

Pedro Miguel Andrade Santos

Desenvolvimento de um robô móvel com Energy Harvesting

Dissertação submetida em cumprimento parcial dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Setembro, 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologias
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores**

Desenvolvimento de um robô móvel com energy harvesting.

Pedro Miguel Andrade Santos

Orientador

Professor Doutor Aníbal Traça Carvalho de Almeida

Co-Orientador

Mestre Ricardo Manuel Pacheco Faria

Júri

Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes
Professor Doutor Aníbal Traça Carvalho de Almeida
Professor Doutor Lino José Forte Marques

Coimbra, 2015

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Aníbal Traça Carvalho de Almeida pela sua disponibilidade, orientação e confiança depositada neste grande projeto. Ao Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra, pela total disponibilidade de recursos e condições de trabalho no decorrer da dissertação.

Ao meu co-orientador Mestre Ricardo Faria, pela orientação e supervisão do trabalho, permitindo assim manter um caminho certo desde o início até ao fim.

Aos colegas do Instituto de Sistemas e Robótica pelas dicas e conselhos, uma boa amizade e companheirismo é fundamental, tanto na partilha de ideias como nos bons e maus momentos.

Aos meus colegas Bruno Martins e Johny Leal, pelos momentos passados na cidade dos estudantes e pelo apoio prestado desde sempre.

Agradecimento especial à Rita Rebelo, pela paciência, compreensão e apoio dados nos momentos mais difíceis no decorrer do curso.

Por último agradecer à minha família, os investidores da minha formação, pelo apoio ao longo do percurso académico pois sem eles não conseguiria alcançar este objetivo.

A todos Muito Obrigado.

Esta dissertação foi realizada no âmbito de uma proposta premiada pelo IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) - (Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrónica) tendo o título: “*Energy harvesting systems for low energy mobile robots* “. *Technical Committee: Energy, Environment, and Safety Issues in Robotics and Automation.*

Resumo

O recurso a tecnologias de *energy harvesting* na robótica móvel tem vindo a crescer, a sua utilização permite a resolução parcial ou até mesmo total da autonomia energética na realização de tarefas. Os robôs móveis que podem beneficiar deste tipo de soluções são normalmente pequenos, de baixo consumo e com sistemas de gestão de energia.

Esta dissertação foi realizada no âmbito de uma proposta premiada pelo IEEE, que visa o desenvolvimento de um robô móvel multi-funcional, de baixo custo e de dimensões reduzidas, alimentado com *energy harvesting*. Foi estudada a viabilidade dos principais tipos de tecnologias existentes e avaliados os que melhor se adequaram aos objetivos do projeto realizado.

O robô desenvolvido contém sistemas de monitorização e gestão de energia permitindo o acompanhamento da potência fornecida e consumida, atuando posteriormente nos periféricos de modo a gerir consumos. É composto por uma arquitetura modular, sendo os três módulos denominados por *base*, *sensor* e *harvester*, de modo a facilitar alterações no hardware ou acrescento de outros módulos. Integra vários tipos de sensores, como sensor de proximidade, temperatura, humidade, barómetro, acelerómetro, giroscópio, magnetómetro, entre outros, tornando-o assim versátil para um grande número de aplicações, como por exemplo monitorização ambiental ou implementação de algoritmos de enxames. O armazenamento de energia tem a possibilidade de integrar baterias de lítio ou supercondensadores, permitindo a realização de testes de autonomia para os diferentes casos.

A solução de *energy harvesting* que se mostra viável passa pela utilização de células fotovoltaicas, apresentando eficiências na ordem dos 13,5% e uma potência máxima de 345 mW. O consumo mínimo do robô foi de 73,6 mW e o máximo de 347,5 mW significando um aumento de 422%. O de tempo carga dos supercondensadores com o robô em *standby* perante a exposição à radiação solar foi cerca de 23 minutos, representando uma diferença de 144% relativamente à carga com o robô desligado. A autonomia varia consoante o tipo de armazenamento usado, periféricos ativos e exposição à radiação solar. O uso do painel fotovoltaico na alimentação do robô permitiu aumentos de autonomia que variam entre 223% (06:52 min - 15:21 min) e 2027% (9:52 min - 3:20:00 h), evidenciando assim a importância da utilização de tecnologias de *energy harvesting*.

Palavras-chave: *energy harvesting*, armazenamento, robô, sensores, autonomia.

Abstract

The use of energy harvesting technologies in mobile robotics is a prominent and growing research area. It enables partial or total energy autonomy when performing tasks. The mobile robots that can benefit from such solutions are typically small, low-consumption and with power management systems.

This work comes from a awarded proposal by IEEE, which aims to develop a multi-functional mobile robot, low-cost, small-sized, and powered with energy harvesting. The viability of the main types of existing energy harvesting technologies were studied, particularly in terms of suitability to the project goals.

The mobile robot developed includes an integrated system for energy monitoring and management, allowing the tracking of the power supplied and consumed. This information is then used to manage energy consumption by acting on peripheral components. The robot consists of a modular architecture, with the three modules named base, sensor, and harvester. This arrangement facilitates changes in the hardware or addition of extra modules. It integrates various types of sensors, such as proximity, temperature, humidity, barometer, accelerometer, gyroscope, magnetometer, among others, thereby making it versatile for a number of applications such as environmental monitoring and swarm robotics. The energy storage unit may use lithium batteries or supercapacitors allowing autonomy tests in both cases.

The viable energy harvesting solution involves the use of photovoltaic cells, with efficiencies of around 13.5% and a maximum power of 345 mW. The minimum consumption of the robot was 73,6 mW and the maximum was 347,5 mW, meaning an increase of 422%. The time of charge of the supercapacitors with the robot on standby and upon exposure to solar radiation was about 23 minutes, a difference of 144% compared with the robot turned off. The autonomy varied depending on the type of storage used, peripheral assets, and exposure to solar radiation. The use of photovoltaic panel in feeding robot allowed autonomy increases ranging from 223% (6:52 min - 15:21 min) and 2027% (9:52 min - 3:20:00 h), thus highlighting the importance of the use of energy harvesting technologies.

Keywords: energy harvesting, storage, robot, sensors, autonomy.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Trabalho realizado e contribuições	3
1.4	Estrutura da dissertação	4
2	Sistemas de <i>Energy Harvesting</i> para Robôs Móveis Autônomos	5
2.1	Energy harvesting	5
2.1.1	Energia solar fotovoltaica	6
2.1.2	Energia termoeétrica	12
2.1.3	Energia mecânica por vibração piezoelétrica e eletromagnética	14
2.2	MPPT - ponto de máxima transferência de potência	17
2.3	Armazenamento de energia	18
2.3.1	Baterias de lítio	19
2.3.2	Supercondensadores	21
2.4	Conversores DC-DC	23
2.4.1	Conversor comutado <i>step-down (buck)</i>	23
2.4.2	Conversor comutado <i>step-up (boost)</i>	24
2.5	Robôs móveis alimentados com energy harvesting	25
2.6	Robôs de enxame	27
2.7	Sumário	29
3	Robô Móvel Desenvolvido	30
3.1	Descrição geral	30
3.1.1	Estrutura física	30
3.1.2	Arquitetura a alto nível	31
3.1.3	Aplicações do robô	31
3.2	Modelo robô diferencial	32
3.3	Arquitetura modular	33
3.3.1	Módulo <i>base</i>	34
3.3.2	Módulo <i>sensor</i>	34
3.3.3	Módulo <i>harvester</i>	35
3.4	<i>Hardware</i>	35
3.4.1	Microcontrolador ARM [®] -M0	35

3.4.2	Sensores	36
3.4.3	Atuadores	39
3.4.4	Comunicação	40
3.4.5	Armazenamento de dados	42
3.4.6	Módulo de energy harvesting	42
3.4.7	Gestão de energia	44
3.4.8	Carregamento do robô	46
3.5	Plataforma de programação ARM [®] mbed TM	48
4	Testes Experimentais e Resultados	50
4.1	Testes gerais de hardware	50
4.2	Ensaio relacionados com questões energéticas	50
4.2.1	Consumos	51
4.2.2	Autonomia	52
4.2.3	Curvas de carga	54
4.2.4	Curvas de descarga	58
5	Conclusões e Trabalho Futuro	59
5.1	Conclusão	59
5.2	Trabalho futuro	60
	Bibliografia	62
A	Caracterização de Painéis Fotovoltaicos	68
A.1	Descrição Geral	68
A.2	<i>Graphical User Interface</i> (GUI) desenvolvido em LabVIEW [®]	69
A.3	Testes experimentais	70
A.3.1	Ficheiro Excel exportado	72
A.4	<i>Hardware</i>	72
A.4.1	Carga variável	72
A.4.2	Medição de temperatura	73
A.4.3	Montagem do <i>hardware</i>	75
B	Caracterização de <i>ThermoElectric Generator</i> (TEG)	77
B.1	Descrição Geral	77
B.2	GUI desenvolvido em LabVIEW [®]	78
B.3	Testes experimentais	79
B.3.1	Ficheiro Excel exportado	81
B.3.2	Montagem do <i>hardware</i>	81
C	Analizador de eficiências de conversores DC/DC	83
C.1	Descrição Geral	83
C.2	GUI desenvolvido em LabVIEW [®]	84
C.3	Testes experimentais - Carregamento por indução	85
C.3.1	Ficheiro Excel exportado	87
C.3.2	Montagem do <i>hardware</i>	87

D	Descarga Supercondensadores	89
D.1	Curvas de descarga dos supercondensadores	89
E	Testes e Resultados Complementares	90
E.1	Testes aos microfones	90
E.1.1	Sinais analógicos	90
E.1.2	Sinais digitais	92
E.2	Testes de comunicação	93
E.2.1	Testes de comunicação via rádio	93
E.2.2	Testes de comunicação via infravermelhos	94
E.3	Testes de Velocidades de Locomoção	95
F	Calibração do Medidor de Potências	97
F.1	Alterações <i>hardware</i>	97
F.2	Método de calibração e resultados obtidos	98
G	Esquema, <i>Printed Circuit Board</i> (PCB), Lista de material do robô	100
G.1	Esquema Completo do Robô	100
G.1.1	Esquema módulo <i>Base</i>	100
G.1.2	Esquema módulo <i>Sensor</i>	115
G.1.3	Esquema módulo <i>Harvester</i>	122
G.2	PCB	130
G.3	Lista de material	143
H	Entradas e Saídas do Microcontrolador	147
H.1	Lista de I/O Microcontrolador	147
I	Códigos em Matlab[®]	150
I.1	MCP3424	150
I.2	LTC3619	151
I.3	TPS3803-01	152
I.4	TPS61201	152
J	Modo de programação - SWD	154
J.1	<i>Hardware</i> necessário	154
J.2	<i>Drivers</i> e <i>firmware</i> necessários	155
K	Manual de Iniciação Rápida	157
K.1	Legenda dos pontos essenciais	157
K.2	Instruções e Procedimentos	161
K.3	Questões Frequentes	162
L	Interface de Testes ao Robô	165
M	Caixa de Transporte do Robô	167

Lista de Figuras

1.1	Exemplos de aplicações de <i>energy harvesting</i> , das marcas Seiko e Instep Nanopower	1
1.2	Arquitetura de alto nível do robô;	3
1.3	Estrutura da dissertação;	4
2.1	Diagrama exemplificativo de um sistema de Energy Harvesting, adaptado da fonte [1];	6
2.2	Hierarquia principal de tecnologias de <i>energy harvesting</i> , fonte adaptada de [2];	6
2.3	Distribuição da radiação solar, fonte portal das energias renováveis [3];	7
2.4	Tipos de painéis fotovoltaicos, fonte adaptada de [4];	8
2.5	Efeito fotovoltaico numa junção p-n, fonte adaptada de [5];	9
2.6	Esquema equivalente de uma célula solar, fonte adaptada de [6];	10
2.7	Curva característica I-V de um painel fotovoltaico [6];	11
2.8	Efeitos provocados na curva de característica I-V com a variação da radiação incidente e variação da temperatura do painel [4];	12
2.9	Estruturas interna e externa de um gerador termoelétrico, fonte adaptada de [7];	13
2.10	Curvas I-V e Potência para vários ΔT , fonte adaptada de [8];	14
2.11	Circuito de acondicionamento de energia elétrica, fonte adaptada de [9];	15
2.12	Exemplo demonstrativo de estrutura piezoelétrica e exemplos de soluções comerciais;	15
2.13	Exemplo de gerador desenvolvido pelo instituto de engenharia mecatrônica da universidade de engenharia e tecnologia do Paquistão [10];	17
2.14	ponto máximo de transferência de um painel fotovoltaico e solução comercial de <i>Maximum Power Point Transfer</i> (MPPT);	18
2.15	Evolução histórica das baterias e comparação da relação potências vs energia de diferentes tipos de armazenamento;	19
2.16	Fluxo de iões de lítio durante a carga e descarga da bateria de lítio, fonte adaptada de [11];	20
2.17	Perfil de carga e capacidade da bateria de iões de lítio [12];	21
2.18	Constituição interna de um supercondensador, fonte adaptada de [13];	22

2.19	Circuito equivalente do condensador [14];	22
2.20	Circuito básico de um conversor DC/DC <i>buck</i> , com formas de onda associadas aos componentes. Fonte adaptada de [15];	24
2.21	Circuito básico de um conversor DC/DC <i>boost</i> , com formas de onda associadas aos componentes. Fonte adaptada de [15];	25
2.22	Robô solar da <i>National Aeronautics and Space Administration</i> (NASA): <i>GROVER</i> ;	26
2.23	Robô da NASA: <i>Curiosity rover</i> ;	26
2.24	Robô agrícola <i>Ladybird</i> ;	26
2.25	Robô de limpeza <i>Scrobby Solar kit</i> ;	26
2.26	Robô académico de exame <i>Alice</i> ;	27
2.27	Robô educacional <i>E-puck</i> ;	27
2.28	Robô académico <i>Kilobot</i> ;	28
2.29	Robô de aplicação exame <i>Swarm Bot</i> ;	28
2.30	Robô de aplicação exame <i>Colias</i> ;	28
3.1	Aspeto físico do robô desenvolvido;	30
3.2	Arquitetura alto nível do robô desenvolvido;	31
3.3	Robô diferencial, fonte adaptada de [16];	33
3.4	Componentes do módulo <i>base</i> e tipos de comunicação associados;	34
3.5	Componentes do módulo <i>sensor</i> e tipos de comunicação associados;	34
3.6	Diagrama de ligações e componentes do módulo <i>harvester</i> - supercondensadores e tipos de comunicação associados;	35
3.7	Diagrama de ligações e componentes do módulo <i>harvester</i> - bateria de lítio e tipos de comunicação associados;	35
3.8	Sensor de cores <i>rgb ISL29125</i> , sensor proximidade e luminosidade <i>VCNL4020</i> , sensor de humidade e temperatura <i>SHT21</i> ;	37
3.9	Barómetro <i>BMP180</i> , unidade inercial <i>MPU9250</i> , <i>encoder</i> magnético <i>AS5600</i> ;	38
3.10	Disposição e diagrama de aquisição de sinal dos microfones incorporados no robô;	38
3.11	Motor e driver usados no sistema de tração do robô;	40
3.12	<i>Buzzer</i> <i>ABT-410-RC</i> , <i>LED RGB</i> <i>CLV1A-FKB</i> , <i>LED</i> branco <i>CLM3C-WKW</i> ;	41
3.13	Módulo <i>transceiver</i> <i>nrf24l01</i> ;	41
3.14	Diagrama de comunicação por infravermelhos, emissão- receção;	42
3.15	Diagrama de controlo de alimentação de barramentos <i>Inter-Integrated Circuit</i> (I2C) e <i>Serial Peripheral Interface</i> (SPI), distribuição de periféricos pelos canais de I2C0 e I2C1 e controlo de alimentação de sistema de microfones e recetor de infravermelhos;	45
3.16	Circuitos usados para leitura de corrente e tensão na <i>Analog to Digital Converter</i> (ADC) diferencial de quatro canais;	45
3.17	Formas de carregamento do robô;	46
3.18	Ambiente gráfico da plataforma de programação <i>online ARM®mbed™</i> ;	48
3.19	Placa de desenvolvimento usada, <i>Freescale®</i> - <i>FRDM-KL25Z</i> ;	49

