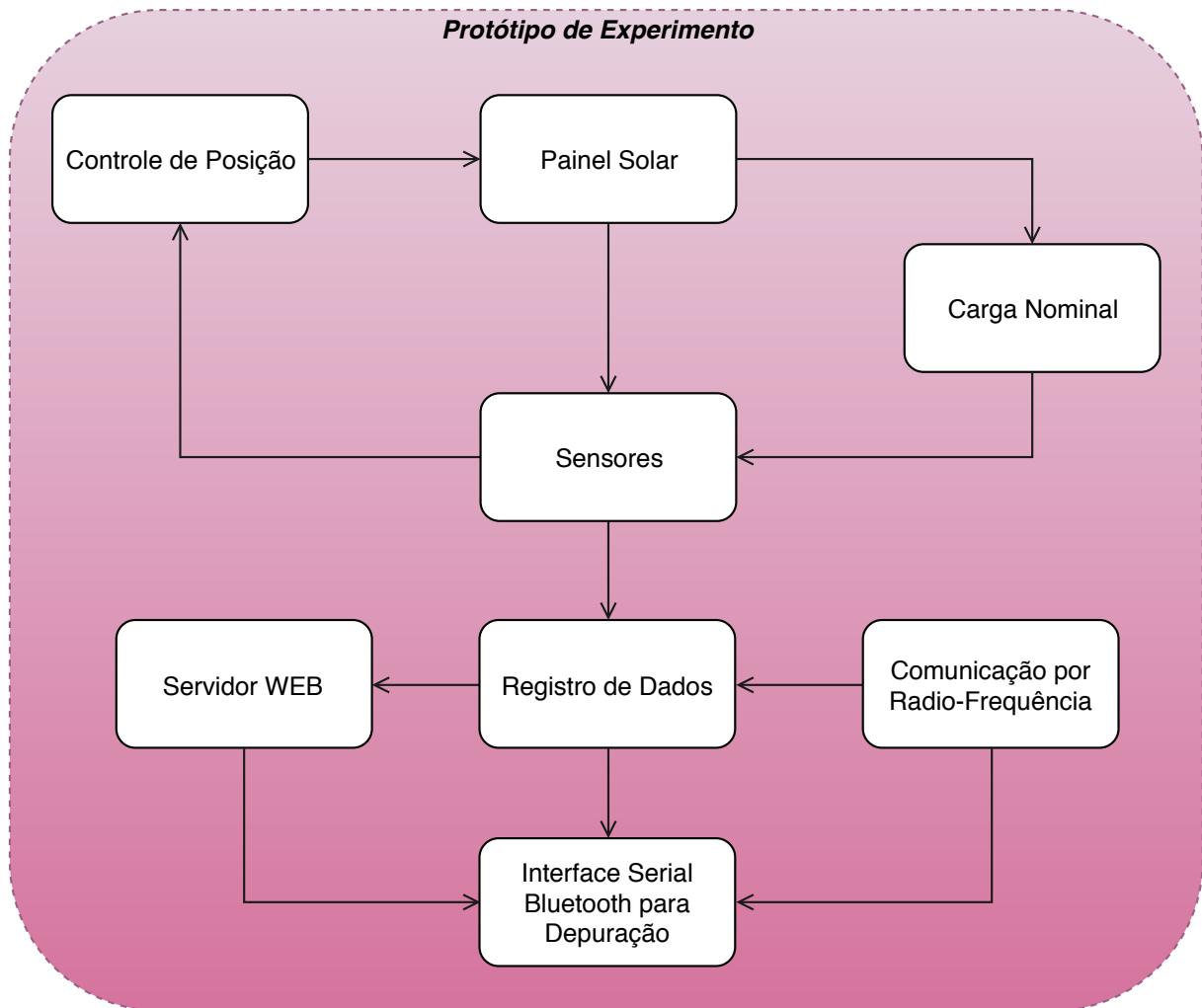


Fonte: Autor (2018)

O protótipo de experimento é o foco do projeto, atuando como seguidor solar ativo de dois eixos. Este além de também possuir os sensores que avaliam informações da estrutura e energia solar recebida pelo painel fotovoltaico, inclui as funções de *datalogger* (registro de dados em mídia física), servidor WEB em uma rede sem fio IEEE 802.11 b/g/n já existente ou gerada (caso não exista uma rede sem fio ao qual o sistema embarcado tenha acesso), a depuração dos sistemas é realizada através de uma interface serial Bluetooth, assim facilitando o processo de testes e monitoramento dos sistemas embarcados dos protótipos.

A Figura 10 apresenta o esquemático do sistema geral proposto no protótipo de experimento.

Figura 10 – Diagrama de Blocos do Sistema do Protótipo de Experimento



Fonte: Autor (2018)

Com os dois protótipos em execução simultaneamente sob as mesmas condições, sensores de intensidade luminosa, radiação solar, corrente e tensão serão devidamente calibrados e instalados em ambos os protótipos. Assim, espera-se comprovar a eficiência do sistema de seguimento solar proposto, apresentando a curva de potência gerada por cada sistema durante um dia inteiro de operação, de forma semelhante aos dados coletados por (ABDALLAH; NIJMEH, 2004) na Figura 7, porém também destacando as condições de temperatura e iluminância do ambiente para cada dado coletado.

4 ESCOLHA DO PAINEL SOLAR

A escolha do painel solar a ser utilizado nos protótipos deve ser o primeiro passo para definição dos protótipos, pois ter em mãos dados como a dimensão, massa e potência máxima implicam na escolha de sensores e desenvolvimento de uma estrutura adequada que consigam trabalhar em conjunto com este painel. Definir um painel solar capaz de gerar até 20A de corrente e depois utilizar um sensor de corrente para aplicações de baixa potência seria um exemplo de erro de especificação de requisitos para o sistema embarcado.

Como o intuito deste projeto é apenas validar o projeto de um seguidor solar não há necessidade de utilizar um painel solar de grande potência, visto que o custo e dimensão de cada painel solar é diretamente proporcional com a potência que este consegue gerar, e neste projeto serão necessários dois painéis solares idênticos a fim de respeitar a metodologia científica exigida para a aquisição dos dados.

Desta forma o critério estabelecido para a escolha do painel solar está em respeitar dimensões e potências mínimas, de forma que seja possível avaliar sua eficiência e que o painel solar não seja ridiculamente menor do que a estrutura que o sustenta. Um painel solar com dimensões mínimas de 50x50mm já é aceitável para o projeto proposto.

Em pesquisa de mercado fora definido o uso de dois painéis solares de silício monocristalino com dimensões 10x69mm, massa 28g e cuja tensão de circuito aberto alcança valores próximos de 5V em uma tarde ensolarada e 250mA em teste de curto circuito sob as mesmas condições de ambiente.

Para poder utilizar este painel solar retirando o máximo de potência que este suporta torna-se necessário obter as curvas características para as condições de ambiente semelhantes as que este será utilizado, pois a escolha da carga que estará presente neste painel solar irá implicar diretamente em sua eficiência na geração de energia elétrica.

4.1 Levantamento das Curvas Características

Conforme já apresentado na Figura 6, ao realizar um teste de curto circuito com o painel solar é possível avaliar a máxima corrente que este é capaz de gerar dada as condições de radiação eletromagnética em que este painel solar está submetido. Colocar o painel solar em curto circuito é o equivalente a dizer que este está utilizando

uma carga nula. De forma equivalente a tensão de circuito aberto no painel solar ocorre para quando uma resistência infinita está sendo aplicada, não há corrente transmitindo em um teste de circuito aberto.

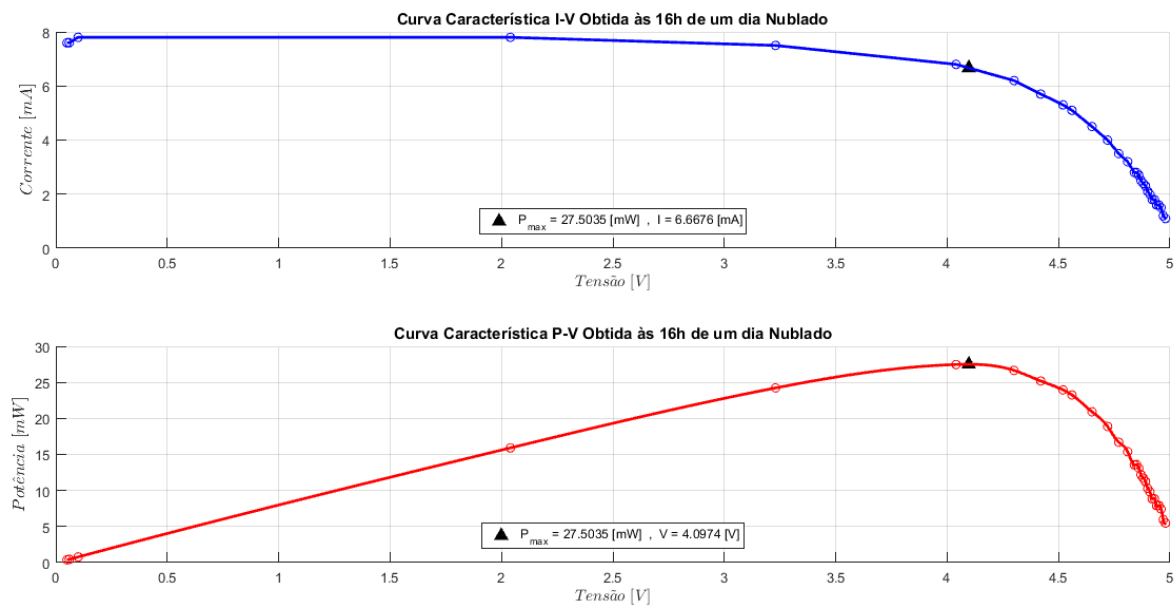
A curva característica representa o comportamento do painel solar ao avaliar a tensão entre os terminais e a corrente na carga ao variar o valor desta carga de nula a infinita resistência. Por razões de um experimento factível os dados são coletados para valores de resistências existentes no mercado através de um resistência ajustável, tal como ocorre em um potenciômetro de resistência máxima conhecida.

A corrente e tensão nos terminais podem ser avaliados com o uso de dois multímetros, cada um utilizando as funções voltímetro DC e amperímetro na faixa de até 300mA, porém é necessário frisar que tal coleta necessita ser rápida a fim de garantir que as condições de medição não variem durante o processo de medição. Para automatizar a verificação da tensão e corrente na carga, bem como o processo de registrar este dado foram utilizados pequenas partes do sistema embarcado cujo desenvolvimento e descrição detalhada são apresentados no Capítulo 5. Em resumo fora utilizado o monitor de potência INA219 para avaliar as grandezas em teste e a interface serial Bluetooth disponível através do módulo HC05 para transmitir os dados para um aplicativo gratuito de celular que recebia estes dados e o salvava em um arquivo de registro.

A carga utilizada no ensaio trata-se de um potenciômetro de $5k\Omega$, utilizando inicialmente a resistência ajustada para seu valor mínimo, com o painel solar mantido fixamente para o Sol enquanto o monitor de potência avalia os dados de tensão e corrente na carga e a interface serial Bluetooth transmite informações para o aplicativo no celular, a resistência é alterada através de um ajuste fino contínuo para não ocorrer variações bruscas de carga e possivelmente não obter dados para parte do gráfico. Ao término do ensaio os dados registrados pelo aplicativo foram transmitidos por e-mail em um arquivo de texto para que este pudesse ser acessado em um computador onde os dados puderam ser tratados e os gráficos referentes aos ensaios então gerados e aqui apresentados.

A Figura 11 apresenta as curvas características obtidas em uma tarde nublada com o painel solar escolhido, estes dados foram coletados às 16h do dia 29 de junho de 2018 no estacionamento do campus UFSC Joinville.

Figura 11 – Curvas características obtidas às 16h de um dia nublado



Fonte: Autor (2018)

Os marcadores representam os dados coletados, enquanto a linha azul representa uma interpolação linear dos dados de corrente e a linha vermelha representa uma interpolação por spline cúbica para os dados de potência coletados.

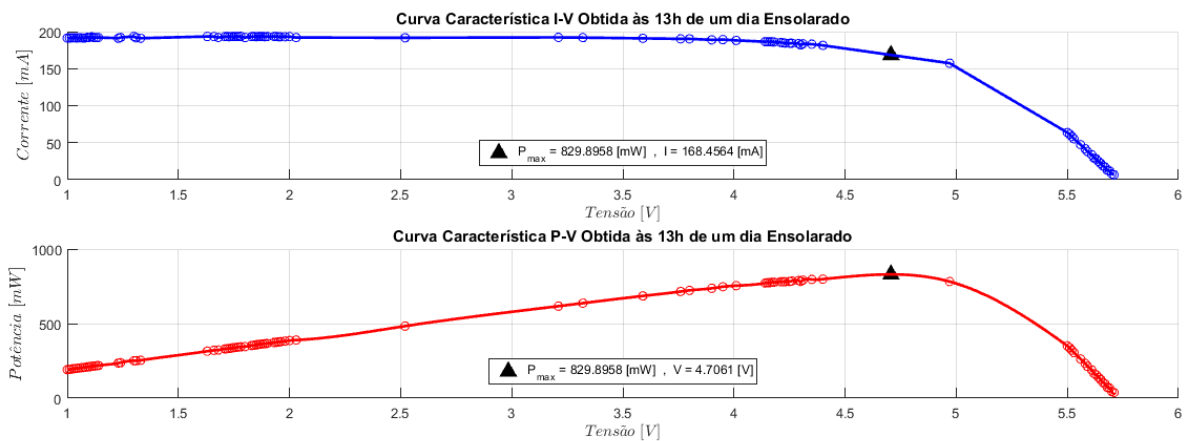
Como pode-se observar na Figura 11 a corrente máxima em uma tarde nublada foi de apenas $8mA$, e a potência máxima obtida fora de $27,5mW$ para uma tensão de $4,097V$.

A carga utilizada para obter o ponto de máxima potência para o ensaio descrito na Figura 11 pode ser obtida através da Lei de Ohm, que pode ser vista sendo aplicada na Equação 4.1.

$$R_{P_{max}} = \left(\frac{V_{P_{max}}}{I_{P_{max}}} \right) = \left(\frac{4,0974[V]}{6,6676 \times 10^{-3}[A]} \right) \approx 614\Omega \quad (4.1)$$

A Figura 12 apresenta as curvas características obtidas em uma tarde de céu limpo com o painel solar escolhido, estes dados foram coletados às 13h do dia 30 de junho de 2018 no estacionamento do campus UFSC Joinville.

Figura 12 – Curvas características obtidas às 13h de um dia ensolarado



Fonte: Autor (2018)

Como esperado o painel solar teve um comportamento próximo aos valores descritos em seu anúncio para uma tarde ensolarada, conseguindo gerar uma potência de 830 mW . Aplicando a Equação 4.1 para os dados obtidos com o ensaio da Figura 12 é possível obter a resistência de 28Ω que é ideal para o ponto de máxima potência deste painel solar nestas condições de radiação eletromagnética.

5 SISTEMA EMBARCADO

Um sistema é classificado como embarcado quando este é dedicado a uma única tarefa e interage continuamente com o ambiente a sua volta por meio de sensores e atuadores (BALL, 2002). A definição das tarefas que necessitam ser executadas pelo sistema embarcado presente nos protótipos, bem como os seus sensores e atuadores é parte crucial do planejamento e desenvolvimento do sistema embarcado, e tais detalhes são abordados a seguir.

5.1 Análise de Requisitos para o Sistema Embarcado

São listadas a seguir todas as funcionalidades e características consideradas obrigatórias para o sistema embarcado proposto.

5.1.1 Requisitos Funcionais para o Sistema Embarcado

Os requisitos que descrevem a funcionalidade do sistema.

- RFSE01 - Os ângulos de azimute e altitude solar referentes ao plano do painel fotovoltaico sejam quantificados pelo sistema embarcado;
- RFSE02 - O sistema embarcado deverá controlar um motor responsável exclusivamente pela alteração do ângulo de inclinação com uma precisão de rotação de pelo menos 1 grau por comando;
- RFSE03 - O microcontrolador do sistema embarcado deverá dirigir um motor responsável exclusivamente pela alteração do ângulo de guinada com uma precisão de rotação de pelo menos 1 grau por comando;
- RFSE04 - Os ângulos de inclinação e guinada do painel fotovoltaico sejam garantidos por uma rotina de correção de orientação baseada nos transdutores embarcados;
- RFSE05 - A rotina de correção de orientação do painel solar deverá garantir que cada transdutor fotocondutor presente no sistema receba o máximo de radiação solar disponível no ambiente;
- RFSE06 - Informações de ano, mês, dia, hora e minuto deverão ser mantidos por um relógio embarcado com bateria de backup;
- RFSE07 - O sistema embarcado deverá se conectar a uma rede Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n com criptografia WPA/WPA2-PSK;

- RFSE08 - O sistema embarcado deverá oferecer uma interface gráfica através de um servidor WEB, onde possa fornecer informações de sensoriamento coletados;
- RFSE09 - Através de uma interface serial Bluetooth o administrador do sistema embarcado deverá ter acesso a dados que o auxiliem a monitorar e depurar o funcionamento das rotinas programadas nos microcontroladores;
- RFSE10 - Os dados de sensoriamento devem ser registrados em uma mídia física removível;

5.1.2 Regras de Negócio para o Sistema Embarcado

Regras de negócio especificam as particularidades das funcionalidades a serem desenvolvidas.

- RNSE01 - A potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico seja quantificada através de sensores de tensão e corrente embarcados;
- RNSE02 - A cada minuto deverá ocorrer o registro de dados de sensoriamento de temperatura e iluminância ambiente, a potência elétrica gerada pelo painel solar de ambos os protótipos, juntamente com a informação da hora e minuto em que cada dado é registrado;

5.1.3 Requisitos Não Funcionais para o Sistema Embarcado

Os requisitos não funcionais são os requisitos que descrevem a qualidade do sistema. A seguir uma enumeração dos requisitos não funcionais do sistema embarcado:

- RNFSE01 - O painel solar deverá estar conectado a uma carga de resistência fixa e conhecida que garanta pelo menos 50% da potência máxima que o painel consegue gerar em uma tarde ensolarada;
- RNFSE02 - A carga escolhida deverá dissipar o calor gerado pela corrente recebida pelo painel solar, suportando 14 horas contínuas de operação sem danificar ou alterar sua resistência;
- RNFSE03 - A corrente elétrica gerada pelo painel fotovoltaico deverá ser lida com uma resolução de pelo menos 1mA;
- RNFSE04 - A tensão aplicada a carga conhecida deverá ser lida com uma resolução de pelo menos 5mV;
- RNFSE05 - A temperatura ambiente próxima ao painel fotovoltaico deve ser quantificada por um sensor embarcado com resolução de pelo menos $0,5^{\circ}C$;
- RNFSE06 - A intensidade de iluminação no painel fotovoltaico seja quantificada por um sensor embarcado com resolução de pelo menos $1lx$;
- RNFSE07 - O servidor WEB deverá exigir autenticação de credenciais do usuário conectado para que este possa ter acesso à página de sensoriamento e controle

do sistema embarcado;

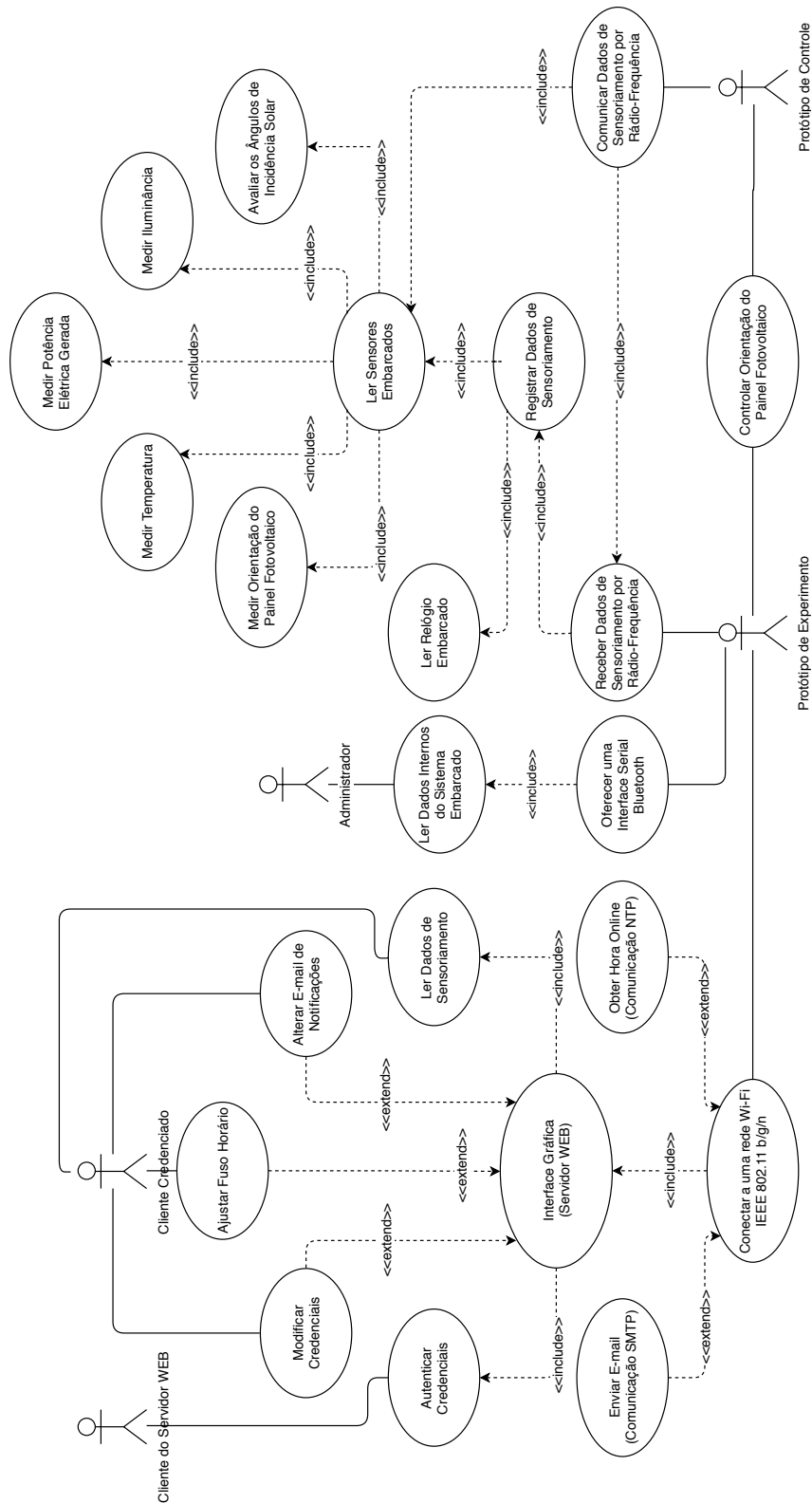
- RNFSE08 - O cliente credenciado conectado ao servidor poderá alterar suas credenciais de login através da interface gráfica;
- RNFSE09 - O cliente credenciado conectado ao servidor poderá ajustar o fuso horário do sistema embarcado através da interface gráfica;
- RNFSE10 - O servidor deverá enviar uma tabela com o resumo dos dados coletados no dia para o email cadastrado em seu sistema;
- RNFSE11 - O cliente credenciado conectado ao servidor poderá alterar o e-mail no qual deseja receber notificações do sistema embarcado através da interface gráfica;
- RNFSE12 - O protótipo de experimento atualizará o relógio do seu sistema embarcado toda vez que estabelecer uma conexão com a internet;
- RNFSE13 - Os ângulos de inclinação e guinada do painel fotovoltaico sejam quantificados por sensores embarcados;
- RNFSE14 - O painel fotovoltaico do protótipo de controle deverá manter seu ângulo de inclinação e guinada fixos em posição ótima de incidência solar durante o período entre as 5h e as 19h do horário local;
- RNFSE15 - O protótipo de experimento deverá executar sua rotina de correção de orientação somente durante o período entre as 5h e as 19h do horário local;
- RNFSE16 - O protótipo de experimento será o responsável pelo registro de dados de ambos os protótipos;
- RNFSE17 - O protótipo de experimento deverá receber informações do protótipo de controle através de comunicação não cabeada;
- RNFSE18 - Os dados de sensoriamento sejam gravados em arquivos digitais separados contendo apenas os dados referentes ao dia atual de amostragem, utilizando um sistema de arquivo FAT;
- RNFSE19 - A comunicação com o relógio embarcado seja compatível com um dos protocolos de comunicação: UART, SPI ou I2C;

5.1.4 Diagrama de Caso de Uso

A modelagem de um sistema tem papel importante em documentar todo o seu funcionamento, deixando claro como será a sua implementação e programação, o que se espera do sistema embarcado como um todo.

Os diagramas UML de casos de uso representam o conjunto de comportamentos de alto nível que o sistema deve executar para um determinado ator, o diagrama de caso de uso deste sistema embarcado pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de Caso de Uso para o Sistema Embarcado



Fonte: Autor (2017)

Observa-se que tarefas tais como manter o servidor WEB e a interface serial Bluetooth são exclusivas do protótipo de experimento, enquanto o protótipo de controle apenas realiza seu sensoriamento, mantém a orientação definida para o

painel fotovoltaico e relata seus dados lidos para o protótipo de experimento.

5.2 Sensoriamento e Instrumentação

Os requisitos do sistema embarcado definem características de ambiente que devem ser quantificadas ou qualificadas e para obter tais medidas torna-se necessário o uso de instrumentos de medição. A escolha dos instrumentos de medição que fazem parte do sistema embarcado proposto e como estes dispositivos funcionam e transmitem suas informações para o microcontrolador principal da unidade são informações cruciais para a programação deste microcontrolador como também para o desenvolvimento do circuito eletrônico.

Os sensores e instrumentos de controle presentes no sistema embarcado podem ser divididos em dois grupos. Um grupo de sensores que quantificam ou qualificam a energia solar recebida na estrutura, e o grupo de sensores e instrumentos de controle que são utilizados para avaliar e definir a orientação do painel fotovoltaico.

5.2.1 Avaliação da Energia Solar Recebida

A radiação eletromagnética fornecida pelo Sol incidente no painel fotovoltaico é um fator determinante na eficiência de geração de energia elétrica por este, logo, a avaliação da energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico e o ambiente em que este está é necessária e para tal o uso de sensores capazes de quantificar ou qualificar os fenômenos naturais envolvidos.

A radiação eletromagnética fornecida pelo Sol pode ser observada por humanos através das ondas de radiação cujo comprimento de onda estão entre $400nm$ à $750nm$, também conhecido como espectro visível, logo esta fatia da radiação solar é observada como luz solar. As ondas de radiação solar cujo comprimento de onda estão entre $700nm$ e $1000nm$ pertencem a conhecida faixa de radiação infravermelha, esta fatia da radiação solar é invisível para o ser humano, porém sensível ao tato através da percepção do calor. Com o intuito de quantificar a radiação eletromagnética fornecida pelo Sol por meios de dados facilmente compreensíveis, são utilizados sensores de temperatura e iluminância para avaliar a radiação solar incidente no espectro visível ao infravermelho. A energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico será avaliada através da potência média de saída, o que pode ser obtido ao avaliar a tensão e corrente na saída do painel fotovoltaico.

5.2.1.1 Sensor de Temperatura

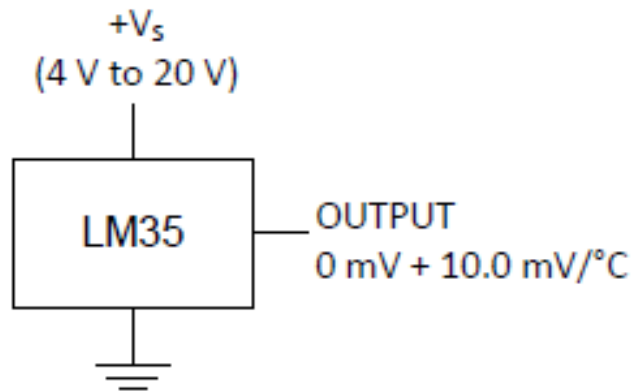
O dispositivo de sensoriamento térmico escolhido para o sistema-embarcado trata-se do LM35 da Texas Instruments, sendo este um sensor de temperatura de

precisão centígrada com uma saída de tensão linearmente proporcional a temperatura em seu encapsulamento.

A Figura 14 apresenta o circuito esquemático para o sensor LM35, destacando seus pinos de alimentação e valor de saída na configuração básica utilizada para medição de temperaturas positivas com uma alimentação não simétrica.

Figura 14 – Esquemático de Funcionamento do Sensor LM35

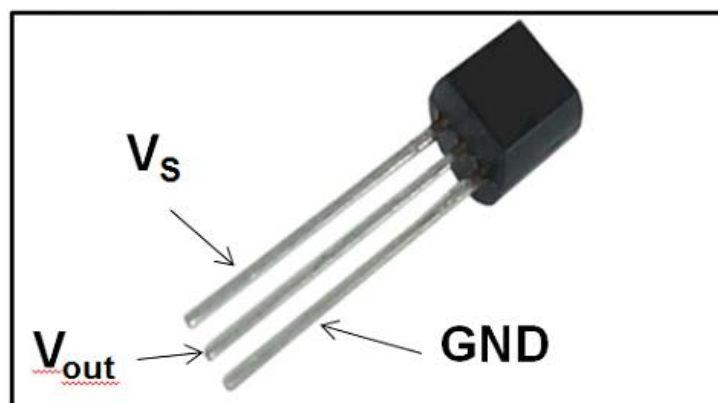
Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Fonte: Texas Instruments (1999)

A Figura 15 apresenta o componente LM35 em seu encapsulamento TO-92 destacando a pinagem de alimentação e tensão de saída.