4.1	Ponto de medição de consumos, barramento 3.3V;	51
4.2	Ponto de medição das curvas de carga e descarga;	54
4.3	Curvas de carga com a exposição do robô à radiação solar com um valor aproximado de $1000W/m^2$;	55
4.4	Evolução da curva de carga da bateria de lítio com o robô desligado exposto a radiação solar durante quatro horas;	56
4.5	Curvas de carga através do <i>Universal Serial Bus</i> (USB) ou pinos mola;	57
4.6	Curva de carga da bateria de lítio com o robô desligado através do USB ou pinos mola;	57
A.1	Arquitetura do sistema de caracterização de painéis fotovoltaicos;	68
A.2	GUI (<i>Graphical User Interface</i>) desenvolvido em LabVIEW® para sistema de caracterização de painéis fotovoltaicos;	69
A.3	Curvas de característica do painel fotovoltaico 4.8x5.3cm REF9, com uma radiação solar de aproximadamente $1000W/m^2$;	71
A.4	Curvas de característica do painel fotovoltaico 4.5x5.5cm REF8, com uma radiação solar de aproximadamente $1000W/m^2$;	71
A.5	Circuito da carga variável;	73
A.6	PCB desenvolvida para carga variável;	73
A.7	Circuito de excitação e PCB desenvolvida para a medição de temperaturas com termístores;	74
A.8	Componentes usados no processo de calibração dos termístores;	74
A.9	Resultados obtidos na calibração dos termístores a partir da utilização de uma resistência PT100 calibrada;	75
A.10	Montagem do <i>hardware</i> necessário para a caracterização de módulos fotovoltaicos;	76
B.1	Arquitetura do sistema de caracterização de TEG;	77
B.2	GUI (<i>Graphical User Interface</i>) desenvolvido em LabVIEW® para sistema de caracterização de TEG;	78
B.3	Curvas de característica do modelo TEG - CP85438 para várias diferenças de temperatura aplicadas;	80
B.4	Curvas de característica do modelo TEG - TEC1-12706 para várias diferenças de temperatura aplicadas;	80
B.5	Montagem do <i>hardware</i> necessário para a caracterização de módulos TEG;	82
C.1	Arquitetura do sistema de caracterização de eficiências de conversores DC/DC;	84
C.2	GUI (<i>Graphical User Interface</i>) desenvolvido em LabVIEW® para sistema de caracterização de eficiências de conversores DC/DC;	84
C.3	<i>Kit</i> adquirido para testes de carregamento por indução;	85
C.4	Diagrama de montagem para análise de eficiência do kit de carregamento por indução adquirido;	86
C.5	Curvas de eficiência do <i>kit</i> , com bobinas de 800mA e 1000mA;	86

C.6	Curvas de relacionamento de tensões, correntes e potências nas bobinas de 800mA e 1000mA;	87
C.7	Montagem do <i>hardware</i> necessário para a caracterização de eficiências de conversores DC/DC;	88
D.1	Curvas de descarga dos supercondensadores;	89
E.1	Diagrama de exposição do robô perante o emissor sonoro;	91
E.2	Sinais analógicos com <i>buzzer</i> colocado à frente e atrás do robô;	91
E.3	Sinais analógicos com <i>buzzer</i> colocado à direita e à esquerda do robô;	92
E.4	Sinais digitais com <i>buzzer</i> colocado à frente e atrás do robô;	93
E.5	Sinais digitais com <i>buzzer</i> colocado à direita e à esquerda do robô;	93
E.6	Placa de circuito impresso desenvolvida para simulação de segundo robô;	94
E.7	Exposição dos <i>LEDs</i> e recetor de infravermelhos no módulo <i>sensor</i> ;	95
E.8	Relação de velocidade linear vs <i>duty cycle</i> aplicado aos motores;	96
F.1	Fios auxiliares para calibração dos medidores de potências;	97
G.1	<i>Layer top</i> do módulo <i>base</i> ;	131
G.2	<i>Layer top</i> com legenda do módulo <i>base</i> ;	132
G.3	<i>Layer bottom</i> do módulo <i>base</i> ;	133
G.4	<i>Layer bottom</i> com legenda do módulo <i>base</i> ;	134
G.5	<i>Layer top</i> do módulo <i>sensor</i> ;	135
G.6	<i>Layer top</i> com legenda do módulo <i>sensor</i> ;	136
G.7	<i>Layer bottom</i> do módulo <i>sensor</i> ;	137
G.8	<i>Layer bottom</i> com legenda do módulo <i>sensor</i> ;	138
G.9	<i>Layer top</i> do módulo <i>harvester</i> ;	139
G.10	<i>Layer top</i> com legenda do módulo <i>harvester</i> ;	140
G.11	<i>Layer bottom</i> do módulo <i>harvester</i> ;	141
G.12	<i>Layer bottom</i> com legenda do módulo <i>harvester</i> ;	142
J.1	Diagrama de programação do robô, programador - ligação - robô;	154
J.2	Passo 1: Detecção do <i>solder jumper</i> SJ11;	155
J.3	Passo 2: Corte do <i>solder jumper</i> SJ11;	155
J.4	Passo 3: Soldadura de <i>header-pitch 2.54mm</i> no <i>solder jumper</i> SJ11;	155
J.5	Disco criado pela placa FRDM KL25Z através das <i>drivers mbedTM</i> ;	156
K.1	<i>Layer Top</i> do módulo <i>base</i> ;	157
K.2	<i>Layer Bottom</i> do módulo <i>base</i> ;	158
K.3	<i>Layer Top</i> do módulo <i>sensor</i> ;	158
K.4	<i>Layer Bottom</i> do módulo <i>sensor</i> ;	159
K.5	<i>Layer Top</i> do módulo <i>harvester</i> sem painel;	159
K.6	<i>Layer Bottom</i> do módulo <i>harvester</i> ;	160
K.7	<i>Layer Top</i> do módulo <i>harvester</i> com painel;	160
K.8	Montagem final com todos os módulos;	161

L.1	Esquema de ligação do robô ao computador;	165
L.2	GUI (<i>Graphical User Interface</i>) desenvolvido em LabVIEW [®] para testar o robô;	166
M.1	Projeto 3D da caixa de transporte - caixa montada;	167
M.2	Projeto 3D da caixa de transporte - caixa desmontada;	168
M.3	Projeto 3D da caixa de transporte - base de acondicionamento; . .	169

Lista de Tabelas

2.1	Potências tipicamente fornecidas por várias tecnologias de <i>energy harvesting</i> , fonte adaptada de [17];	7
2.2	Rendimento das diferentes células fotovoltaicas, fonte adaptada de [4] e [18];	9
2.3	Soluções de geradores piezoelétricos da marca PIEZO SYSTEMS, INC.	16
2.4	Propriedade dos materiais do eletrodo positivo;	20
2.5	Propriedades do principais conversores DC/DC, fonte adaptada de [19];	23
2.6	Robôs de enxame existentes e suas características, fonte adaptada de [20];	28
3.1	Sinais lógicos provenientes do microcontrolador e efeito provocado no motor <i>Direct Current</i> (DC);	39
3.2	Tipo de armazenamento usado e <i>solder jumpers</i> associados;	43
3.3	Sinais digitais provenientes do LTC3619 e respetivo estado de carga;	47
4.1	Consumos no barramento 3.3V com diversos casos de periféricos ativos e motores desligados;	51
4.2	Consumos no barramento 3.3V com situações comuns de funcionamento do robô;	52
4.3	Consumos no barramento 3.3V com possíveis situações espontâneas que possam existir;	52
4.4	Dados relativos ao armazenamento e painel solar fotovoltaico;	53
4.5	Autonomia do robô em diversos casos com recurso ao armazenamento em supercondensadores sem exposição à radiação solar;	53
4.6	Autonomia do robô em diversos casos com recurso ao armazenamento em supercondensadores com exposição à radiação solar;	54
4.7	Autonomia do robô em diversos casos com recurso ao armazenamento na bateria de lítio sem exposição à radiação solar;	54
A.1	Resultados obtidos na caracterização dos dois modelos de painéis fotovoltaicos;	70
A.2	Ficheiro exportado da aplicação em LabVIEW [®] resultante da caracterização de um painel fotovoltaico;	72

B.1	Ficheiro exportado da aplicação em LabVIEW [®] resultante da caracterização do TEG;	81
C.1	Exemplo de ficheiro exportado da aplicação em LabVIEW [®] resultante da caracterização da eficiência do <i>kit</i> de carregamento por indução adquirido;	88
E.1	Resultados de alcance máximo de comunicação via rádio relativamente à potência de sinal emitida;	94
E.2	Resultados obtidos de velocidade na locomoção do robô;	95
F.1	Resultados obtidos da calibração do medidor de potências do módulo <i>harvester</i> - supercondensadores:	98
F.2	Resultados obtidos da calibração do medidor de potências do módulo <i>harvester</i> - bateria lítio:	99
G.1	Lista de material do módulo <i>base</i> ;	144
G.2	Lista de material do módulo <i>sensor</i> ;	145
G.3	Lista de material do módulo <i>harvester</i> - supercondensador;	145
G.4	Lista de material do módulo <i>harvester</i> - lítio;	146
H.1	Lista de entradas digitais do microcontrolador;	147
H.2	Lista de saídas digitais do microcontrolador;	148
H.3	Lista de sinais analógicos do microcontrolador;	148
H.4	Lista de sinais de comunicação do microcontrolador;	149
H.5	Lista de sinais para programação do microcontrolador;	149

Lista de Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DCR	<i>Direct Current Resistance</i>
EMI	<i>ElectroMagnetic Interference</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ID	Identidade
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Transfer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>
RTG	<i>Radioisotope thermoelectric generator</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>

TEG *ThermoElectric Generator*

USB *Universal Serial Bus*

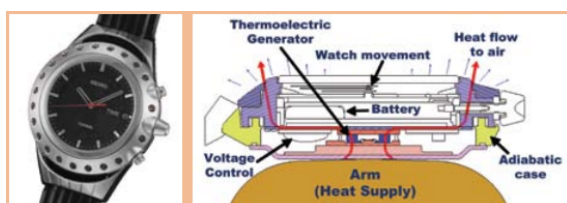
Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A *Ernergy Harvesting* é uma área de pesquisa que continua a crescer a um ritmo acelerado envolvendo assim muitos investigadores, tem uma ampla gama de aplicações, como por exemplo redes de sensores sem fios de monitorização ambiental, redes de sensores para aplicações médicas, monitorização de pressão em pneus, alimentação de veículos não tripulados, sistemas de segurança domésticos e entre outras [21]. Desenvolvimentos recentes na tecnologia à micro escala permitiram que certos materiais e componentes fossem integrados nesta área abrangendo assim mais aplicações que antes não seriam possíveis.

Na figura 1.1 é possível visualizar duas aplicações na área:



(a) Relógio Seiko - Modelo - 6C12 [22];



(b) Solução da Instep Nanopower [23];

Figura 1.1: Exemplos de aplicações de *energy harvesting*, das marcas Seiko e Instep Nanopower

A figura 1.1 mostra dois exemplos de aplicações de *energy harvesting*, à esquerda é visível um relógio da marca Seiko que utiliza um gerador termoeletrico - TEG para gerar energia a partir de diferenças de temperatura existentes no braço e no relógio [22]. À direita é apresentada uma aplicação em calçado da marca Instep Nanopower, esta desenvolveu um sistema que transforma a energia mecânica em energia elétrica [23].

Em particular uma área com forte aplicação neste tipo de soluções é a robótica móvel, a capacidade finita no armazenamento de energia limita a sua autonomia impedindo de realizar tarefas com maior duração. A utilização de tecnologias de

energy harvesting possibilita a resolução do problema parcial ou até mesmo total da autonomia energética. Um ponto importante na aplicação destes sistemas é a limitação da extração de energia a partir do meio ambiente, para cada tipo de aplicação têm que ser realizados estudos apropriados para maximização do rendimento. Os robôs móveis que podem beneficiar desta solução são normalmente pequenos, de baixo consumo e que incorporam sistemas de poupança de energia, impedindo assim gastos de energia quando não se encontram a realizar tarefas ou quando não necessitam da utilização todos os seus periféricos. Estes robôs podem ser por exemplo para monitorização ambiental ou enxames de robôs.

Para o aluno é também extremamente motivante saber que o trabalho desenvolvido partiu de uma proposta por uma organização internacionalmente conhecida, podendo assim abrir novas portas ao seu futuro.

1.2 Objetivos

O trabalho realizado nesta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um robô móvel multi-funcional, de baixo custo e de dimensões reduzidas (cerca de dez centímetros de diâmetro) alimentado com *energy harvesting*. O robô deve conter um sistema de monitorização de energia, tanto fornecida como energia consumida, uma arquitetura modular e vários tipos de sensores tornando-o assim versátil para um grande número de aplicações. O seu desenvolvimento tem em conta os requisitos principais, custo e consumo energético de todos os componentes usados. O robô pode ainda ser replicado formando assim um enxame de robôs, permitindo testar algoritmos de comportamentos de enxames.

Nesta dissertação são estudados os principais tipos de tecnologias de *energy harvesting* que melhor se adequam para aplicações em robôs móveis de dimensões reduzidas, mostrando a viabilidade da aplicação de cada uma destas. Relativamente ao armazenamento de energia, este deve ter a possibilidade de integrar a solução de baterias de lítio ou supercondensadores.

É importante salientar que existem no mercado robôs móveis de dimensões e custo reduzido para aplicações de enxames de robôs, no entanto são escassas as soluções de plataformas com sistemas de monitorização avançada de energia e com soluções de *energy harvesting* incorporadas.

1.3 Trabalho realizado e contribuições

De acordo com os objetivos propostos para o presente trabalho, foi desenvolvido um protótipo de um robô móvel que integra tecnologias de *energy harvesting* e de gestão de energia. A figura 1.2 apresenta a arquitetura de alto nível do robô.

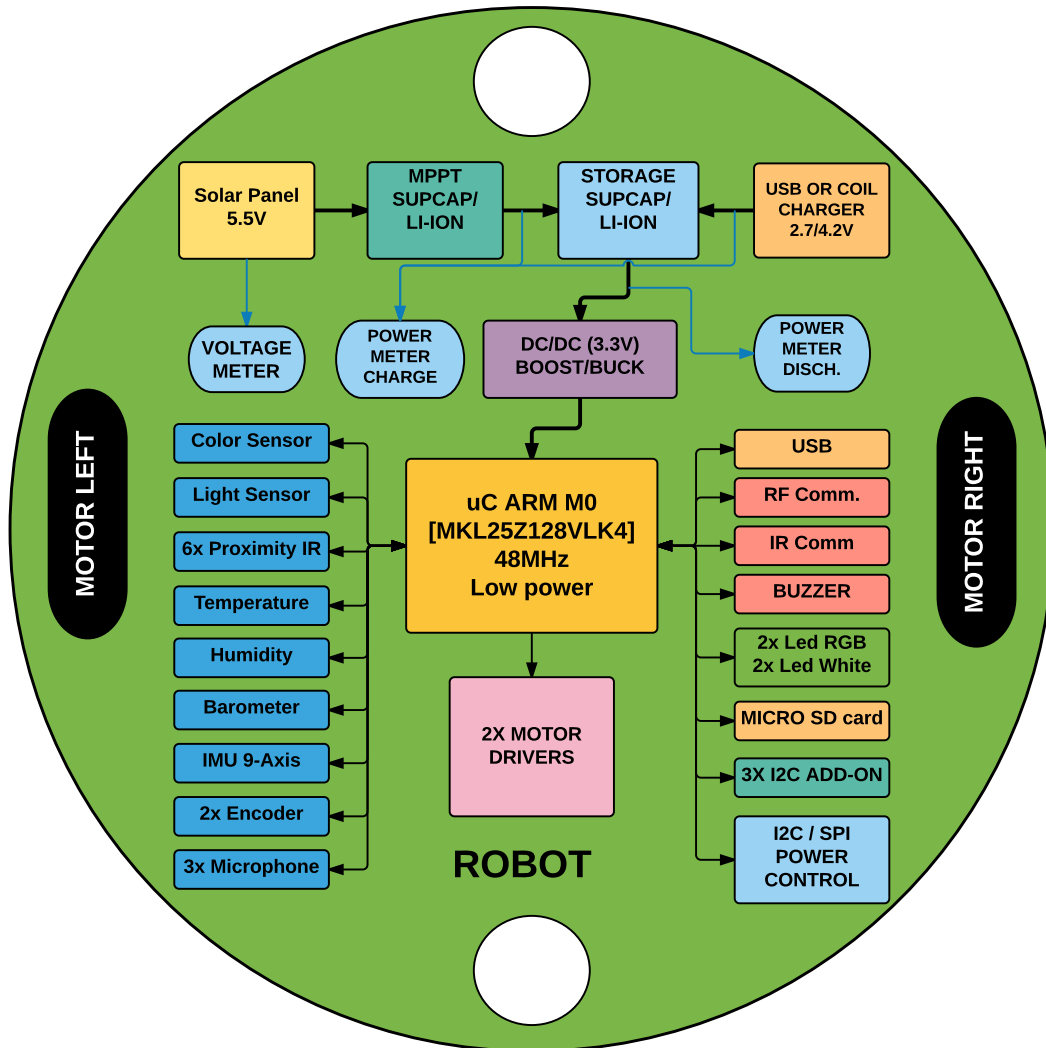


Figura 1.2: Arquitetura de alto nível do robô;

O facto do projeto ser *Open Source* e com possibilidade de programação a alto nível, é uma mais valia na realização tanto de testes como alterações no hardware.

O robô é composto por um conjunto alargado de sensores tornando-o útil para enúmeras aplicações, a possibilidade do uso de diferentes tipos de armazenamento de energia, permite a realização de estudos de autonomia avançados. Devido ao seu baixo custo de produção pode ser usado em robótica de enxame para testes de algoritmos complexos.

1.4 Estrutura da dissertação

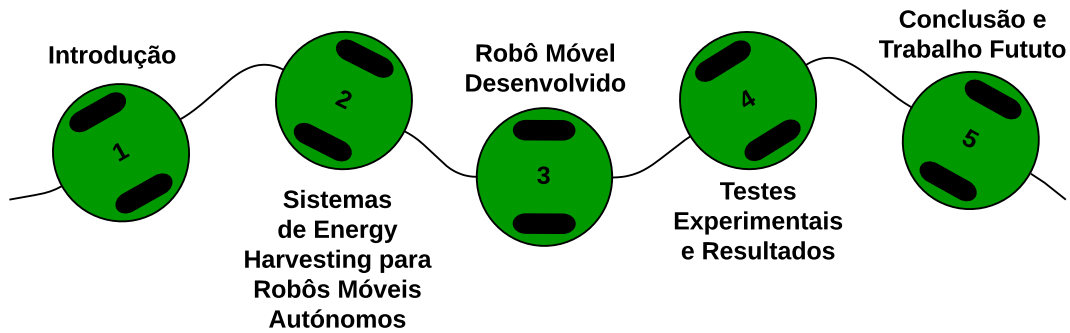


Figura 1.3: Estrutura da dissertação;

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. Após a introdução, o capítulo 2 apresenta uma revisão geral da literatura e estado da arte, relativa a sistemas de *Energy Harvesting* para robôs móveis autônomos, são abordadas as principais tecnologias existentes e a sua viabilidade. O capítulo 3 dá a conhecer o robô móvel desenvolvido, inicialmente é abordada a arquitetura a alto nível e posteriormente é apresentada a arquitetura modular e o *hardware* que compõe o robô. O capítulo 4 apresenta os testes experimentais efetuados e os resultados obtidos. Por fim, o capítulo 5 diz respeito às conclusões atingidas com a realização da dissertação e são apresentadas sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

Sistemas de *Energy Harvesting* para Robôs Móveis Autônomos

Neste capítulo são abordados conceitos relativos ao trabalho realizado na presente dissertação e uma visão geral do estado da arte, encontra-se dividido em seis secções sendo estas: Na primeira secção é apresentado o conceito de *energy harvesting* e os principais tipos de tecnologias de recolha de energia a partir do meio ambiente, direcionados para o trabalho desenvolvido; Na segunda é dado a conhecer o módulo MPPT e os principais algoritmos de máxima transferência de potência; Na terceira é apresentada uma revisão relativa à evolução das baterias químicas e as principais formas de armazenamento de energia elétrica na robótica móvel da atualidade; Na quarta são dados a conhecer os principais tipos de conversores DC/DC existentes comparados sob forma de tabela; Na quinta são apresentadas algumas soluções existentes de robôs móveis com *energy harvesting*; Na sexta são apresentadas algumas soluções existentes de robótica de enxame, comparando-as sob forma de tabela.

2.1 Energy harvesting

Energy harvesting também conhecida pelos termos na língua inglesa *Power harvesting* ou *Energy scavenging* é um processo de captação de pequenas quantidades de energia proveniente do meio ambiente, transformando-a em energia elétrica utilizável. A energia disponível para a captação é principalmente fornecida pela luz ambiente (iluminação artificial ou natural), radio frequências, fontes térmicas ou fontes mecânicas. A utilização deste tipo de tecnologias na robótica móvel proporciona uma maior autonomia aos robôs, permitindo que estes consigam operar durante mais tempo, não sendo necessário o seu carregamento ou de utilização de cabos de alimentação até aos mesmos. Para se perceber melhor o que incorpora um sistema de *energy harvesting* é apresentada a figura 2.1, contém um transdutor responsável pela conversão da energia proveniente do ambiente em energia elétrica, de seguida é efetuado o armazenamento controlado da energia e posteriormente a conversão DC-DC de forma a garantir a amplitude de tensão desejada para alimentação da carga de baixo consumo.

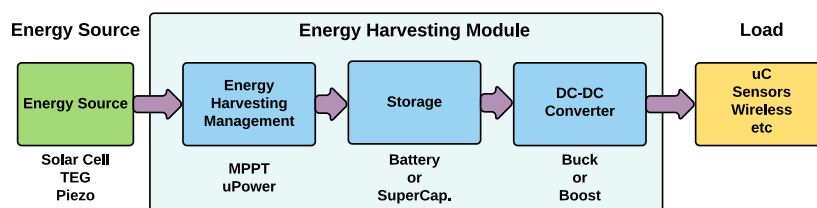


Figura 2.1: Diagrama exemplificativo de um sistema de Energy Harvesting, adaptado da fonte [1];

É possível efetuar a classificação das principais tecnologias de *energy harvesting* de forma hierárquica como mostra a figura 2.2;

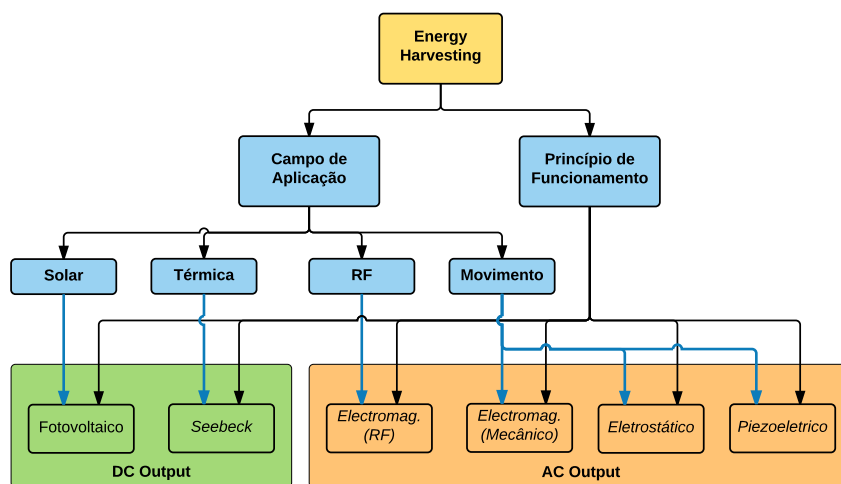


Figura 2.2: Hierarquia principal de tecnologias de *energy harvesting*, fonte adaptada de [2];

É importante conhecer qual a potência típica fornecida por este tipo de soluções, por unidade de área ou volume, para tal é apresentada a tabela 2.1 que relaciona o tipo de tecnologia usada, o meio em que está aplicada e a potência fornecida.

2.1.1 Energia solar fotovoltaica

Energia Solar

A energia solar é das mais importantes fontes de energia renováveis que tem ganhado atenção nos últimos anos, a sua elevada abundância relativamente às outras fontes de energia faz com que seja muito utilizada. A quantidade de energia fornecida à terra pelo sol durante um dia é suficiente para estabelecer as necessidades totais da terra durante um ano [24]. A radiação solar emitida pelo sol é recebida pela superfície terrestre com distribuição alternada devido à existência

Tabela 2.1: Potências tipicamente fornecidas por várias tecnologias de *energy harvesting*, fonte adaptada de [17];

Fonte de Energy Harvesting	Ambiente Local	Harvester Potência	Harvester Considerações	Circuito Considerações
Luz	Interior	$10\mu W/cm^2$	Intensidade de luz e comprimento de onda	MPPT Necessário
	Exterior	$10mW/cm^2$		
Mecânica vibração Piezoelétrica	Humanos	$4\mu W/cm^2$	Vibração da amplitude e frequência de ressonância	Necessário conversor AC/DC
	Máquinas	$250\mu W/cm^2$		
Mecânica vibração Eletromagnética	Humanos	$50\mu W/cm^3$		
	Máquinas	$50\mu W/cm^3$		
Térmica	Humanos	$25\mu W/cm^2$	Gradientes térmicos e fluxos de calor	Baixa tensão de arranque
	Máquinas	$10mW/cm^2$		
Ondas Rádio	Indireta	$0,1\mu W/cm^2$	Distância da fonte e antena ressonante	Boa eficiência, baixa tensão de retificação
	direta	$1mW/cm^2$		

de nuvens, gases, vapores de água, poeiras e vegetação. Depois de atravessar a atmosfera atinge a superfície terrestre de três formas distintas:

- **Radiação direta** – Atinge diretamente a superfície;
- **Radiação difusa** – É desviada em diferentes direções pelos componentes da atmosfera;
- **Radiação refletida** – É refletida pelo solo e objetos circundantes.

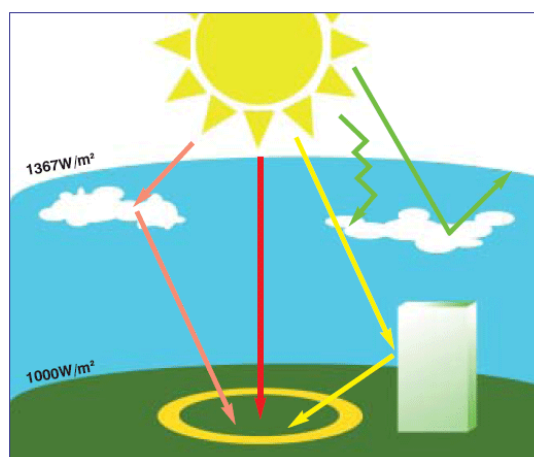


Figura 2.3: Distribuição da radiação solar, fonte portal das energias renováveis [3];

O instrumento que mede a radiação solar total é designado por piranómetro, é usado para medir toda a radiação que chega à superfície da Terra [3]. Num dia sol, com o céu limpo, sensivelmente ao meio-dia a radiação é aproximadamente de $1000 W/m^2$.

Células fotovoltaicas

Células solares ou fotovoltaicas são responsáveis pela transformação de energia proveniente de uma fonte de luz em energia elétrica, este fenómeno é possível devido ao efeito fotovoltaico. Existem três tipos de células fotovoltaicas mais comuns, as de silício com cristais monocristalinos, com cristais policristalinos e as de silício amorfo.

- **Silício monocristalino** - A célula de silício monocristalino é a mais usada comercialmente na composição de painéis fotovoltaicos, embora o seu custo seja elevado, relativamente à sua espessura ronda os 300 microns [25]. A eficiência em laboratório pode chegar aos 24% e a nível comercial aos 16% [18] [4];
- **Silício policristalino** - A célula de silício policristalino é obtida a partir de blocos de silício de pureza intermédia, o seu custo de fabrico é reduzido, no entanto a eficiência é menor. A eficiência em laboratório pode chegar aos 18% e a nível comercial aos 14% [18] [4];
- **Silício amorfo** - O Silício amorfo é usado sobretudo em produtos de consumo como relógios e calculadoras, pelo que é possível colocar uma película fina de silício amorfo sobre um substrato (metal, vidro, plástico). A eficiência em laboratório pode chegar aos 13% e a nível comercial aos 7% [18] [4].

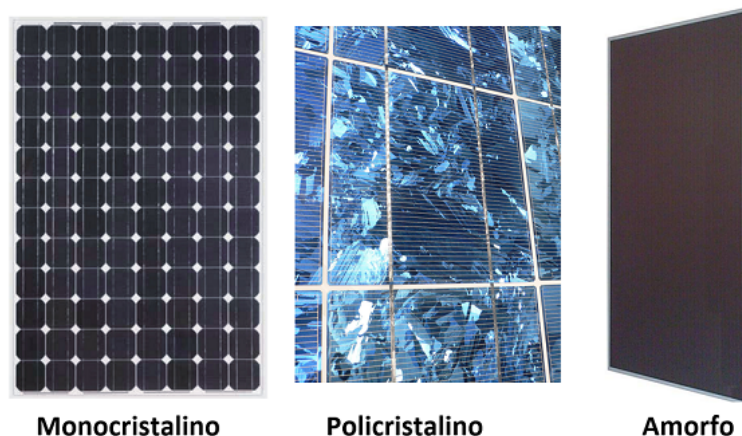


Figura 2.4: Tipos de painéis fotovoltaicos, fonte adaptada de [4];

Cada painel é constituído por vários módulos fotovoltaicos, em que cada módulo é constituído por um determinado número de células, a potência do painel é relacionada com o número de células utilizadas e a característica tensão/corrente está relacionada com o tipo de ligações entre células, sendo estas série/paralelo respetivamente.

A tabela 2.2 apresenta de uma forma resumida o rendimento dos três tipos de células fotovoltaicas vistas anteriormente.

Tabela 2.2: Rendimento das diferentes células fotovoltaicas, fonte adaptada de [4] e [18];

Tipo de Células	Rendimento		
	Típico	Máximo	
		Comercial	Laboratório
Monocristalinas	14-16%	22%	24%
Policristalinas	11-13%	15%	18%
Silício amorfo	6-7%	10%	12%

Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o processo responsável pela conversão de energia proveniente de uma fonte luz em energia elétrica. O efeito dá-se quando são absorvidos fótons (partículas de luz) e libertados eletrões, durante este processo estão envolvidas três etapas físicas em simultâneo: [26]

- **Captação de luz** - os fótons são absorvidos e a sua energia é usada para excitar eletrões;
- **Separação de carga** - os eletrões excitados são separados espacialmente de estado fundamental para evitar a recombinação;
- **Seleção de Carga transporte/excitação** - os eletrões e as lacunas são transportadas para os terminais do dispositivo onde os eletrões de alta energia são seletivamente extraídos a um terminal, enquanto que as lacunas restabelecem o outro terminal.

Na figura 2.5 é possível visualizar o que acontece no interior da junção p-n quando esta é exposta a uma fonte luminosa.

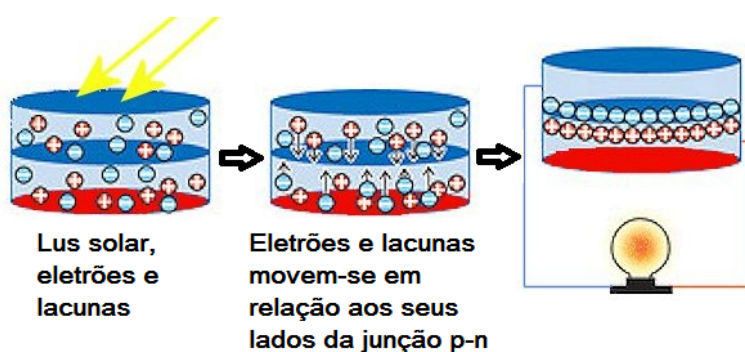


Figura 2.5: Efeito fotovoltaico numa junção p-n, fonte adaptada de [5];

Modelo teórico da célula fotovoltaica

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica (figura 2.6) inclui uma fonte de corrente, um diodo (D), a resistência série equivalente (R_s) e a resistência de

fugas equivalente (R_{sh}). A saída da fonte de corrente é diretamente proporcional à luz que incide sobre a célula [6].

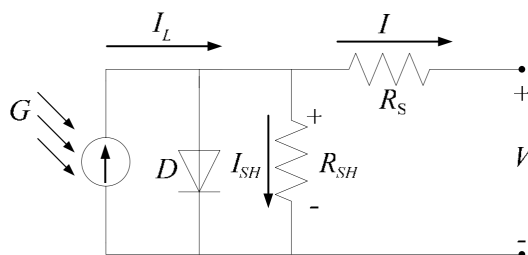


Figura 2.6: Esquema equivalente de uma célula solar, fonte adaptada de [6];

O aumento da sofisticação do modelo, como precisão e complexidade podem ser introduzidos adicionando mais dependências: [6]

- Dependência da temperatura na corrente de saturação I_0 do diodo e na tensão térmica Vt ;
- Dependência da temperatura na foto corrente I_L ;
- Resistência série R_s que dá uma forma mais precisa ao modelo entre o ponto de potência máxima e a tensão em circuito aberto, representa perdas devido ao fluxo de corrente;
- Resistência de fugas R_{sh} que representa a fuga de corrente para a terra é importante que este valor seja elevado;
- Fator de qualidade n do diodo, tornando-se assim um parâmetro variável no modelo.

A equação 2.1 traduz o modelo esquemático de uma célula fotovoltaica da figura 2.6: [27]

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

A corrente gerada I_L é dependente da irradiância que atinge a célula solar (E) e da temperatura da célula (T_c), a corrente pode ser aproximada pela equação 2.2, onde $I_{ph,ref}$ representa a foto corrente gerada, medida com $T_{c,ref}$ e E_{ref} .

$$I_L = \frac{E}{E_{ref}} [I_{ph,ref} + \alpha_{Isc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (2.2)$$

A tensão térmica (Vt) e a corrente de saturação do diodo (I_0) são parâmetros dependentes da temperatura, estes encontram-se descritos nas equações 2.3 e 2.4, onde n é o fator de qualidade do diodo; q - carga eletrão; k - constante de Boltzmann; α - coeficiente térmico empírico; E_g - banda proibida do material, em inglês, *band gap* [27].

$$V_t = \frac{nkT_c}{q} \quad (2.3)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{1}{k} \left(\frac{E_g}{T_c} - \frac{E_{g,ref}}{T_{c,ref}} \right) \right] \quad (2.4)$$

O valor das resistências R_s (resistencia série) e R_{sh} (resistência de fugas) podem ser estimados analisando a curva característica tensão-corrente de um painel fotovoltaico, figura 2.7, para uma melhor estimativa estes devem ser calculados para vários valores de irradiância, fazendo uma média final dos vários valores obtidos [28] [29].