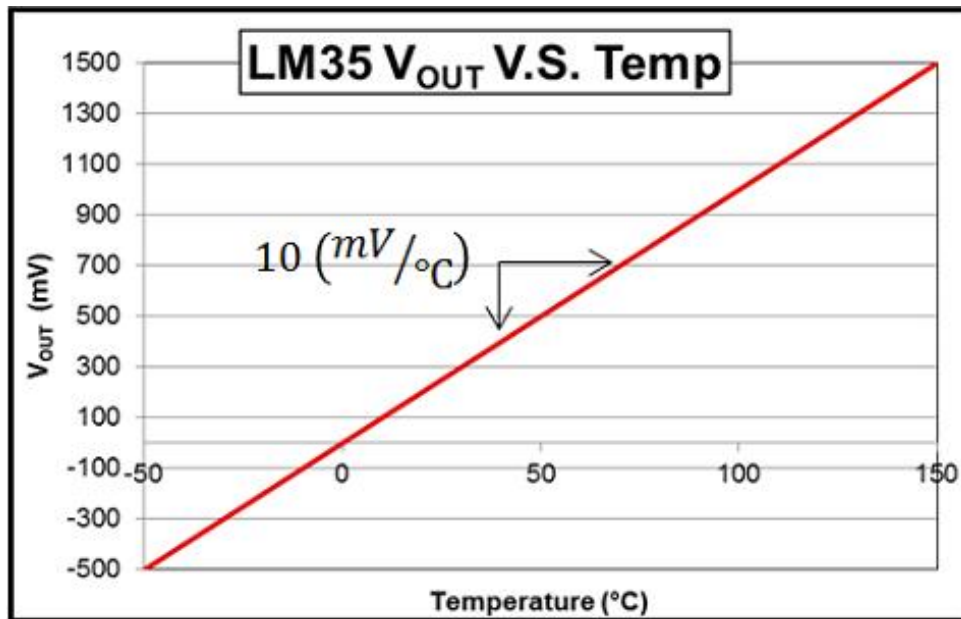
Figura 15 – Sensor de Temperatura LM35



Fonte: Texas Instruments (1999)

A relação linear entre a temperatura a ser medida e a tensão de saída do sensor pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 – Relação entre a Tensão de Saída e Temperatura para o LM35



Fonte: Texas Instruments (1999)

Ao realizar a medição da tensão de saída é possível obter a temperatura através da Equação 5.1:

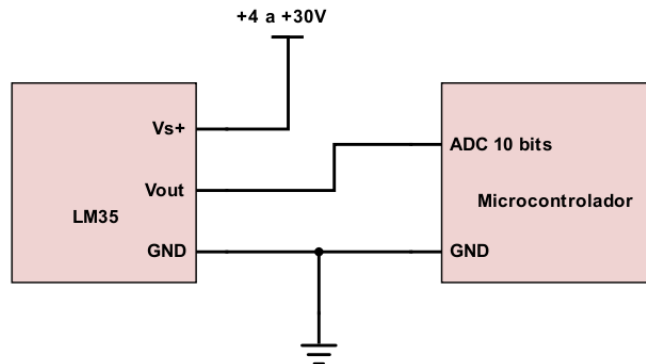
$$T[{}^{\circ}C] = \frac{V_{out}[mV]}{10[\frac{mV}{{}^{\circ}C}]} \quad (5.1)$$

Na prática o valor de tensão de saída só poderá ser lido por um microcontrolador através de um conversor analógico digital que irá quantizar este sinal de saída, tornando em valores discretos digitais este valor de tensão que pode possuir infinitos valores. Considerando uma leitura máxima esperada de $120^{\circ}C$ e uma resolução de pelo menos $0,5^{\circ}C$, para se obter esta faixa de pelo menos 240 valores torna-se necessário um passo de quantização menor ou igual a $5mV$, ao considerar a utilização de um conversor ADC existente em um microcontrolador, é interessante avaliar que estes conversores costumam quantizar valores considerando toda a faixa de valores de entrada de $0V$ a $3,3V$ ou $5V$, para ambos os casos só é possível obter um passo de quantização menor ou igual a $5mV$ caso estes conversores possuam uma resolução de pelo menos 10 bits, para assim atribuir a qualquer valor de tensão dentro de toda a sua faixa de entrada em 1024 possíveis valores discretos e digitalizados. A frequência de amostragem do conversor ADC é insignificante para este sensor, pois mudanças súbitas de temperatura são improváveis e apenas uma amostra por minuto já é suficiente para o sistema em questão, a maioria dos conversores ADC no mercado possuem taxas de amostragem superiores a mil amostras por segundo.

Desta forma defini-se o critério para a escolha do microcontrolador que irá tratar os dados deste sensor, que este possua um conversor analógico digital de pelo menos 10 bits reservado para o uso deste sensor.

A Figura 17 apresenta as conexões citadas para o uso do sensor LM35 com o microcontrolador.

Figura 17 – Esquemático de Aplicação do sensor LM35 com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

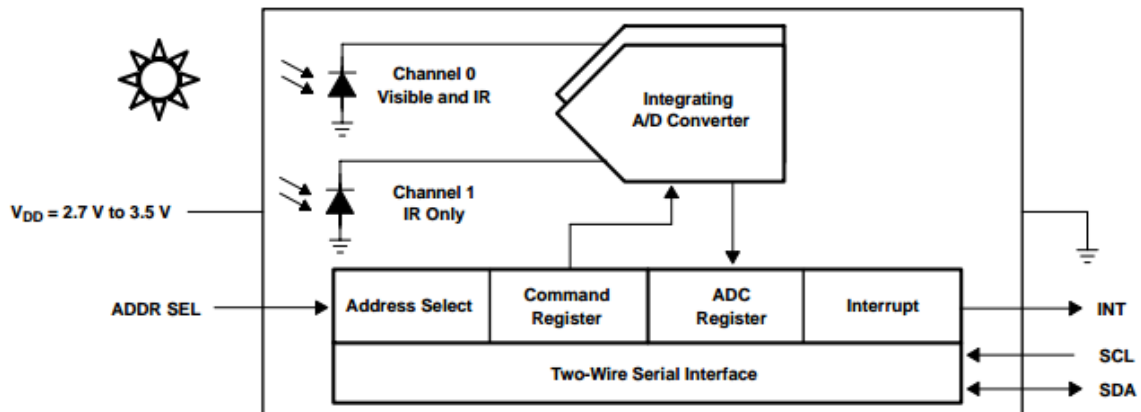
Este sensor pode ser alimentado com tensão de 4V a 30V, e em condições nominais de operação consome $60\mu A$ de corrente.

5.2.1.2 Sensor de Iluminância

Para o sensoriamento da iluminância, ou seja da quantidade de luz disponível no ambiente, o dispositivo escolhido trata-se do TSL2561 da Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc., que é em outras palavras um conversor que transforma intensidade de luz em uma saída de sinal digital capaz de interface direta nos barramentos I2C ou SMBus. O dispositivo combina um fotodiodo de banda larga (sensível ao espectro visível e infravermelho) e um fotodiodo de resposta infravermelho em um único circuito integrado CMOS capaz de fornecer uma resposta quase fotópica com uma resolução de 16 bits. Dois ADCs de integração convertem as correntes de fotodiodo em uma saída digital que representa a irradiância medida em cada canal, e então o resultado da conversão é transferido para os registros de dados do canal 0 (referente ao fotodiodo de banda larga) e canal 1 (referente ao fotodiodo de resposta em infravermelho). Estas saídas digitais podem ser inseridas em um microprocessador onde a iluminância (nível de luz ambiente) em lux é extraída (TAOS INC, 2009).

A Figura 18 apresenta o diagrama de bloco funcional para o sensor TSL2561.

Figura 18 – Diagrama de bloco funcional para o sensor TSL2561



Fonte: TAOS Inc (2009)

Conforme pode ser visto na Figura 18 acima, os canais 0 e 1 recebem os registros de dados dos fotodiodos de resposta em banda larga e de resposta em infravermelho respectivamente, os pines de comunicação SCL e SDA são responsáveis pela comunicação em protocolo I2C com o microcontrolador.

O pino ADDR SEL (Address Selector) é utilizado para determinar o endereço deste sensor no barramento de comunicação I2C de forma a garantir que este sensor não atue no mesmo endereço que outro componente já presente no mesmo barramento. Este sensor pode operar em até 3 endereços possíveis no barramento I2C e em único endereço não configurável no barramento SMB.

A Tabela 1 apresenta os endereços possíveis de operação para este sensor nos barramentos I2C e SMB conforme a configuração utilizada do pino ADDR SEL.

Tabela 1 – Configuração de Endereço para o TSL2561

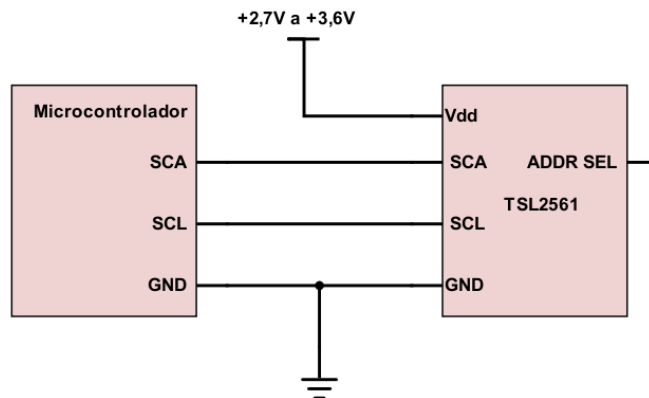
ADDR SEL	Endereço I2C	Endereço SMB
GND	0x29	0x0C
NC	0x39	0x0C
VDD	0x49	0x0C

Fonte: TAOS Inc (2009)

Os endereços apresentados estão em representação hexadecimal. Vale ressaltar que GND aqui representa que o pino ADDR SEL está em curto com o seu pino de terra, em aberto que o pino ADDR SEL não está conectado a nada e o sensor está operando em seu endereço padrão, VDD indica que o pino ADDR SEL está em curto com seu pino de alimentação.

A Figura 19 apresenta as conexões citadas para o uso do sensor TSL2561 com o microcontrolador.

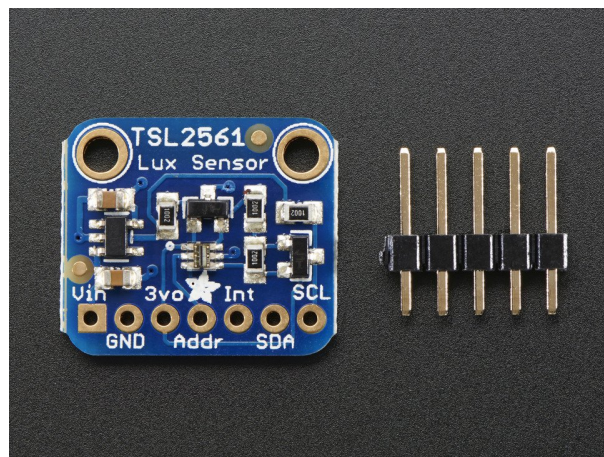
Figura 19 – Esquemático de Aplicação do sensor TSL2561 com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

A Figura 20 apresenta o sensor TSL2561 em um módulo de avaliação deste sensor que visa facilitar a experiência com o sensor através da rápida integração deste componente em um sistema maior, por já possuir o sensor soldado em uma placa de circuito impresso com regulador de tensão, capacitor e resistores necessários para a devida alimentação e uso das portas deste sensor.

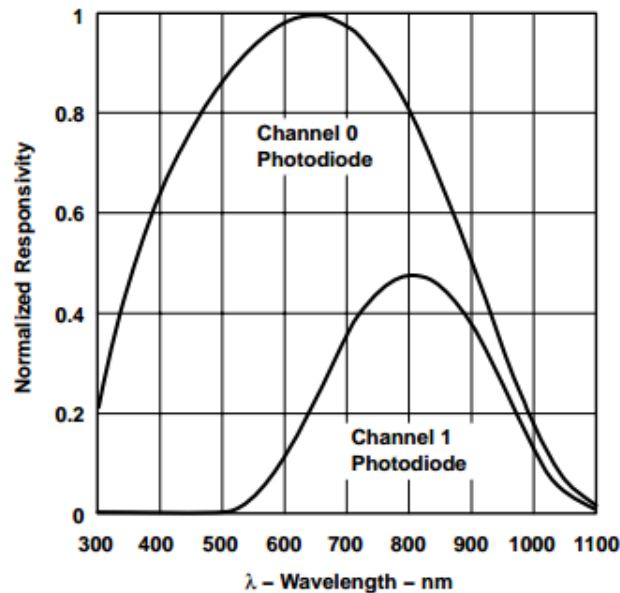
Figura 20 – Luxímetro TSL2561 em um Módulo de Avaliação



Fonte: TAOS Inc (2009)

A resposta espectral para os dois fotodiodos presentes neste sensor, cujo dados podem ser obtidas nos canais 0 e 1, podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 – Resposta Espectral do TSL2561



Fonte: TAOS Inc (2009)

Observa-se que o comprimento de onda para a sensibilidade de pico do fotodiodo do canal 0 referente ao espectro visível e infravermelho é de $640nm$ enquanto o fotodiodo do canal 1 referente ao infravermelho é de $940nm$.

Este sensor exige uma alimentação de $2,7V$ a $3,6V$ com um consumo máximo de corrente de $0,6mA$, porém em condições típicas de operação consome uma potência de $0,75mW$.

5.2.1.3 Monitor de Potência Elétrica

A importância do monitor de potência elétrica é fundamental neste projeto, sem este não é possível obter qualquer informação a respeito do painel solar em uso e sua geração de energia elétrica. Com o intuito de avaliar a geração de potência elétrica do painel será necessário avaliar a corrente de saída do painel fotovoltaico e a tensão aplicada na carga, para assim obter a potência elétrica instantânea na carga.

O princípio de funcionamento de monitores de potência geralmente consiste em quantificar tensão de entrada no sensor e a tensão de saída do sensor para a carga. A corrente é estimada ao avaliar a queda de tensão no resistor shunt presente neste sensor, cuja resistência é conhecida, como resistores shunt possuem resistência insignificante e alta dissipação de calor eles suportam grande quantidade de corrente sem interferir no funcionamento da carga aplicada.

A queda de tensão no resistor shunt é obtida através da Equação 5.2:

$$V_{shunt} = V_{Entrada} - V_{Carga} \quad (5.2)$$

As tensões V_{shunt} e $V_{Entrada}$ são obtidas através de conversores ADC integrados

no monitor de potência.

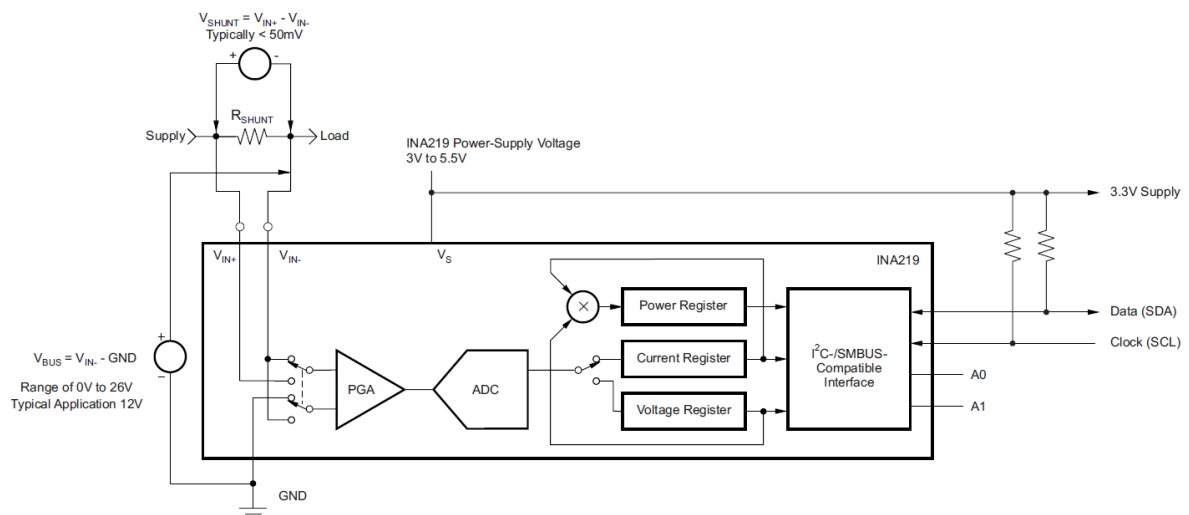
A corrente de saída para a carga é obtida através da Lei de Ohm que pode ser vista sendo aplicada na Equação 5.3.

$$I_{carga} = I_{shunt} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (5.3)$$

Neste projeto fora escolhido o monitor de potência INA219 da Texas Instruments, capaz de trabalhar com tensões de entrada de até 26V possuindo ganhos programáveis para garantir máxima precisão nas leituras dentro da faixa de valores de operação esperada na aplicação final, além de garantir um erro máximo de 0,5% por influência da dissipação de calor. A leitura dos dados deste sensor pode ser obtida através da comunicação usando barramentos I2C ou SMBus, garantindo até 16 endereços programáveis.

A Figura 22 apresenta o diagrama de bloco funcional para o monitor de potência INA219.

Figura 22 – Esquemático de Funcionamento do INA219



Fonte: Texas Instruments (2008)

Os pinos A0 e A1 são utilizados para configuração do endereço escravo I2C e SMB do sensor no barramento. A Tabela 2 apresenta os 16 possíveis endereços configuráveis para o INA219.

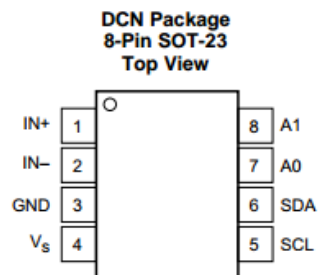
Tabela 2 – Configuração de Endereço para o INA219

A0	A1	Endereço
GND	GND	0x40
GND	VS+	0x41
GND	SDA	0x42
GND	SCL	0x43
VS+	GND	0x44
VS+	VS+	0x45
VS+	SDA	0x46
VS+	SCL	0x47
SDA	GND	0x48
SDA	VS+	0x49
SDA	SDA	0x4A
SDA	SCL	0x4B
SCL	GND	0x4C
SCL	VS+	0x4D
SCL	SDA	0x4E
SCL	SCL	0x4F

Fonte: Texas Instruments (2008)

Para conectar o pino A0 ou A1 ao pino de alimentação é recomendação da fabricante o uso de um resistor de $3,3k\Omega$. A configuração de pinos do INA219 pode ser vista na Figura 23 a seguir.

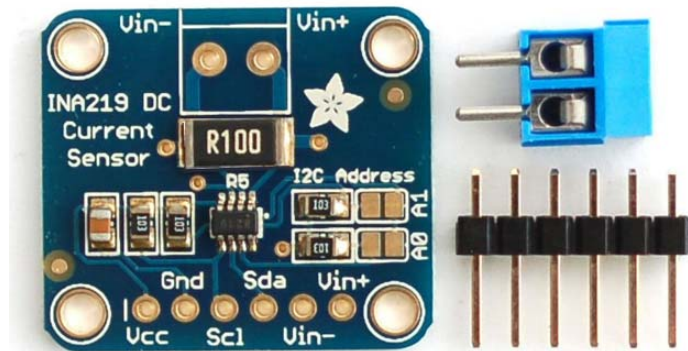
Figura 23 – Configuração de pinos do INA219



Fonte: Texas Instruments (2008)

Novamente para facilitar o uso deste componente, um módulo de avaliação foi utilizado garantindo praticidade para inserção ou até mesmo remoção deste sensor em um projeto em fase de protótipo como é o caso. O módulo utilizado neste projeto pode ser visto na Figura 24 a seguir.

Figura 24 – Módulo de Avaliação do INA219

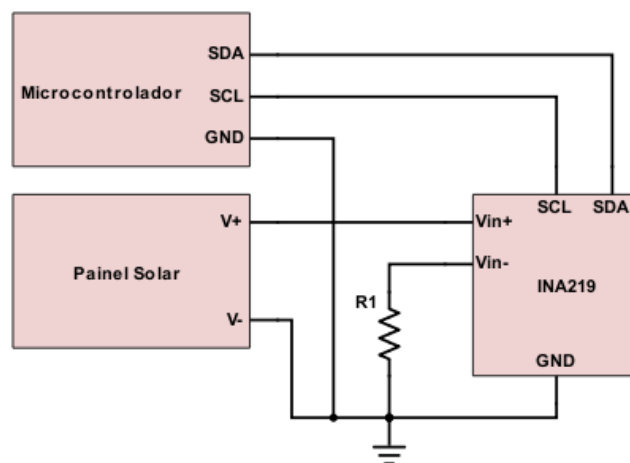


Fonte: Ada (2016)

Para poder avaliar a potência elétrica instantânea fornecida pelo painel solar o cabo positivo do painel solar será conectado a entrada V_{in+} do INA219, e o pino V_{in-} do INA219 será conectado a uma carga que irá para o terra, o cabo V_- do painel solar será também conectado no terra em comum com o INA219, assim os valores de tensões lidos pelo INA219 referentes ao painel solar terão o mesmo referencial.

A Figura 25 apresenta as conexões citadas para o uso do INA219 para avaliar a potência elétrica do painel solar.

Figura 25 – Esquemático de Aplicação do INA219 com o Painel Solar



Fonte: Autor (2018)

A resistência $R1$ representa a carga definida para o uso do painel solar com máxima eficiência.

O módulo de avaliação do INA219 utilizado exige uma alimentação de $3V$ a $5,5V$, consumindo no máximo $1mA$ de corrente.

5.2.2 Orientação do Pannel Solar

A orientação do painel solar é definida por motores de passo que não possuem controle de posição para garantir que o painel solar não seja capaz de rotacionar indefinidamente, possivelmente causando rompimento de cabos importantes do sistema embarcado, ângulos de guinada e inclinação, bem como o referencial do polo magnético da Terra podem ser utilizados para controle de segurança na orientação do painel, bem como a validação de movimentação de eixos do seguidor solar.

Os motores serão utilizados apenas para seguimento solar (caso do protótipo de experimento) ou para se manter na posição fixa definida caso este tenha sua posição modificada durante seu funcionamento (caso do protótipo de controle).

Saber o ângulo de incidência solar é de extrema importância para o seguimento solar de dois eixos proposto, pois através de tal quantificação será possível definir as alterações necessárias na orientação do painel solar através de atuação por meio dos motores de passo. O ângulo de incidência solar será estimado com o uso de fototransistores.

5.2.2.1 Fototransistor

Como alternativa ao uso de um algoritmo baseado em calendário astronômico para o controle de orientação do painel solar, são utilizados transdutores para o sistema de medição e estimação do ângulo azimutal e de atitude. A seguir a descrição da escolha dos transdutores utilizados, o condicionamento dos dados lidos e o algoritmo de seguimento solar proposto.

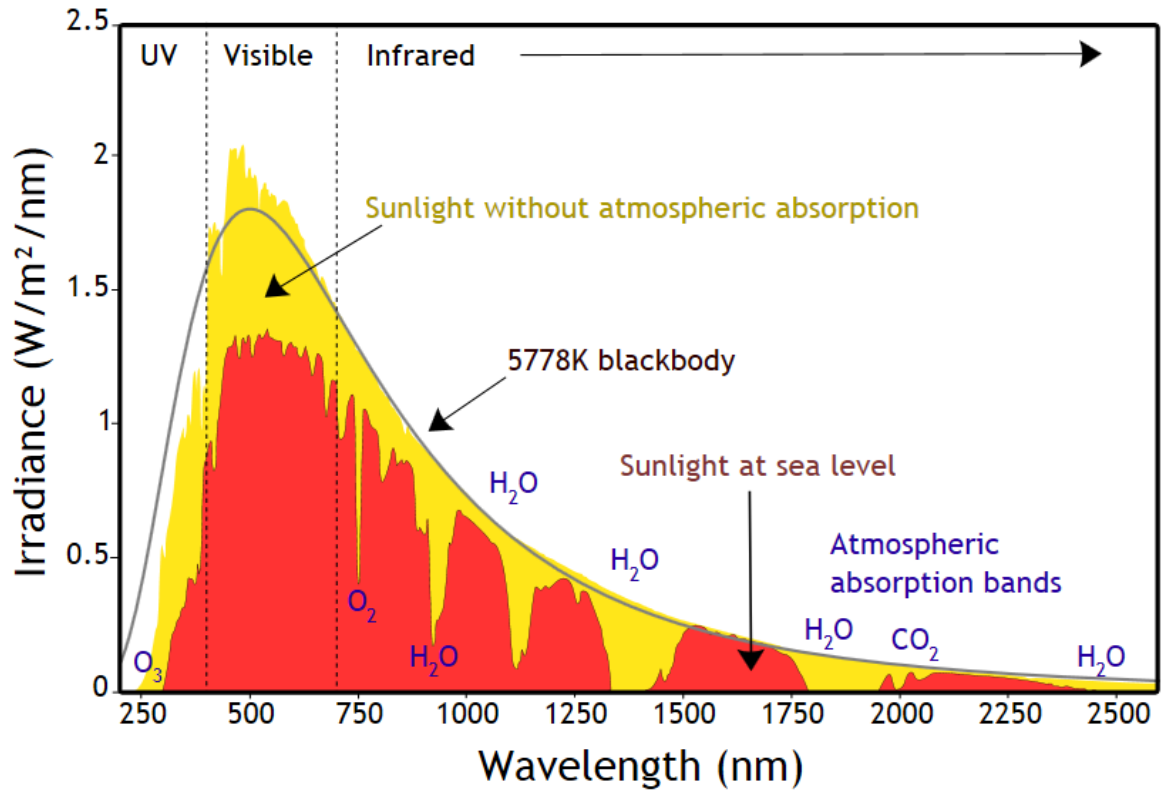
Fotodiodos, fototransistores e LDR (Light Dependet Resistor) são transdutores com os quais é possível avaliar a intensidade de radiação eletromagnética neles incidente através de um circuito elétrico prático, porém detalhes referentes ao princípio de funcionamento de cada um tornam a escolha do transdutor a ser utilizado uma parte crucial deste projeto, apesar de que ambos são facilmente encontrados no mercado por centavos de reais.

A estrutura será projetada para comportar quatro transdutores fotocondutores idênticos dispostos próximos ao painel solar e com seus campos de visão direcionados perpendiculares a superfície no qual o painel solar está apoiada, tendo como premissa que todos estes transdutores se comportem de forma idêntica e quando o painel solar estiver apontado para o Sol todos eles respondam com uma mesma grandeza quantificável.

Cada transdutor fotocondutor poderá ter uma sensibilidade de pico diferente, portanto é importante avaliar o espectro de radiação solar para garantir que o transdutor escolhido responda para um comprimento de onda coerente com o espectro de radiação. O espectro de radiação solar na Terra pode visto na Figura 26 a seguir.

Figura 26 – Espectro da Radiação Solar na Terra

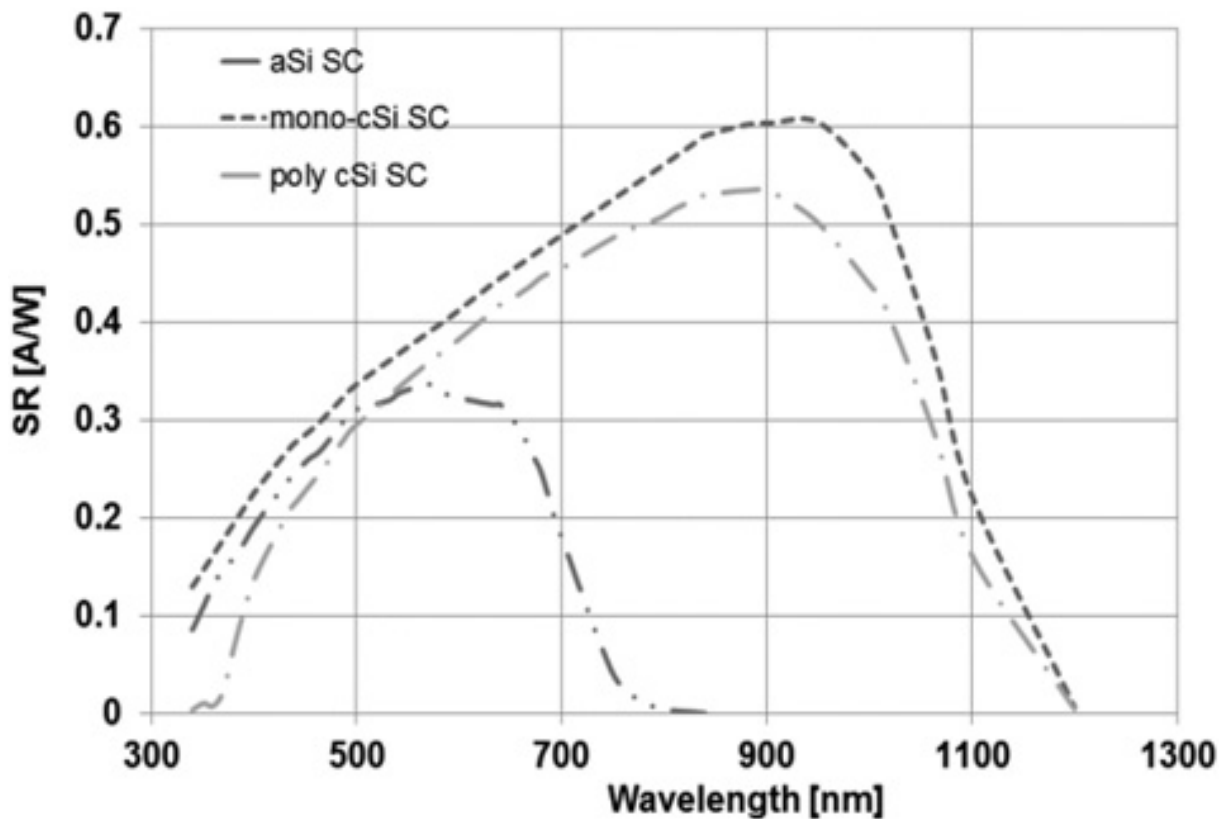
Spectrum of Solar Radiation (Earth)



Fonte: Santos et al. (2015)

Como fora escolhido um painel solar de silício monocristalino (mono-Si) é importante avaliar a resposta espectral dos painéis solares feitos deste material, como pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Resposta Espectral para Painéis Solares de Silício



Fonte: Sara, Betts e Gottschalg (2013)

Onde “aSi SC” representa a célula solar feita de silício amorfo, “mono-cSi SC” representa a célula solar feita de silício monocristalino e “poly cSi SC” representa a célula solar feita de silício policristalino.

Como pode-se observar um painel solar de silício monocristalino costuma ter sua sensibilidade de pico no infravermelho, com comprimento de onda aproximado de $900nm$.

Os LDR costumam ter boa sensibilidade para ondas de radiação eletromagnética de comprimento de onda entre $400nm$ e $700nm$, este comprimento de onda é presente no espectro visível. Medições com um LDR são possíveis ao avaliar a variação de sua resistência com a variação de luz incidente neste. Apesar da praticidade de uso deste sensor seu comportamento pode variar com a temperatura e tempo de uso (CORTEZ, 2013). Como são necessários quatro transdutores idênticos o uso de LDRs é inviável para este projeto.

O fotodiodo é um dispositivo semiconductor que converte a luz em corrente elétrica. Células solares convencionais são basicamente fotodiodos com grande superfície. Num sensor fotovoltaico, quando acontece o efeito fotoelétrico é possível obter-se uma tensão que varia em função da intensidade da radiação recebida. Os fotodiodos são construídos basicamente da mesma forma que um diodo. As principais diferenças entre estes dois componentes está no fato de um fotodiodo ser construído

com um invólucro transparente de forma a permitir que luz forneça energia a área fotossensível (CORTEZ, 2013).

O comprimento de onda para a sensibilidade de pico em fotodiodos irá variar drasticamente dependendo do fotodiodo escolhido, porém é esperado uma sensibilidade para comprimentos de onda entre $200nm$ e $1100nm$.

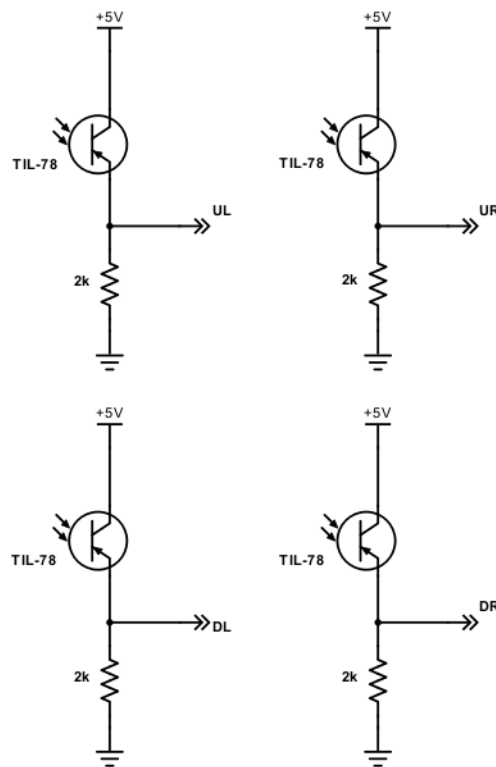
Um fototransistor é a combinação de um fotodiodo e um transistor n-p-n onde a radiação luminosa vai incidir na base e provocar uma corrente. São amplamente utilizados em controles remotos e facilmente encontrados no mercado, possuindo sensibilidade a comprimentos de onda infravermelho de $400nm$ a $1100nm$ com sensibilidade de pico entre $800nm$ a $900nm$.