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{MAXpower}}{I_{MAXpower}} \quad (2.5)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{MAXpower}}{I_{sc} - I_{MAXpower}} \quad (2.6)$$

Para uma análise detalhada do desempenho de um módulo fotovoltaico é necessário fazer um estudo da curva de características I-V 2.7 que relaciona a tensão com a corrente gerada pelo painel. É obtida aplicando uma fonte de luz constante no painel e variando a carga a que este se encontra ligado, ou seja, estamos perante um circuito gerador de energia com uma carga variável. A temperatura do painel deve ser constante durante o teste para não influenciar os resultados.

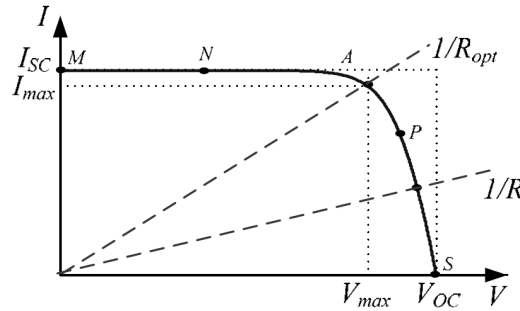


Figura 2.7: Curva característica I-V de um painel fotovoltaico [6];

Em cargas resistivas a característica de carga do painel é uma linha reta com declive $I/V = 1/R$ e para a obtenção da máxima transferência de potência é necessário ligar o painel a um circuito MPPT.

Para compreender quais os efeitos causados pela variação da radiação solar e temperatura num painel fotovoltaico é apresentada a figura 2.8:

Ao observar a figura 2.8 (a) conclui-se que a corrente varia de forma proporcional à variação da radiação solar, quando esta diminui, verifica-se a diminuição da corrente fornecida pelo painel, sendo o ponto de potência máxima

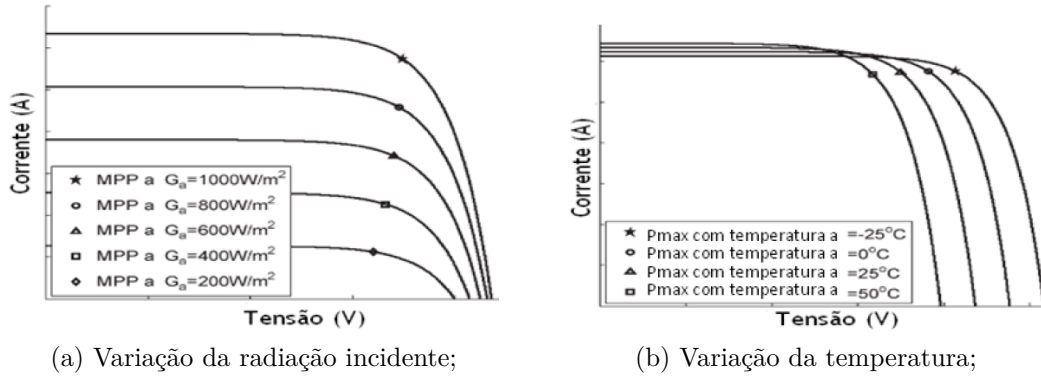


Figura 2.8: Efeitos provocados na curva de característica I-V com a variação da radiação incidente e variação da temperatura do painel [4];

($P_{max} = V_{max}I_{max}$) do painel também diretamente afetado pela descida da corrente, a tensão mantém-se praticamente constante. Na figura 2.8 (b) observa-se que quando existem variações de temperatura, a tensão do painel fotovoltaico é proporcionalmente afetada, quanto maior for a temperatura menor será a tensão máxima deste. Em suma, a potência máxima do painel é menor com o aumento da temperatura das células fotovoltaicas.

A eficiência de um painel fotovoltaico é dada pela equação 2.7, com A - área do painel e G_a - irradiação solar.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}V_{max}}{AG_a} \quad (2.7)$$

Como se conseguem eficiências relativamente satisfatórias os painéis fotovoltaicos têm inúmeras aplicações, das quais na robótica móvel, a relação custo, tamanho e potência fornecida são fatores aliantes na aquisição deste tipo de solução. Para o presente trabalho foi desenvolvida uma aplicação em Labview[®] (software de projeto gráfico) e todo o *hardware* necessário para a caracterização de forma automática de painéis fotovoltaicos. Encontrando-se descrita em detalhe no apêndice A.

2.1.2 Energia termoelétrica

Ambientes que contenham naturalmente gradientes de temperatura e fluxos de calor têm potencial para gerar eletricidade, para tal é necessário usar a conversão de energia termoelétrica. A diferença de temperatura oferece o potencial para a conversão de energia, enquanto que o fluxo de calor fornece a potência. Para sistemas com requisitos de baixo consumo energético, dando um exemplo, sensores remotos de monitorização ambiental, esta solução de *energy harvesting* têm-se mostrado viável [21].

Um bom exemplo da aplicação de energia termoelétrica é a do relógio de pulso

da marca Seiko, figura 1.1 (a), este produz energia elétrica através da diferença de temperatura do corpo e do metal do relógio. Pelo menos dois modelos de relógios foram fabricados, um da marca Seiko e outro da marca Citizen [21].

A NASA e o departamento de engenharia (DOE) desenvolveram uma geração de sistemas de energia que podem ser usados para missões espaciais, o princípio de funcionamento passa pela utilização de uma fonte de calor recorrendo à energia nuclear que posteriormente é transformada em energia elétrica a partir de geradores termoelétricos *Radioisotope thermoelectric generator* (RTG). A primeira missão da NASA para transportar um MMRTG (*Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*) foi lançada em novembro de 2011 e aterrou com sucesso no planeta Vermelho (Marte) em 6 de agosto de 2012 [30].

Geradores termoelétricos

Os geradores termoelétricos (TEG) (*thermoelectric generator*) são dispositivos de estado sólido sem partes móveis que consistem em semicondutores tipo-n e tipo-p conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, em que o seu princípio de funcionamento parte do efeito *Seebeck*. O efeito ocorre quando um gradiente de temperatura é aplicado à superfície do gerador termoelétrico e os elétrons do semicondutor do tipo-n e as lacunas do tipo-p tendem afastar-se da fonte de calor dirigindo-se para a fonte fria. O movimento das cargas gera uma diferença de potencial $V = \alpha \Delta T$, sendo α o coeficiente de *Seebeck*.

O revestimento do gerador termoelétrico é feito com placas cerâmicas de uma elevada condutividade térmica e elevada resistência elétrica. Para aumentar a eficiência de uma determinada aplicação o calor rejeitado deve ser removido com o auxílio de um dissipador calor colocado na parte fria do TEG [31] [21].

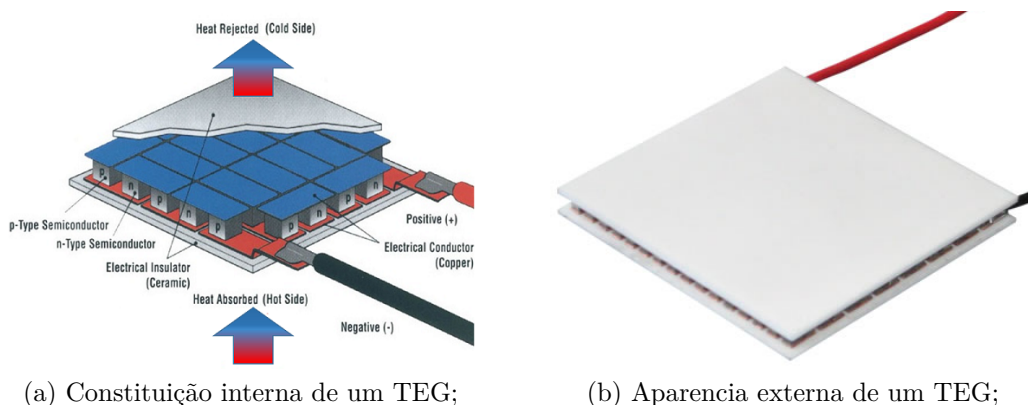


Figura 2.9: Estruturas interna e externa de um gerador termoelétrico, fonte adaptada de [7];

Um gerador termoelétrico tem a particularidade de converter diferenças de temperatura em eletricidade (comportamento de gerador) ou a possibilidade de converter energia elétrica em diferenças de temperatura (comportamento de carga ou bomba de calor).

A máxima eficiência de um dispositivo termoelétrico é determinada pela figura de mérito (em inglês, *figure of merit*) (zT) dos materiais, depende do coeficiente *Seebeck* (α), temperatura absoluta (T), resistividade elétrica (ρ) e condutividade térmica (k).

$$zT = \frac{\alpha^2 T}{\rho k} \quad (2.8)$$

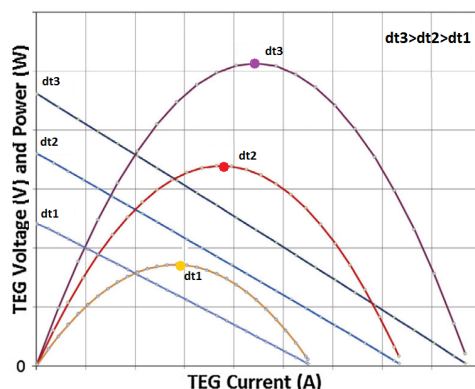


Figura 2.10: Curvas I-V e Potência para vários ΔT , fonte adaptada de [8];

Ao analisar a figura 2.10 observa-se que quanto maior é a diferença de temperatura entre faces do gerador termoelétrico maior é a potência máxima que pode ser fornecida a carga. Em robôs móveis de dimensões reduzidas, cujo diâmetro normalmente é inferior a dez centímetros é difícil obter grandes diferenças de temperatura, seria necessário a utilização de uma chapa metálica que absorvesse radiação solar e um dissipador colocado na face oposta, o que levaria a um aumento de volume no TEG posteriormente aplicado no robô.

Para o presente trabalho foi desenvolvida uma aplicação em Labview[®] (software de projeto gráfico) e todo o *hardware* necessário para a caracterização de forma automática de geradores termoelétricos, descrita em detalhe no apêndice B. Depois de analisados os resultados obtidos chegou-se à conclusão que não é viável a utilização de TEG, na relação tamanho/potência fornecida, para este tipo de aplicação.

2.1.3 Energia mecânica por vibração piezoelétrica e eletromagnética

Em ambientes ou sistemas mecânicos onde existem vibrações, como por exemplo, sistemas de suspensões de veículos, é possível gerar energia elétrica recorrendo a transdutores piezoelétricos ou eletromagnéticos. Quando é aplicada uma tensão mecânica nos transdutores e gerada uma corrente elétrica, é chamado o efeito direto. O efeito inverso ocorre quando é aplicada uma corrente elétrica e gerada uma deformação mecânica na estrutura do material [32].

A corrente elétrica gerada por este tipo de transdutores é alternada traduzindo o tipo de vibração aplicada ao material, portanto para ser armazenada é necessário ser retificada e filtrada por um circuito adequado (figura 2.11).

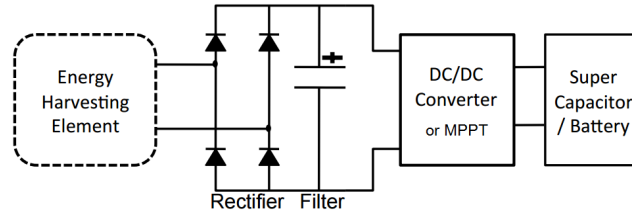


Figura 2.11: Circuito de condicionamento de energia elétrica, fonte adaptada de [9];

A eficiência destes transdutores para além de estar relacionada com o coeficiente de perdas e coeficiente de qualidade dos materiais usados na sua fabricação, está dependente do coeficiente de acoplamento mecânico à fonte de vibração. É desejável a não dissipação de vibrações na estrutura de acoplamento mecânico entre a fonte e o transdutor [33].

Geradores piezoelétricos

O Efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 por *Jacques and Pierre Curie brothers* num estudo relacionado com a pressão em cristais (quartzo e turmalina) para geração de energia elétrica. O uso da tecnologia num sonar submarino na primeira guerra mundial despertou o interesse no desenvolvimento de dispositivos piezoelétricos [34].

O tipo de material mais usado para converter vibrações mecânicas em energia elétrica utilizável é a cerâmica de titanato zirconato de chumbo (PZT), embora apresente limitações à deformação. Quando a aplicação exige movimentos de altas frequências as piezocerâmicas são suscetíveis a roturas [34].

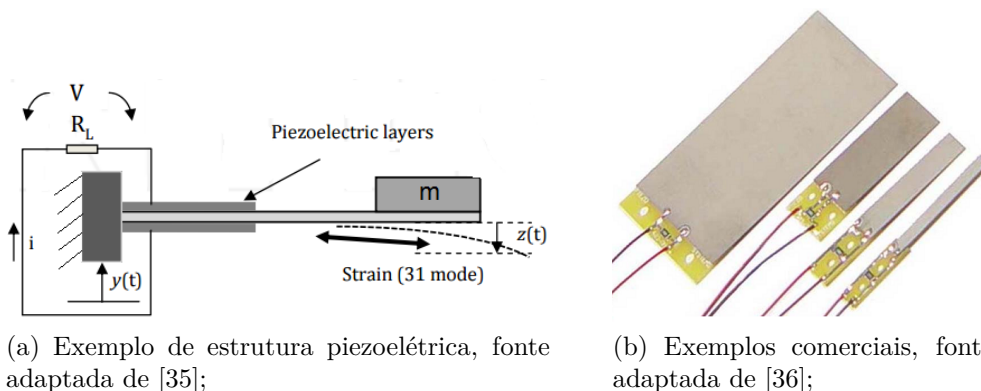


Figura 2.12: Exemplo demonstrativo de estrutura piezoelétrica e exemplos de soluções comerciais;

Uma aplicação típica na robótica móvel passa pela utilização de um transdutor piezoelétrico com rigidez (k), fixo numa das pontas e com uma massa (m) suspensa na ponta oposta, a principal característica deste sistema é que opera em ressonância. A frequência de ressonância é dada pela equação 2.9 [26].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.9)$$

A potência de ressonância de um sistema massa mola é dado pela equação 2.10, onde Y é a amplitude de vibração externa e Z_{max} o máximo deslocamento da massa de prova.

$$P(f) = 4\pi^3 m f^3 Y z_{max} \quad (2.10)$$

Na tabela 2.3 é possível verificar e comparar algumas soluções de mercado, ficando com uma noção da quantidade de potência elétrica que podem fornecer.

Tabela 2.3: Soluções de geradores piezoelétricos da marca PIEZO SYSTEMS, INC.

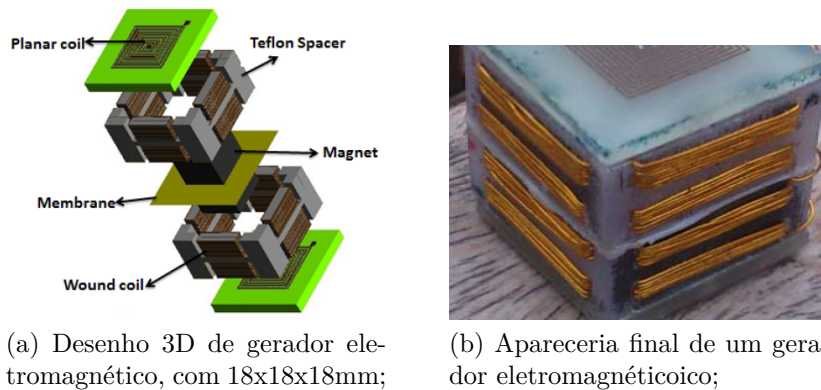
Exemplos de soluções da marca: PIEZO SYSTEMS, INC.							
Referencia	Rigidez(N/m)	Larg.(mm)	Comp.(mm)	Freq. T.(Hz)	Voc(Vpico)	Isc(uApico)	Pot.(mWrms)
Q220-A4-103YB	1.9×10^{-2}	3,2	36,5	275	$\pm 16,5$	$\pm 2,2$	1,1
Q220-A4-203YB	3.8×10^{-2}	12,7	34,9	257	$\pm 16,5$	$\pm 4,4$	2,3
Q220-A4-303YB	7.6×10^{-2}	6,3	36,5	275	$\pm 16,5$	$\pm 8,8$	4,5
Q220-A4-503YB	2.4×10^{-2}	31,8	66,7	68	$\pm 18,1$	± 46	4,7

Geradores eletromagnéticos

Um gerador eletromagnético é normalmente constituído por um invólucro onde se encontra enrolada uma bobina e no seu interior um ímã permanente. Quando o ímã oscila dentro do invólucro é gerada uma corrente elétrica na bobina alimentando a carga desejada. Existem duas formas de construção do gerador eletromagnético, uma utiliza a bobina fixa e o que oscila é o ímã permanente, e a outra o ímã mantém-se fixo e o que se move é a bobina, embora devido ao stress mecânico a bobina deve ser fixa para que não se danifique [10]. Na figura 2.13 encontra-se um exemplo de um gerador.

O gerador apresentado na figura 2.13 gera uma tensão em circuito aberto de $15.7mV$, com a aplicação de 3 gramas, a uma frequência de ressonância de 27Hz, a potência máxima fornecida à carga é de $2.1uW$.

Em suma, estes tipos de tecnologias de *energy harvesting* (piezoelétrica e eletromagnética) geram potências muito baixas (inferiores a 5mW). Para aplicações na robótica móvel de enxame acaba por não ser uma solução viável, pois este tipo de aplicações além de requererem dimensões reduzidas não são suscetíveis a fontes abundantes de vibração.



(a) Desenho 3D de gerador eletromagnético, com 18x18x18mm;

(b) Apareceria final de um gerador eletromagnético;

Figura 2.13: Exemplo de gerador desenvolvido pelo instituto de engenharia mecatrônica da universidade de engenharia e tecnologia do Paquistão [10];

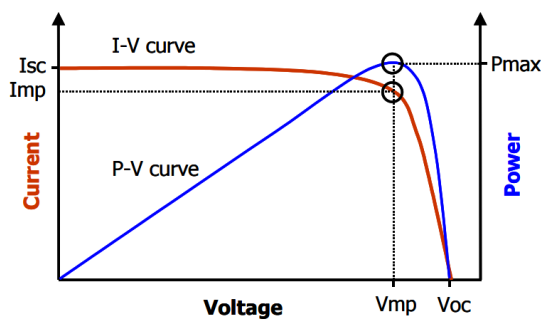
2.2 MPPT - ponto de máxima transferência de potência

A presente secção dá a conhecer um módulo muito importante chamado MPPT, este é responsável por maximizar a potência elétrica fornecida pela fonte e posteriormente fornecer essa potência ao módulo de armazenamento. No meio ambiente existem variações constantes de luminosidade e temperatura, o que leva a variações por vezes bruscas na geração de energia elétrica em painéis fotovoltaicos e em geradores termoelétricos. Com a utilização do módulo MPPT consegue-se obter o ponto ideal de potência máxima, basicamente é um conversor DC/DC que incorpora um algoritmo para obtenção do máximo ponto de transferência de potência.

Existem módulos MPPT que operam com tensões de entrada menores que a tensão de armazenamento e outros que operam com tensões de entrada superiores ao armazenamento. A figura 2.14 mostra a curva de características I-V de um painel fotovoltaico com o ponto de potência máximo assinalado, com I_{sc} - corrente de curto-circuito, V_{oc} - tensão em circuito aberto, I_{mp} - corrente do ponto máximo de transferência e V_{mp} - tensão do ponto máximo de transferência.

Os principais algoritmos que existem para obtenção do ponto máximo de potência são: [38] [39]

- **Método da tensão constante** - Este método é um dos mais simples de implementar, consiste em guardar o valor da tensão de funcionamento para a qual o painel fotovoltaico fornece a maior potência, posteriormente o conversor DC/DC mantém o valor de tensão de saída igual à tensão de referência.
- **Método da corrente de curto-circuito** - Este método baseia-se na relação entre a corrente obtida no ponto máximo de transferência de potência e a corrente de curto circuito do painel. O fator de relação (k) é praticamente constante para vários valores de radiação solar incidentes no painel, resultando a equação $I_{mp} = kI_{sc}$.



(a) Ponto máximo de transferência de potência de um painel fotovoltaico [37];



(b) Solução MPPT comercial ZSPM4523 do fabricante ZMDI;

Figura 2.14: ponto máximo de transferência de um painel fotovoltaico e solução comercial de MPPT;

- **Método da tensão em aberto** - Este método tem com base o conceito de linearidade existente entre a tensão do painel em circuito aberto e a tensão na máxima transferência de potência. A percentagem de correspondência entre tensões depende das características do material que constitui o painel, por norma o valor V_{mp} varia entre 73% - 80%. Antes do método ser implementado deve ser feito um estudo de modo a obter V_{oc} e V_{mp} , a tensão ideal é dada por $V_{mp} = kV_{oc}$. Para que este método funcione corretamente é necessário medir periodicamente a tensão de circuito aberto, ou seja desligar o painel do conversor.
- **Método de perturbação e observação** - É dos métodos mais utilizados e com implementação simples, consiste na introdução de perturbações na corrente ou tensão fornecida, comparando posteriormente a potência atual com a anterior. O facto de estarem a ser constantemente introduzidas perturbações, leva a que a potência de saída esteja constantemente a oscilar, ocorrendo pequenas quebras no rendimento.

Para mais detalhe relativamente a MPPT, pode ser consultado o documento [39], onde estão incluídas mais técnicas. A próxima secção do trabalho dá a conhecer as soluções de armazenamento de energia, onde a saída do MPPT é conectada.

2.3 Armazenamento de energia

Em dispositivos elétricos/eletrónicos portáteis é imprescindível a existência de uma forma de armazenamento de energia, tornando possível o seu funcionamento. Exemplos destes dispositivos são: robôs móveis, *smartphones*, computadores portáteis e entre outros. A figura 2.15 (a) exhibe a evolução das baterias ao longo dos anos, são apresentadas vários tipos de baterias químicas e a sua densidade de energia associada. A figura 2.15 (b) apresenta a relação potência vs energia,

relativa a condensadores convencionais, supercondensadores, baterias e células de combustível (gasolina).

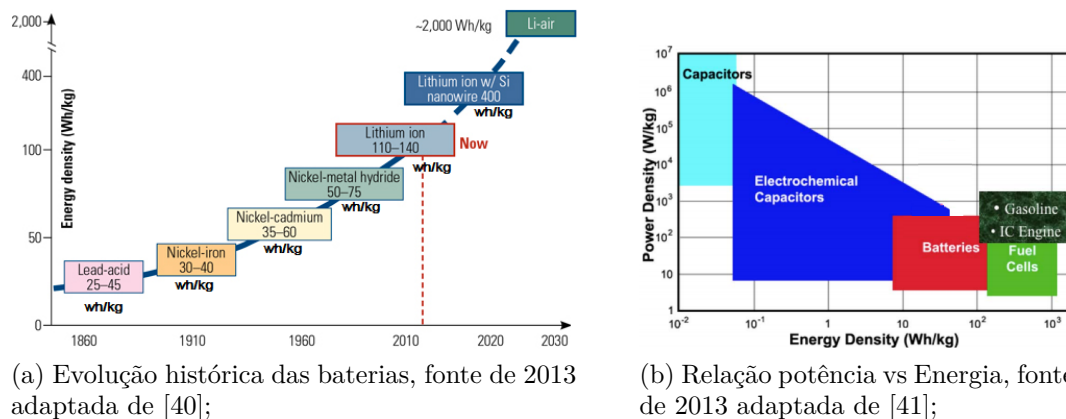


Figura 2.15: Evolução histórica das baterias e comparação da relação potências vs energia de diferentes tipos de armazenamento;

A primeira bateria foi inventada por *Alessandro Volta* em 1800, chamada *voltic pile*, conseguia fornecer continuamente corrente elétrica a um circuito. Era composta por discos de zinco e prata, espaçados com placas que continham água com sal [42]. Desde então foram desenvolvidas várias baterias químicas com cada vez mais densidade de energia (Wh/kg), desde a primeira passaram 191 anos até aparecer a primeira bateria de íons de lítio comercial, apresentada pela marca Sony em 1991 [43].

Atualmente a bateria de íons de lítio é a mais usada em dispositivos portáteis, dispõem de boa capacidade de armazenamento de energia em relação ao seu tamanho e não apresentam efeito de memória. Alguns modelos de veículos elétricos já incorporam esta tecnologia de armazenamento [44]. No entanto na robótica móvel para além das baterias de lítio ainda são usadas muitas vezes as tradicionais baterias de chumbo, pois têm um custo reduzido o que as leva a serem o tipo de bateria muitas vezes usado.

2.3.1 Baterias de lítio

A utilização de armazenamento de energia recorrendo à bateria de lítio em dispositivos portáteis exige cuidados relativos à sua segurança. A possibilidade de sobrecarga, sobreaquecimento ou curto-circuito pode dar origem a incêndio ou explosão, logo estes parâmetros devem ser controlados durante o seu uso. O termo bateria de íons de lítio refere-se a uma família diversa de baterias químicas, a maioria difere na composição do eletrodo positivo, os materiais variam no custo, segurança e densidade de energia. Na tabela 2.4 são apresentados os diferentes tipos de materiais que compõem o eletrodo positivo em baterias existentes atualmente no mercado. Relativamente ao eletrodo negativo o tipo de material mais usado é o grafite, embora estejam a ser estudados e desenvolvidos novos materiais [45].

Tabela 2.4: Propriedade dos materiais do elétrodo positivo;

Material	Fórmula química	Descri�o
Lithium cobalt oxide (LCO)	$LiCoO_2$	Tipo comercial; Matérias primas caras
Nickel cobalt aluminum (NCA)	$LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$	Alta densidade de energia por unidade de massa
Nickel manganese cobalt (NMC)	$LiNi_{1-x-y}Mn_xCo_yO_2$	Mais segurança e mais barato que (LCO)
Lithium manganese oxide (LMO)	$LiMn_2O_4$	Mais barato que (LCO) ; Pouca estabilidade na temperatura
Lithium iron phosphate (LFP)	$LiFePO_4$	Muito segura, alta potência, mas menor densidade de energia;

A figura 2.16, apresenta o movimento dos iões de lítio durante a carga e descarga da bateria, durante a carga fluem a partir do elétrodo positivo para o negativo através do eletrólito e na descarga fluem de volta do elétrodo negativo para o positivo.

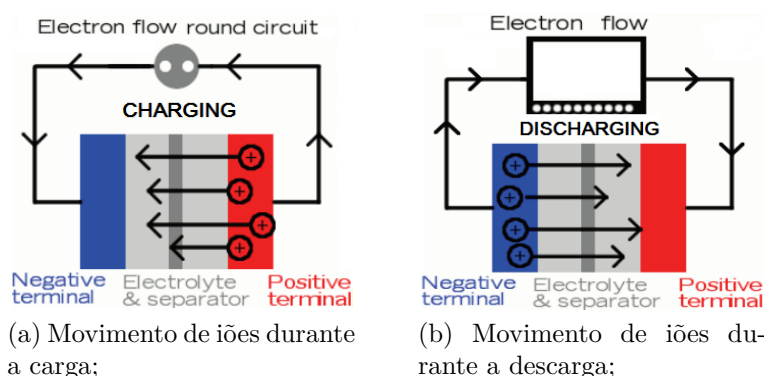


Figura 2.16: Fluxo de iões de lítio durante a carga e descarga da bateria de lítio, fonte adaptada de [11];

O controlo da carga é fundamental numa bateria de lítio, algumas baterias já cont m circuitos integrados de modo a assegurar esse controlo, quando estas não os possuem, devem ser projetados circuitos de carga com prote es adequadas, tais como monitoriza o de temperatura e sobrecarga. O perfil de carga de uma bateria de lítio é composta geralmente por duas fases:

- **1  fase** - Carga com corrente constante, até que a bateria atinja o seu ponto máximo de tensão, normalmente 4.1-4.2 V/célula;
- **2  fase** - Carga com tensão constante, até que a corrente absorvida pela bateria seja aproximadamente zero amperes.

Se a bateria se encontrar severamente esgotada, deve ter uma carga lenta de modo a que a tensão atinja 2.5-3 V/célula, posteriormente pode ser aplicada a carga normal descrita acima. Esgotar a bateria até ao fim não   aconselhável pois pode danificar-se e perder capacidade de armazenamento. A figura 2.17 ilustra

o perfil de carga de uma bateria de íões de lítio e a sua capacidade em função da tensão por célula.

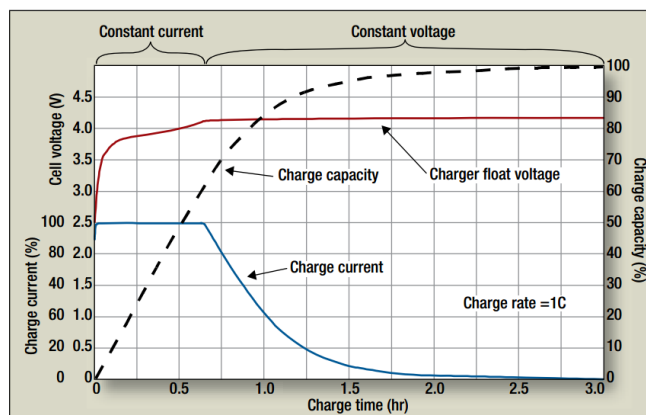


Figura 2.17: Perfil de carga e capacidade da bateria de íões de lítio [12];

Uma forma de aumentar a vida útil de uma bateria de lítio é não efetuar o carregamento até 100% da sua capacidade, a solução passa por escolher uma tensão de flutuação mais baixa que proíba que esta chegue aos 100%, o inconveniente deste método é o não aproveitamento total da sua capacidade de armazenamento [12].

2.3.2 Supercondensadores

Supercapacitors, ultracapacitors ou também conhecidos por *electrochemical double-layer capacitors* são dispositivos de armazenamento elétrico com densidade de armazenamento de energia e densidade de potência elevadas. O seu custo é superior ao das baterias, embora apresente vantagens no que diz respeito à densidade de potência e tempo de vida útil. Em aplicações que necessitem de ciclos rápidos de carga e descarga, é comum a utilização deste tipo de solução [13]. A construção de supercondensadores consiste basicamente em dois elétrodos, um separador e um eletrólito, a principal diferença comparativamente aos convencionais está na constituição dos elétrodos utilizados, que se baseiam numa tecnologia de carbono (nanotubo). Esta tecnologia cria uma área de superfície elevada com uma distância de separação extremamente pequena. Para se perceber melhor a sua constituição deste é apresentada a figura 2.18 [14].

A analogia teórica de um supercondensador pode ser vista como a do condensador convencional, a figura 2.19 apresenta o seu circuito equivalente, com ESR - a resistência série equivalente, Rp - a resistência de isolamento, C - a capacitância e Xl - a indutância.

A capacidade de um condensador pode ser obtida com equação 2.11, com C - a capacidade, Q - a carga positiva e V - a tensão aplicada [46];

$$C = \frac{Q}{V} [F] \quad (2.11)$$

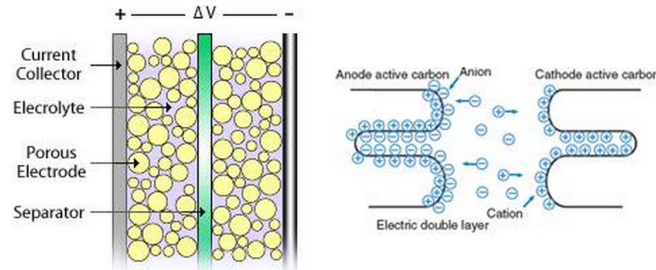


Figura 2.18: Constituição interna de um supercondensador, fonte adaptada de [13];

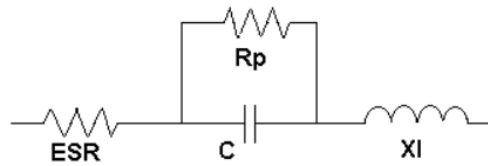


Figura 2.19: Circuito equivalente do condensador [14];

A energia armazenada num condensador é dada pela equação 2.12;

$$E = \frac{1}{2}CV^2[J] \quad (2.12)$$

A densidade de potência máxima do condensador é dada pela equação 2.13 [47];

$$P_{max} = \frac{V^2}{4ESR}[W/kg] \quad (2.13)$$

Uma das desvantagens dos supercondensadores é a tensão máxima que suportam, os mais convencionais são de 2.7V, quando se pretende obter um banco de supercondensadores com a tensão resultante maior, é necessário conectá-los em série, no entanto deverá existir um circuito de balanceamento de modo a garantir que não fiquem em sobretensão impedindo que se danifiquem. Na junção de condensadores em paralelo não existem qualquer restrição de balanceamento.

A carga de um supercondensador deve ser controlada de modo a limitar a corrente, a sua baixa resistência interna faz com que a corrente tenda para um valor elevado no início da carga, na maioria dos casos a corrente absorvida tende para o valor máximo que a fonte consegue fornecer. Deve também ser usado um limitador de corrente na descarga, pois na existência de um curto-circuito o supercondensador irá descarregar provocando fluxos de corrente elevados que podem danificar os condutores (fios ou pistas da PCB).

Normalmente quando existe necessidade do uso de armazenamento de energia elétrica em aplicações é necessário utilizar conversores DC/DC, na próxima secção são apresentadas as principais soluções e topologias existentes.

2.4 Conversores DC-DC

Praticamente todas as aplicações portáteis possuem conversão DC/DC, é necessária para adequar as características da fonte (energia armazenada) à carga. Os dois principais métodos de conversão utilizados é o método de conversão linear e o método de conversão comutada.

Os reguladores **lineares** são conhecidos pela sua construção simples e de fácil aplicação, embora apresentem menos eficiência que os reguladores comutados. A dissipação da potência em excesso é libertada sob forma de calor sendo prejudicial no rendimento final da aplicação, outra limitação é o facto de só operarem com tensões de entrada superiores às de saída. Normalmente este tipo de solução é usado para diferenças de potências de entrada e saída baixas. O custo de soluções de reguladores lineares é mais baixo que reguladores comutados devido à sua simplicidade [48].