Devido a fácil obtenção de um fototransistor cuja sensibilidade de pico equivale a sensibilidade de pico descrita para painéis solares de silício monocristalino descrito na Figura 27, o fototransistor foi o transdutor escolhido para este projeto.

O fototransistor “TIL-78” escolhido para este projeto é o mais popular no mercado, porém não há documentação oficial para este, o mesmo é comumente vendido com nomes de fototransistores genéricos tais como o “SFH 309 FA” da OSRAM Opto Semiconductors e o “PT334-6C” da Everlight, sabe-se que o mesmo possui sensibilidade de pico para um comprimento de onda de aproximadamente $950nm$.

São utilizados quatro fototransistores “TIL-78” dispostos na forma de uma matriz 2x2, o circuito de medição para a saída destes 4 fototransistores pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Circuito de Medição para a Matriz de Fototransistores



Fonte: Autor (2018)

Sendo UL o valor de tensão referente ao fototransistor disposto na posição superior esquerda da matriz 2x2, UR para o fototransistor da posição superior direita, DL para o fototransistor inferior esquerdo e DR para o fototransistor inferior direito. Caso a saída dos fototransistores esteja desbalanceada (ao menos uma saída não equivale a dos demais), correção será necessária por parte dos motores de forma a garantir o balanceamento.

O desbalanceamento para o eixo responsável pela alteração do ângulo de inclinação pode ser estimado ao calcular a diferença entre a soma das saídas dos fototransistores superior e inferior, enquanto o desbalanceamento para o eixo responsável pela alteração do ângulo de guinada pode ser estimado ao calcular a diferença entre a soma das saídas dos fototransistores laterais.

A Equação 5.4 apresenta o cálculo necessário obter o desbalanceamento no eixo responsável pelo ângulo de guinada através do valor de tensão lido nos fototransistores.

$$\Delta_X = (UR + DR) - (UL + DL) \quad (5.4)$$

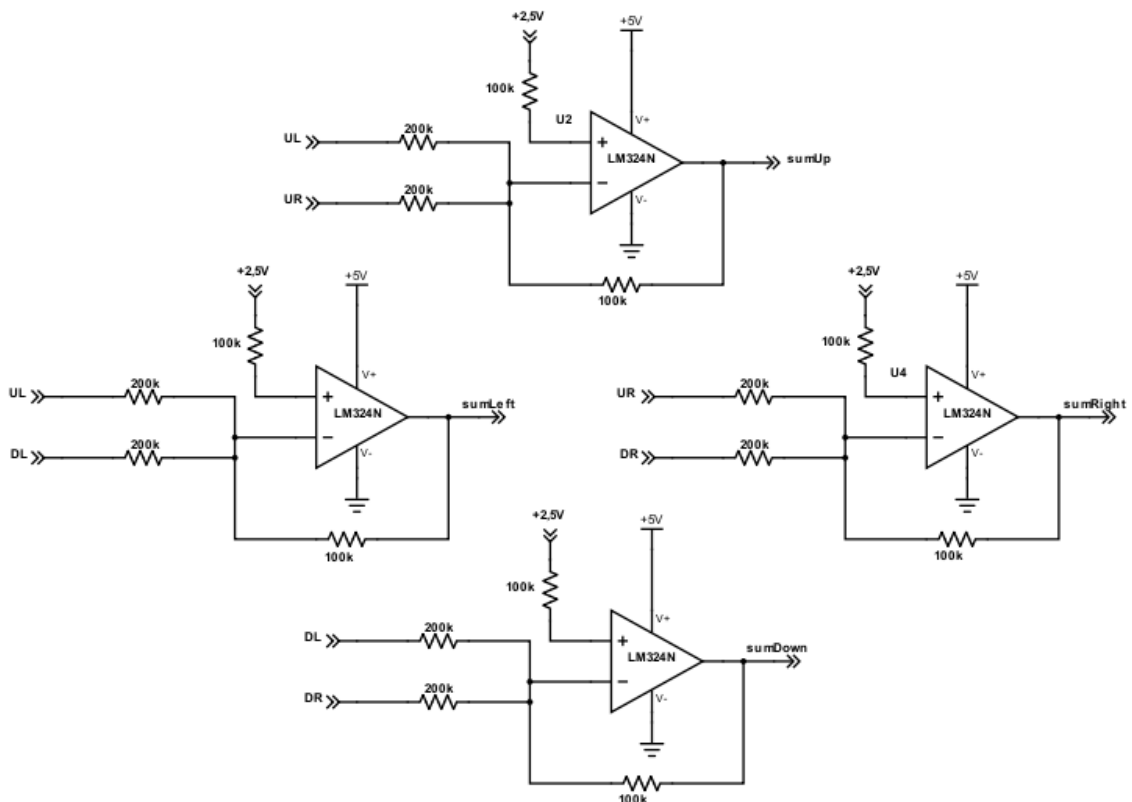
A Equação 5.5 apresenta o cálculo necessário obter o desbalanceamento no eixo responsável pelo ângulo de inclinação através do valor de tensão lido nos

fototransistores.

$$\Delta_Y = (UL + UR) - (DL + DR) \quad (5.5)$$

A Figura 29 apresenta um circuito com amplificadores operacionais em uma configuração de somadores inversores de ganho meio e resistor de equalização com terra virtual em $2,5V$, que podem ser utilizado para realizar o cálculo da soma de tensões de saída superiores, inferiores e laterais da matriz de fototransistores.

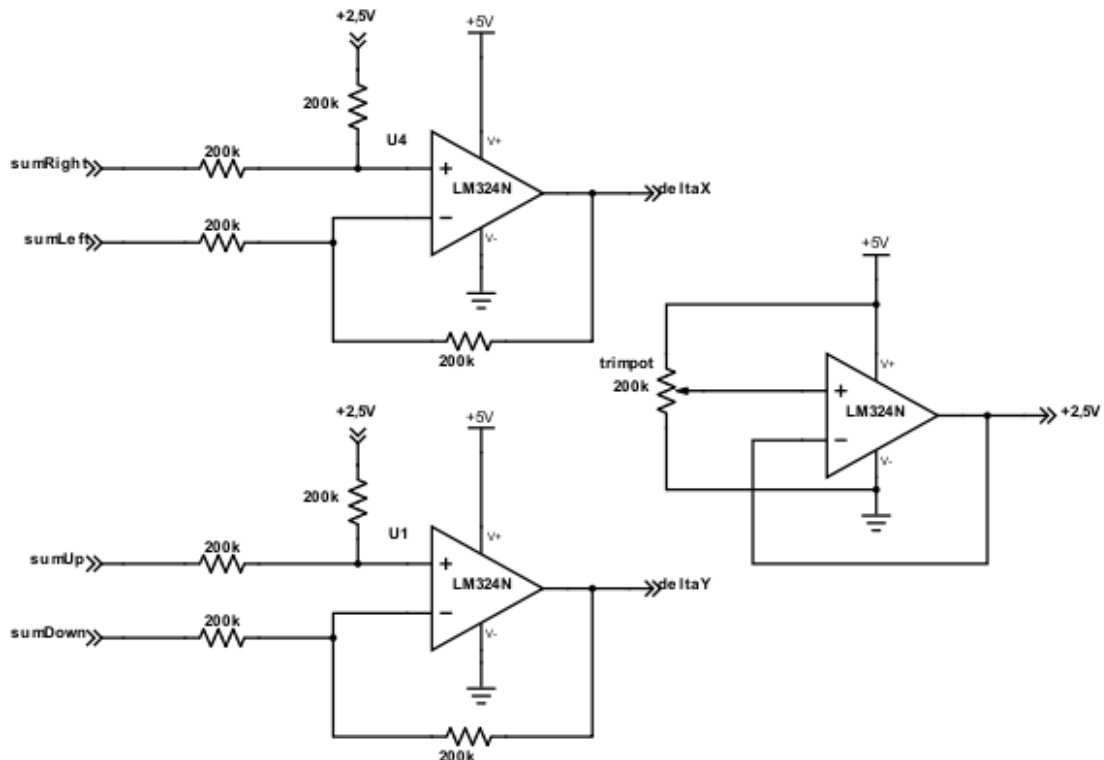
Figura 29 – Circuito Para Cálculo das Soma de Tensões dos Fototransistores



Fonte: Autor (2018)

A Figura 30 apresenta o circuito com amplificadores operacionais em uma configuração de subtrator de ganho unitário com o uso de um terra virtual em $2,5V$ e um amplificador operacional sendo utilizado como seguidor de tensão para gerar o terra virtual através da regulagem de um trimpot. Este circuito pode ser utilizado para realizar o cálculo de Δ_X e Δ_Y que são utilizados para determinar a correção necessária na orientação do painel solar pela rotação dos eixos horizontais e verticais.

Figura 30 – Circuito de Análise de Correção para a Orientação do Pannel Solar



Fonte: Autor (2018)

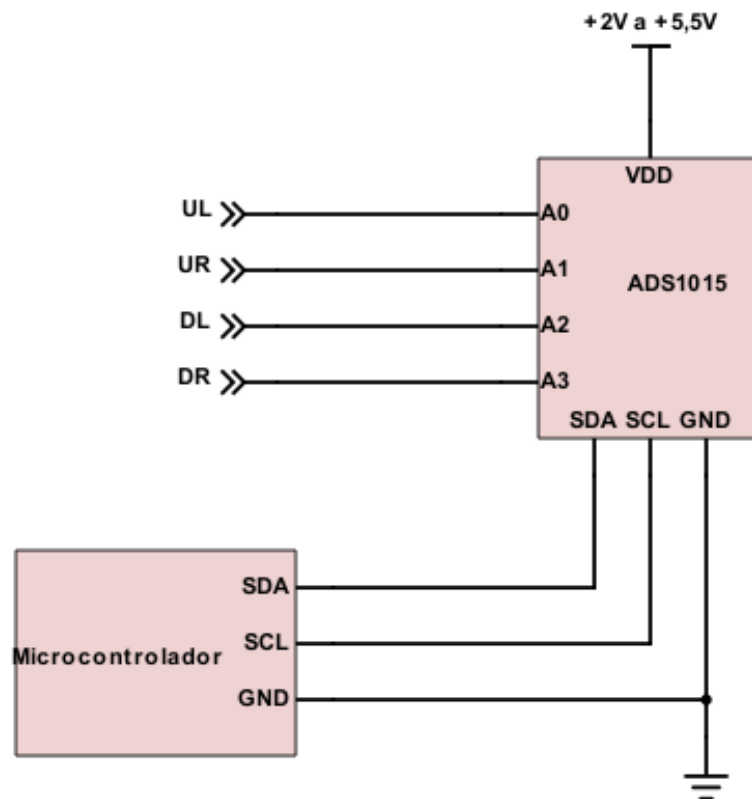
Uma placa de circuito impresso é proposta para utilizar esta metodologia no cálculo do desbalanceamento dos valores lidos pelos fototransistores.

Este método apresenta algumas imperfeições que devem ser levadas em consideração, é esperado que todos os fototransistores estejam sujeitos a ruído e pequenas flutuações no valor de tensão de um dos fototransistores já acarretará em valores de desbalanceamento apresentados. O valor do terra virtual necessita de ajuste fino através do trimpot, uma pequena variação no ajuste deste trimpot já poderá ser indicado como correção necessária para os motores. A leitura dos valores de Δ_X e Δ_Y necessitam ser realizadas por meio de um conversor analógico digital, onde o valor de terra virtual, neste caso $+2,5V$ será o valor de referência para a matriz de fototransistores balanceada, exigindo assim uma boa leitura para pequenas flutuações ao redor deste valor.

Outro método também é proposto para o cálculo do desbalanceamento, desta vez considerando que as operações matemáticas envolvidas ocorrem em software, enquanto os valores de tensão são lidos por um conversor analógico digital externo.

A Figura 31 apresenta o circuito de medição proposto com o ADS1015 para a leitura dos fototransistores.

Figura 31 – Circuito de Medição para a Matriz de Fototransistores com ADC Externo



Fonte: Autor (2018)

Para garantir robustez contra ruído na leitura durante o cálculo do desbalanceamento, um filtro digital de resposta ao impulso finita (FIR) passa-baixas é utilizado. Neste caso trata-se da média móvel com 5 medições. O método consiste basicamente em manter uma fila FIFO de tamanho máximo de 5 elementos, cada vez que uma amostra for obtida esta amostra é inserida nesta FIFO e o quinto elemento é retirado, assim o quarto elemento se torna o quinto, o terceiro se torna o quarto, e assim por diante para dar espaço para a nova amostra ser o novo primeiro elemento da FIFO. Uma FIFO de tamanho máximo de 5 elementos é utilizada para cada um dos 4 fototransistores, e para cada atualização das FIFOs o valor atual de cada fototransistor é considerado como sendo a média dos 5 elementos atualmente presentes em sua respectiva FIFO, caracterizando o nome média móvel. O desbalanceamento é calculado considerando como UR, UL, DR e DL os valores referentes a média móvel de cada fototransistor.

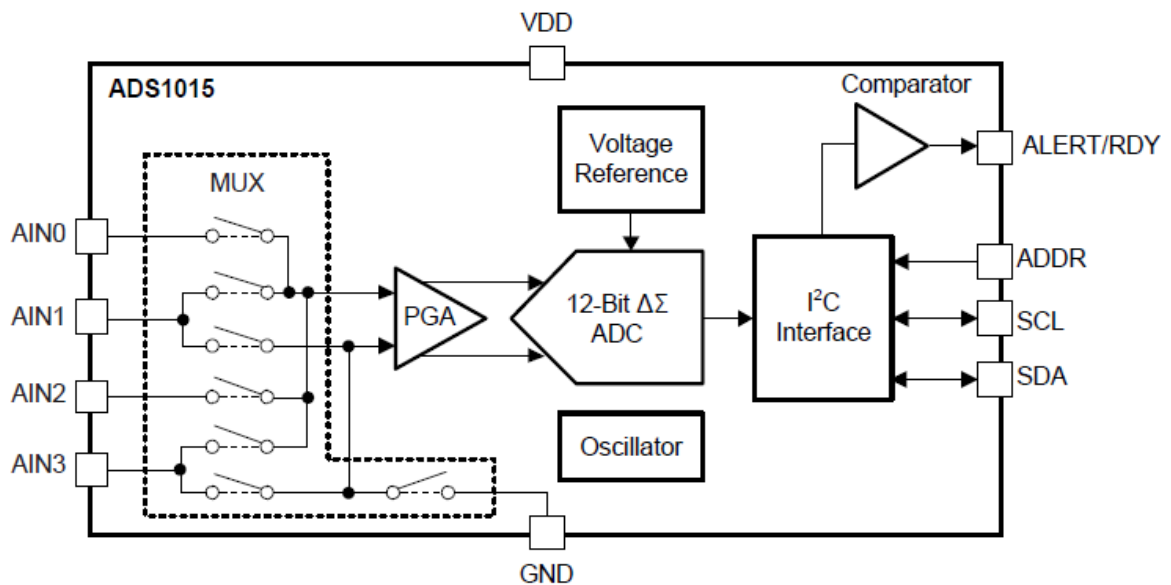
Ambos os métodos serão implementados e testados na prática, porém a metodologia de cálculo do desbalanceamento através do conversor analógico digital ADS1015 será aqui apresentada como sendo a principal proposta para o projeto do seguidor solar ativo de dois eixos, devido a maior confiabilidade na leitura de dados

filtrados e a possibilidade do uso de um ganho configurável pelo ADS1015.

O conversor analógico digital ADS1015 possui 4 entradas analógicas de 12 bits com uma taxa de amostragem de até 3300 amostras por segundo, a escala de leitura pode ser configurada para garantir maior precisão na leitura, ajustando a quantização para operar dentro da faixa de $\pm 256mV$ a $\pm 6,144V$. Este dispositivo opera no barramento I2C (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

A Figura 32 apresenta o diagrama de bloco do ADS1015 destacando suas conexões.

Figura 32 – Diagrama de Bloco do ADS1015

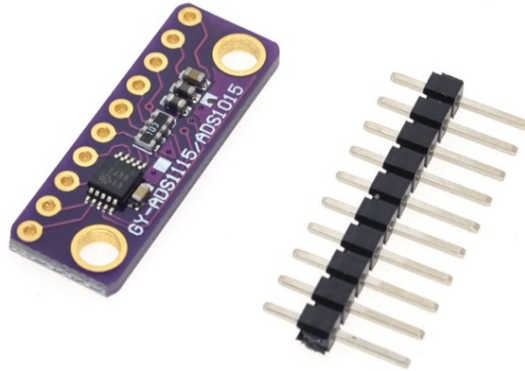


Fonte: Texas Instruments (2018)

Este conversor analógico digital será utilizado em um módulo de avaliação que torna seu uso prático e de fácil integração ao sistema embarcado.

A Figura 33 apresenta o módulo de avaliação utilizado neste projeto.

Figura 33 – Módulo de Avaliação do ADS1015



Fonte: Ijaradar e Chatterjee (2018)

O módulo ADS1015 exige uma alimentação de 2V a 5,5V podendo consumir até $300\mu A$ de corrente.

5.2.2.2 Acelerômetro

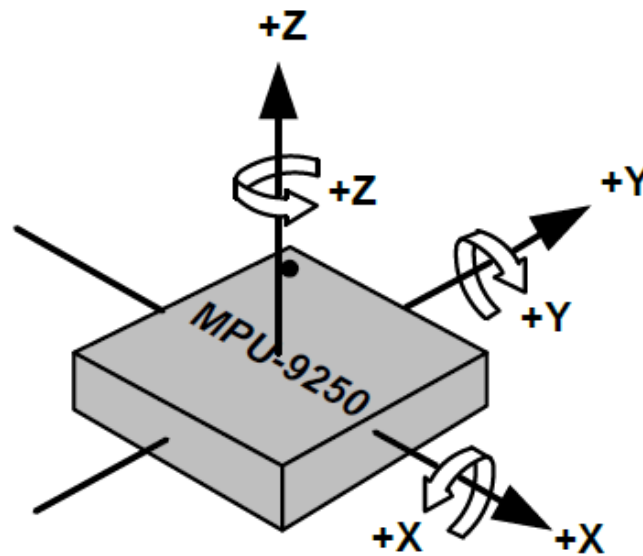
O acelerômetro é um dispositivo usado para medir a aceleração própria de um sistema em relação a outro sistema em queda livre atrelada à sua sensação de peso.

Acelerômetros convertem energia mecânica em um sinal elétrico mensurável, sendo que sua saída geralmente é expressa em milivolts, de modo que a sensibilidade é dada em mV por g ($9,81m/s^2$).

Ao utilizar um sistema microeletromecânico (MEMS) com um acelerômetro de três eixos, ao mantê-lo em repouso em sobre a superfície da Terra na altura do nível do mar, a leitura do acelerômetro para dois dos eixos serão nulas, enquanto no terceiro eixo a aceleração lida será referente a gravidade da Terra, nesta situação de repouso do acelerômetro alterar seu ângulo de guinada não irá alterar as leituras de aceleração, porém se alterar o seu ângulo de inclinação ou rolagem será possível observar variações nas medições de aceleração nos três eixos.

A Figura 34 apresenta os referenciais de orientação para o acelerômetro e giroscópio em uma unidade de medição inercial.

Figura 34 – Referenciais de Orientação para o Acelerômetro e Giroscópio do MPU9250



Fonte: InvenSense Inc (2016)

Supondo que o painel solar esteja preso no eixo X descrito na Figura 34 seria o equivalente a determinar o ângulo de guinada como o ângulo referente a rotação ao redor do eixo Z e o ângulo de inclinação como sendo o ângulo ao redor do eixo X, a inclinação ao redor do eixo Y seria a rolagem, e neste caso não existente, visto que como proposto o painel estaria preso em um eixo fixo e coincidente com o eixo X.

A Equação 5.6 descreve como calcular o ângulo de inclinação, dadas as medições do acelerômetro.

$$\theta_{\text{Inclinação}} = \text{atan2}(A_x, \sqrt{A_y^2 + A_z^2}) \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (5.6)$$

Neste projeto em questão apenas os ângulos de inclinação e guinada são importantes, pois são responsáveis por avaliar a orientação do painel referente aos dois eixos ao qual este está fixado.

5.2.2.3 Giroscópio

O giroscópio é um dispositivo cujo eixo de rotação mantém sempre a mesma direção na ausência de forças que o perturbem seja qual for a direção do dispositivo que o conduz. Um giroscópio informa a taxa de rotação ao redor de um eixo de referência, normalmente descritos em $^{\circ}/s$.

Ao utilizar um MEMS com um giroscópio de três eixos torna-se possível avaliar a taxa de variação angular em cada um destes eixos, assim sabendo-se a orientação inicial de operação, é possível obter a orientação atual do dispositivo realizando a integração da taxa de variação angular para cada um dos eixos.

A Equação 5.7 apresenta como calcular a variação angular ($\Delta\theta$) ao redor de determinado eixo, conhecendo-se a taxa de variação angular (ω) ao redor deste eixo durante um período de tempo (T).

$$\Delta\theta = \int_{t_0}^{T+t_0} \omega dt \quad (5.7)$$

Conhecendo-se a variação angular decorrida dentro de um período de tempo (T) pode-se obter o ângulo atual através da Equação 5.8.

$$\theta_{t_0+T} = \theta_{t_0} + \Delta\theta \quad (5.8)$$

As leituras do giroscópio ocorrem periodicamente, assim a variação angular descrita na Equação 5.7 são irreais e necessitam considerar a discretização do sinal, desta forma uma aproximação da integral pode ser obtida através de métodos de integração numérica tais como trapézio descrito na Equação 5.9.

$$\Delta\theta = \int_{t_0}^{T+t_0} \omega dt \approx T \left(\frac{\omega_T + \omega_{t_0}}{2} \right) \quad (5.9)$$

A integração numérica pelo método do trapézio apesar de não exigir muito poder computacional causa um erro de aproximação considerável que será acumulativo neste processo, portanto métodos numéricos de integração mais precisos seriam necessários, tais como a regra de quadratura ou as fórmulas de Newton-Cotes de intervalo fechado com grau n maior que 1. A minimização do período de amostragem T é necessária para que o erro de aproximação da integração numérica dos valores discretos não cause erro acumulativo significativo, além de garantir que não ocorra perda informações importantes durante o intervalo entre cada amostragem.

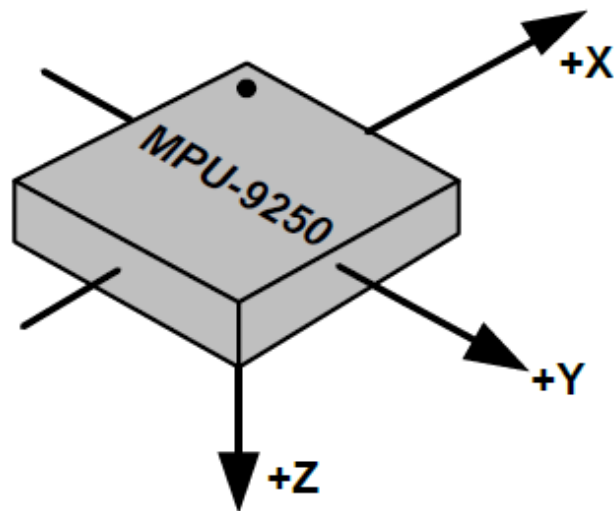
5.2.2.4 Magnetômetro

O magnetômetro é um instrumento usado para medir a intensidade, direção e sentido de campos magnéticos em sua proximidade, e assim a orientação do painel em relação ao norte magnético da Terra.

Neste protótipo o uso de um magnetômetro está associado a validação da movimentação na orientação do painel quanto ao seu ângulo de guinada e azimutal ao utilizar como referencial o polo magnético da terra, e assim verificar se o painel está compensando a rotação natural da terra e acompanhando a movimentação do Sol.

A Figura 35 apresenta os referenciais de orientação para o magnetômetro de três eixos presente no MPU9250.

Figura 35 – Referenciais de Orientação para o Magnetômetro do MPU9250



Fonte: InvenSense Inc (2016)

A leitura de um magnetômetro de três eixos equivale a um vetor apontando para o polo magnético da Terra, a leitura de cada eixo ocorre por meio de um sensor magnético monolítico de efeito Hall assim a saída de cada sensor é medida em Tesla.

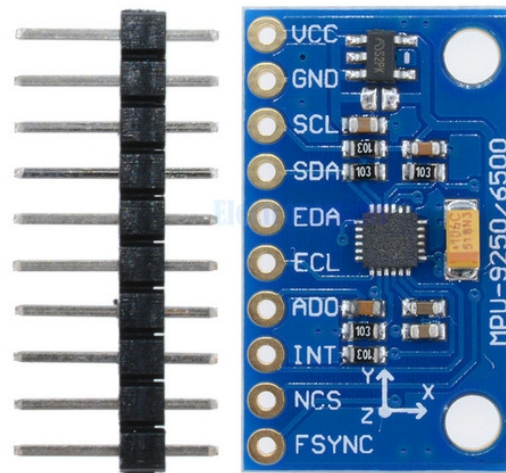
5.2.2.5 Unidade de Medição Inercial

Uma unidade de medição inercial (IMU) nada mais é do que a integração dos dispositivos acelerômetro, giroscópio podendo também contar com magnetômetro e barômetro em um único módulo, com o intuito de facilitar a combinação sensorial poder obter dados precisos de orientação e movimento do IMU possuindo também informações referentes a um referencial fixo e conhecido.

O dispositivo escolhido foi o módulo multi-chip (MCM) MPU-9250 que consiste de um chip com o acelerômetro e giroscópio e outro com o magnetômetro AK8963 da Asahi Kasei Microdevices Corporation.

A Figura 36 apresenta o módulo de avaliação do MPU-9250 utilizado neste projeto.

Figura 36 – Módulo de Avaliação do MPU-9250

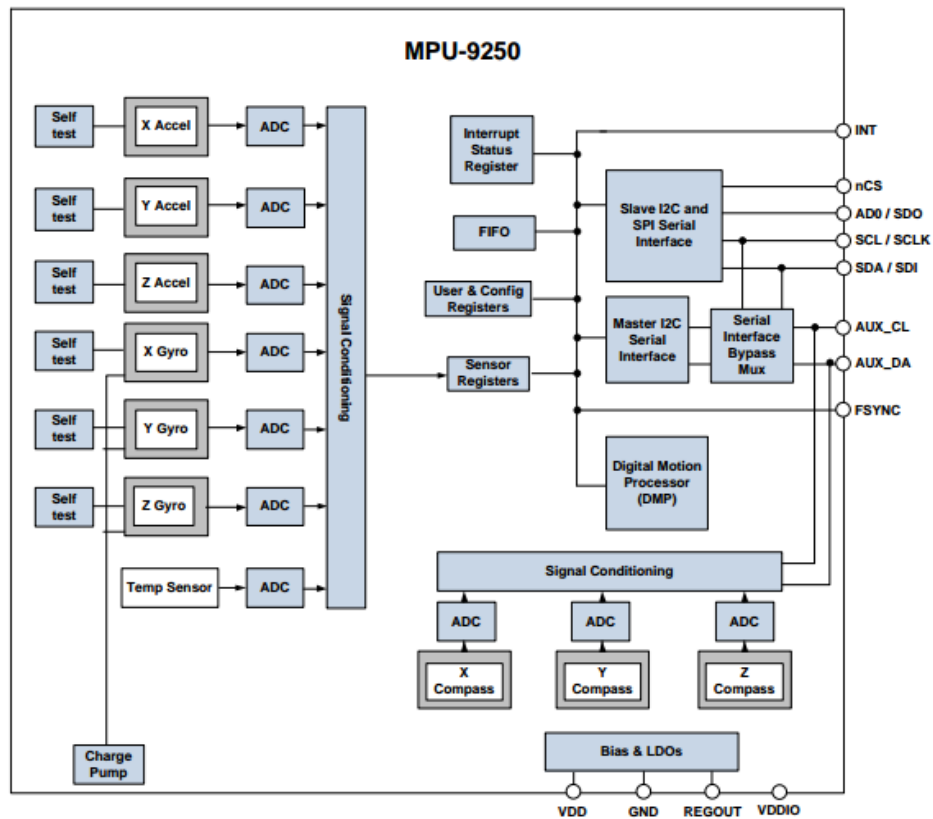


Fonte: Ada (2017)

Noves conversores analógico-digitais (ADCs) de 16 bits são utilizados para a digitalização das saídas dos sensores, sendo um para cada eixo de cada sensor, os dados podem ser obtidos através de interface I2C ou SPI. Este dispositivo também permite o ajuste de sensibilidade dos sensores garantindo que o giroscópio atue com boa precisão seja trabalhando em $250^\circ/s$ ou $2000^\circ/s$ o mesmo ocorre para o acelerômetro que pode ter sua sensibilidade configurada para trabalhar em $2g$ a $16g$, garantindo precisão no rastreamento de movimentos rápidos ou lentos do módulo. O magnetômetro AK8963 opera na faixa de medição de $4800\mu T$ (INVENSENSE INC, 2016).

A Figura 37 apresenta o diagrama de bloco funcional para a unidade de medição inercial MPU-9250.

Figura 37 – Diagrama de bloco funcional para a IMU modelo MPU-9250



Fonte: InvenSense Inc (2016)

O IMU MPU-9250 é compatível com protocolo de comunicação I2C e SPI, para o caso da comunicação SPI o pino AD0 (LSB do endereço I2C) é utilizado como SDO (SPI Serial Data Output), o pino SCL (I2C Serial Clock) é utilizado como SCLK (SPI Serial Clock) e o pino SDA (I2C Serial Data) é utilizado como SDI (SPI Serial Data Input). A Tabela 3 apresenta a configuração do pino AD0 para o ajuste de endereço I2C do MPU9250.

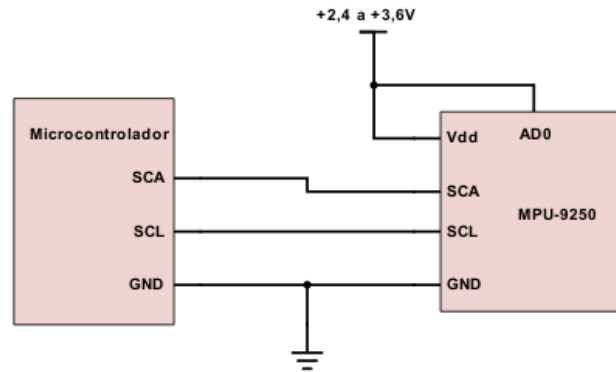
Tabela 3 – Configuração de Endereço para o MPU9250

AD0	Endereço I2C
GND	0x68
VDD	0x69

Fonte: InvenSense Inc (2016)

A Figura 38 apresenta as conexões citadas para o uso do MPU-9250 com o microcontrolador.

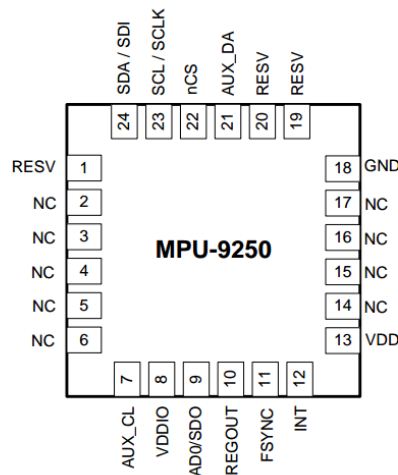
Figura 38 – Esquemático de Aplicação do MPU-9250 com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

A Figura 39 apresenta o componente MPU-9250 e sua configuração de pinos.

Figura 39 – Configuração de pinos da MPU-9250



Fonte: InvenSense Inc (2016)

O dispositivo exige uma tensão de alimentação VDD de 2,4V a 3,6V e corrente de operação máxima de 3,7mA.

5.2.2.6 Motores de Passo

Os motores de passo utilizados nos protótipos são necessários para controlar os eixos da estrutura garantindo a alteração de orientação necessária para o painel solar. Uma estrutura mecânica foi desenvolvida para que os motores com o auxílio de controle próprio e componentes extras, como eixos, engrenagens e rolamentos, possam movimentar o painel solar em dois eixos distintos cobrindo os variáveis ângulos de incidência solar ao longo do dia.

O motor de passo escolhido para este projeto trata-se do modelo 28byj-48-5V da Welten Holdins Ltd trata-se de um motor de passo unipolar com redução de

1/64, isto significa que é possível dar uma volta completa com 4096 passos, ou seja, aproximadamente $0,088^\circ$ por passo.

Um motor de passo quando não está sendo alimentado tem seu eixo de rotação livre, tendo apenas o seu torque do atrito estático próprio da modelagem mecânica, portanto no protótipo de controle também serão utilizados motores para garantir que o painel se mantenha numa orientação fixa, também com o intuito de não gerar modificações consideráveis de projeto para o protótipo de controle, mantendo-os o mais idêntico possível.

A Figura 40 apresenta o motor de passo 28byj-48-5V.

Figura 40 – Motor de passo 28byj-48-5V



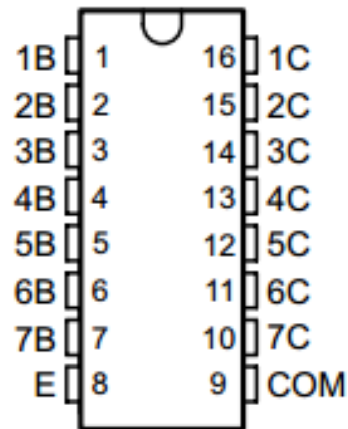
Fonte: Welten Holdings Ltd (2012)

Um driver de motor é utilizado em conjunto com o motor de passo para converter os sinais de controle com baixa corrente fornecidos pelo microcontrolador para sinais de potência capazes de fornecer a quantidade de corrente necessária para os pinos de entrada do motor. O driver escolhido para o projeto é o de modelo ULN2003 da Texas Instruments.

A Figura 41 apresenta o componente ULN2003 e sua configuração de pinos, enquanto que a Figura 42 apresenta o módulo de avaliação do ULN2003 utilizado neste projeto.

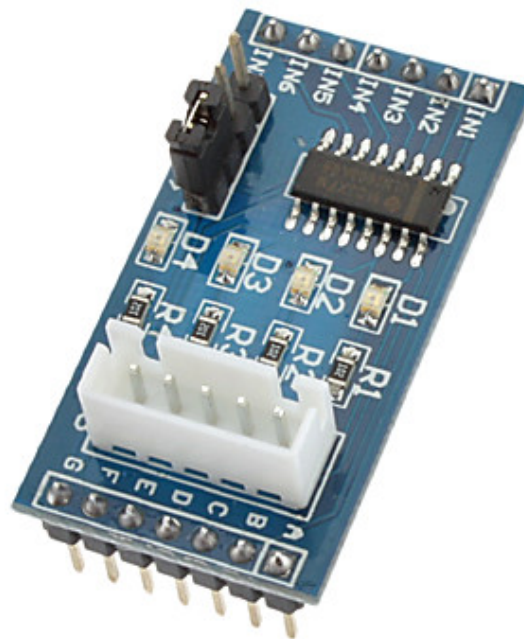
Figura 41 – Configuração de pinos do driver ULN2003

**D, N, NS, and PW Package
16-Pin SOIC, PDIP, SO, and TSSOP
Top View**



Fonte: Texas Instruments (1976)

Figura 42 – Módulo de Avaliação do ULN2003



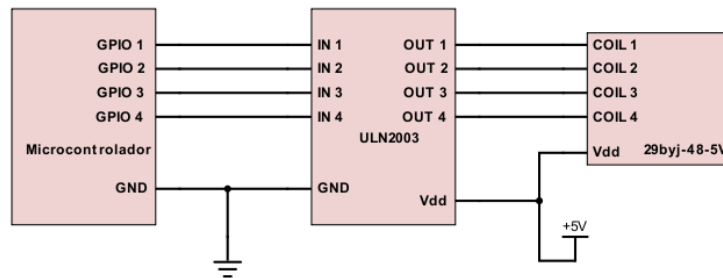
Fonte: Ada (2014)

Como este é um motor de 4 fases, ao utilizar a matriz de transistores Darlington presente no ULN2003 como driver de motor de passo será necessário utilizar 4 das 7 portas neste disponíveis, e conseqüentemente 4 GPIOs serão necessárias para a interface de cada driver com o microcontrolador, considerando o uso de dois motores 28byj48 e dois drivers ULN2003 serão necessários 8 portas GPIO no microcontrolador.

A Figura 43 apresenta as conexões citadas entre o motor de passo 28byj-48-5V,

o driver ULN2003 e o microcontrolador.

Figura 43 – Esquemático de Aplicação do Motor de Passo com o ULN2003 e com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

Cada motor de passo necessita uma tensão de alimentação de $5V$ podendo consumir uma corrente máxima de $200mA$, e cada driver exige uma tensão de alimentação de $3,3V$ a $5,5$ e uma corrente máxima de entrada de $1mA$ por porta.

5.3 Datalogger

Um datalogger (gravador de dados) é utilizado para que o usuário possa acessar e visualizar dados salvos em dias, meses ou anos anteriores de operação dos protótipos, assim facilitando a análise e comparação dos dados de desempenho e sensoriamento dos sistemas.

É importante que tais dados sejam registrados de forma clara para o usuário, informações sobre quando cada dado foi registrado são importantes para garantir que os arquivos de registro sejam salvos com nomes referentes a data atual, como também saber exatamente quando o sistema iniciou sua operação e em que instante de tempo cada dado foi registrado, para garantir tal funcionalidade, um relógio de tempo real embarcado está presente neste sistema.

O protótipo seguidor solar ativo de dois eixos e o protótipo de controle não possuem comunicação cabeada entre si, portanto para facilitar o procedimento de registro de dados, os mesmos serão salvos apenas por um dos protótipos. Entretanto, para que o protótipo responsável pelo registro dos dados possa ter acesso aos dados de sensoriamento do outro protótipo, estes se comunicam através de transceptores de rádio-frequência.

Os dados são salvos em uma mídia física removível micro SD, que pode ser utilizada em um computador para armazenamento externo ou restauração dos dados.

5.3.1 Relógio de Tempo Real

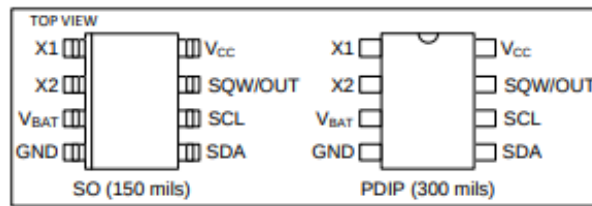
Um relógio de tempo real (RTC) é um dispositivo eletrônico, geralmente sob a forma de um circuito integrado, que mantém o controle do tempo presente. O RTC

serve para dar sentido aos dados coletados, pois ele indica quando cada dado foi salvo, mostrando do dia ao minuto.

O dispositivo RTC escolhido para este projeto é o DS1307 da Maxim Integrated Products Inc. O DS1307 é um relógio/calendário decimal de baixa potência com codificação binária, sendo que endereço e dados são transferidos serialmente através de protocolo de comunicação I2C.

A Figura 44 apresenta o componente DS1307 e sua configuração de pinos.

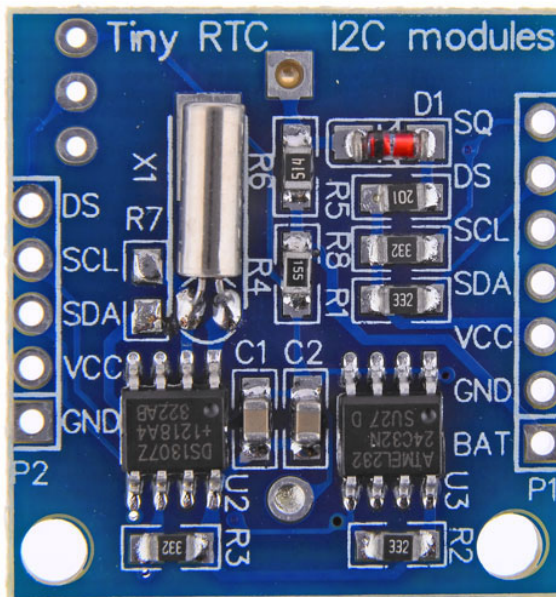
Figura 44 – Configuração de pinos do RTC DS1307



Fonte: Maxim Integrated Products Inc (2015)

A Figura 45 apresenta o módulo de avaliação do DS1307 utilizado neste projeto.

Figura 45 – Módulo de Avaliação do DS1307



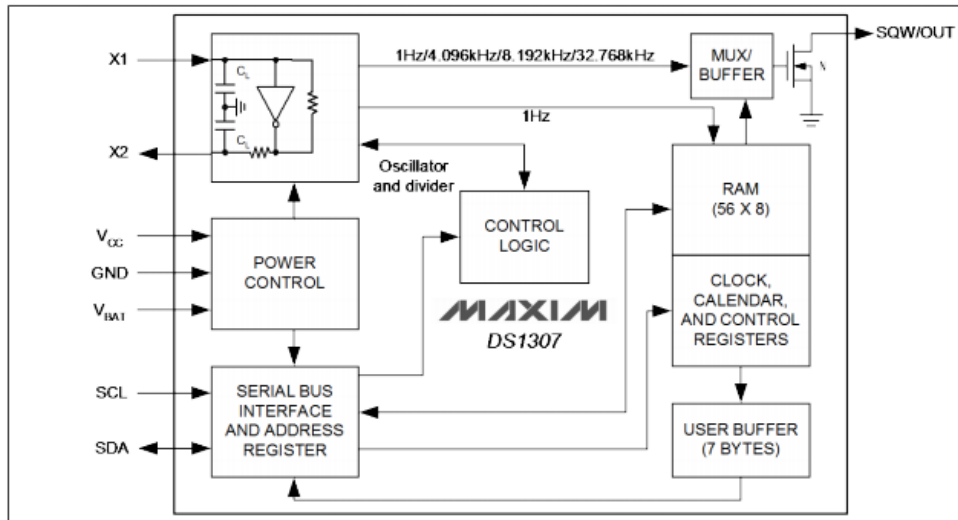
Fonte: Rocha et al. (2018)

O RTC fornece informações sobre segundos, minutos, horas, dia, data, mês e ano. O final da data do mês é automaticamente ajustado para meses com menos de 31 dias, incluindo correções para o ano bissexto. O relógio funciona no formato de 24 ou 12 horas com o indicador AM/PM. O DS1307 possui um circuito integrado de detecção de energia que detecta falhas de energia e alterna automaticamente para o suprimento de backup. A operação de cronometragem continua enquanto a peça opera a partir do

suprimento de backup.

A Figura 46 apresenta o diagrama de bloco funcional para o RTC DS1307.

Figura 46 – Diagrama de bloco funcional para o RTC DS1307

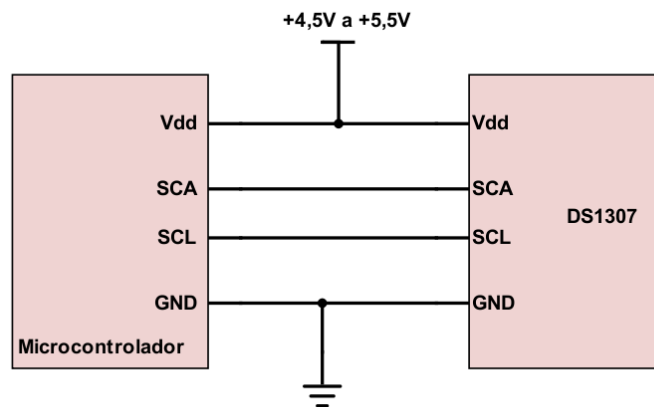


Fonte: Maxim Integrated Products Inc (2015)

Como pode-se observar na Figura 46 este se comunica através de um barramento de comunicação serial I2C, e não possui configuração de endereço de escravo, o endereço I2c deste dispositivo é 0x68.

A Figura 47 apresenta as conexões citadas para o uso do DS1307 com o microcontrolador.

Figura 47 – Esquemático de Aplicação do DS1307 com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

O relógio de tempo real DS1307 exige uma alimentação de 4,5V a 5,5V e um consumo máximo de corrente de 1,5mA.

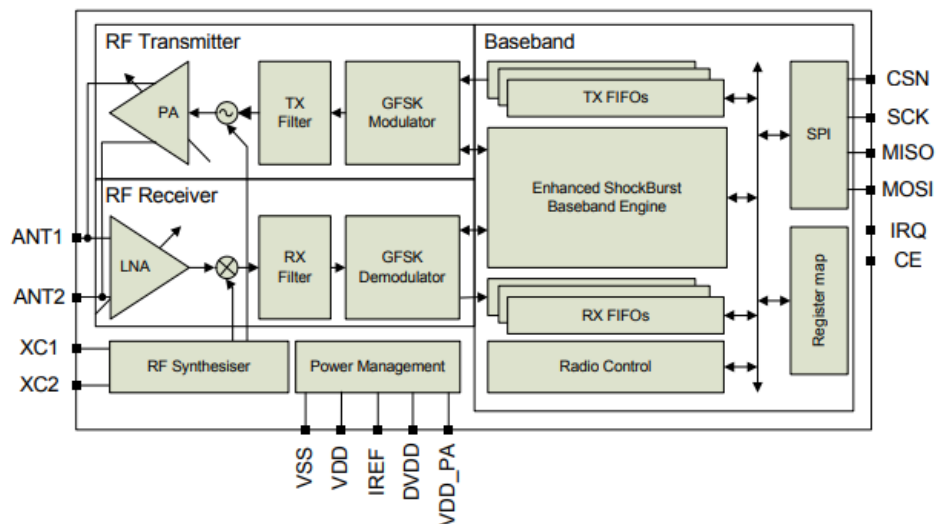
5.3.2 Transceptor de Rádio-Frequência

Um transceptor de rádio-frequência nada mais é do que um dispositivo de comunicação capaz de transmitir e receber dados por meio de radio-frequência.

O principal propósito do transceptor de rádio-frequência neste sistema está na transmissão de mensagens que contenham informações dos sensores embarcados no protótipo de controle e na recepção destas mensagens pelo protótipo de experimento para que este possa registrá-los em memória física e apresentá-los em servidor WEB.

Para este projeto fora escolhido o transceptor nRF24L01+, este transceptor de baixíssimo custo é capaz de realizar comunicações de até 2Mbps utilizando a banda de frequência ISM (Industrial, Scientific and Medical Radio Bands) em 2,4GHz com modulação GFSK, consumindo picos de corrente para transmissão e recepção inferiores a 14mA, possuindo 3 buffers FIFOs (First In, First Out) de 32 bytes para mensagens de transmissão e recepção, simplificando assim seu uso com microcontroladores de baixo custo por não exigir requisitos críticos de tempo para a recepção e envio de mensagens sem perda de dados (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2008).

A Figura 48 apresenta o diagrama de bloco funcional para o NRF24L01+.
 Figura 48 – Diagrama de bloco funcional para o transceptor NRF24L01+

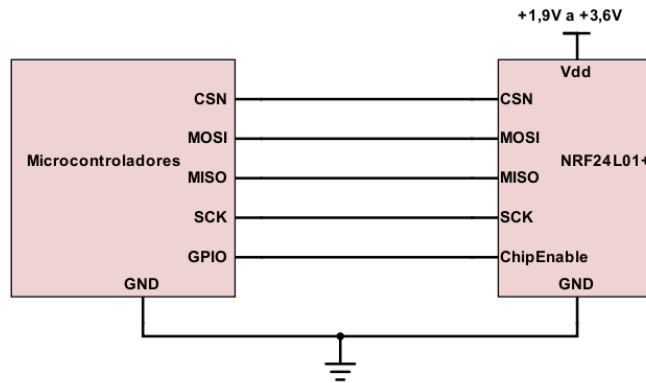


Fonte: Nordic Semiconductor (2008)

A comunicação NRF24L01+ é via barramento de comunicação SPI utilizando as portas CSN, MOSI, MISO, SCK e o pino de CE (Chip Enable) para ativar a comunicação.

A Figura 49 apresenta as conexões citadas para o uso do nRF24L01+ com o microcontrolador.

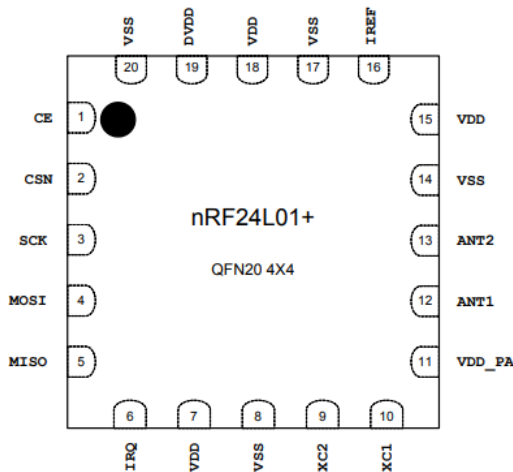
Figura 49 – Esquemático de Aplicação do nRF24L01+ com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 50 podemos verificar um dos modelos de encapsulamento do transceptor de rádio-frequência NRF24L01+ e sua configuração de pinos.

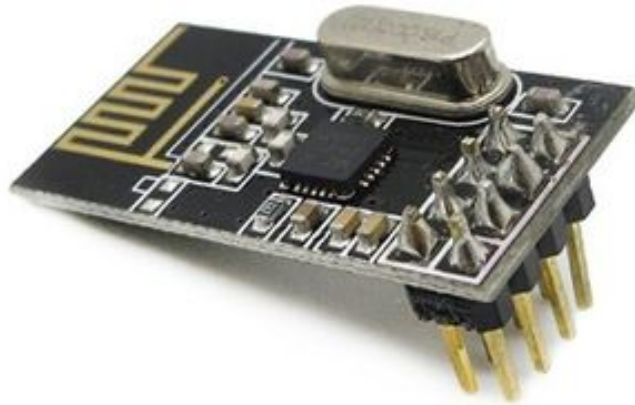
Figura 50 – Configuração de pinos do transceptor NRF24L01+



Fonte: Nordic Semiconductor (2008)

A Figura 51 apresenta o módulo de avaliação do transceptor NRF24L01P utilizado neste projeto.

Figura 51 – Módulo de Avaliação do NRF24L01+



Fonte: ITEAD Intelligent Systems Co.Ltd (2015)

O transceptor de rádio-frequência exige uma alimentação de tensão de $1,9V$ a $3,6V$ e em seu consumo máximo uma corrente de $13,5mA$.

5.3.3 Gravador e Leitor de Cartões Secure Digital

Cartões Secure Digital (sigla SD) são pequenos cartões de memória não voláteis desenvolvidos pela SD Card Association.

O módulo gravador microSD é responsável por gravar os dados de sensoriamento coletados dos protótipos em um arquivo de texto presente na memória não volátil do cartão microSD ou microSDHC, este cartão poderá ser facilmente retirado do módulo gravador e introduzido em qualquer outro sistema compatível com a mídia, tais como notebooks e smartphones, onde então os dados registrados pelo sistema poderão ser observados pelo usuário interessado.

Fora utilizado um gravador microSD genérico, sem informações detalhadas sobre fabricante ou PartNumber, em sua placa de circuito impresso há apenas um link morto para uma loja chinesa que já não atua mais no mercado. Logo para este componente não foi localizada documentação oficial, porém como se trata de um componente genérico as configurações do mesmo são amplamente divulgadas em sites que o comercializam.

A Figura 52 apresenta o módulo de avaliação do gravador microSD escolhido.

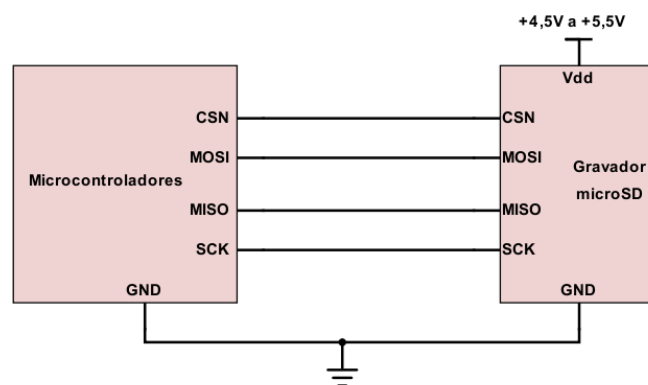
Figura 52 – Módulo de Avaliação do Gravador microSD



Fonte: Shenzhen Kaizhen Electronics Co. Ltd. (2013)

O modelo escolhido possui suporte para cartões Micro SD e Micro SDHC de alta velocidade. A comunicação deste gravador com o microcontrolador ocorre através do protocolo SPI utilizando as pinagens CSN, MOSI, MISO e SCK. A Figura 53 abaixo apresenta as conexões citadas para o uso do Módulo Gravador microSD com o microcontrolador.

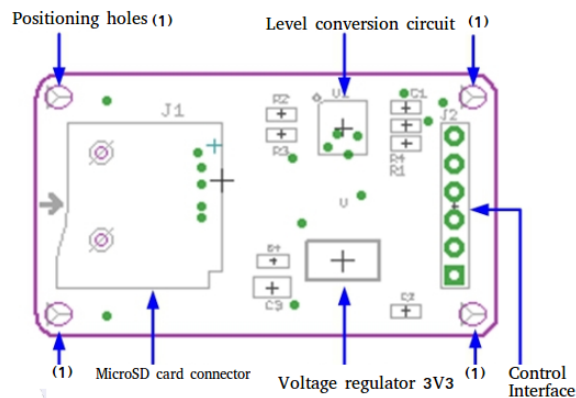
Figura 53 – Esquemático de Aplicação do Módulo Gravador microSD com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

Abaixo a Figura 54 apresenta o uma vista simplificada dos componentes do módulo gravador microSD escolhido.

Figura 54 – Descrição dos componentes no módulo gravador microSD



Fonte: Shenzhen Kaizhen Electronics Co. Ltd. (2013)

O módulo gravador escolhido exige uma alimentação de $4,5V$ a $5,5V$ com um consumo máximo de corrente estimado de $200mA$.

5.4 Interface Remota e Depuração

Este sistema embarcado proposto é composto de inúmeros componentes complexos que realizam alguma forma de comunicação com o microcontrolador, cada componente pode vir a operar de forma inadequada e a identificação remota do problema costuma ser impossível. Para facilitar os testes unitários e de integração dos componentes no sistema embarcado uma interface serial Bluetooth é adicionada ao sistema embarcado com o propósito de repassar informações de comunicação de sensores e módulos presentes no sistema embarcado para esta interface, de forma que o programador ou administrador do sistema tenha facilidade em depurar possíveis erros de software.

Com o sistema funcionando adequadamente e realizando o registro de dados na mídia física através de um gravador microSDHC ainda é difícil para que um usuário possa avaliar o comportamento do sistema no dia em questão, para tal um servidor WEB é proposto para funcionar na rede IEEE WiFi 802.11 b/g/n local, onde qualquer usuário também conectado a esta rede poderá acessar a página do servidor, inserir suas credenciais e obter informações do comportamento do sistema.

5.4.1 Interface Serial Bluetooth

Como todos os celulares e boa parte dos computadores já possuem compatibilidade com comunicação Bluetooth, um protocolo padrão de comunicação sem fio, a possibilidade do sistema embarcado transmitir informações via Bluetooth garante praticidade no monitoramento do comportamento do sistema.

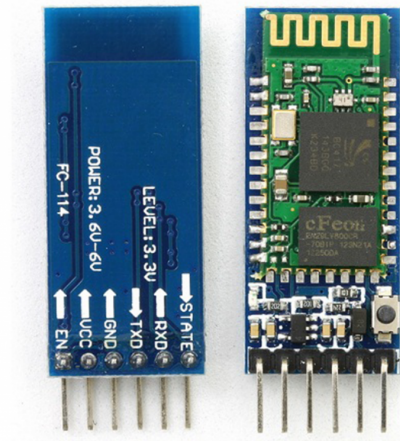
Um componente do sistema embarcado irá enviar mensagens de texto através de uma interface serial Bluetooth, repassando mensagens de estados e comunicação

interna do microcontrolador, assim um administrador ou programador do sistema que possua a chave de acesso para o emparelhamento do seu dispositivo Bluetooth com o transceptor do sistema embarcado, poderá por meio de inúmeras possibilidades de aplicativos ou programas, visualizar as mensagens sendo recebidas através de sua interface serial Bluetooth.

O dispositivo Bluetooth escolhido para este projeto é o modelo HC05, sendo este um módulo genérico sem documentação técnica específica, pois o mesmo é produzido por uma pequena empresa para utilização em projetos acadêmicos simples e pequenos projetos amadores.

A Figura 55 apresenta o módulo de avaliação do Bluetooth HC-05 utilizado neste projeto.

Figura 55 – Módulo de Avaliação do Bluetooth HC-05

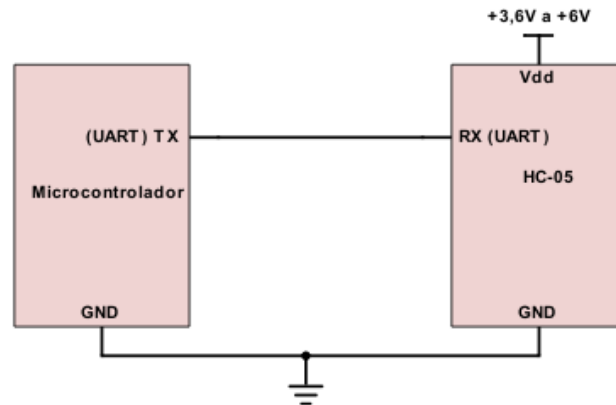


Fonte: Velázquez (2015)

A comunicação do dispositivo Bluetooth com o microcontrolador é feita por protocolo UART, utilizando os pinos Tx e Rx.

A Figura 56 abaixo apresenta as conexões citadas para o uso do HC-05 com o microcontrolador.

Figura 56 – Esquemático de Aplicação do HC-05 com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

O módulo Bluetooth HC-05 exige uma tensão de alimentação de 3,6V a 6V e um consumo máximo de corrente de 40mA.

5.4.2 Servidor WEB

A comunicação com a rede WiFi IEEE 802.11 b/g/n existente se dá por meio do microchip Wi-Fi ESP8266 da Espressif Systems, que é instalado no protótipo de experimento.

O microchip ESP8266 possui uma interface serial UART com qual este se comunica com o microcontrolador desta unidade para receber informações que serão necessárias para o servidor WEB, tais como dados de sensoriamento, e também para transmissão de informações de formulários preenchidos pelo usuário credenciado no servidor WEB a ser programado ou para envio de informações atualizadas de data e hora obtidas online por meio de conexão com protocolo NTP (Network Time Protocol).

Caso este microchip não possua chave de acesso para nenhuma rede com criptografia WPA2-PSK existe no local, este estará programado para gerar uma rede de acesso Wi-Fi própria na qual um usuário poderá se conectar e informar os dados de SSID (Service Set Identifier) e senha para a rede WiFi desejada.

Existem inúmeros modelos distintos de módulos de avaliação para o microchip ESP8266, cada um liberando mais ou menos portas e características extras, tais como um conector micro-USB para alimentação e programação, podendo exigir antenas externas ou já possuindo antena impressa na própria PCB (Printed Circuit Board) do módulo.

Neste projeto o microchip possui as seguintes funcionalidades previstas:

- Manter o servidor HTML na rede local;
- Monitorar a conectividade na rede WiFi existente podendo gerar um ponto de acesso separado caso a conexão caia ou se mantenha inativa por um período

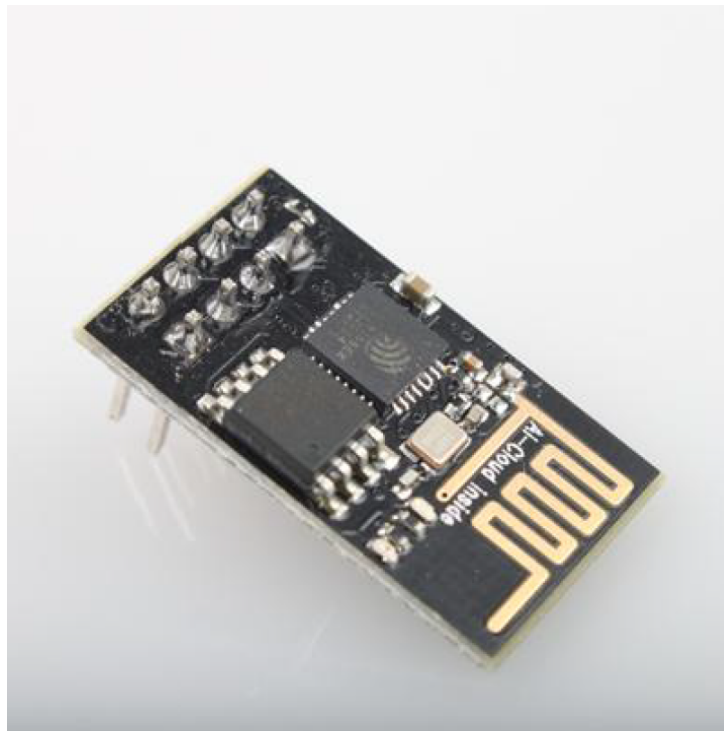
prolongado;

- Desligar o ponto de acesso e reconectar a rede WiFi determinada caso a conexão volte a ser possível e esgote o tempo de espera por um usuário informar dados de login em uma nova rede WiFi;
- Obter dados de data e hora atualizados através de um servidor NTP;
- Enviar e-mails diários informando o resultado da coleta de dados ao usuário cadastrado no servidor HTML;
- Receber, via barramento UART, informações de sensoriamento e modo de operação do microcontrolador presente no protótipo de experimento;
- Informar, via barramento UART, dados de formulário e hora atualizados para o microcontrolador presente no protótipo de experimento;

Observa-se que o único requisito de comunicação em barramento esperado para o projeto com este microchip está na interface serial UART, portanto o módulo de avaliação mais simples e barato do mercado já é suficiente para a aplicação desejada, portanto será utilizado o módulo de avaliação “ESP-01”.

A Figura 57 apresenta o módulo de avaliação ESP-01 utilizado neste projeto.