Os reguladores **comutados** apresentam elevadas eficiências embora o seu custo e complexidade sejam maiores. A comutação é controlada normalmente por um circuito integrado em malha fechada e a saída em *Pulse Width Modulation* (PWM) que controla na maioria dos casos a *gate* de um *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET). O circuito integrado analisa em contínuo quais as necessidades da carga através da malha de *feedback* e modula o *Duty Cycle* de modo a garantir que a tensão na saída seja o mais próxima do valor de referência. A energia é armazenada em bobinas e condensadores sendo a qualidade destes um fator importante para a eficiência final do conversor, no caso dos condensadores estes devem ter um *Equivalent Series Resistance* (ESR) de valor baixo permitindo um bom funcionamento em altas frequências. No caso de bobinas, devem ter o valor *Direct Current Resistance* (DCR) baixo, evitando assim perdas no fio de cobre que a compõe [48] [38].

Tabela 2.5: Propriedades do principais conversores DC/DC, fonte adaptada de [19];

Característica	Linear DC/DC - LDO	Reguladores comutados
Projeto Complexidade	Baixo	Moderado-Alto
Custo	Baixo	Moderado
Ruído	Baixo	Baixo-Moderado
Eficiência	Baixo-Moderado	Alto
Libertação Calor	Alto	Baixo
Capacidade Corrente	Moderada	Alto
Requisitos Magnéticos	Não	Sim
Limitações	Só reduz	Considerações PCB

2.4.1 Conversor comutado *step-down* (*buck*)

O conversor comutado *Buck* é utilizado quando se pretende diminuir a tensão média, ou seja, nos casos em que o armazenamento de energia fornece tensões maiores do que a carga necessita. A figura 2.20 mostra o circuito básico equivalente do conversor *buck*.

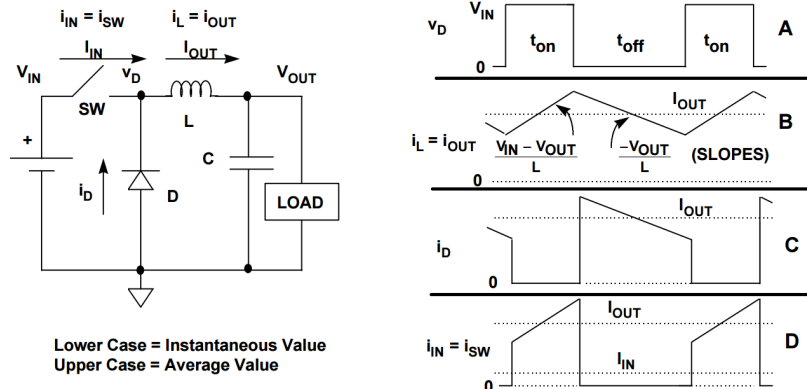


Figura 2.20: Circuito básico de um conversor DC/DC *buck*, com formas de onda associadas aos componentes. Fonte adaptada de [15];

Visualizando a figura 2.20 pode ser analisado o princípio de funcionamento do conversor, quando o *switch* se encontra fechado, a energia está a ser transferida para a bobina e para o condensador e quando o *switch* abre, a energia magnética armazenada na bobina é convertida em energia elétrica. Posteriormente a tensão é filtrada no condensador alimentando a carga desejada.

Numa condição estacionária a relação da tensão de entrada e saída pode ser obtida analisando a corrente na bobina, pode ser descrita pela equação 2.14 [15].

$$\frac{V_{in} - V_{OUT}}{L} t_{on} = \frac{V_{out}}{L} t_{of} \quad (2.14)$$

Resolvendo em ordem a V_{out} resulta a equação 2.15, com D - *duty cycle* [15].

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = V_{in} \cdot D \quad (2.15)$$

2.4.2 Conversor comutado *step-up (boost)*

O conversor comutado *Boost* ao contrario do *Buck* é utilizado quando se pretende aumentar a a tensão média, ou seja, nos casos em que o armazenamento de energia fornece tensões menores do que a carga necessita. A figura 2.21 mostra o circuito básico equivalente do conversor *boost*.

Visualizando a figura 2.21 pode ser analisado o princípio de funcionamento do conversor, quando o *switch* se encontra fechado, a energia é transferida para a bobina e quando o *switch* abre, a energia magnética armazenada na bobina é convertida em energia elétrica, neste caso existe uma soma de tensões resultantes da bateria e bobina. Posteriormente a tensão é filtrada no condensador alimentando assim a carga desejada.

Efetuando a mesma analogia que no conversor *Buck*, numa condição estacionária a relação da tensão de entrada e saída pode ser obtida analisando a corrente na bobina, pode ser traduzida pela equação 2.16 [15].

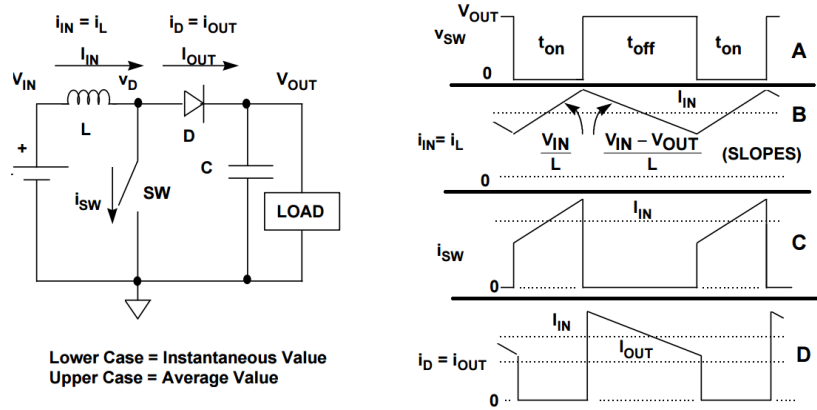


Figura 2.21: Circuito básico de um conversor DC/DC *boost*, com formas de onda associadas aos componentes. Fonte adaptada de [15];

$$\frac{V_{in}}{L} \cdot t_{on} = \frac{V_{out} - V_{in}}{L} \cdot t_{off} \quad (2.16)$$

Resolvendo em ordem a V_{out} resulta a equação 2.17, com D - *duty cycle* [15].

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = V_{in} \cdot \frac{1}{1 - D} \quad (2.17)$$

Para o presente trabalho foi desenvolvida uma aplicação em Labview[®] (software de projeto gráfico) e todo o *hardware* necessário para caracterização da eficiência de conversores DC/DC, descrita em detalhe no apêndice C.

2.5 Robôs móveis alimentados com energy harvesting

A aplicação de tecnologias de *Energy harvesting* na robótica móvel encontra-se atualmente em fase de crescimento, com o avançar dos anos conseguiram-se resultados muito satisfatórios relativos ao rendimento de soluções de captação de energia a partir do ambiente, o que leva os fabricantes de robôs moveis a integrarem este tipo de tecnologias. Permitem que robôs sejam parcialmente, ou totalmente autónomos sendo uma mais valia nas tarefas que realizam. Para perceber que tipo de soluções existem foi efetuada uma pesquisa de robôs móveis que incorporam sistemas de *Energy harvesting*.



Figura 2.22: Robô solar da NASA: *GROVER*;

O *GROVER* é um robô desenvolvido pela NASA em 2010/2011 cujo principal objetivo é a exploração e pesquisa das camadas de gelo da Gronelândia, é autônomo e transporta um radar de penetração no solo [49];



Figura 2.23: Robô da NASA: *Curiosity rover*;

O *Curiosity rover* é um robô desenvolvido pela NASA enviado para Marte com o objetivo de estudar o planeta. Incorpora um gerador de calor a partir da reação nuclear e um gerador termoeletrico permitindo que seja autônomo. Este sistema tem o nome de MMRTG (*Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*) [50];



Figura 2.24: Robô agrícola *Ladybird*;

O *Ladybird* é um robô agrícola desenvolvido por investigadores da universidade de Sidney, com o objetivo de realizar tarefas agrícolas (controlo de pragas, análise de crescimento, entre outras). Contem painéis solares de modo a maximizar o tempo de operação [51];

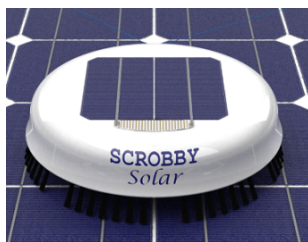


Figura 2.25: Robô de limpeza *Scrobby Solar kit*;

O *Scrobby Solar* é um robô de limpeza de painéis solares, mantendo-se fixo através de dois fios presos aos cantos do painel. Utiliza painéis fotovoltaicos para ser autônomo e inclui um sistema de controlo por *Bluetooth* [52];

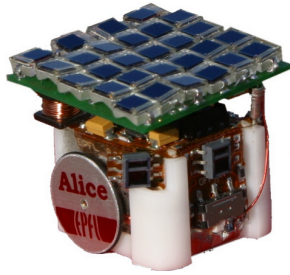


Figura 2.26: Robô acadêmico de enxame *Alice*;

O robô *Alice* foi o culminar de 8 anos de pesquisa na universidade *Ecole Polytechnique Federale De Lausanne* situada na Suíça. Têm a capacidade de integrar alguns módulos, sendo o único robô encontrado, normalmente usado em enxames que contém integrado um sistema de captação de energia a partir do meio ambiente [53].

2.6 Robôs de enxame

Na secção anterior visualizamos algumas aplicações de tecnologias de *Energy harvesting* em robôs móveis. Como um dos objetivos principais do presente trabalho é o desenvolvimento de um robô móvel que possa ter comportamento de enxame, na presente secção é dado a conhecer o conceito de enxame de robôs (*Swarm Robot*) e algumas soluções comerciais existentes na atualidade. É importante realçar que nenhuma delas contém integradas tecnologias de captação e gestão de energia.

A robótica de enxame é das áreas mais fascinantes de pesquisa das últimas décadas, é uma nova abordagem para a coordenação de sistemas multi-robôs. Consiste num número considerável de robôs, relativamente simples, com a capacidade de trabalharem cooperativamente no alcance de um determinado objetivo em comum [54] [55]. A simulação de grandes números de robôs é extremamente complexa e a maioria das vezes imprecisa devido à má modelagem de condições externas [20]. São constituídos por um conjunto de sensores e atuadores de modo a permitir efetuar tarefas, sendo comum o uso de *hardware* personalizado para aplicações específicas [55]. Normalmente têm tamanho reduzido e *hardware* de baixo custo, permitindo a aquisição de um enxame de robôs por um custo razoável. O *software* por norma contém alguma complexidade devido à implementação de algoritmos de comportamento de enxame.



Figura 2.27: Robô educacional *E-puck*;

O robô *E-puck* foi desenvolvido para fins educacionais universitários, sendo que o primeiro conjunto de robôs foi produzido em novembro de 2004. É sobretudo usado em testes de algoritmos de enxame devido às suas características [56].



Figura 2.28: Robô acadêmico *Kilobot*;

O robô *Kilobot* foi projetado para permitir programar e testar comportamentos de enxames a larga escala. Cada unidade contém recursos básicos de um robô enxame (controlador programável, locomoção e comunicação). É possível o uso de uma única unidade de forma fácil [57].



Figura 2.29: Robô de aplicação enxame *Swarm Bot*;

O robô *Swarm Bot* é um projeto que tem como objetivo estudar novas abordagens para a concepção e implementação de auto-organização e auto-montagem [58].

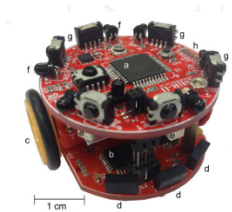


Figura 2.30: Robô de aplicação enxame *Colias*;

O *Colias* é um robô para aplicações de enxame que incorpora uma arquitetura modular, tendo a possibilidade de acrescento de outros módulos. Tem cerca de 4cm de diâmetro e é de baixo custo [20].

A tabela 2.6 apresenta alguns robôs existentes e as principais características relativas ao hardware e autonomia energética.

Tabela 2.6: Robôs de enxame existentes e suas características, fonte adaptada de [20];

Robô	Custo (€)	Sensores	Movimento/ velocidade	Tamanho	Autonomia
Colias	33	distância, luz, colisão, encoder, distância	rodas, 35cm/s	4 cm	1-3 h
AMiR	92	distância, luz, encoder	rodas, 10cm/s	6,5 cm	2 h
Alice	N/A	distância, câmera	rodas, 4cm/s	2,2 cm	10 h
Jasmine	113	distância, luz, encoder	rodas, n/a	3 cm	1-2 h
E-Puck	550	distância, câmera, encoder, acelerômetro, microfone	rodas, 13cm/s	7,5 cm	1-10 h
Kobot	1 130	distância, encoder, visão, bússola	rodas, n/a	12 cm	1-10 h
Kilobot	105	distância, luz	vibração, 1cm/s	3,3 cm	3-24 h
R-one	310	luz, ir, giroscópio, colisão, acelerômetro	rodas, 30cm/s	10 cm	6 h
SwarmBot	N/A	distância, encoder, câmera, colisão	rodas, 50cm/s	12,7 cm	3 h
Robô - Desenvolvido	300€	luz, colisão, temperatura, humidade, barômetro, encoder, corrente, tensão, bússola, acelerômetro, giroscópio, cores rgb , infravermelhos	rodas, 9cm/s	10 cm	6min-30h

2.7 Sumário

Em suma, um sistema de *energy harvesting* é composto por quatro módulos, sendo estes: O módulo da fonte de energia elétrica, o módulo de gestão da energia proveniente da fonte, o módulo de armazenamento de energia e o módulo de conversão DC/DC. O painel fotovoltaico que apresenta melhor rendimento é composto por células monocristalinas com eficiências típicas de 16%, sendo o mais utilizado. A energia termoelétrica, piezoelétrica e eletromagnética, apresentam uma capacidade de geração baixa acabando por não serem viáveis em aplicações de robótica móvel de dimensões reduzidas, como no caso do presente trabalho.

Ao nível do armazenamento de energia elétrica, a solução mais usada em dispositivos portáteis são as baterias de lítio.

Os conversores DC/DC que apresentam melhores rendimentos são os comutados, embora exista um aumento de complexidade a nível do projeto.

Existem algumas soluções de robôs para aplicações em enxame, no entanto não contêm tecnologias integradas de *energy harvesting* e gestão de energia.

Capítulo 3

Robô Móvel Desenvolvido

Neste capítulo é dado a conhecer o robô móvel desenvolvido. Está dividido em cinco secções: Na primeira secção é dada a conhecer a estrutura física e a arquitetura a alto nível; Na segunda o sistema de locomoção diferencial e a formulação teórica necessária; Na terceira a arquitetura modular; Na quarta o hardware usado; Na quinta e última a plataforma utilizada na programação o robô.

3.1 Descrição geral

3.1.1 Estrutura física

O robô móvel desenvolvido é composto por três módulos, estes denominados por *base*, *sensor* e *harvester*. A *base* tem uma forma circular com cerca de dez centímetros de diâmetro, os restantes módulos são quadrados, tendo cerca de seis centímetros de lado e estão colocados na parte superior da *base*. Para uma melhor percepção é apresentada a figura 3.1.

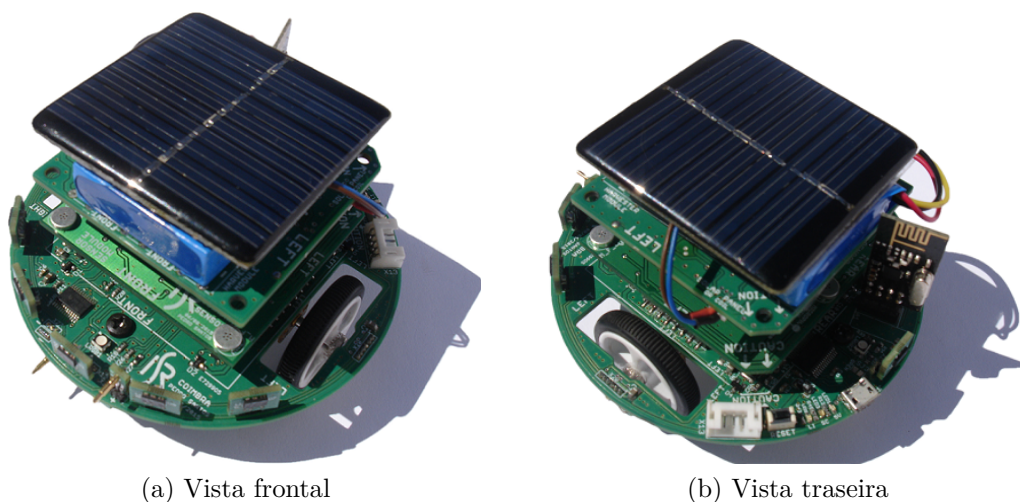


Figura 3.1: Aspeto físico do robô desenvolvido;

3.1.2 Arquitetura a alto nível

A arquitetura de alto nível do robô pode ser visualizada na figura 3.2, apresenta de uma forma geral todos os componentes que o integram. É visível na parte superior da figura os componentes que compõem o módulo de *Energy harvesting*, do lado esquerdo o conjunto de todos os sensores utilizados, no centro o microcontrolador, na parte inferior o sistema de tração e no lado direito os vários tipos de comunicação, armazenamento de dados e *feedback* luminoso. Para além do sistema de captação de energia o robô contém ainda um sistema de gestão de energia, sendo possível conhecer a potência elétrica fornecida e consumida, adotando posteriormente medidas de poupança energética, desligando barramentos de alimentação de periféricos ou optar pela colocação destes em *sleep*.