Figura 57 – Módulo de Avaliação ESP-01 do Microchip ESP8266



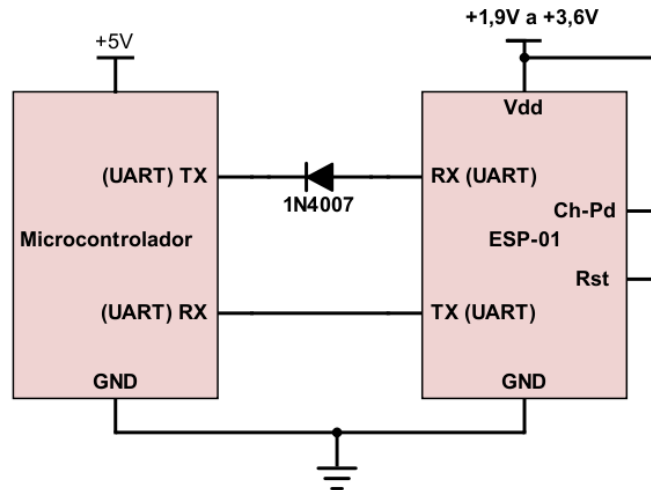
Fonte: Shenzhen Anxinke Technology CO LTD (2015)

Ao considerar o uso de um microcontrolador que opera com uma alimentação de $+5V$ é importante atentar ao fato de que o módulo ESP-01 não tolera valores de tensão superiores a $+3,6V$ em sua porta de entrada UART, porém a transmissão de um sinal de $3,3V$ do ESP-01 será recebida adequadamente por um microcontrolador que opere em $5V$. Para garantir que durante a transmissão de dados pelo microcontrolador

este não danifique o módulo ESP-01 uma simples alteração de circuito proposta está em adicionar um diodo no circuito de comunicação.

A Figura 58 abaixo apresenta as conexões citadas para o uso do módulo ESP-01 com o microcontrolador.

Figura 58 – Esquemático de Aplicação do ESP-01 com o microcontrolador



Fonte: Autor (2018)

O módulo ESP-01 exige uma tensão de alimentação de 3,0V a 3,6V e um consumo máximo de corrente de 80mA.

5.5 Definição do Microcontrolador

Para definir quais microcontroladores podem ser usados no projeto é necessário analisar os requisitos de comunicação dos componentes. A Tabela 4 apresenta os requisitos de funcionamento dos sensores e demais dispositivos:

Tabela 4 – Portas de Entrada e Saídas Exigidas no Microcontrolador

Componente	Porta de Comunicação
LM35	ADC 10bits
TSL2561	I2C ou SMBus
INA219	I2C ou SMBus
ADS1015	I2C ou SMBus
MPU9250	I2C ou SPI
ULN2003	8 Portas GPIO
DS1307	I2C
nRF24L01+	SPI e 1 Porta GPIO
Gravador microSD	SPI e 1 Porta GPIO
HC05	2 Portas GPIO (Comunicação UART)
ESP-01	2 Portas GPIO (Comunicação UART)

Fonte: Autor (2018)

Conforme pode ser visto na Tabela 4 acima, alguns componentes, tal como

o TSL2561, podem utilizar tanto comunicação via I2C como SMBus, enquanto que o componente DS1307 pode se comunicar somente utilizando protocolo I2C. Dessa forma, de modo a simplificar a escolha de um microcontrolador compatível com a comunicação exigida no projeto foi optado pela comunicação I2C para todos os componentes citados que a aceitam.

Em resumo, as portas de entrada e saídas exigidas para o microcontrolador são:

- 1 canal ADC 10bits;
- Interface Serial I2C;
- 2 Interfaces Seriais UART;
- Interface Serial Mestre/Escravo SPI;
- 10 portas GPIO;

Com o objetivo de garantir as funcionalidades propostas reduzindo o tempo de projeto quanto a programação do microcontrolador para seu devido funcionamento com cada sensor e instrumento listado, o primeiro microcontrolador proposto para este projeto é o ATmega328p da empresa Atmel Corporation que pode facilmente ser encontrado no mercado por baixíssimo custo devida a sua enorme popularidade em desenvolvimento de projetos de sistemas autônomos que exigem microcontroladores de baixo custo e fácil desenvolvimento.

O microcontrolador ATmega328p é facilmente encontrado no encapsulamento DIP (Dual in-line Package) ou em placas prontas em plataformas de desenvolvimento Arduino. Para este projeto é proposto o uso da placa de desenvolvimento Arduino Pro Mini 5V 16Mhz.

A Tabela 5 abaixo visa explicitar os requisitos cumpridos pelo microcontrolador ATmega328p.

Tabela 5 – Requisitos cumpridos pelo Microcontrolador ATmega328p

Microcontrolador	Requisitos exigidos				
	ADC 10bits	I2C	2 UART	SPI	10 P.GPIO
ATmega328p					
14 canais ADC 10bits	x				
Interface Serial I2C		x			
Interface Serial UART			x		
Interface Serial M/E SPI				x	
22 Portas GPIO			x		x

Fonte: Autor (2018)

Como pode-se observar o microcontrolador ATmega328p possui apenas uma interface UART disponível, porém uma segunda interface pode ser emulada utilizando portas GPIO que estiverem disponíveis.

Apesar deste microcontrolador cumprir todos os critérios de forma unitária é importante avaliar que algumas das portas do microcontrolador possuem múltipla funcionalidade.

A Tabela 6 apresenta a conectividade sugerida dos componentes com o microcontrolador ATmega328p.

Tabela 6 – Conectividade com as portas do microcontrolador ATmega328p

Porta	Propósito
0	UART RX (ESP-01 TX)
1	UART TX (ESP-01 RX)
2	STEPPER MOTOR 1 COIL 1
3	STEPPER MOTOR 1 COIL 2
4	STEPPER MOTOR 1 COIL 3
5	STEPPER MOTOR 1 COIL 4
6	NC
7	SOFTWARE UART TX (HC05 RX)
8	CE (DATA LOGGER)
9	CE (nRF24L01+)
10	SPI (CSN)
11	SPI (MOSI)
12	SPI (MISO)
13	SPI (SCK)
A0	STEPPER MOTOR 2 COIL 1
A1	STEPPER MOTOR 2 COIL 2
A2	STEPPER MOTOR 2 COIL 3
A3	STEPPER MOTOR 2 COIL 4
A4	I2C (SDA)
A5	I2C (SCL)
A6	ADC LM35
A7	NC

Fonte: Autor (2018)

Como pode-se observar é possível utilizar um microcontrolador ATmega328P para cumprir todas as conexões exigidas ainda deixando duas portas disponíveis.

A placa de desenvolvimento Arduino Pro Mini 5V 16Mhz exige uma alimentação de 5V a 12V com um consumo máximo de corrente de 200mA.

5.6 Alimentação de Componentes

Tendo detalhado todos os componentes que fazem parte do sistema embarcado e como eles se comunicam entre si, o próximo passo é avaliar como alimentar todos estes componentes de forma a garantir que não ocorra queda de energia em algum componente devido a falta de corrente durante seu funcionamento.

A Tabela 7 apresenta a alimentação exigida por todos os componentes e a corrente máxima (extremo pior caso) que estes podem exigir.

Tabela 7 – Critérios de Alimentação dos Componentes Eletrônicos

Dispositivo	Tensão de Alimentação	Corrente Máxima
ADS1015	2,0V - 5,5V	2,0 μ A
LM35	4,0V - 30,0V	60,0 μ A
TSL2561	2,7V - 3,6V	0,6mA
INA219	3,0V - 5,5V	1,0mA
DS1307	4,5V - 5,5V	1,5mA
MPU9250	2,4V - 3,6V	3,7mA
2 \times ULN2003	3,3V - 5,5V	4,0mA
nRF24L01+	1,9V - 3,6V	13,5mA
HC05	3,6V - 6,0V	40,0mA
ESP-01	3,0V - 3,6V	80,0mA
Gravador microSD	4,5V - 5,5V	200,0mA
Arduino Pro Mini 5V/16MHz	5,0V - 12,0V	200,0mA
2 \times 28byj-48	5,0V - 12,0V	400,0mA
Total		\approx 950mA

Fonte: Autor(2018)

Como pode-se observar na Tabela 7 todos os componentes exigem uma alimentação de +3,3VDC ou +5VDC garantindo apenas uma pequena tolerância para o valor de alimentação de entrada.

A Tabela 8 apresenta a alimentação proposta para cada componente.

Tabela 8 – Alimentação Proposta para Cada Componente

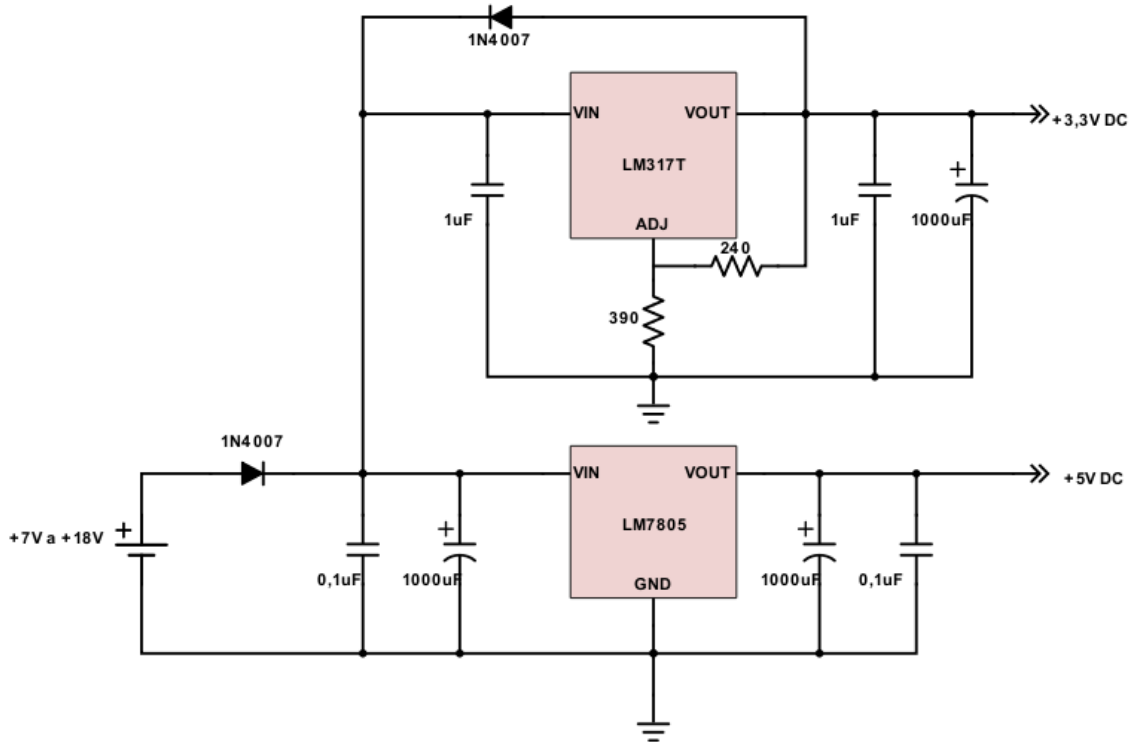
Dispositivo	+5V DC	+3,3V DC
ADS1015	x	
LM35	x	
INA219	x	
DS1307	x	
2 \times ULN2003	x	
HC05	x	
Gravador microSD	x	
Arduino Pro Mini 5V/16MHz	x	
2 \times 28byj-48	x	
TSL2561		x
MPU9250		x
nRF24L01+		x
ESP-01		x
Consumo Máximo de Corrente	\approx 850mA	\approx 100mA

Fonte: Autor(2018)

O regulador de tensão em um circuito integrado de tensão fixa LM7805 foi escolhido para garantir a alimentação de +5VDC, podendo ofertar até 1,5A. Reguladores de tensão fixa de 3,3V costumam ser encontrados apenas para aplicações em PCBs SMT (Surface-mount technology), portanto para este projeto fora escolhido o regulador de tensão linear ajustável LM317T para alimentar os componentes que exigem uma alimentação de 3,3V.

A Figura 59 apresenta o circuito esquemático proposto com os reguladores de tensão LM7805 e LM317T para prover as alimentação de 5V e 3,3V.

Figura 59 – Circuito Esquemático de Regulação de Tensão



Fonte: Autor (2018)

Para garantir os 5V na saída do regulador LM7805 é necessário garantir uma alimentação de pelo menos 7V na entrada.

5.7 Projeto dos Circuitos Eletrônicos

Alguns componente que utilizam o protocolo de comunicação I2C conseguem operar em mais de um endereço, entretanto dois componentes distintos não podem acessar o mesmo endereço, e é por esse motivo que a maioria dos fabricantes disponibiliza escolha de endereço de operação.

Na Tabela 9 abaixo são listados os endereços utilizados pelos componentes que utilizam comunicação I2C.

Tabela 9 – Endereçamentos de Comunicação I2C Possíveis dos Componentes

Endereço	TSL2561	INA219	ADS1015	MPU9250	DS1307
0x29	x				
0x39	x				
0x40		x			
0x41		x			
0x42		x			
0x43		x			
0x44		x			
0x45		x			
0x46		x			
0x47		x			
0x48		x	x		
0x49	x	x	x		
0x4A		x	x		
0x4B		x	x		
0x4C		x			
0x4D		x			
0x4E		x			
0x4F		x			
0x68				x	x
0x69				x	

Fonte: Autor (2018)

Como pode-se observar na Tabela 9 existe a possibilidade de conflito de endereço I2C para alguns componentes. O endereço hexadecimal 0x68 é o endereço I2C padrão para o DS1307 e o MPU9250, porém o DS1307 não possui endereço configurável, logo para utilizar o MPU9250 neste sistema torna-se necessário que este seja configurado para o endereço 0x69 ao criar um curto circuito entre sua porta AD0 e seu pino de alimentação positiva. Como o endereço padrão do INA219 é 0x40 e o ADS1015 é 0x48 nenhuma outra alteração é necessária para garantir sua integração ao barramento.

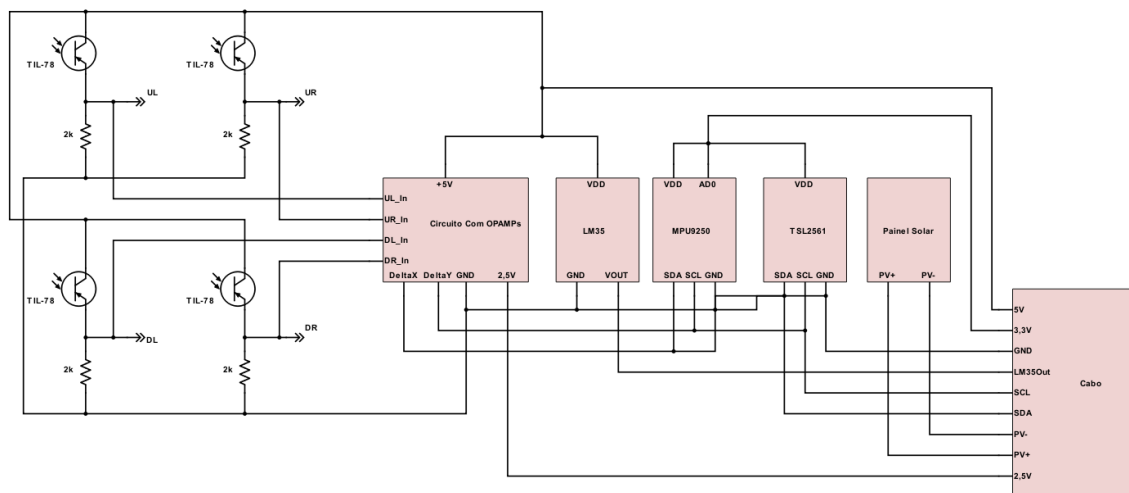
Com todas as informações de conectividade disponíveis inicia-se o desenvolvimento das placas de circuito impresso. O primeiro passo é montar o esquemático destacando toda a integração dos componentes com o microcontrolador definido para o projeto, definir a localização de cada componente em cada placa de circuito impresso e como cada trilha de circuito irá garantir as conexões previstas, para então realizar o processo artesanal de preparação das placas de circuito impresso propostas bem como o teste de conectividade para cada trilha de cada placa fabricada, para finalmente iniciar o processo de soldagem de componentes e montagem do sistema embarcado.

5.7.1 Circuitos Esquemáticos

Cada protótipo possui duas placas de circuito impresso, uma placa de 100x95mm fica escondida logo abaixo do painel solar, esta placa é responsável por distribuir o cabeamento repetidos entre os componentes interessados, tais como o cabeamento terra, caso esta placa não existisse seria necessária cabear repetidos fios de terra até a placa de circuito impresso presente na base da estrutura.

Foram propostos dois circuitos esquemáticos para a placa de circuito impresso de 100x95mm, na primeira proposta o balanceamento dos fototransistores ocorre através de um circuito com amplificadores operacionais, enquanto na segunda proposta os cálculos são realizados por software para os dados obtidos através do conversor analógico digital externo.

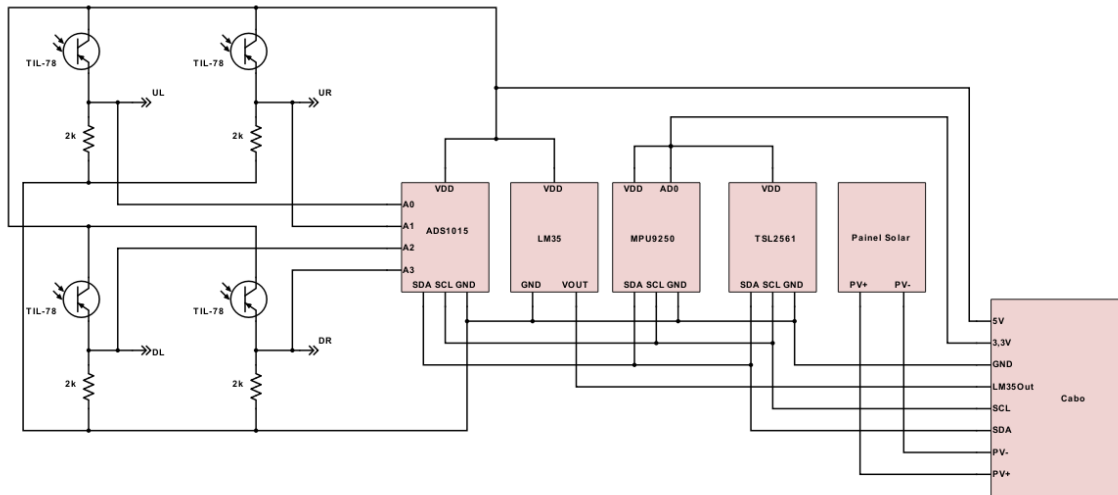
A Figura 60 apresenta a primeira proposta para o circuito esquemático para a placa de circuito impresso que está escondida atrás do painel solar, nesta proposta está incluso o circuito com amplificadores operacionais descrito na subseção 5.2.2.1. Figura 60 – Primeira Proposta de Circuito Esquemático para a Placa de Circuito Impresso Superior



Fonte: Autor (2018)

A Figura 61 apresenta a segunda proposta para o circuito esquemático para a placa de circuito impresso que está escondida atrás do painel solar.

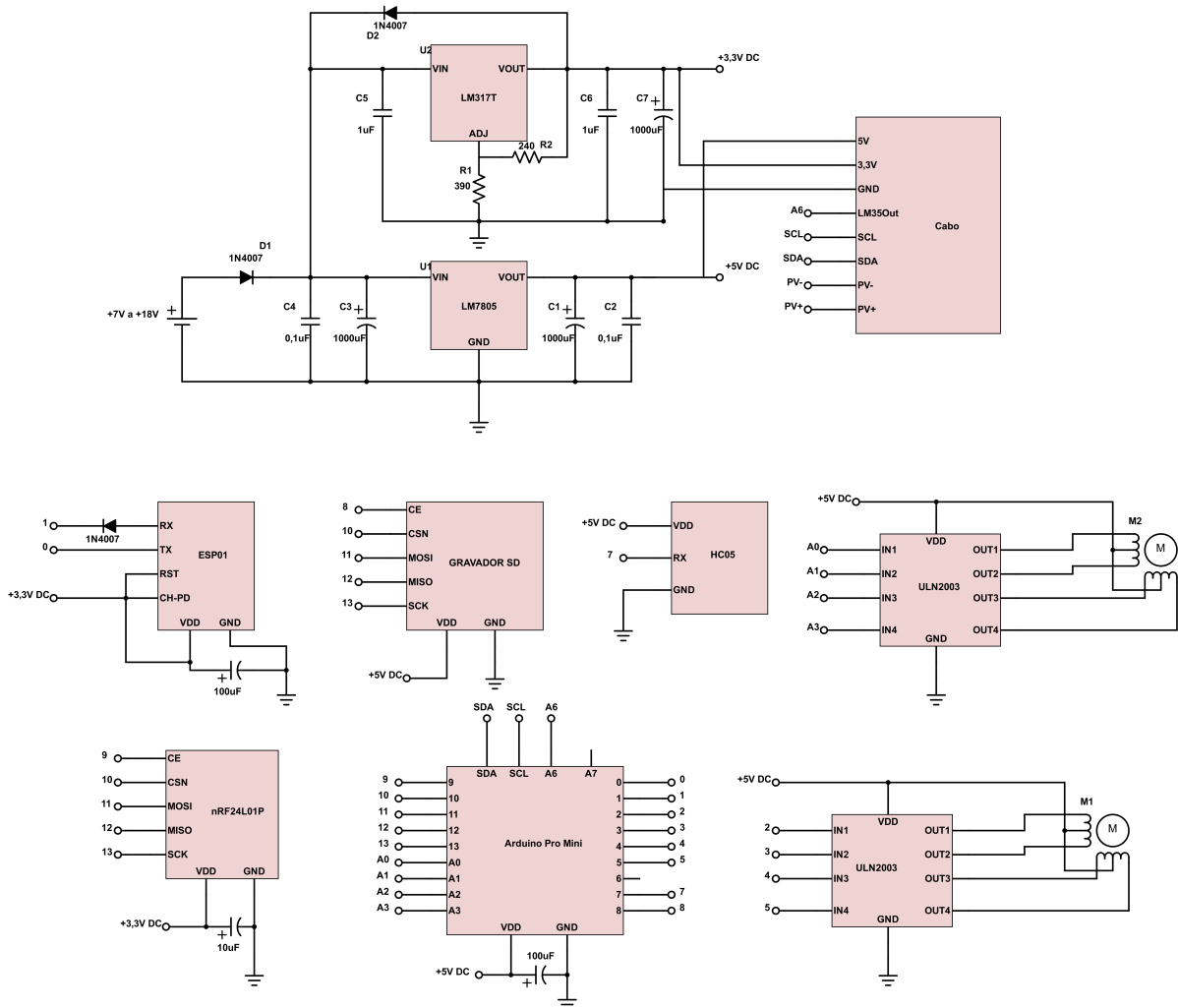
Figura 61 – Segunda Proposta de Circuito Esquemático para a Placa de Circuito Impresso Superior



Fonte: Autor (2018)

A Figura 62 apresenta o circuito esquemático para a placa de circuito impresso principal, onde o microcontrolador e o circuito de alimentação estão presentes.

Figura 62 – Circuito Esquemático para a Placa de Circuito Impresso Principal



Fonte: Autor (2018)

Como o circuito opera com uma entrada de tensão de $+7VDC$ a $+18VDC$ este pode ser utilizado com baterias de $+9VDC$ ou $+12VDC$, porém durante os testes unitários e integração do sistema o circuito foi alimentado com uma fonte externa de $+12VDC$, neste caso é importante avaliar a quantidade de corrente máxima que a fonte externa é capaz de ofertar para o circuito, pois conforme descrito este circuito poderá exigir até $1A$ de corrente.

A placas de circuito impresso propostas para o protótipo de experimento também serão utilizadas no protótipo de controle, a diferença está na ausência de componentes que serão soldados ou conectados nestas placas de circuito impresso.

5.7.2 Placas de Circuito Impresso

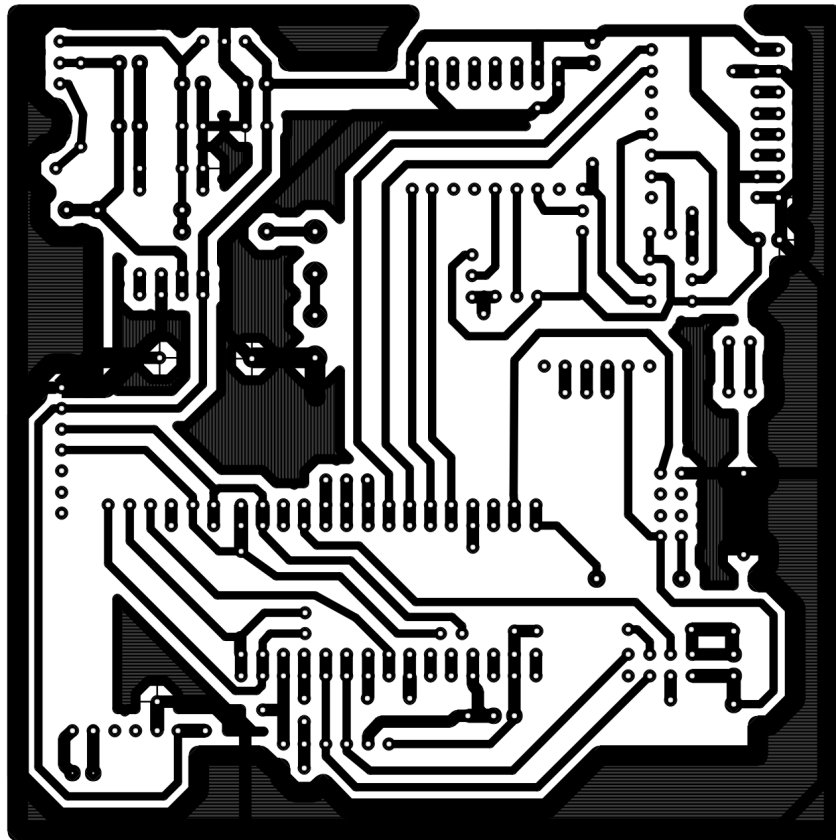
Uma placa de circuito impresso consiste em uma placa rígida onde são depositadas finas camadas de metal condutor chamadas de trilhas, que servem para conectar componentes eletrônicos, sendo que estrategicamente os componentes

eletrônicos são acoplados a esta placa em furações feitas normalmente nas trilhas.

Para os protótipos foram projetadas 2 placas de circuito impresso distintas, sendo cada uma delas duplicada em virtude da fabricação de dois protótipos, totalizando 4 placas de circuito impresso. A primeira placa compreende o circuito da eletrônica de potência com os reguladores de tensão, o microcontrolador, microchip Wi-Fi, drivers dos motores de passo, transceptor de rádio frequência, módulo Bluetooth, relógio de tempo real e datalogger, enquanto que a segunda placa compreende os sensores de orientação, luxímetro e o sensor de temperatura.

A Figura 63 apresenta a imagem a ser utilizada no processo de termotransferência para a preparação da placa de circuito impresso principal.

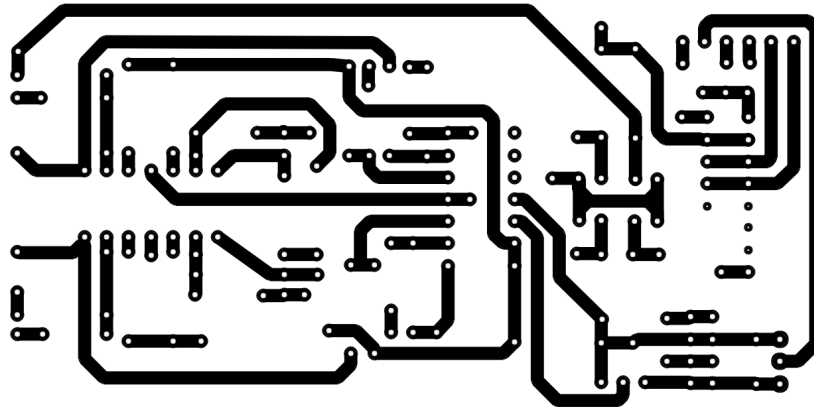
Figura 63 – Imagem utilizada no processo de termotransferência para a placa principal



Fonte: Autor (2018)

A Figura 64 apresenta a imagem a ser utilizada no processo de termotransferência para a preparação da placa de circuito impresso da primeira proposta de medição de desbalanceamento da matriz de fototransistores.

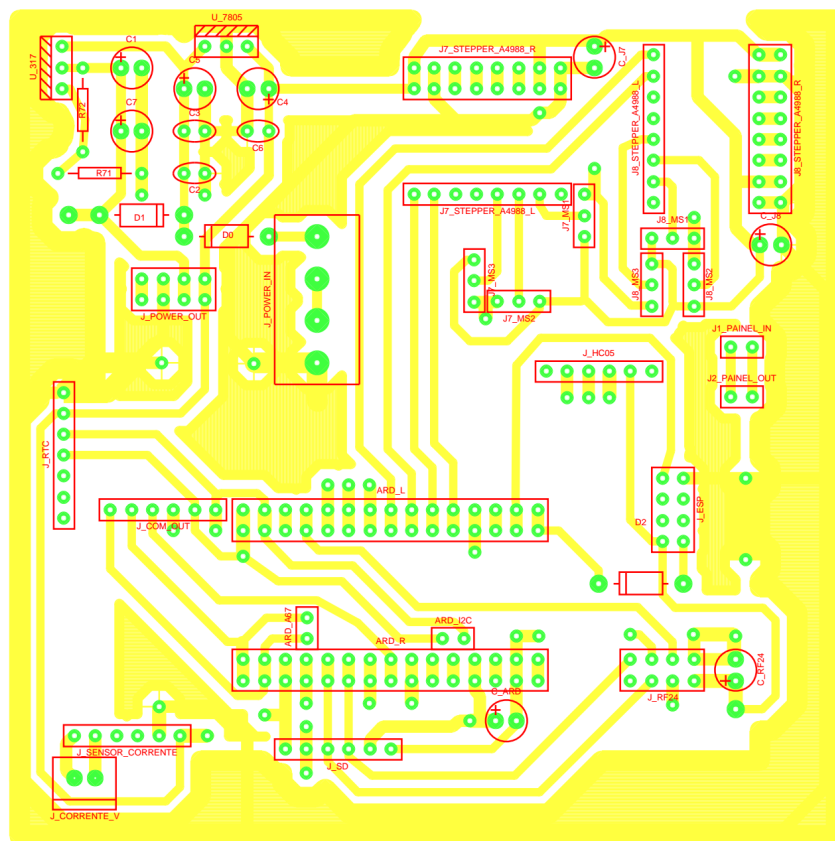
Figura 64 – Imagem utilizada no processo de termotransferência para a placa superior



Fonte: Autor (2018)

A Figura 65 apresenta a indicação dos componentes que serão soldados na placa de circuito impresso principal.

Figura 65 – Localização dos componentes na placa de circuito impresso principal



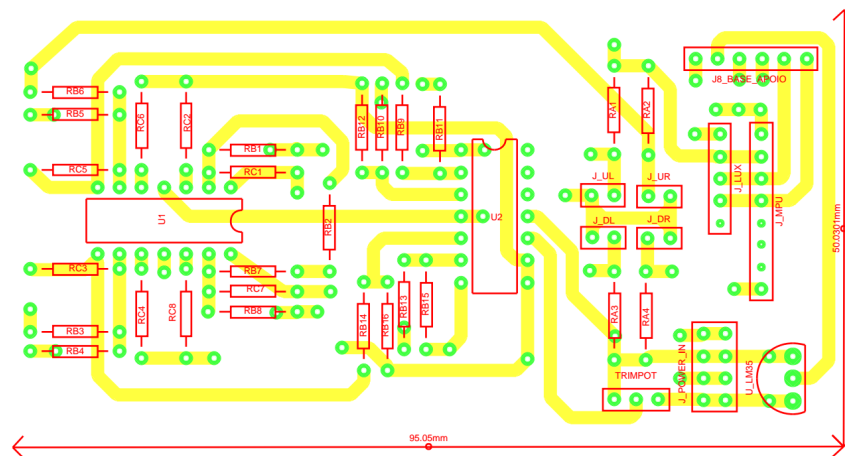
Fonte: Autor (2018)

Como pode-se observar esta placa fora projetada pensando no uso de dois drivers de passo A4988 no estado atual do projeto este driver foi substituído pelo ULN2003.

A Figura 66 apresenta a indicação dos componentes que serão soldados na

placa de circuito impresso superior.

Figura 66 – Localização dos componentes na placa de circuito impresso superior



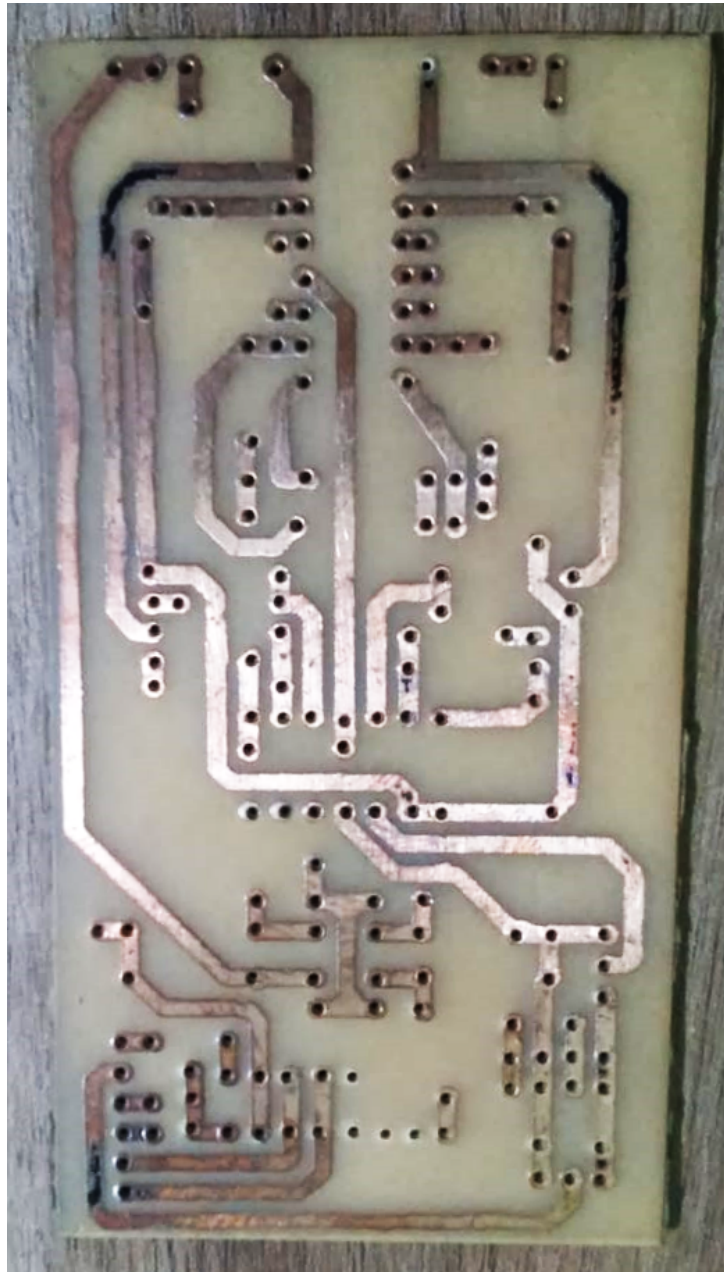
Fonte: Autor (2018)

A confecção das placas foi feita de forma artesanal por meio da termotransferência e a corrosão do cobre por percloroeto de ferro. Os passos que constituem a confecção de uma placa de circuito impresso consistem em:

- Impressão do desenho do circuito em folha especial;
- Transferência da tinta do desenho do circuito para a placa de fenolite (lado cobreado) por meio de aquecimento da folha especial;
- Imersão da placa com o desenho do circuito aderido em solução de percloroeto de ferro;
- Após alguns minutos, quando ocorre corrosão completa do cobre das áreas que não contemplam o desenho do circuito, limpeza para remoção tinta que ainda protege o cobre não corroído;
- Execução das furações pra encaixe dos componentes eletrônicos;
- Testes de conectividade para validar a confecção da placa.

A Figura 67 apresenta a placa de circuito impressa confeccionada artesanalmente através da transferência térmica com o uso da imagem citada na Figura 64 cujo circuito esquemático é descrito na Figura 60.

Figura 67 – Placa de Circuito Impresso Superior Confeccionada Artesanalmente

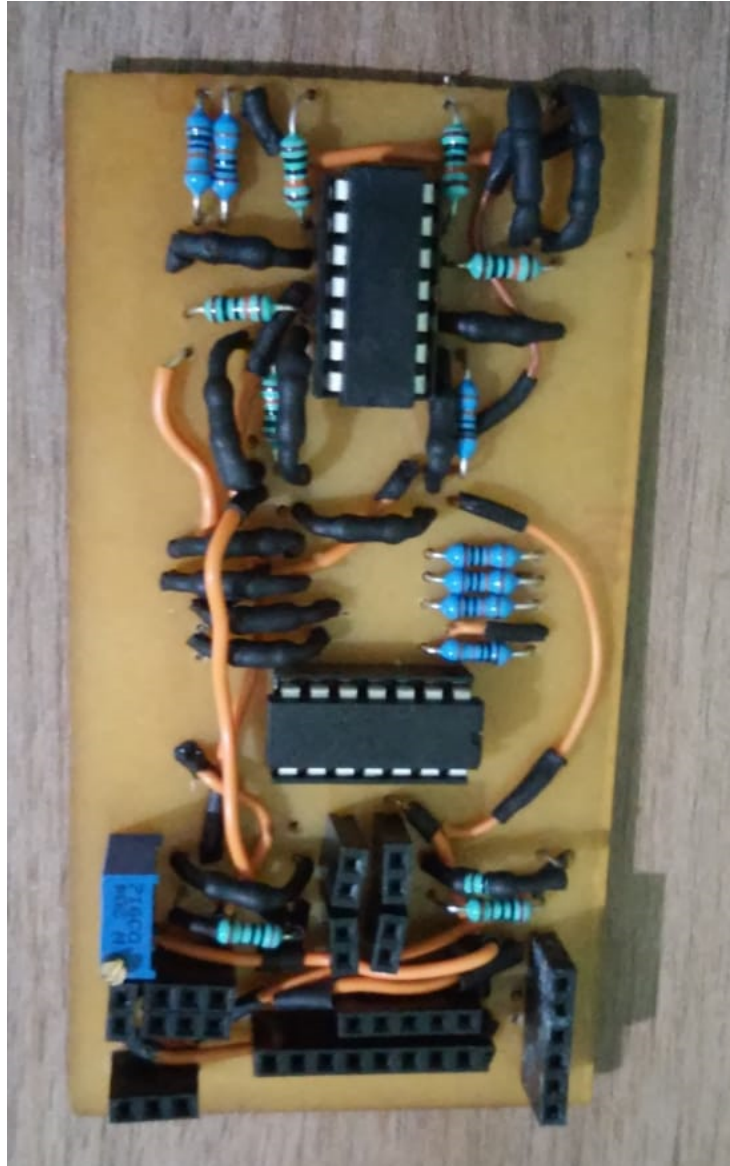


Fonte: Autor (2018)

Com as placas confeccionadas e trilhas conferidas, basta proceder com a soldagem dos componentes e o cabeamento.

A Figura 68 apresenta os componentes soldados e conectados à placa de circuito impresso superior confeccionada artesanalmente.

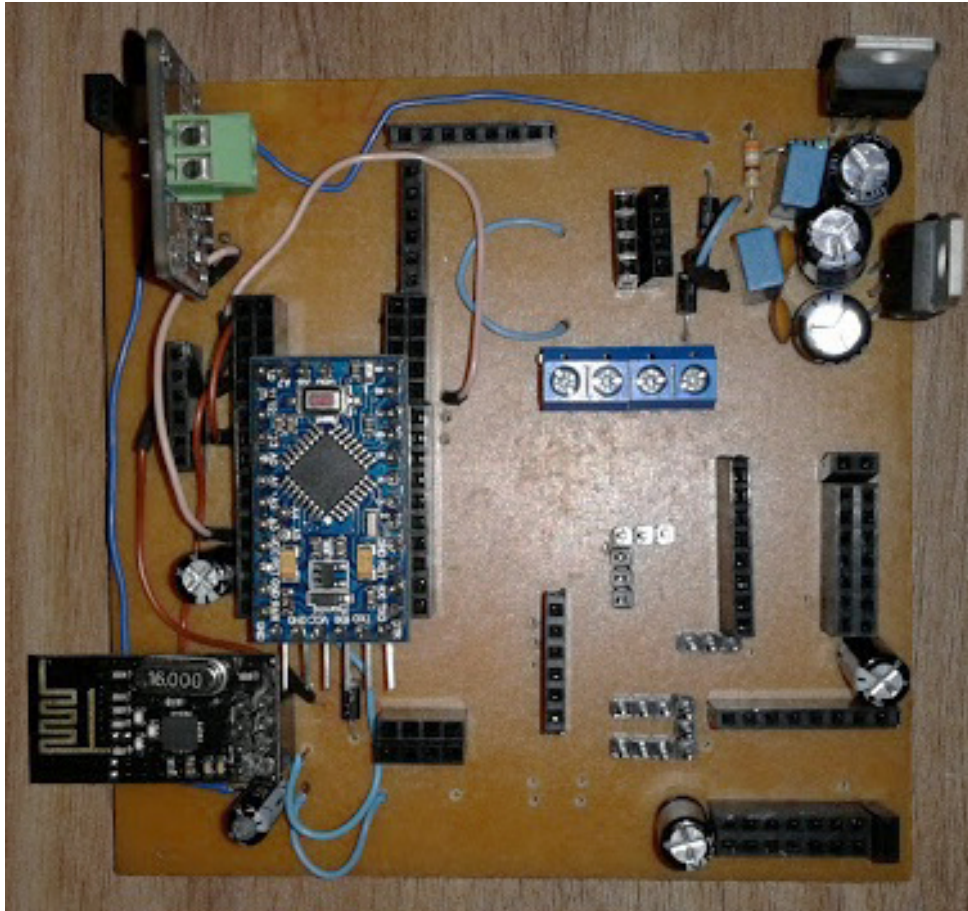
Figura 68 – Placa de Circuito Impresso Superior Montada



Fonte: Autor (2018)

A Figura 69 apresenta a placa de circuito impressa confeccionada artesanalmente através da transferência térmica com o uso da imagem citada na Figura 63 cujo circuito esquemático é uma versão anterior com pouca variação do esquemático descrito na Figura 62.

Figura 69 – Placa de Circuito Impresso do Protótipo de Controle



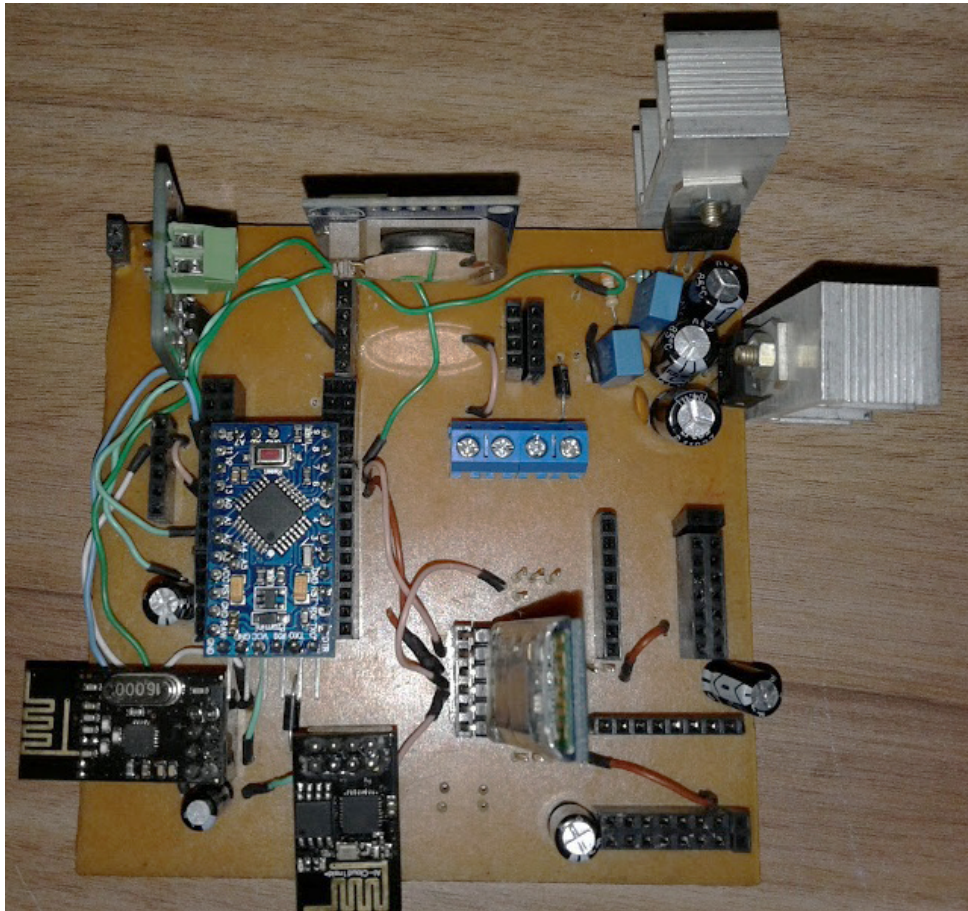
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 68 é possível observar o Arduino Pro Mini, o transceptor de rádio frequência nRF24L01+ e o monitor de potência INA219.

Não foram necessárias modificações na placa de circuito impresso para garantir que esta placa pudesse ser utilizada com o esquemático proposto na Figura 62, pois duas barras de pinos extras foram inseridas ao redor do microcontrolador para facilitar acesso de controle a suas portas de comunicação e também para modificações de projeto na placa serem possíveis, assim a fabricação de uma nova placa de circuito impresso não foi necessária, pois com o uso de jumpers é possível reconfigurar a conectividade com a porta desejada. A exemplo do driver A4988 que foi substituído pelo driver ULN2003 neste projeto, e desta forma as conexões do driver ULN2003 ocorrem diretamente nas barras de pinos extras nas laterais do Arduino Pro Mini.

A Figura 70 apresenta a placa de circuito impresso presente no protótipo de experimento.

Figura 70 – Placa de Circuito Impresso do Protótipo de Experimento



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 70 é possível observar o Arduino Pro Mini, o transceptor de rádio frequência, o INA219, o microchip Wi-Fi no módulo ESP-01, o módulo Bluetooth HC-05, o relógio de tempo real DS1307. Nesta imagem os drivers ULN2003 e o gravador SD não estão presentes.

5.8 Programação do Sistema Embarcado

Atualmente neste projeto apenas os seguintes componentes necessitam ser programados:

- Microcontrolador ATmega328p (Unidade de Controle);
- Microcontrolador ATmega328p (Unidade de Experimento);
- Micro-Chip ESP8266 (Servidor HTML);

As principais atividades do microcontrolador ATmega328p da unidade de controle são:

1. Avaliar a potência instantânea do painel solar;
2. Avaliar a temperatura no painel solar;
3. Avaliar a iluminância no painel solar;
4. Reportar periodicamente os dados de sensoriamento à unidade de experimento

através do transceptor de rádio-frequência.

As principais atividades do microcontrolador ATmega328p da unidade de experimento são:

1. Avaliar a potência instantânea do painel solar;
2. Avaliar a temperatura no painel solar;
3. Avaliar a iluminância no painel solar;
4. Avaliar a desbalanceamento da matriz de fototransistores;
5. Corrigir o desbalanceamento da matriz de fototransistores através dos motores de passo;
6. Receber os dados de sensoriamento da unidade de controle através do transceptor de rádio-frequência;
7. Registrar as informações obtidas em memória física removível;
8. Reportar dados de sensoriamento ao micro-chip Wi-Fi ESP8266;
9. Receber dados de configuração do micro-chip Wi-Fi ESP8266;

As principais atividades do micro-chip ESP8266 são:

1. Conectar-se a rede Wi-Fi 802.11 b/g/n local;
2. Obter hora e data online através de servidor NTP;
3. Transmitir informações de configuração para o microcontrolador ATmega328p da unidade de controle através de interface UART;
4. Receber informações de sensoriamento do microcontrolador ATmega328p da unidade de controle através de interface UART;
5. Fornecer dados de sensoriamento em uma página HTML na rede local;
6. Notificar via e-mail ao final do dia, um resumo dos dados coletados no dia em questão;

Todos os códigos implementados para cada um dos microcontroladores são de minha propriedade intelectual ou códigos de terceiros cuja licença permite o seu uso sob termos e condições específicos que foram seguidos com rigor durante sua utilização neste projeto.

Todos os códigos implementados estão bem comentados e são constantemente atualizados e dispostos em repositório online público para todo aquele que tiver interesse em replicar o projeto apresentado neste documento, sob os termos e condições de uso descritos na “GNU GENERAL PUBLIC LICENSE Version 3”.

Visto que ao todo são milhares de linhas de códigos utilizados neste projeto, divididos em vários arquivos os quais sofrem alterações constantemente, detalhar os algoritmos utilizados em cada trecho seria enfadoso e desnecessário, visto que o repositório existe justamente com o intuito de facilitar o uso do material aqui desenvolvido por outras pessoas, como também ter garantia de que o material ao qual a pessoa interessada deseja ter acesso seja uma versão atualizada do sistema embarcado proposto e livres de erros.

Os arquivos de código fonte deste projeto estão disponíveis em repositório público para todo aquele que tiver interesse, acessível através do endereço WEB: <<https://github.com/wrgallo/DualAxisSolarTracker>>.

6 PROJETO MECÂNICO

O desenvolvimento de um projeto estrutural específico para os protótipos apresenta um grande diferencial, já que a estrutura é parte fundamental no processo de captação da energia solar, uma vez que a mesma deve possibilitar a mobilidade do painel ao seguir o melhor ângulo de incidência solar. A definição das características que necessitam ser cumpridas pela estrutura, que possibilitem o movimento do painel solar, é parte crucial do para o desenvolvimento do design da estrutura, sendo que tais detalhes são abordados a seguir.

6.1 Análise de Requisitos Estruturais

São listadas a seguir todas as funcionalidades e características consideradas obrigatórias para a estrutura do protótipo.

6.1.1 Requisitos Funcionais para a Estrutura

Os requisitos que descrevem a funcionalidade da estrutura.

- RFE01 - Acondicionar e sustentar todos os sensores, instrumentos e placas de circuito eletrônico do protótipo;
- RFE02 - A estrutura ser capaz de proporcionar a rotação do painel solar ao redor dos eixos transversal e vertical;
- RFE03 - O torque necessário para rotacionar os eixos da estrutura não poderão ser maiores do que o motores 28byj48 possam comportar;

6.1.2 Requisitos Não Funcionais para a Estrutura

Os requisitos que descrevem a qualidade da estrutura.

- RNFE01 - As paredes estruturais deverão ter no mínimo 3mm de espessura;
- RNFE02 - A estrutura ser projetada de modo a minimizar material levando em consideração o processo de impressão 3D;
- RNFE03 - A estrutura deve suportar umidade ou precipitação sem sofrer danos;
- RNFE04 - A estrutura deve suportar temperatura de até $40^{\circ}C$ sem sofrer danos;
- RNFE05 - Uma tolerância de 1mm deverá ser garantida na dimensão dos encaixes de todas as peças;

6.2 Desenvolvimento em CAD

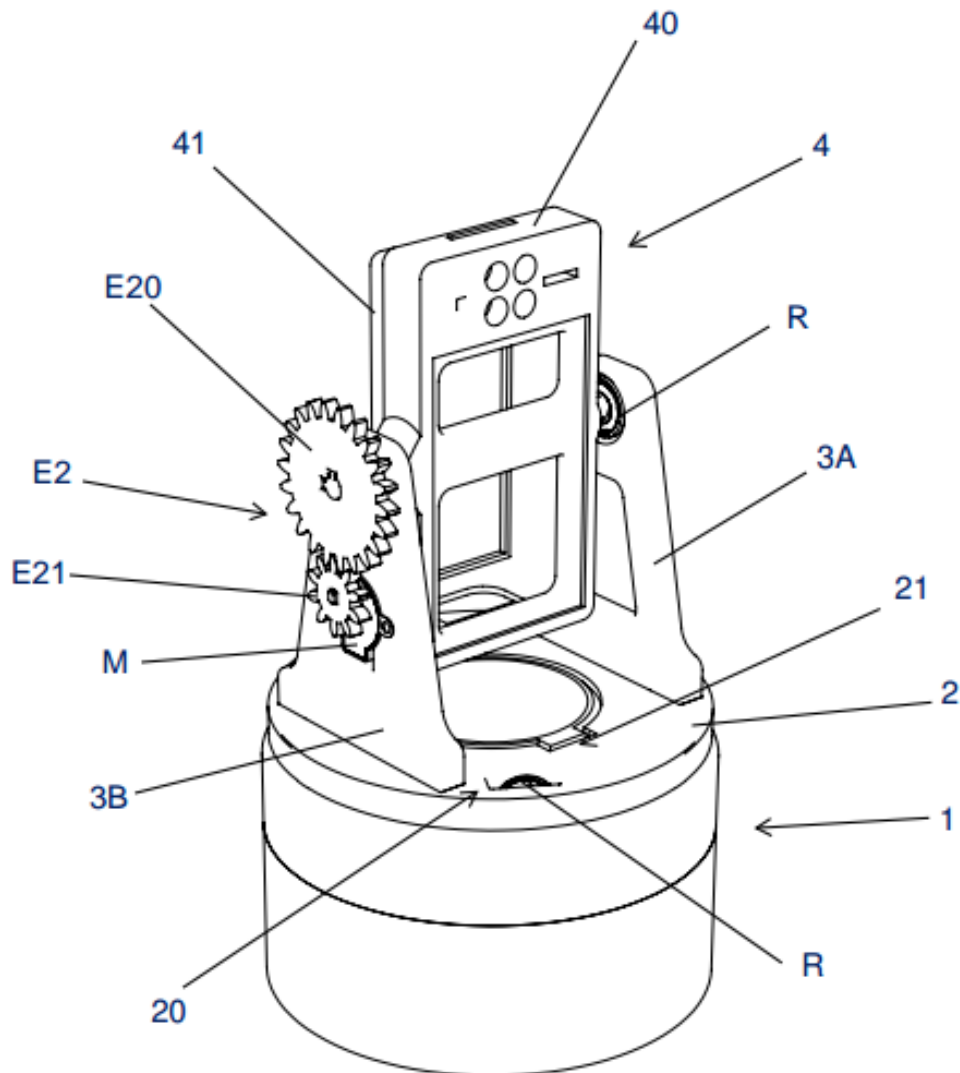
O protótipo estrutural foi desenvolvido com auxílio de software de CAD 3D (Computer-Aided Design), o SolidWorks®, sendo elaborado de forma a atender as demandas de componentes e instrumentos a receber e visando minimização de material para sua impressão 3D.

Assim como o código fonte do sistema embarcado, os arquivos do projeto CAD estão disponíveis para todo aquele que tiver interesse através do link: <<https://grabcad.com/library/dual-axis-solar-tracker-5>>.

As imagens a seguir apresentam vistas do projeto com indicações das peças para melhor compreensão da estrutura do protótipo e são referenciadas por elas toda a descrição do projeto estrutural que segue abaixo.

A Figura 71 apresenta uma vista em perspectiva frontal do protótipo em CAD 3D.

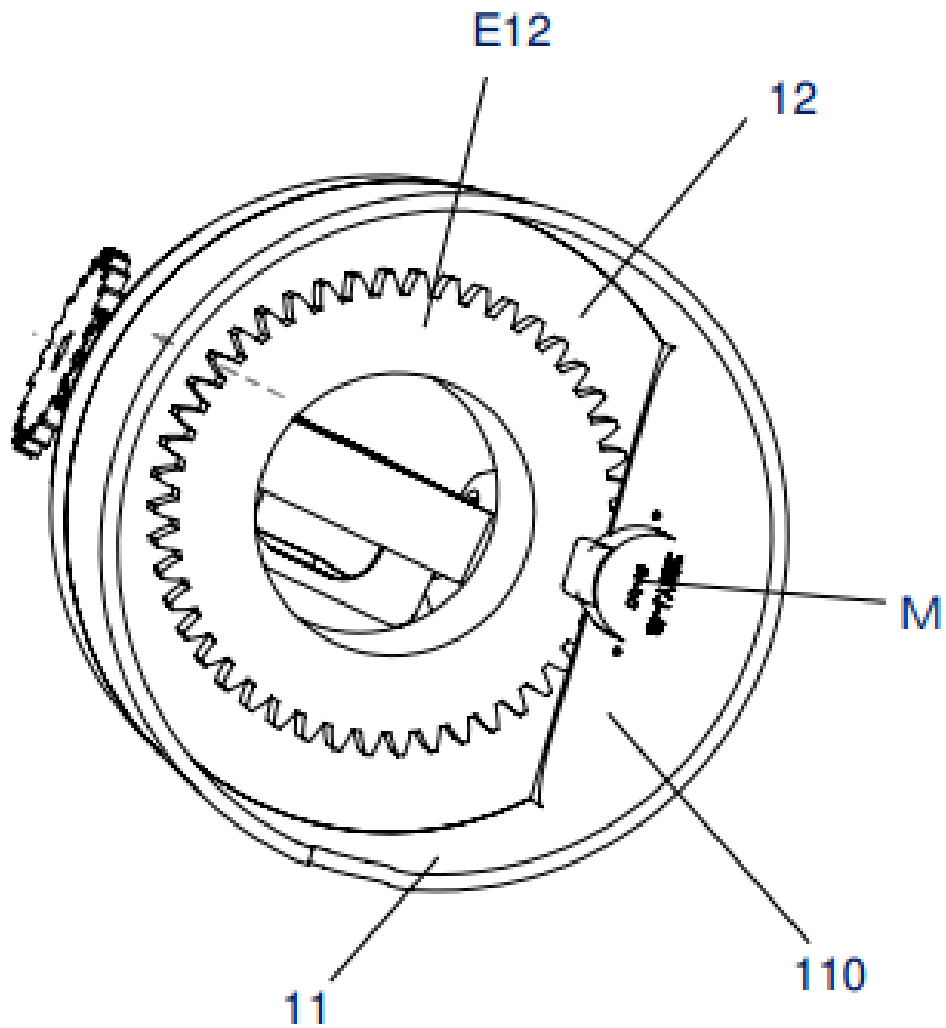
Figura 71 – Vista em perspectiva frontal do protótipo



Fonte: Autor (2018)

A Figura 72 apresenta uma vista em perspectiva inferior do protótipo em CAD
3D.

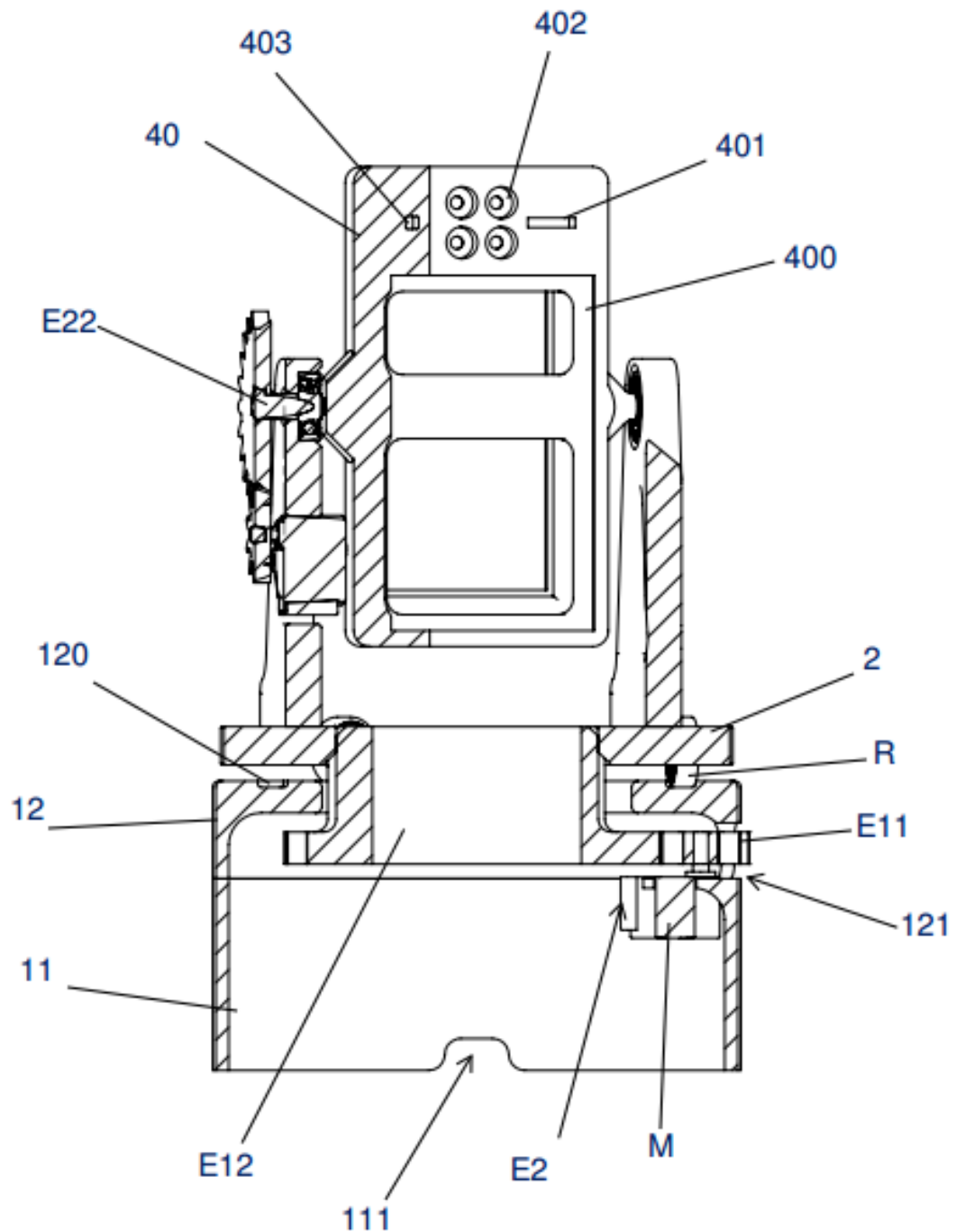
Figura 72 – Vista em perspectiva inferior do protótipo



Fonte: Autor (2018)

A Figura 73 apresenta uma vista em perspectiva e em corte do protótipo em CAD 3D.