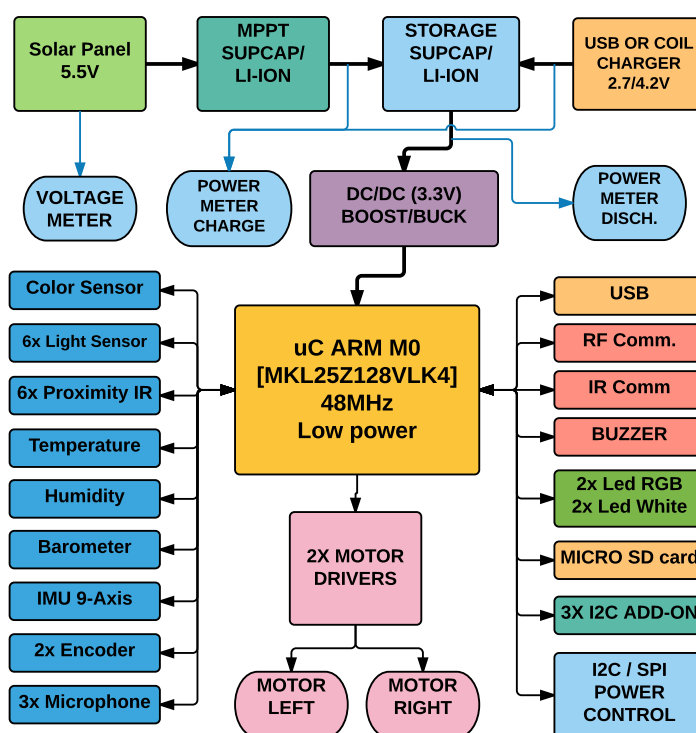


Figura 3.2: Arquitetura alto nível do robô desenvolvido;

3.1.3 Aplicações do robô

Um robô móvel com estas características tem um enorme potencial para vários tipos aplicações. O sistema de direção diferencial permite uma modelação fácil para o controlo de movimento, a possibilidade de integrar módulos de expansão permite obter novas funcionalidades, a integração de um conjunto alargado dos mais variados sensores existentes é uma mais valia para o aumento do número de aplicações. Na literatura não foi encontrado nenhum robô com as características deste, principalmente na área de *Energy harvesting* e gestão de energia elétrica. Este pode operar em espaços interiores (*indoor*), ou no exterior (*outdoor*) com condições de piso adequado.

Seguem-se alguns tipos de aplicações possíveis para o robô desenvolvido:

- Testes de locomoção diferencial com ponto origem e destino;
- Seguidor de linhas acrescentando *add-on* com sensores na *base*;
- Monitorização ambiental, por exemplo, temperatura, humidade e pressão atmosférica;
- Análise estrutural recorrendo à unidade inercial do robô;
- Estudos de *Energy harvesting* e gestão de energia;
- Testes de localização recorrendo à triangulação (microfones);
- Reconhecimento de área recorrendo aos sensores de proximidade, odometria e unidade inercial;
- Testes de algoritmos de comportamentos de enxames;
- Outros.

Devido às características do robô desenvolvido este pode ser usado por uma grande faixa académica, desde o ensino básico com testes simples de movimento diferencial e utilização de alguns sensores, no ensino secundário já com alguma complexidade, por exemplo em concursos de busca e salvamento e num grau universitário com testes de algoritmos avançados de comportamentos de enxame e gestão de energia. Para diminuir o custo do robô é possível a colocação de sensores consoante as necessidades da aplicação pretendida.

3.2 Modelo robô diferencial

O sistema de locomoção do robô foi desenvolvido com base no modelo diferencial, devido às suas características, é um dos tipos de locomoção mais utilizado em aplicações de robótica móvel, representado na figura 3.3. É composto por duas rodas alinhadas uma com a outra e o controlo do seu movimento é efetuado variando a velocidade de cada uma das suas rodas.

A estrutura do robô diferencial apresentada na figura 3.3, impede que sejam feitos movimentos de translação segundo o eixo que atravessa os veios das rodas. Considerando que não existe escorregamento lateral, ou seja, que a velocidade das rodas no ponto de contacto com o chão seja sempre perpendicular aos eixos das rodas, o vetor de estado pode ser representado pela equação 3.1, em que $x(t)$, $y(t)$ e $\theta(t)$ representam a posição do ponto P da figura 3.3 no plano, $v(t)$ representa a velocidade linear e $w(t)$ a velocidade angular [59].

$$X(t)^T = (x(t) \ y(t) \ \theta(t) \ v(t) \ w(t)) \quad (3.1)$$

A velocidade linear de cada roda é determinada pela relação entre a velocidade angular (w) e raio ideal de cada roda (r), descrito pela equação 3.2 [60];

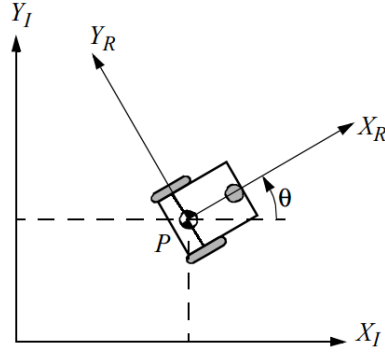


Figura 3.3: Robô diferencial, fonte adaptada de [16];

$$V_E(t) = w_E(t)r_E, \quad V_D(t) = w_D(t)r_D \quad (3.2)$$

A velocidade linear e correspondente velocidade angular são representadas pela equação 3.3, em que o (b) é a distância ideal entre rodas [60];

$$v = \frac{v_D + v_E}{2} = \frac{R(w_D + w_E)}{2} \quad ; \quad w = \frac{v_D - v_E}{b} = \frac{R(w_D - w_E)}{b} \quad (3.3)$$

Conhecendo a velocidade linear (v) e a velocidade angular (w) as velocidades angulares a aplicar em cada roda são dadas pela equação 3.4 [60]:

$$w_E = \frac{v - (b/2)w}{r} \quad ; \quad w_D = \frac{v + (b/2)w}{r} \quad (3.4)$$

A evolução das variáveis características do modelo (graus de liberdade \rightarrow espaço de configurações \mathfrak{R}^3) pode expressar-se através das relações das equações 3.5, 3.6 e 3.7 [60] [61];

$$\dot{x} = \frac{r \cdot \cos(\theta(t))}{2} w_E + \frac{r \cdot \cos(\theta(t))}{2} w_D \quad (3.5)$$

$$\dot{y} = \frac{r \cdot \sin(\theta(t))}{2} w_E + \frac{r \cdot \sin(\theta(t))}{2} w_D \quad (3.6)$$

$$w \equiv \dot{\theta} \frac{R}{b} w_D - \frac{R}{b} w_E \quad (3.7)$$

Mediante a integração das equações anteriores é possível obter a evolução temporal do vetor de posição da pose do robô, sendo possível a extração da estimação da pose ao longo do tempo [60].

3.3 Arquitetura modular

O projeto foi desenvolvido com base numa arquitetura modular, permite alterações de uma forma simples e menos dispendiosa relativamente à integração de

todos os componentes num só módulo. Como já referido o robô incorpora três módulos, em que cada um destes é responsável por funções específicas. A existência de um conector extra I2C (protocolo I2C [62]) em cada módulo permite adicionar outros componentes. Na presente secção é dado a conhecer com mais detalhe cada módulo do robô.

3.3.1 Módulo *base*

O módulo *base* é o suporte de todo o robô, a placa de circuito impresso para além de conter os componentes eletrónicos, serve de estrutura física para a fixação dos motores e suportes em *nylon*. A figura 3.4 apresenta de forma mais detalhada quais os componentes que se encontram neste módulo.

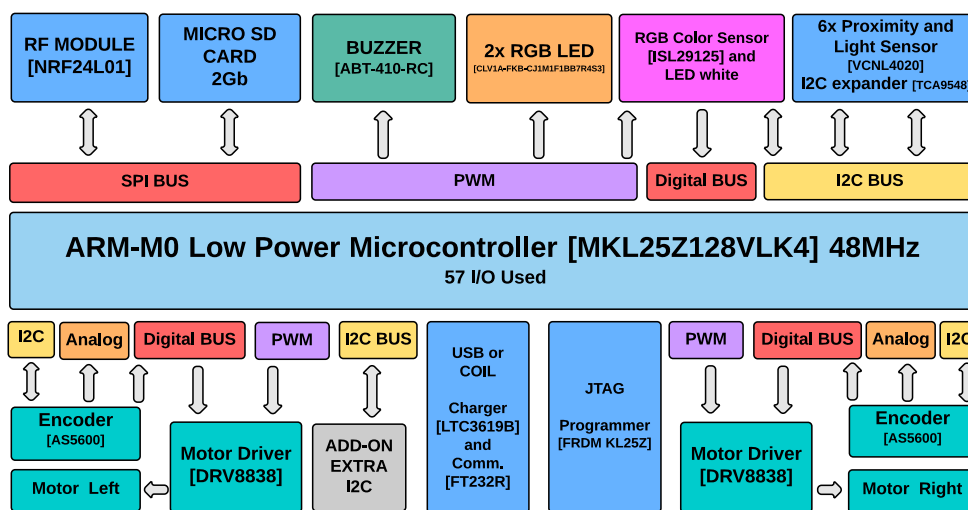


Figura 3.4: Componentes do módulo *base* e tipos de comunicação associados;

3.3.2 Módulo *sensor*

O módulo *sensor* é colocado na parte superior do módulo *base*, integra vários sensores, comunicação por infra-vermelhos e serve de intermediário relativamente aos sinais que ligam o módulo *base* ao módulo *harvester*. A figura 3.5 apresenta de forma mais detalhada os componentes que o compõem.

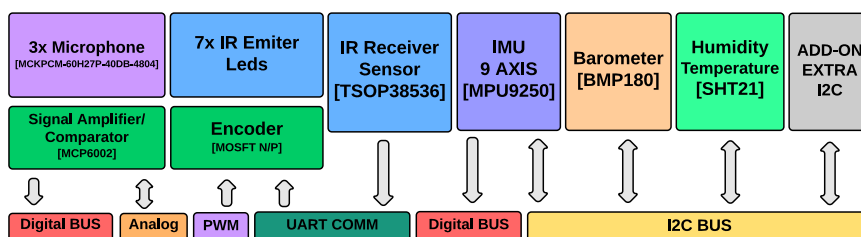


Figura 3.5: Componentes do módulo *sensor* e tipos de comunicação associados;

3.3.3 Módulo *harvester*

O módulo *harvester* é responsável pela captação, armazenamento e monitorização de energia, a utilização de dois tipos diferentes de armazenamento sendo supercondensadores ou bateria de lítio, obriga a que sejam utilizadas topologias diferentes no MPPT e na conversão DC/DC. De forma a minimizar custos de fabrico, a PCB foi projetada de modo a servir para os dois tipos de armazenamento. São necessárias duas unidades da PCB iguais, embora sejam soldados somente os componentes para o respetivo tipo de armazenamento usado. A figura 3.6 apresenta o diagrama de ligações e componentes usados em caso de utilização de supercondensadores no armazenamento de energia elétrica.

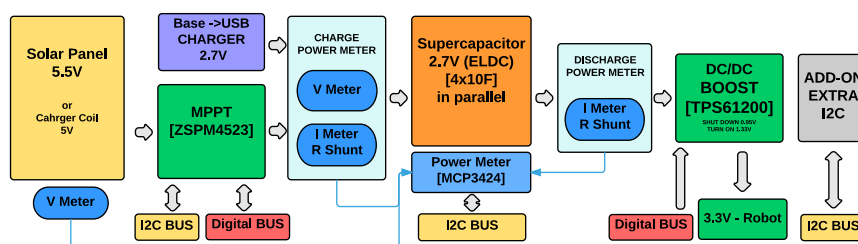


Figura 3.6: Diagrama de ligações e componentes do módulo *harvester* - supercondensadores e tipos de comunicação associados;

A figura 3.7 apresenta o diagrama de ligações e componentes usados em caso de utilização de bateria de lítio no armazenamento de energia elétrica.

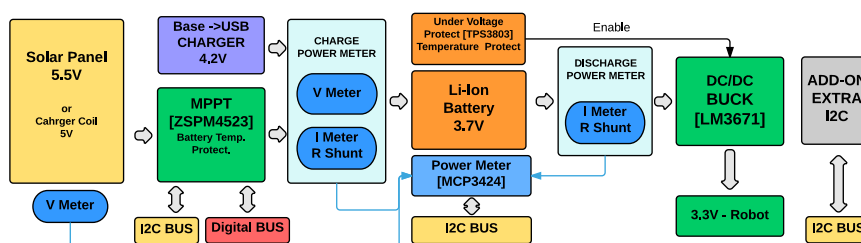


Figura 3.7: Diagrama de ligações e componentes do módulo *harvester* - bateria de lítio e tipos de comunicação associados;

Para mais detalhe relativo aos diagramas apresentados pode ser consultado o esquema do robô que se encontra no apêndice G do presente trabalho.

3.4 Hardware

3.4.1 Microcontrolador ARM[®]-M0

O microcontrolador usado no projeto é fabricado pela marca de semicondutores Freescale[®], optou-se pela escolha devido às suas características e à existência de uma placa de desenvolvimento de baixo custo na qual está integrado. As principais características são:

- **Modelo** - ARM[®] CORTEX[®]-M0 - MKL25Z128VLK4;
- **Performance** - 48MHz, 16KB RAM, 128KB FLASH;
- **Periféricos** - 2xSPI, 2xI2C, 3xUART, 24xPWM, 6xADC (16Bits), 1xDAC (16Bits), 80 Pinos, 66 I/O;
- **Consumo** - *Run mode 47uA/MHz, static power 2uA.*

No projeto foram utilizados cinquenta e sete pinos de sinais do microcontrolador, ficando praticamente esgotado. A lista detalhada do mapeamento dos pinos encontra-se no apêndice H.

3.4.2 Sensores

Na presente secção são revistos todos os sensores que se encontram integrados no robô e as suas principais características, bem como algumas aplicações de exemplo para cada um. Foram escolhidos tendo em conta o seu custo, consumo de energia e efeito desejado, todos têm tecnologias *low power* de forma a minimizar o consumo energético.

Sensor de cores

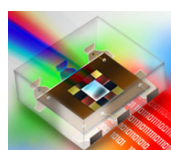
O sensor de cores *rgb* utilizado é produzido pelo fabricante INTERSIL[®], modelo ISL29125 (figura 3.8 (a)), comunica por I2C, integra tecnologia *ultra low power* e tem alta sensibilidade na deteção de cor. A resolução pode ser modificada por software, podendo operar com opção de 12 ou 16bits. Está posicionado na parte frontal do módulo *base* juntamente com dois *Light Emitting Diode* (LED)s de alto brilho de cor branca. Permite a deteção de cores de objetos ou alvos específicos na realização de tarefas.

Sensor de proximidade e luminosidade

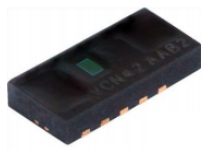
Os sensor de proximidade e luminosidade usado é produzido pelo fabricante de semicondutores Vishay[®], modelo VCNL4020 (figura 3.8 (b)), comunica por I2C e incorpora num só circuito integrado as duas funcionalidades, o sensor de proximidade tem um alcance máximo de 20cm sendo possível controlar por software a corrente do LED emissor. O sensor de luminosidade opera numa faixa de 0.25lx (Lux) a 16Klx e tem a capacidade de rejeição do ruído *flicker* com frequências de 100Hz e 120Hz sendo uma mais valia para a não existência de perturbações. Estão expostos cinco sensores na parte frontal do módulo *base*, com orientações de vinte cinco graus relativamente uns aos outros e na parte traseira foi colocado um sensor ao centro. Podem então servir para detetar obstáculos, paredes, outros robôs, ou até mesmo seguir fontes de luz para a utilização do painel solar.

Sensor de humidade e temperatura

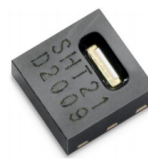
Os sensor de humidade e temperatura usado é produzido pelo fabricante de semicondutores SENSIRION[®], modelo SHT21 (figura 3.8 (c)), comunica por I2C e integra num só circuito integrado as duas funcionalidades, o sensor de humidade relativa deve operar no intervalo de 5 a 90%RH e a resolução máxima é de 12bits. O sensor de temperatura deve operar na faixa dos -20°C até 100°C e tem uma resolução máxima de 14Bits. Encontra-se colocado no módulo *sensor* e pode ser usado para conhecer a temperatura, a humidade e relacionar os valores com a velocidade do som em testes de localização.