Figura 73 – Vista em perspectiva e em corte do protótipo



Fonte: Autor (2018)

Conforme pode ser visto nas Figuras 71, 72 e 73 acima, a estrutura é formada pelo acoplamento de uma base fixa (1) que recebe uma base móvel (2), sendo que dita base móvel (2) recebe elementos estruturais (3A e 3B) para encaixe de um painel (4) onde fica alojado o painel fotovoltaico (não ilustrado).

A base fixa (1) é formada por um cilindro (11) acoplado em uma plataforma fixa (12), e recebe em seu interior um primeiro mecanismo de rotação (E1). O cilindro (11) compreende em uma de suas extremidades uma parede (110) com abertura para

encaixe de um motor de passo (M), e na extremidade oposta uma abertura (111) para passagem dos cabos de alimentação.

A plataforma fixa (12) é dotada de um canal (120) que delimita o movimento de rolamentos (R) da base móvel (2), e em sua lateral um abertura (121) que permite o livre movimento de uma engrenagem (E11) do mecanismo de rotação (E1).

Ainda, a base fixa (1) receberá em seu interior uma placa de circuito impresso (não ilustrada) de potência e controle do projeto.

Encaixada por meio a base fixa (1) encontra-se a base móvel (2) que permite a rotação do painel (4) em um dos eixos, sendo que a base (2) possui o formato de um prato com rasgos passantes (20) para encaixe de rolamentos (R), que permitem o movimento desta por meio do mecanismo (E1). Dita base (2) também compreende encaixe (21) para acoplamento de um eixo (E12) por interferência mecânica.

O mecanismo de rotação (E1) é formado pelo encaixe entre uma engrenagem (E11), acoplada no eixo de um motor (M), e a engrenagem do eixo (E12), sendo que para movimentação da base móvel (2) basta acionar o motor de passo (M), assim a engrenagem (E11) rotaciona a engrenagem do eixo (E12) movimentando a base (2).

O eixo (E12) possui formato cilíndrico com centro oco que permite a passagem do cabeamento do circuito de sensoriamento (não ilustrado) localizado no painel (4) até a placa de potência e controle acomodada no interior da base (1).

Os elementos estruturais (3A e 3B) são os elementos de sustentação no qual o painel (4) fica suspenso para livre rotação por meio de eixos acoplados a rolamentos (R) localizados nas extremidades superiores dos elementos estruturais (3A e 3B). Estes possuem desenhos diferenciados, sendo que o elemento (3B) possui além do encaixe para rolamento (R), uma abertura para encaixe de um segundo motor de passo (M) do projeto. O elemento (3A) possui uma abertura passante para economia de material não alterando sua capacidade estrutural.

Dessa forma, os elementos estruturais (3A e 3B) são fixos na base móvel (2) por meio de um pequeno recorte na base (2) que demarca o local de encaixe dos mesmos, e recebem adesivo epóxi para fixação definitiva.

O painel (4) é responsável por alojar o circuito de sensoriamento (não ilustrado), sensores (não ilustrados), e painel fotovoltaico (não ilustrado). O mesmo é formado por uma caixa (40) que abriga o painel fotovoltaico no rebaixo (400), um luxímetro no rasgo (401), um sensor de temperatura no furo (403) e quatro fototransistores nos rebaixos (402). A caixa (40) recebe no seu interior a placa do circuito elétrico de sensoriamento (não ilustrada) do projeto, além do cabeamento (não ilustrado) tanto dos sensores dispostos na mesma quanto de alimentação, sendo que esse cabeamento se externa a caixa (4) por meio de uma abertura (410) numa tampa (41), que é encaixada na parte posterior da caixa (4) de modo a isolar o circuito de sensoriamento.

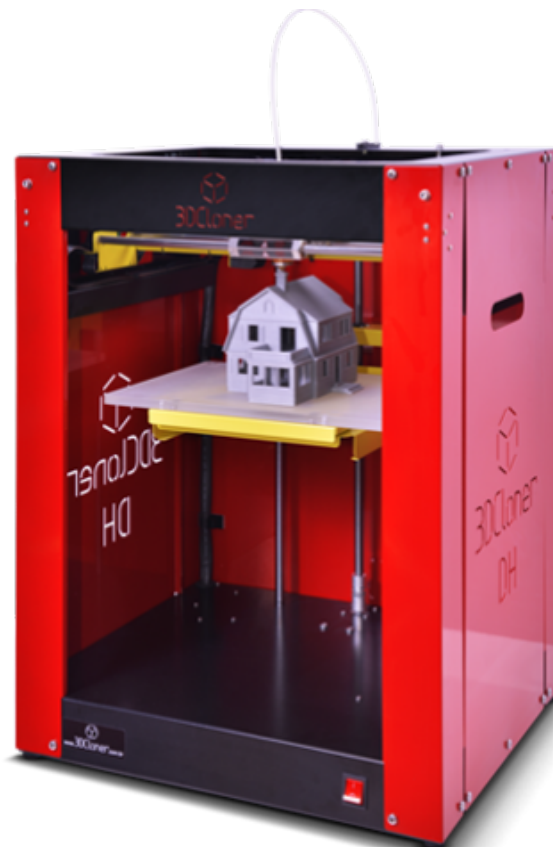
O mecanismo de rotação (E2) é formado pelo encaixe entre duas engrenagens

(E21 e E22), sendo a engrenagem (E21) acoplada num motor (M), e um eixo (E22) diretamente conectado ao painel (4) por meio de um furo na lateral da caixa (40). Assim ao acionar o motor (M), este movimenta as engrenagens (E21 e E22) e o eixo (E22) por consequência, rotacionando o painel (4) em outro eixo.

6.3 Impressão 3D

A UFSC dispõe de impressoras 3D que são administradas dentro do Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos e Processos Sustentáveis – LiD. Optou-se neste projeto pela fabricação da estrutura em impressão 3D pela precisão que a mesma possui e a disponibilidade de integrar novas tecnologias ao projeto. A impressora utilizada foi a 3D Cloner© fabricada pela Indústria Schumacher Ltda, que pode ser vista na Figura 74 abaixo, sendo que esta possui velocidade de impressão variável de acordo com o grau de precisão do projeto e imprime camadas com espessura que variam de 0,05mm até 0,40mm.

Figura 74 – Impressora 3D Cloner©



Fonte: Ltda (2018)

O material de modelagem utilizado foi o termoplástico PLA (Ácido Polilático) que é um material biodegradável derivado de fontes renováveis como amido de milho, raízes de mandioca e de cana, sendo que o mesmo apresenta alta rigidez e resistência.

A seguir são apresentadas imagens das peças do projeto fabricadas por

impressão tridimensional de camadas sucessivas do termoplástico PLA.

A Figura 75 apresenta o cilindro (11).

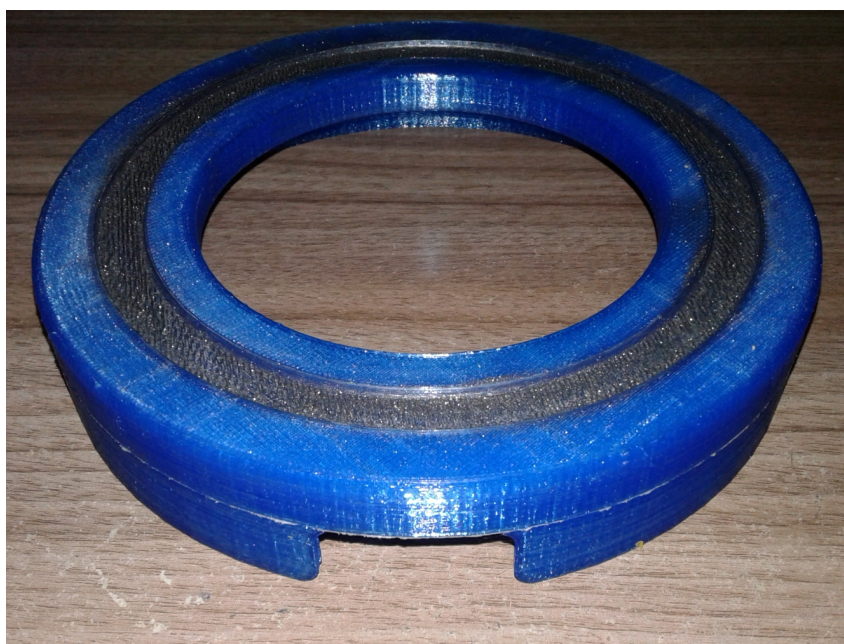
Figura 75 – Cilindro (11) impresso



Fonte: Autor (2018)

A Figura 76 apresenta a plataforma fixa (12).

Figura 76 – Plataforma fixa (12) impressa



Fonte: Autor (2018)

A Figura 77 apresenta o eixo (E12).

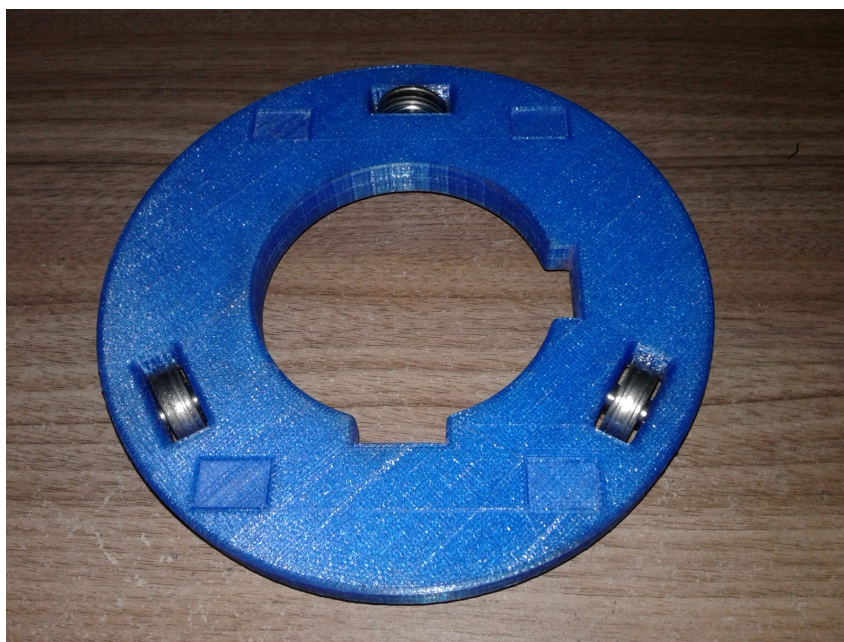
Figura 77 – Eixo (E12) impresso



Fonte: Autor (2018)

A Figura 78 apresenta a base móvel (2).

Figura 78 – Base móvel (2) impressa



Fonte: Autor (2018)

A Figura 79 apresenta os elementos estruturais (3A e 3B) .

Figura 79 – Elementos estruturais (3A e 3B) impressos



Fonte: Autor (2018)

A Figura 80 apresenta a caixa (40).

Figura 80 – Caixa (40) impresso

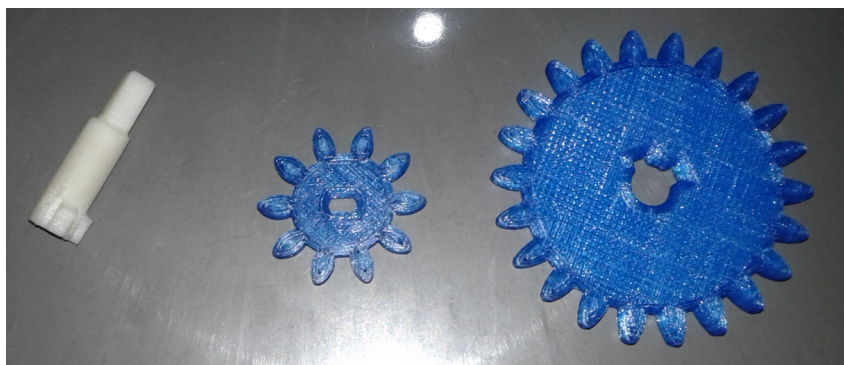


Fonte: Autor (2018)

A Figura 81 apresenta a engrenagem (E11 ou E21), engrenagem (E20) e o

eixo (E22).

Figura 81 – Engrenagem (E11 ou E21), engrenagem (E20) e o eixo (E22) impressos



Fonte: Autor (2018)

A Figura 82 apresenta o protótipo seguidor solar ativo de dois eixos montado com o sistema embarcado e painel solar acoplados.

Figura 82 – Protótipo Seguidor Solar Montado



Fonte: Autor (2018)

7 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

As atividades de verificação e validação servem pra assegurar que o sistema funcione de acordo com o que foi especificado e atendendo aos requisitos.

Serão aqui descritos os testes que validaram o devido comportamento esperado para cada componente presente no sistema embarcado e estrutura, sendo seguidos de testes de integração que buscam avaliar se cada parte do sistema ainda se comporta como esperado enquanto a complexidade do sistema cresce.

7.1 Testes Unitários

Lembrando que a função da interface serial Bluetooth neste sistema embarcado é justamente poder monitorar o comportamento do sistema podendo realizar depuração das rotinas implementadas, logo é importante que o módulo HC05 seja o primeiro componente a ser testado neste sistema.

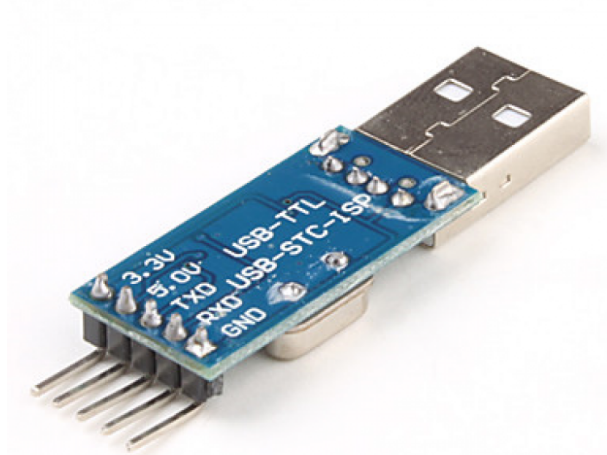
7.1.1 Teste da Interface Serial Bluetooth

Existem inúmeros aplicativos para smartphones e computadores para poder ler e transmitir mensagens via Bluetooth, o próprio sistema operacional para computadores pessoais geralmente já oferece ferramentas que possam ser utilizadas para tal fim. Para testar o funcionamento de transmissão de mensagens pelo módulo HC05 via Bluetooth foi utilizado o aplicativo “Bluetooth Terminal” desenvolvido pela “MEMIGHTY Tech Inventions & Customized Electronics Solutions”, disponível gratuitamente para smartphones com sistema operacional Android através da loja de aplicativos Play Store.

Para este teste é necessário o uso de um dispositivo capaz de realizar a conversão USB para serial, o qual irá se conectar com o módulo HC05, neste projeto fora utilizado o PL2303 da Prolific Technology.

A Figura 83 apresenta o componente utilizado para poder se comunicar com o HC05.

Figura 83 – Interface USB para Serial



Fonte: Prolific Technology Inc (2013)

Esta interface também é utilizada para a programação dos microcontroladores e micro-chip ESP8266.

O módulo HC05 necessita apenas de algumas configurações iniciais, estas são o modo de operação seja mestre ou escravo, o baud-rate com o qual receberá mensagens, o nome de exibição para conexão ao módulo e a senha necessária para sincronização.

O módulo HC05 é alimentado através dos pinos 5V e GND do PL2303, as portas Tx e Rx do PL2303 são conectadas com os pinos Rx e Tx do HC05. Ao conectar o PL2303 o módulo já será energizado, e neste processo é importante que o botão de reset que está presente no se mantenha pressionado por cinco segundos, neste momento um LED presente no módulo HC05 irá piscar lentamente indicando que este está no modo de configuração. Agora ao utilizar algum aplicativo de console serial tal como PuTTY, Cutecom ou até mesmo o monitor serial presente junto com a IDE do Arduino basta configurar o baud-rate de transmissão para 38000bps e enviar o comando “AT” e se tudo estiver ido bem até aqui a mensagem “OK” irá aparecer no console serial tendo sido transmitida pelo HC05.

A seguir a seguinte lista de comandos é enviada para o HC05:

1. “AT+ORGL”
 - O módulo será reiniciado para padrões de fábrica e a mensagem OK será retornada;
2. “AT+NAME=MASTER-DEBUG”
 - O nome do módulo Bluetooth irá aparecer como MASTER-DEBUG;
3. “AT+ROLE=0”
 - O módulo irá operar como escravo, apenas recebendo conexões Bluetooth;

4. “AT+PSWD=1234”
 - Para ter acesso ao MASTER-DEBUG será necessário inserir a senha 1234;
5. “AT+UART=115200,1,0”
 - A UART do módulo será configurada para operar com baud rate de 115200 bps, com 1 bit de parada e nenhum bit de paridade;
6. “AT+CMODE=1”
 - Não será aplicado um filtro de MAC além da exigência de senha de sincronização, o módulo aceitará se comunicar com qualquer dispositivo que tente se comunicar com este.

Agora o módulo HC05 já está configurado para se comunicar com qualquer dispositivo que se conecte a “MASTER-DEBUG” com a senha “1234”, e este irá repassar as informações transmitidas e recebidas pelo terminal Bluetooth através de sua interface UART utilizando um Baud Rate de 115200 bps com 1 bit de parada e 0 bits de paridade. O próximo passo para testar o módulo Bluetooth é reconectar o PL2303 com o módulo conectado a este, configurar o console serial para o novo baud rate e bits de parada e então utilizando o aplicativo citado tentar se comunicar com o módulo, ao enviar uma mensagem pelo aplicativo a mensagem será recebida no console serial do computador, ao enviar uma mensagem pelo console serial uma mensagem deverá ser recebida pelo usuário no aplicativo.

O mesmo teste pode ser repetido utilizando desta vez o microcontrolador programado para reenviar as mensagens que receber pela UART do HC05 já utilizando este nas portas a ele especificadas e com uma UART emulada, assim possível avaliar tanto o envio de mensagens do HC05 para o microcontrolador (não haverá esta funcionalidade neste projeto) como a recepção das mensagens enviadas pelo microcontrolador para o HC05.

Ambos os testes acima descritos foram realizados e assim concluído que o HC05 funciona adequadamente para a função a este atribuída. Apesar de ter respondido adequadamente neste teste individual, este ainda necessitará ser testado em conjunto com os demais componentes.

7.1.2 Medição de Potência do Painel Solar

O teste unitário de do monitor de potência do painel solar visa realizar as seguintes verificações:

- A comunicação do INA219 com o microcontrolador ATmega328p ocorre adequadamente com o circuito proposto nas Figuras 25 e 62;
- Avaliar se a leitura de tensão pelo INA219 é coerente com a tensão conhecida que este está lendo;
- Avaliar se a leitura de corrente pelo INA219 é coerente com a corrente conhecida que este está lendo;

- Avaliar se o INA219 consegue realizar medições de tensão com a resolução exigida neste projeto;
- Avaliar se o INA219 consegue realizar medições de corrente com a resolução exigida neste projeto.

Para obter as informações desejadas um circuito de teste é montado unindo os circuitos descritos nas Figuras 25 e 56. Neste circuito de teste será possível utilizar o módulo HC05 para avaliação da rotina implementada no microcontrolador ATmega328p para solicitar medições de tensão e corrente do INA219.

Na Figura 25 fora utilizado um painel solar com carga para máxima potência, porém neste teste é necessário conferir se as grandezas lidas pelo INA219 são confiáveis, portanto utilizando uma bateria de tensão conhecida no lugar do painel solar e um resistor de resistência conhecida no lugar da carga ideal para máxima potência do painel solar, a rotina de leitura dos dados do INA219 é testada em conjunto com o HC05 e validada através do terminal Bluetooth.

Para avaliar a resolução na leitura de corrente um trimpot é utilizado como carga, assim torna-se possível avaliar a precisão na leitura quanto a variação do valor lido para nenhuma variação de tensão e carga quanto a menor variação de corrente que este é capaz de detectar ao realizar um ajuste fino no trimpot. É esperado obter uma resolução de pelo menos 0,8mA conforme especificado no datasheet do INA219.

Para poder avaliar a resolução na leitura de tensão basta conectar a fonte de tensão diretamente no trimpot e a sua saída variável como entrada de tensão a ser avaliada pelo INA219 (porta Vin+), a porta Vin- do INA219 então é conectada diretamente no terra. Ao ajustar finamente a chave do trimpot será possível avaliar a menor variação de tensão que o INA219 consegue detectar. É esperado obter uma resolução de pelo menos 4mA conforme especificado no datasheet do INA219.

Todos os testes acima citados apresentaram os resultados esperados, indicando que o INA219 é adequado para o uso como monitor de potência do painel solar e a rotina de coleta de dados implementada é funcional e adequada para a comunicação com este componente.

7.1.3 Teste de Leitura e Gravação de Hora no DS1307

O teste unitário do DS1307 visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se a comunicação do DS1307 com o microcontrolador ATmega328p ocorre adequadamente com o circuito proposto nas Figuras 47 e 62, testando rotinas de leitura e escrita de hora e data;
- O DS1307 é capaz de se lembrar da data configurada após permanecer alimentado apenas pela sua bateria de backup por 24h;

Conforme já destacado na Tabela 9 é necessário que o MPU9250 esteja configurado para operar no endereço 0x69 para que o DS1307 possa operar no mesmo

barramento.

O circuito de teste é montado inserindo novamente o HC05 para depuração do sistema, uma rotina de teste é implementada para realizar a leitura do ano, mês, dia do mês, dia da semana, hora e minuto do DS1307 a cada segundo e para cada leitura os dados deverão ser repassados à UART do módulo HC05 que então irá transmitir para a interface Bluetooth no aplicativo utilizado para depuração do sistema. A rotina irá realizar o repasse das informações lidas a cada segundo durante dois minutos, em seguida irá escrever uma data completamente diferente no relógio de tempo real e então se manterá infinitamente repassando os valores lidos pelo DS1307 para a UART do HC05. Desta forma será possível avaliar a coerência dos dados lidos pelo DS1307 e se a tarefa de leitura e escrita estão ocorrendo adequadamente.

Após ter obtido sucesso no teste anterior é anotado o instante em que os testes se encerraram e então o DS1307 é removido do circuito e mantido energizado apenas pela sua bateria de backup por pelo menos 24h, onde o teste será repetido com o objetivo de ler, durante os dois primeiros minutos de operação, valores de data e hora coerentes com o tempo decorrido desde a última leitura.

Os testes acima descritos ocorreram com sucesso indicando a que o DS1307 é uma boa escolha para a aplicação a ele designada neste projeto.

7.1.4 Teste de Leitura de Orientação com o IMU

O teste unitário da MPU9250 visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se a comunicação do MPU9250 com o microcontrolador ATmega328p ocorre adequadamente com o circuito proposto nas Figuras 38 e 62;
- É possível obter o ângulo de inclinação com o MPU9250;
- É possível obter o ângulo de guinada com o MPU9250;

Com o circuito de teste montado incluindo o módulo HC05 a primeira rotina de teste a ser executada no microcontrolador é apenas realizar medições do acelerômetro, giroscópio e magnetômetro presentes no MPU9250 e reportar estes dados a cada segundo para a UART do HC05.

O próximo teste é tentar obter o ângulo de inclinação utilizando a Equação 5.6 e reportar ao HC05, para este teste é importante que o MPU9250 esteja conectado no circuito de teste através de cabos e que este possa rotacionar durante o teste. Com este teste busca-se avaliar se o cálculo de ângulo de inclinação pode ser obtido com o uso desta IMU.

O próximo teste é tentar obter o ângulo de guinada utilizando a Equação 5.8 e também utilizando o DMP do MPU9250. Por fim o último teste será avaliar a variação na leitura do magnetômetro durante sua rotação.

Durante os testes acima descritos fora observado que o critério de tempo e processamento de dados é de extrema importância para garantir o correto tratamento

dos dados, a quantidade de memória do microcontrolador reservada para o software era maior do que a metade da memória total disponível e os resultados obtidos ainda não eram bons o suficientes e necessitariam melhor tratamento da informação. Algoritmos para tratamento de informações de IMU costumam exigir muito processamento, um timer configurável para obter ao menos 200 amostras por segundo do giroscópio, é recomendável o uso de uma unidade de ponto flutuante para acelerar o processamento de operações matemáticas. Muitas bibliotecas open-source disponíveis para tratamento de dados deste interesse exigem mais memória do que o microcontrolador ATmega328p consegue suportar. Além de todos os problemas já citados, a calibração do IMU é obrigação do cliente e necessita ser realizada antes de qualquer operação.

Apesar de todos os problemas citados fora possível calcular o ângulo de inclinação com precisão e estimar o ângulo de guinada, porém ao avaliar o consumo de processamento necessário para cumprir esta funcionalidade a importância de tal informação teve de ser repensada. Desta forma fora decidido que uma IMU não é uma boa solução para avaliação dos ângulos de inclinação e guinada da estrutura que suporta o painel solar, opções mais práticas e simples deveriam ser pensadas tais como o uso de um potenciômetro linear acoplado diretamente em cada motor, assim adicionando sensores de posição aos motores que exigiriam ao todo apenas 2 portas ADC para estimação da posição atual.

7.1.5 Teste da Medição dos Fototransistores

O teste unitário da leitura dos fototransistores visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se a comunicação do ADS1015 com o microcontrolador ATmega328p ocorre adequadamente com o circuito proposto nas Figuras 31 e 62;
- Avaliar a efetividade da média móvel implementada em conjunto com a aplicação das Equações 5.4 e 5.5 propostas;

Um circuito de teste é preparado em protoboard novamente inserindo o HC05 para facilitar a depuração da rotina implementada no microcontrolador para o teste.

A rotina implementada lê as informações da matriz de fototransistores, para o caso da primeira medição o valor lido em cada fototransistor é repetidamente inserido na respectiva FIFO até que esta possua seu tamanho máximo, assim garantindo que um comportamento inesperado não ocorra para as médias calculadas durante as primeiras amostras. Em seguida a cada 100ms um nova amostra para cada fototransistor é obtida do ADS1015, a média móvel é então atualizada com estas novas amostras, e as informações referentes a cada um dos fototransistores é transmitida via UART emulada para o HC05. Com o teste em execução a iluminação nos fototransistores é adulterada com o uso de uma lanterna enquanto através do terminal Bluetooth o valor de tensão lido em cada fototransistor é observado.

Repetindo o teste distribuindo os fototransistores em protoboard na forma de uma matriz 2x2 os valores de Δ_X e Δ_Y utilizando as Equações 5.4 e 5.5 serão coletados e transmitidos via UART emulada para o HC05. Com o teste em execução uma lanterna é utilizada para observar o comportamento das variáveis Δ_X e Δ_Y quando o foco estiver no centro e nos extremos da matriz de fototransistores. Espera-se observar o seguinte comportamento no sistema de medição:

- $\Delta_X > 0$, quando o foco de luz estiver a direita da matriz de fototransistores;
- $\Delta_X \approx 0$, quando o foco de luz estiver no centro dos fototransistores;
- $\Delta_X < 0$, quando o foco de luz estiver a esquerda da matriz de fototransistores.
- $\Delta_Y > 0$, quando o foco de luz estiver a acima da matriz de fototransistores;
- $\Delta_Y \approx 0$, quando o foco de luz estiver no centro dos fototransistores;
- $\Delta_Y < 0$, quando o foco de luz estiver a abaixo da matriz de fototransistores.

Os testes acima descritos indicam que o ADS1015 é uma boa escolha para a aplicação a ele designada neste projeto, bem como os cálculos propostos para avaliação da necessidade de correção de orientação foram funcionais e aplicáveis para o caso de uma fonte de luz controlada.

7.1.6 Teste de Controle dos Motores de Passo

O teste unitário dos motores de passo visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se o acionamento dos motores através do driver proposto em conjunto com o microcontrolador ATmega328p ocorre adequadamente com o uso do circuito proposto nas Figuras 43 e 62;
- Conferir se a quantidade de passos necessários para uma volta completa equivale aos dados lidos no datasheet;
- Conferir se a velocidade máxima de passos por minuto equivale aos dados lidos no datasheet;
- Avaliar se o motores são capazes de vencer o atrito estático da estrutura;

Um circuito de teste é preparado de acordo com as Figuras 43 e 62, a primeira rotina de teste a ser implementada irá apenas comandar o motor para que seu eixo rotacione indefinidamente para uma direção, a segunda rotina de teste fará a mesma tarefa porém para a direção contrária, assim podendo avaliar o comportamento do motor sem carga para o controle de posição em malha aberta em ambas as direções.

A terceira rotina de testes utiliza o módulo HC05. O administrador envia um número inteiro positivo ou negativo pelo terminal Bluetooth, este valor será interpretado como a quantidade de passos e direção desejada, assim torna-se possível avaliar o comportamento do motor para quantidades específicas de passos, podendo observar como este se comporta para pequenas e grandes movimentações, bem como avaliar qual é a quantidade de passos necessárias para uma volta completa. Este mesmo teste é então repetido com o motor agora instalado na estrutura para controle de cada eixo.

Após todas as rotinas de testes descritas acima foi possível avaliar que o motor e driver escolhido para o projeto são boas escolhas para a aplicação a estes designados neste projeto.

7.1.7 Teste de Conectividade em Rede IEEE 802.11 b/g/n Criptografada

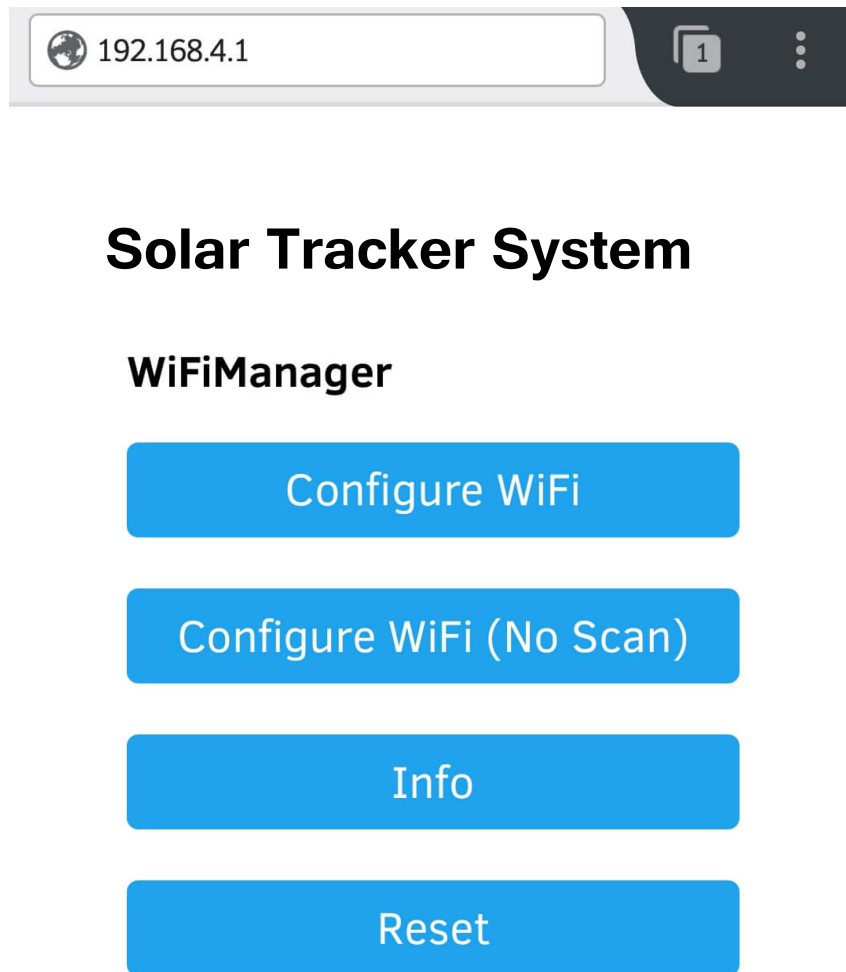
O teste unitário da conectividade com uma rede WiFi 802.11 do sistema embarcado visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se o ESP8266 consegue se conectar com uma rede IEEE 802.11 b/g/n com autenticação WEP ou WPA/WPA2;
- Avaliar se o ESP8266 conseguirá gerar um ponto de acesso caso este não consiga se conectar a nenhuma rede IEEE 802.11 b/g/n existente;
- Avaliar se ao conectar ao ponto de acesso gerado pelo ESP8266 este irá redirecionar para a página de configuração do WiFi;
- Avaliar se será possível configurar a autenticação para uma nova rede IEEE 802.11 através do endereço do ESP8266 no ponto de acesso por ele gerado;

Para estes testes será necessário programar o módulo ESP8266 com o uso do PL2303 para o upload do firmware. Com o ESP-01 devidamente programado para as tarefas citadas e conectado ao PL2303 esperasse que este transmite informações via UART informando se conseguiu se conectar a uma rede WiFi presente no local, caso contrário este irá informar a criação do ponto de acesso onde o usuário poderá se conectar e será redirecionado para uma página onde poderá escolher uma das redes IEEE 802.11 b/g/n disponíveis e inserir a senha de autenticação necessária para aquela rede, em seguida o módulo ESP-01 irá reiniciar e tentar se conectar a rede informada pelo usuário com as credenciais salvas em memória não volátil.

A Figura 84 apresenta a página na qual o usuário é redirecionado após se conectar ao ponto de acesso gerado pelo ESP01.

Figura 84 – Página WEB para Configuração Wi-Fi em Ponto de Acesso Gerado



Fonte: Autor (2018)

Como pode-se observar o usuário pode solicitar que o módulo realize um mapeamento das redes IEEE 802.11 b/g/n disponíveis onde o usuário poderá informar a senha de autenticação.

Ao perder conexão com uma rede Wi-Fi o módulo irá gerar este ponto de acesso, porém após determinado período de tempo ele reinicia e tenta se conectar a rede Wi-Fi novamente, caso contrário permanecerá neste loop de tentativa de conexão e geração de ponto de acesso.

Todas as funcionalidades descritas foram bem sucedidas neste teste unitário indicando que o módulo ESP-01 será facilmente configurável para operar em novas redes.

7.1.8 Teste da Página de Login do Servidor WEB

O teste unitário da página de login do servidor WEB visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se apenas usuários já logados conseguiram ter acesso a página principal;
- Avaliar se o ESP8266 conseguirá validar os dados inseridos por um usuário no formulário da página de login com os dados de credenciais salvos na memória EEPROM do módulo ESP01;
- Avaliar se usuários logados são automaticamente redirecionados para a página principal;

Para este teste uma página principal muito simples é implementada, pois o foco do teste está em avaliar o redirecionamento e validação de cookies do cliente que tenta acessar o servidor WEB.

O módulo é programado para gerar um servidor WEB na rede Wi-Fi ao qual está conectado, ao se conectar ao endereço do módulo na rede este o redireciona para a página de login caso o cliente não tenha logado ainda, caso contrário o cliente será redirecionado para a página de sensoriamento, caso o cliente tente acessar a página de sensoriamento sem ter validado suas credenciais primeiramente este será redirecionado novamente para a página de login e só poderá avançar quando inserir credenciais válidas.

O módulo é programado para aceitar duas possíveis credenciais, a credencial de administrador que é salva na memória flash do microcontrolador junto com o software e a segunda credencial estará salva na memória EEPROM e esta poderá ser modificada pelo usuário através da página de sensoriamento.

A Figura 85 apresenta a página que o usuário não autenticado é redirecionado.

Figura 85 – Página WEB para Autenticação no Servidor WEB

Solar Tracker System

Enter your Credentials

USERNAME : wrgallo

PASSWORD : Sign In

Wellington Rodrigo Gallo
w.r.gallo@grad.ufso.br
2018

Fonte: Autor (2018)

Todas as funcionalidades descritas foram bem sucedidas neste teste unitário indicando que o módulo ESP-01 será capaz de requisitar e validar credenciais para liberar o acesso da página de sensoriamento somente para os clientes que já estão autenticados.

7.1.9 Teste da Página de Sensoriamento do Servidor WEB

O teste unitário da página de sensoriamento do servidor WEB visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se as informações das variáveis de sensoriamento são apresentadas no servidor WEB;
- Verificar o comportamento do servidor WEB ao receber formulários HTML;

O micro-chip ESP8266 é programado para apresentar dados de sensoriamento na página principal do servidor WEB, estes dados são recebidos pela interface UART que está conectada ao microcontrolador do protótipo de experimento. Todas estas variáveis são iniciadas com um valor padrão e só serão atualizadas ao receber uma mensagem válida do microcontrolador.

Todas as mensagens trocadas entre o microcontrolador do protótipo de experimento e o ESP8266 via UART foram rigorosamente protocoladas, defini-se como mensagem válida a mensagem que respeita o protocolo definido neste projeto para a comunicação entre o ESP8266 e o microcontrolador.

As mensagens válidas são compostas de um byte de início (valor 2 da tabela ASCII), seguidos de três bytes que definem o contexto da mensagem, seguidos dos bytes que formam os dados da mensagem, um byte de fim (valor 3 da tabela ASCII) é utilizada para determinar o fim do quadro.

Neste teste unitário o ESP8266 está conectado ao PL2303 e o console serial é utilizado no computador onde o administrador insere dados e avalia as informações recebidas pelo ESP8266 via UART de forma controlada exatamente como o microcontrolador da unidade de experimente fará. Durante este teste a interface WEB para sensoriamento é avaliada e testada com um cliente autenticado, espera-se que o preenchimento de determinados formulários HTML gerem respectivas mensagens a serem transmitidas via UART para o microcontrolador da unidade de experimento e estas mensagens serão captadas pela console serial do computador.

O ESP8266 é programado para obter a hora online através de servidores NTP assim que obter conexão com a internet, ao obter a hora atual esta informação é repassada via UART, e somente quando estes mesmos dados forem recebidos via UART é que os dados de data e hora serão atualizados no servidor WEB, assim garantindo que toda informação presente na página de sensoriamento represente informações do microcontrolador da unidade de experimento. Neste teste o console serial é utilizado para enviar dados de hora e data para o ESP8266, espera-se como resultado que a hora e data inseridas sejam apresentadas na página do servidor WEB, porém todas as demais variáveis não atualizadas sejam mantidas com seu valor inicial, indicando que ainda não fora recebida nenhuma mensagem indicando seu valor. O ESP8266 está configurado com um timer de dois minutos, se nenhuma mensagem válida for recebida via UART dentro de dois minutos o status da unidade de experimento é apresentado como “Offline”, e imediatamente após receber uma mensagem válida este valor é alterado para “Online”.

A Figura 86 apresenta a página WEB de sensoriamento durante o teste unitário descrito.

Figura 86 – Página WEB de Sensoriamento em Teste Unitário

Solar Tracker System

Solar Tracker Unit	ONLINE
Control Unit	OFFLINE
Time	15:43
Date (DD/MM/YY)	03/07/18
Weekday	Tuesday
Mail Recipient	wrgallo@hotmail.com

<i>Power Test</i>	<i>Solar Tracker</i>	<i>Control</i>
Power Delivered	Unknown	Unknown
Current Delivered	Unknown	Unknown
Voltage	Unknown	Unknown
Current	Unknown	Unknown
Power	Unknown	Unknown
Temperature	Unknown	Unknown
LUX	Unknown	Unknown
Photo Up Left	Unknown	Unknown
Photo Up Right	Unknown	Unknown
Photo Down Left	Unknown	Unknown
Photo Down Right	Unknown	Unknown
Pitch Angle	Unknown	Unknown
Yaw Angle	Unknown	Unknown

Select Test Mode:

Time Zone:

Time:
 Date:
 Weekday:

Email Recipient:

User Credential:
 User Password:
 Confirm Password:

You can access this page until you disconnect

Wellington Rodrigo Gallo
 w.r.gallo@grad.ufsc.br
 2018

Fonte: Autor (2018)

Todas as funcionalidades descritas foram bem sucedidas neste teste unitário, indicando que o módulo ESP-01 será capaz de administrar o servidor WEB enquanto obtém e informa dados via UART para o microcontrolador da unidade de experimento.

7.1.10 Teste de Obtenção de Hora Online

O teste unitário da obtenção de hora online visa verificar a conectividade com servidores NTP.

Ao iniciar o módulo WiFi, este se conecta à um servidor NTP para obter a hora exata atual (UTC), tendo obtido o valor e feito o ajuste relativo ao fuso horário o módulo WiFi envia os respectivos comandos para o microcontrolador da unidade supervisória através da comunicação UART, informando os novos valores de hora e data, que então serão gravados no relógio de tempo real.

Ao tentar obter o valor da hora atual, o módulo WiFi tenta se conectar primeiramente ao servidor NTP brasileiro: "a.st1.ntp.br" através da porta NTP "123", porém caso algum problema ocorra na comunicação com este servidor NTP, o módulo WiFi irá tentar se conectar ao servidor NTP: "time.nist.gov", caso este servidor também falhe, nenhuma informação é repassada ao microcontrolador.

Caso o módulo de tempo real apresente algum mal funcionamento e informe um valor inválido para o microcontrolador, o microcontrolador irá solicitar uma atualização online da hora atual. Ou caso um novo dia tenha se passado, um novo valor de hora também é requisitado ao servidor.

A página do servidor WEB dispõe da possibilidade do usuário escolher o fuso horário que deseja. As informações inseridas pelo usuário autenticado no servidor WEB serão salvas na memória EEPROM do módulo WiFi e serão lembradas mesmo que o módulo WiFi permaneça desligado por um longo período.

Para testar a conexão com o servidor NTP o computador conectado ao ESP8266 através do PL2303, uma mensagem de requisição de atualização de hora online é transmitida para o módulo ESP01, espera-se como resultado que este retorne dados atualizados de data e hora obtidos no servidor NTP. Em seguida o procedimento é repetido, porém desta vez o fuso horário é reconfigurado no servidor WEB e a requisição de hora atualizada é feita através do próprio servidor WEB, espera-se obter o mesmo resultado do teste anterior.

Todas as funcionalidades descritas foram bem sucedidas neste teste unitário indicando que o módulo ESP-01 será capaz de obter dados de hora e data online.

7.1.11 Teste do Envio de Emails

O teste unitário para envio de e-mails visa verificar o módulo ESP01 conectado a uma rede IEEE 802.11 b/g/n é capaz de enviar email para um endereço registrado

em sua memória EEPROM e reconfigurável no servidor WEB.

Como o código do projeto esta disponível abertamente no GitHub, as informações de login e senha do email de origem estão salvas na EEPROM do módulo WiFi.

Inicialmente fora desenvolvido a funcionalidade de envio de emails através do provedor de emails SMTP do GMail "smtp.gmail.com"na porta 465, utilizando uma comunicação SSL (cliente segura), todos os testes desta nova funcionalidade ocorreram perfeitamente, porém, ao integrar ao servidor, verificou-se um problema instabilidade, pois ao trocar a comunicação de cliente utilizada pelo servidor, para uma comunicação de cliente segura para o uso do e-mail, necessitava de memória RAM não disponível. Como consequência o módulo WiFi reiniciava alertando o problema.

Como segunda opção fora utilizado o serviço gratuito da ©2017 SMTP2GO, onde é possível utilizar o servidor SMTP "mail.smtpcorp.com"na porta 2525, que não requer comunicação SSL, e diferentemente do uso do servidor SMTP para comunicação insegura do GMail: "aspmx.l.google.com"na porta 25, através do SMTP2GO é possível enviar emails para outros domínios, não apenas para emails que também sejam do GMail. Desta vez a integração ao servidor ocorreu perfeitamente.

A página do servidor WEB dispõe de um formulário HTML para que o usuário autenticado possa alterar o email de destino padrão e um botão poder testar a funcionalidade de envio de emails, além de exibir o email de destino atualmente cadastrado. As informações de email que forem inseridas pelo usuário autenticado no servidor WEB serão salvas na memória EEPROM do módulo WiFi e serão lembradas mesmo que o módulo WiFi permaneça desligado por um longo período.

A Figura 87 apresenta o corpo de um email enviado para um cliente Outlook pelo ESP8266.

Figura 87 – Conteúdo do email recebido do ESP8266 durante teste unitário

Solar Tracker System Results

Solar Tracker Unit	ONLINE
Control Unit	OFFLINE
Time	Unknown
Date (DD/MM/YY)	Unknown
Weekday	Unknown

Operation Mode	Solar Tracker	Control
Energy Generated	Unknown	Unknown
Voltage	Unknown	Unknown
Current	Unknown	Unknown
Power	Unknown	Unknown
Temperature	Unknown	Unknown
LUX	Unknown	Unknown

Wellington Rodrigo Gallo
w.r.gallo@red.ufso.br
 2018

Fonte: Autor (2018)

Todas as funcionalidades descritas foram bem sucedidas neste teste unitário indicando que o módulo ESP-01 será capaz de informar o resumo dos dados coletados durante o dia via email para o endereço de email cadastrado no servidor WEB.

7.1.12 Teste de Comunicação por Rádio-Frequência

O teste unitário para comunicação por rádio-frequência visa verificar se o protótipo de experimento consegue receber mensagens transmitidas pelo protótipo de controle.

Para este teste unitário são utilizados dois circuitos de teste baseados no esquemático apresentado na Figura 51, além do HC05 em conjunto com o microcontrolador da unidade de experimento. O microcontrolador do protótipo de controle estará programado para enviar dados falsos de sensoriamento para o protótipo de experimento a cada 15 segundos, o microcontrolador do protótipo de experimento irá receber as mensagens transmitidas pelo protótipo de controle e repassar a informação via UART emulada para o HC05. Espera-se ler no HC05 mensagens coerentes com a mensagem transmitida programado no protótipo de controle.

A transmissão e recepção de mensagens utilizando o transceptor nRF24L01+ ocorreu adequadamente durante o teste, indicando que este transdutor deve ser uma boa opção para a comunicação do protótipo de controle com o protótipo de experimento.

7.1.13 Teste de Registro de Dados em Cartão microSDHC

O teste unitário para o gravador microSDHC visa realizar as seguintes verificações:

- Avaliar se a comunicação do gravador SDHC com o microcontrolador ATmega328p ocorre adequadamente com o circuito proposto nas Figuras 53 e 62;
- Avaliar a continuação da escrita em um arquivo de dados já existente;

Para testar a escrita de dados em um cartão microSDHC é montado um circuito de teste descrito na Figura 53 em conjunto com o HC05 em uma comunicação de duas vias UART. O módulo HC05 irá receber mensagens transmitidas pelo administrador através da interface Bluetooth, e repassar estas informações via UART para o microcontrolador que então irá registrar estes dados no cartão microSDHC. Espera-se como resultado retirar o cartão microSDHC do gravador, inserir no computador e poder ler exatamente as mensagens transmitidas pelo terminal Bluetooth.

Todas as funcionalidades descritas foram bem sucedidas neste teste indicando que o gravador microSDHC é capaz de realizar as tarefas a ele atribuídas neste projeto.

7.2 Teste de Integração

Enquanto os testes unitários envolvem a verificação do comportamento dos componentes individualmente e em situações controladas, os teste de integração correspondem a fase de teste do sistema em que módulos são combinados e testados em grupo.

7.2.1 Teste do Registro de Dados de Sensoriamento Geral

O teste de integração para o registro de dados de sensoriamento geral visa avaliar o comportamento do sistema sob as determinadas condições de teste:

- Todos os componentes estão instalados e conectados na placa de circuito impresso conforme descrito na Figura 62;
- O protótipo de controle deverá enviar informações de seus dados de sensoriamento para o protótipo de experimento a cada 60 segundos;
- O protótipo de experimento ao iniciar irá criar um arquivo com o nome no formato “YYMMDD.txt” onde YY representa os dois últimos dígitos do ano atual, MM representa o mês e DD o dia;
- Caso o protótipo de experimento falhe em criar o arquivo de texto uma mensagem de erro será transmitida para o HC05;
- O protótipo de experimento deverá receber as informações recebidas por rádio-frequência e reportar estas informações via UART emulada para o módulo HC05;

- A cada 60 segundos os dados de sensoriamento de ambos os protótipos e hora atual lida pelo DS1307 serão salvos no cartão microSDHC;

Ao realizar o teste de integração descrito foi verificado que os dados do protótipo de controle nunca chegavam ao protótipo de experimento em todas as execuções. O teste unitário da comunicação por radio-frequência fora repetido e foi observado que o transceptor de rádio frequência estava se comportando adequadamente. A rotina utilizada neste teste de integração foi então depurada linha por linha, conferindo se todos os pequenos trechos de código estavam ocorrendo conforme esperado, onde o microcontrolador enviava informações para cada linha de código para o HC05. Não fora encontrado nenhuma falha no software, porém foi identificado que os módulos gravador microSDHC e o módulo de avaliação do nRF24L01+ não eram capazes de operar simultaneamente, por razões até então desconhecidas.

Após análise minuciosa fora constatado falhas no design da placa de circuito impresso do gravador microSDHC escolhido para este projeto.

O cartão microSD trabalha em uma tensão de 3,3V e caso este opere com tensões superiores a 3,6V poderá danificar o cartão permanentemente, portanto a placa de circuito impresso do gravador microSD consta com um conversor de nível lógico de 5V para 3,3V para poder realizar a interface SPI com segurança com o cartão microSDHC. A comunicação SPI ocorre através da comunicação pelos pinos MOSI, SCK, CS e MISO, enquanto as portas MOSI (Master-Output, Slave-Input), SCK (Serial Clock) e CS (Chip Select) são informações transmitidas do microcontrolador para o gravador microSDHC, a porta MISO (Master-Input, Slave-Output) é uma porta de saída do gravador microSDHC para o microcontrolador, e o conversor de nível lógico está conectado inversamente para esta porta, o que por consequência causa a porta MOSI se manter em curto com terra enquanto o gravador microSDHC não estiver enviando informações para o microcontrolador. Tal falha de hardware implica que nenhum outro dispositivo SPI é capaz de compartilhar o barramento com o gravador microSDHC da Catalex utilizado neste projeto.

Dada a importância de ambos o transceptor de rádio frequência e o gravador microSDHC neste projeto, uma solução de emergência fora adotada. Um terceiro Arduino Pro Mini é conectado via uma terceira porta UART (segunda porta UART emulada), com o microcontrolador do protótipo de experimento, este microcontrolador tem a função de receber as informações que necessitam ser gravadas no cartão microSDHC e repassar através de seu barramento SPI independente para o gravador microSDHC.

As modificações no esquemático da Figura 62 necessárias para a implementação emergencial adotada se resumem a conectar o gravador microSDHC da mesma forma que descrito na Figura 62 porém com o terceiro microcontrolador inserido no projeto. A porta 8 que era usada como CE do gravador microSD torna-se

uma saída Tx UART emulada, e a porta 6 que não estava sendo utilizada é usada como entrada Rx UART emulada, o novo microcontrolador recebe informações UART através da sua interface UART principal nas portas 0 e 1 respectivamente.

O teste de integração com o novo sistema proposto provou ser eficaz gravando dados de ambos os sensores conforme previsto.

7.2.2 Teste do Servidor WEB Integrado ao Sistema em Funcionamento

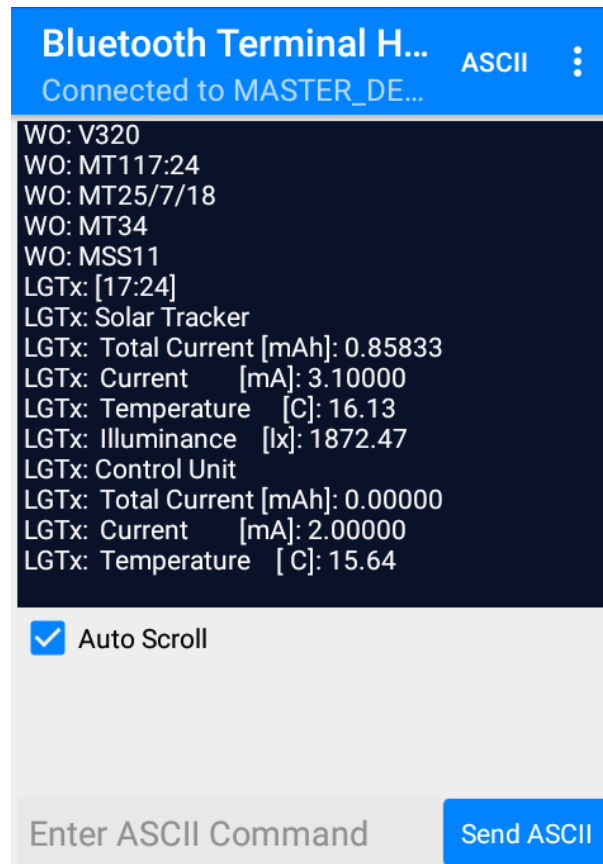
O teste de integração do servidor WEB visa avaliar o comportamento do sistema sob as determinadas condições de teste:

- Todos os componentes estão instalados e conectados na placa de circuito impresso conforme descrito na Figura 62;
- O protótipo de controle deverá enviar informações de seus dados de sensoriamento para o protótipo de experimento a cada 60 segundos;
- O protótipo de experimento deverá receber as informações recebidas por rádio-frequência e reportar estas informações via UART emulada para o módulo HC05;
- A cada 60 segundos os dados de sensoriamento de ambos os protótipos e hora atual lida pelo DS1307 serão reportados ao servidor WEB;

Espera-se neste teste obter obter resultado semelhante ao da Figura 86, porém com dados de sensoriamento sendo reportados ao servidor WEB e garantindo a atualização da informação apresentada no servidor WEB.

A Figura 88 apresenta uma captura de tela do smartphone durante o momento em que o microcontrolador está reportando dados para o microcontrolador responsável pelo registro de dados, logo após ter atualizado o servidor WEB.

Figura 88 – Captura de Tela do Terminal Bluetooth



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 88, a palavra “LGTx” representa um marcador de que a mensagem a seguir está sendo enviada para o registrador de dados, e “WO” indica que é uma mensagem válida sendo enviada para o ESP8266.

O teste de integração do servidor foi bem sucedido, apresentando no servidor WEB os dados de sensoriamento de ambos os protótipos.

7.2.3 Teste do Algoritmo de Correção de Orientação

O teste de integração do algoritmo de Correção de Orientação visa avaliar o comportamento do sistema sob as determinadas condições de teste:

- Todos os componentes estão instalados e conectados na placa de circuito impresso conforme descrito na Figura 62;
- O algoritmo de correção de orientação deve ser executado uma vez por segundo;

Quando o algoritmo de correção de orientação é chamado, este calcula o valor de Δ_x , caso $(\frac{\Delta_x}{\zeta}) < 0$, (onde ζ representa a tolerância adotada), haverá correção na orientação do eixo X através do envio de comando de passos para determinada direção, porém caso $(\frac{\Delta_x}{\zeta}) > 0$ o comando de passos será dado na direção contrária. Procedimento idêntico ocorre para o eixo Y.

O algoritmo de correção fora testado com uma lanterna onde foi possível

observar o comportamento de um seguidor de luz.

O teste de integração do algoritmo de correção foi bem sucedido, porém aplicado em um ambiente controlado.

7.3 Teste de Sistema

O teste de sistema é uma fase do processo de teste de software e de hardware em que o sistema já completamente integrado é verificado quanto a seus requisitos.

Todas as pequenas partes do sistema embarcado já foram devidamente verificadas com sucesso, porém o algoritmo de correção de orientação só foi testado em fontes de luz controlada, para poder validar o sistema seguidor solar ativo de dois eixos proposto torna-se necessário manter os protótipos de controle e de experimento atuando dentro do período das 5h às 19h sem interrupção registrando dados em uma dia de Sol limpo.

Com a coleta de dados para todo o período de Sol em um dia limpo, é esperado obter a comprovação da maior eficiência do seguidor solar ativo de dois eixos proposto neste projeto, tal como apresentado na Figura 7.

Este projeto fora desenvolvido dentro de um cronograma apertado, no qual as datas em que era esperado realizar tais coletas de dados, o clima não era ideal para a coleta, portanto o teste de sistema ainda está pendente.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de não ter sido possível realizar a coleta de dados que efetivamente comprovasse que o seguidor solar ativo de dois eixos proposto é capaz de aproveitar melhor a radiação solar disponível durante o dia, para assim conseguir gerar mais energia elétrica do que um sistema fixo convencional, todos os testes aplicados indicam que o sistema embarcado proposto funciona conforme o esperado, assim verificando não apenas o sistema, mas comprovando a eficácia da metodologia de projeto e desenvolvimento adotada para o sistema embarcado e mecânico.

Embora o projeto desenvolvido se trate de um pequeno protótipo com sistema embarcado composto de módulos de avaliação de sensores e equipamentos largamente utilizados em projetos amadores de programação, todas as etapas de planejamento do sistema embarcado aqui utilizadas seriam igualmente necessárias em um projeto de sistema embarcado para fins de comercialização.

8.1 Trabalhos Futuros

Este projeto manterá sua continuidade mesmo após a submissão oficial deste documento.

Planos futuros incluem a obtenção dos dados comparativos entre o seguidor solar e o sistema fixo; a otimização do sistema embarcado com uma nova versão para a placa de circuito impresso, reduzindo a quantidade de cabos a vista para conexão dos componentes; o uso de potenciômetros para avaliar a posição atual de cada motor e garantir segurança na faixa máxima de movimentação permitida para cada motor, prevenindo-se contra torção e ruptura de cabos por rotação excessiva em algum eixo; implementar um algoritmo de varredura completa, a ser executado no momento de inicialização do sistema a fim de avaliar qual a melhor posição inicial para garantir máxima radiação solar incidente no painel fotovoltaico.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S.; NIJMEH, S. Two axes sun tracking system with plc control. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 45, n. 11, p. 1931–1939, 2004.
- ADA, L. Adafruit driver uln2003. **Adafruit Industries**, 2014.
- ADA, L. Adafruit ina219 current sensor breakout. **Adafruit Industries**, 2016.
- ADA, L. Adafruit mpu-9250. **Adafruit Industries**, 2017.
- AGRAFIOTIS, C. et al. Solar water splitting for hydrogen production with monolithic reactors. **Solar Energy**, Elsevier, v. 79, n. 4, p. 409–421, 2005.
- ALEXANDRU, C.; POZNA, C. Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system. In: IEEE. **Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2008. v. 3, p. 434–439.
- SILVA ANTÔNIO, A. da; RIBEIRO, G. A. G.; PEREIRA, H. A. **Utilização de Seguidores Solares Aplicados a Painéis Solares: Construção e Análise**. [S.l.]: Paraná: SBSE, 2014.
- ARGESEANU, A.; RITCHIE, E.; LEBAN, K. A new solar position sensor using low cost photosensors matrix for tracking systems. **WSEAS Trans Power Syst**, v. 64, p. 189–198, 2009.
- BALL, S. R. **Embedded Microprocessor Systems Real World Design**. 3. ed. [S.l.]: Newnes, 2002.
- CHENMING, H.; WHITE, R. **Solar cells from basic to advanced systems**. [S.l.]: McGraw Hill, London, 1983.
- CORTEZ, R. J. M. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2013.
- ESCOLAR, R. **Movimentos da Terra**. 2009. Disponível em: <<https://www.resumoescolar.com.br/geografia/movimentos-da-terra/>>. Acesso em: 03 out. 2017.
- FADIGAS, E. A. F. A. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica**. 2012. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf>. Acesso em: 5 set. 2017.
- GEOGRAPHIC, N. **Solar Energy**. 2012. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/solar-power/>>. Acesso em: 03 out. 2017.

HULD, T. et al. Analysis of one-axis tracking strategies for pv systems in europe. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 18, n. 3, p. 183–194, 2010.

IJARADAR, J.; CHATTERJEE, S. Real-time water quality monitoring system. 2018.

INVENSENSE INC. **MPU-9250 Product Specification**. [S.I.], 2016. Disponível em: <<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2018.

ITEAD INTELLIGENT SYSTEMS CO.LTD. **NRF24L01 Module**. [S.I.], 2015. Disponível em: <https://www.itead.cc/wiki/NRF24L01_Module>. Acesso em: 1 jul. 2018.

LTDA, I. S. **Impressora 3DCloner DH G3**. 2018. Disponível em: <http://3dcloner.ind.br/detalhes_produto/11/impressora_3dcloner_dh_g3.html>. Acesso em: 26 jun. 2018.

MASTERS, G. M. **Renewable and efficient electric power systems**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2013.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS INC. **DS1307 64x8, Serial, I2C Real-Time Clock**. [S.I.], 2015. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

NORDIC SEMICONDUCTOR. **NRF24L01+ Preliminary Product Specification v1.0**. [S.I.], 2008. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

OLIVEIRA, M. M. **Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

PROLIFIC TECHNOLOGY INC. **PL-2303HX Edition**. [S.I.], 2013. Rev. 03/2013. Disponível em: <http://www.prolific.com.tw/UserFiles/files/ds_pl2303HXD_v1_4_4.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2018.

GUIA ROCHA, F. da et al. Prototipo de micro estação meteorológica para pesquisa de dados atmosféricos na região do pantanal matogrossense. **Anais do Computer on the Beach**, p. 334–343, 2018.

SANTOS, F. Hoefling dos et al. A importância da determinação do espectro da radiação local para um correto dimensionamento das tecnologias de conversão. v. 19, p. 11.43 – 11.54, 10 2015.

SARA, I.; BETTS, T.; GOTTSCHALG, R. Determining spectral response of a photovoltaic device using polychromatic filters. v. 8, 01 2013.

SHENZHEN ANXINKE TECHNOLOGY CO LTD. **ESP-01 WiFi Module**. [S.I.], 2015. Disponível em: <<https://ecksteinimg.de/Datasheet/Ai-thinker%20ESP-01%20EN.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2018.

SHENZHEN KAIZHEN ELECTRONICS CO. LTD. **MicroSD Card Adapter v0.9b**. [S.I.], 2013. Disponível em: <Link indisponível>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SIMÓN-MARTÍN, M. de et al. A review of solar tracker patents in Spain. In: **Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference-Energy Problems and Environmental Engineering**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 292–297.

TAOS INC. **TSL2560, TSL2561 Light-to-digital converter**. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>>.

TEXAS INSTRUMENTS. **ULN200x, ULQ200x High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays**. [S.l.], 1976. Rev. 01/2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**. [S.l.], 1999. Rev. 12/2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface**. [S.l.], 2008. Rev. 12/2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS101x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 3.3-kSPS, 12-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator**. [S.l.], 2018. Rev. 01/2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2018.

TUTORIALS, A. E. **Photovoltaic Solar Cells**. 2017. Disponível em: <<http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/photovoltaics.html>>. Acesso em: 5 set. 2017.

SANTAMARÍA VELÁZQUEZ, J. Control remoto usando bluetooth. 2015.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

WELTEN HOLDINGS LTD. **28BYJ-48-5V Stepper Motor**. [S.l.], 2012. Disponível em: <https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_28BYJ-48.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2018.