(a) ISL29125;



(b) VCNL4020;



(c) SHT21;

Figura 3.8: Sensor de cores *rgb* ISL29125, sensor proximidade e luminosidade VCNL4020, sensor de humidade e temperatura SHT21;

Barómetro

O Barómetro utilizado é produzido pelo fabricante BOSCH[®], modelo BMP180 (figura 3.9 (a)), comunica por I2C e opera numa faixa de pressão de 300hPa (hectopascal) a 1100hPa que para além da pressão, fornece também a temperatura. A resolução pode ser definida por software tendo as opções de 16bits ou 19bits. Encontra-se colocado no módulo *sensor* e através dos valores fornecidos é possível saber qual a altitude a que o robô se encontra relativamente ao nível do mar, para tal é utilizada a equação 3.8 em que p é a pressão do local onde se encontra o robô e p_0 (exemplo: 1013.25hPa) é a pressão ao nível do mar.

$$Altitude = 44330 \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right) \quad (3.8)$$

Sensor inercial

O sensor inercial utilizado é produzido pelo fabricante InvenSense[®], modelo MPU9250 (figura 3.9 (B)), comunica por I2C e contém integrados um giroscópio, um acelerómetro e um magnetómetro, cada um destes tridimensional. A utilização do giroscópio permite medir velocidades angulares em torno dos três eixos do robô, com o acelerómetro é possível medir inclinações e acelerações lineares e o magnetómetro permite medir campos magnéticos, sendo assim possível saber qual a orientação do robô relativamente ao campo magnético da Terra. Este sensor está colocado no módulo *sensor* alinhado exatamente com o centro do robô.

Encoders Magnéticos

Os *encoders* magnéticos usados são produzidos pelo fabricante Ams[®], modelo AS5600 (figura 3.9 (C)), tem uma resolução de 12bits e pode comunicar por I2C, por um sinal analógico ou por PWM. Este sistema é sem contacto mecânico e mede a posição absoluta de um ímã colocado no veio de cada motor. É possível estimar a posição do robô através de odometria.

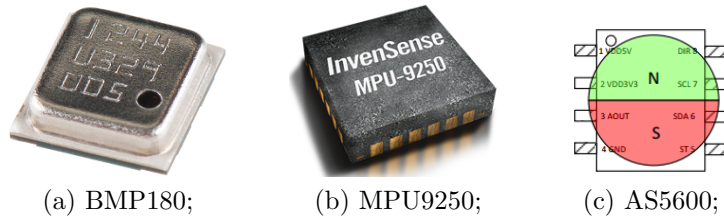


Figura 3.9: Barômetro BMP180, unidade inercial MPU9250, *encoder* magnético AS5600;

Microfones

O robô contém três microfones integrados no módulo *sensor*, modelo POM-1644P-NF-R fabricado por PUI AUDIO[®] e podem analisar a amplitude e formas de onda de sons presentes no ambiente. Para perceber de que forma estão posicionados e qual o circuito utilizado é apresentada a figura 3.10.

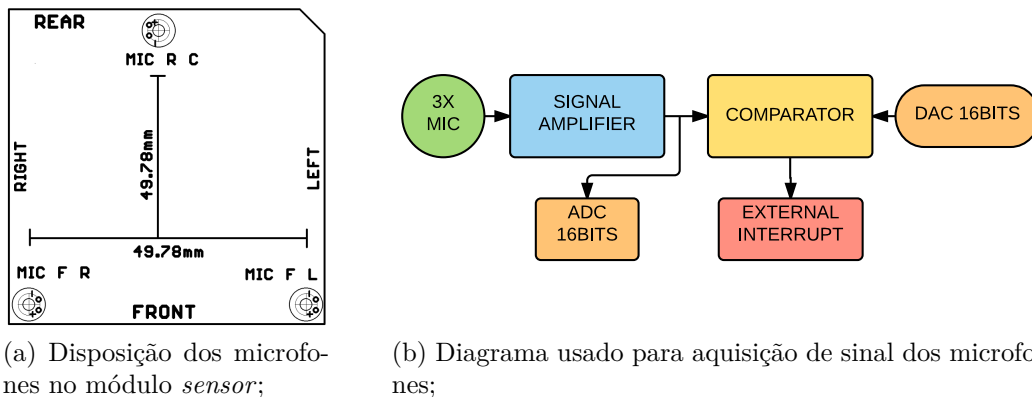


Figura 3.10: Disposição e diagrama de aquisição de sinal dos microfones incorporados no robô;

Através da disposição dos microfones e do circuito de aquisição de sinal utilizado, para além de conseguir saber qual a forma de onda, é possível saber qual a distância e orientação da fonte sonora, analisando o tempo de voo e a diferença de tempos entre disparos de interrupções externas. O reconhecimento da forma de onda está limitado devido à taxa de amostragem do ADC, para ser possível

a reconstrução de um sinal com o mínimo de perdas é necessário que a frequência de amostragem seja pelo menos duas vezes superior à frequência do sinal. Para contornar de certa forma o problema da limitação da taxa de amostragem do ADC foi acrescentado um módulo comparador ao circuito, onde é possível definir através de *software* no *Digital to Analog Converter* (DAC) do microcontrolador, qual o valor de disparo da interrupção externa. Com a utilização do comparador é possível conhecer qual o tempo que houve entre disparos, ou seja o período e estimar a frequência da onda sonora. Numa situação em que um robô pretende saber qual a localização de outro relativamente à sua pose, deve enviar informação por infravermelhos ou via rádio pretendendo a emissão de um som através do *buzzer*, assim que envie a informação, deve começar a contar um tempo, quando ocorrer o primeiro disparo de interrupção externa deve ser guardado o tempo que passou, assim sucessivamente até o som ter alcançado os três microfones. Depois de conhecer o tempo de voo do som enviado e qual a diferença de tempos relativos aos três microfones é possível saber a distância e orientação do outro robô.

3.4.3 Atuadores

Na presente secção são revistos todos os atuadores que se encontram integrados no robô e as suas principais características e funcionalidades.

Motores de tração

O sistema de tração do robô é composto por dois motores DC com escovas (*brushed*). Foram escolhidos tendo em conta a dimensão reduzida e o baixo consumo energético. Agregado ao motor DC encontra-se uma caixa redutora de velocidade constituída em metal, oferecendo assim uma maior robustez mecânica. Para o mesmo motor existem várias caixas redutoras, no presente robô são utilizados motores de 100RPM com tensão máxima admissível de 6V. O *driver* usado para o controlo é produzido pelo fabricante Texas Instruments®, modelo DRV8838, integra uma ponte-H que suporta correntes até 1.8A. O consumo do motor ronda os 15mA sem aplicação carga e cerca de 100mA com o veio bloqueado, em testes efetuados com uma tensão aplicada de 3.3V. Para uma melhor perceção dos componentes descritos é exibida a figura 3.11. A tabela 3.1 apresenta o tipo de comportamento do motor DC consoante os sinais lógicos do microcontrolador.

Tabela 3.1: Sinais lógicos provenientes do microcontrolador e efeito provocado no motor DC;

Signals uC			Output Driver		Motor DC
Nsleep	PHASE	ENABLE	OUT1	OUT2	Function
0	X	X	Z	Z	Coast
1	X	0	L	L	Brake
1	1	1	L	H	Reverse
1	0	1	H	L	Forward

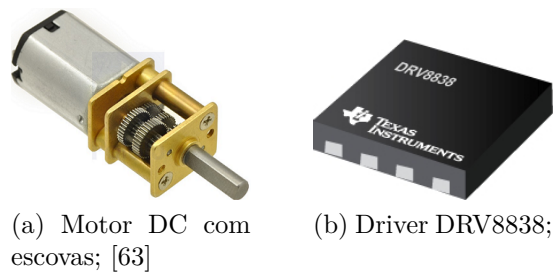


Figura 3.11: Motor e driver usados no sistema de tração do robô;

Buzzer

O *buzzer* utilizado é produzido pelo fabricante pro-SIGNALs[®], modelo ABT-410-RC (figura 3.12 (a)) e encontra-se colocado no módulo *base*. A sua frequência de ressonância é de 2.048kHz, sendo a que emite com maior intensidade. O controle é efetuado através de um sinal PWM em que o *driver* utilizado é um MOSFET. O *buzzer* pode ser usado por exemplo para geração de alarmes sonoros ou para localização espacial.

LEDs - *Red Green Blue* (RGB)

Os LEDs RGB utilizados são produzidos pelo fabricante CREE[®], modelo CLV1A-FKB (figura 3.12 (b)), encontram-se estrategicamente colocados no módulo *base*. Um LED RGB encontra-se na parte frontal do robô e o outro na parte traseira. O controle é através de sinais digitais estando totalmente independente, sendo assim necessário seis saídas digitais. Os LED podem ser usados por exemplo para identificarem a posição e orientação do robô perante uma câmara em sistemas de *tracking*.

LEDs brancos

Os LEDs brancos de alto brilho utilizados são produzidos pelo fabricante CREE[®], modelo CLM3C-WKW (figura 3.12 (c)), o controle é através de PWM em que o driver utilizado é um MOSFET. Encontra-se junto ao sensor de cores e a principal função é a projeção de luz branca para os objetos sendo posteriormente refletida para o sensor de cor RGB.

3.4.4 Comunicação

O robô contém integradas duas formas de comunicação sem fios, a comunicação via rádio e comunicação por infravermelhos. Podem ser usadas para comunicar entre diferentes robôs ou com dispositivos que incorporem *hardware* compatível. É possível ainda a comunicação com um computador usando um cabo *micro USB type B*.

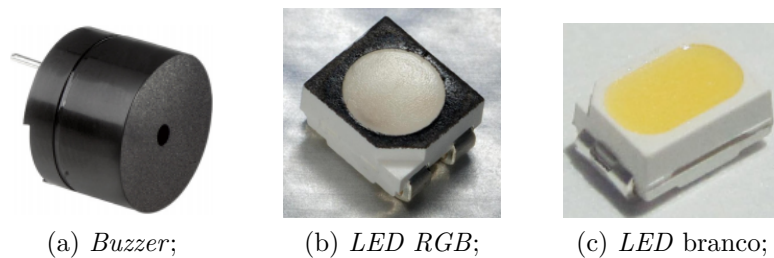
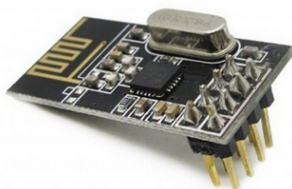


Figura 3.12: *Buzzer* ABT-410-RC, *LED RGB* CLV1A-FKB, *LED* branco CLM3C-WKW;

Comunicação via rádio

O módulo usado para a comunicação via rádio é do fabricante de semicondutores *Nordic*, foi escolhido tendo em conta o alcance máximo, o custo e o consumo de energético. O modelo é o nrf24l01 e apresenta as seguintes características:

- 2.4GHz GFSK RF *transceiver*;
- Baixo custo, 2 a 3€;
- Baixo consumo de energia, $26\mu A$ em *stanby*;
- Transmissão a 1Mbps e 2Mbps, com potência controlável por *software*;
- Comunicação SPI.



O alcance máximo varia com a potência do sinal emitida, sem atenuação consome 11.3mA quando emite e 12.3mA quando recebe dados. O alcance máximo ronda os vinte metros em linha livre, estando a operar sem atenuação no sinal enviado.

Figura 3.13: Módulo *transceiver* nrf24l01;

Comunicação por infravermelhos

A comunicação por infravermelhos foi desenvolvida de modo a ser simples de implementar no *software*. A emissão do feixe de luz é feita com LEDs emissores cujo o modelo é L-934F3C e são controlados por dois MOSFET's. Na receção é usado um sensor modulado do fabricante de semicondutores *Vishay*, modelo TSOP38536. Para perceber o funcionamento da comunicação é apresentada a figura 3.14.

O PWM de frequência de 36kHz modula o sinal proveniente da porta serial, depois do sinal estar modulado é enviado e reconhecido pelo recetor, que por sua vez faz a demodulação enviando-o diretamente para o pino RX da porta serial do microcontrolador. Neste tipo de aplicação o a velocidade da porta de

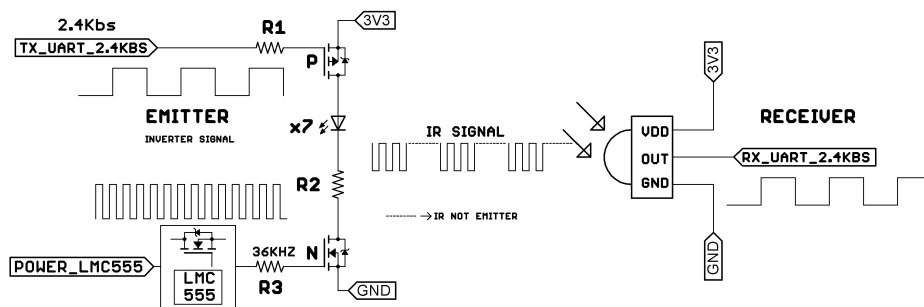


Figura 3.14: Diagrama de comunicação por infravermelhos, emissão- recepção;

comunicação deve ser baixa de modo a que a modulação apanhe a máxima área da largura de pulso. Foram feitos testes com o velocidades de 2400bps e os resultados foram satisfatórios, resultando num alcance de 2 metros sem perda de dados. Embora seja aconselhável fazer verificação de dados utilizando técnicas apropriadas.

3.4.5 Armazenamento de dados

Num robô autónomo é importante a existência de pelo menos uma forma de armazenamento de dados, para tal foi incorporado um *MICRO SD CARD* situado no módulo *base*. Comunica por SPI e suporta grandes quantidades de armazenamento de dados que podem ser posteriormente consultadas ou pelo microcontrolador ou por um computador juntamente com um leitor de cartões. Podem ser guardados dados relativos ao Identidade (ID) do robô, ganhos dos controladores *Proportional-Integral-Derivative* (PID), resultados de medições de sensores e entre outras.

3.4.6 Módulo de energy harvesting

O módulo de *energy harvesting* é composto por vários componentes e todos eles são adequados a cada função específica, na presente secção são apresentados os componentes usados e quais as suas principais características.

Painel solar fotovoltaico

O painel solar usado no robô deve ter em conta o seu tamanho e a amplitude da tensão no ponto máximo de transferência de potência (V_{pmax}). Devido às características do MPPT usado, a tensão no ponto máximo de transferência de potência (V_{pmax}) deve ser superior em 0.3V à tensão do armazenamento usado. No uso da solução de armazenamento em baterias de lítio o valor de V_{pmax} do painel deve ser pelo menos $4.2 + 0.3 = 4.5V$. No uso de supercondensadores o valor de V_{pmax} deve ser no mínimo de 3.2V, tensão para qual o MPPT entra em funcionamento. O tamanho do painel não deve exceder o tamanho do módulo

harvester, ou seja seis centímetros de lado. É colocado por cima do armazenamento de energia e em aplicações com armazenamento em baterias de lítio, deve ser colocado entre o painel e a bateria uma tela de material termicamente isolante, para impedir que o painel que recebe radiação solar esteja em contacto direto com a bateria.

MPPT

O MPPT usado é produzido pelo fabricante ZMDI[®] e o modelo varia consoante o tipo de armazenamento de energia usado, no caso de utilização de supercondensadores o modelo é o SZPM4523 e no uso de baterias de lítio o modelo é o ZSPM4521. Além de obterem o ponto máximo de transferência de potência incorporam um conversor DC/DC comutado que controla a carga do respetivo tipo armazenamento. A comunicação destes circuitos integrados com o microcontrolador é através do protocolo I2C e podem ser alterados alguns parâmetros, como corrente máxima de carga, temperatura máxima da bateria de lítio durante a carga e entre outros. O *enable* pode ser controlado através de software e utilizando um sinal digital ligado a um MOSFET de comutação.

Supercondensadores/Bateria lítio

O robô foi projetado de modo a possibilitar o uso de dois tipos de armazenamento de energia, supercondensadores ou baterias de lítio. Relativamente aos supercondensadores devem ter uma tensão máxima de 2.7V e devem ser escolhidos tendo em conta o espaço disponível na PCB., o número máximo de unidades que podem ser soldadas, são quatro. Relativamente à utilização de baterias de lítio, devem ser de 3.7V/célula e o seu tamanho não deve exceder o módulo *harvester*. Se integrar sensor de temperatura (termístor), deve ser ligado diretamente ao MPPT, caso contrario, deve ser soldado na parte superior do módulo *harvester* um termístor que fica em contacto permanente com a bateria. Como a PCB é a mesma para as duas soluções de armazenamento, são soldados somente os componentes necessários, é imprescindível a verificação dos *solder jumpers* que selecionam o circuito indicado. Para perceber quais o *solder jumpers* que devem estar soldados é apresentada a tabela 3.2;

Tabela 3.2: Tipo de armazenamento usado e *solder jumpers* associados;

Storage Mode	Solder Jumper Select									
Supercapacitor	SJ2	SJ4	SJ5	SJ6	SJ7	SJ9	SJ10	SJ11	SJ12	SJ13
Battery Li-Ion	SJ3	SJ4	SJ5	SJ6	SJ7	SJ8	SJ10	SJ11	SJ12	SJ13

Conversores DC/DC

Os conversores DC/DC usados são produzidos pelo fabricante Texas Instruments[®] e o modelo/topologia varia consoante o tipo de armazenamento de energia usado,

na utilização de supercondensadores o modelo é o TPS61201 (*boost*) e na utilização de baterias de lítio o modelo é o LM3671 (*buck*). O *boost* utilizado permite uma corrente máxima de entrada de 1.35A, sendo possível através de um sinal digital proveniente do microcontrolador controlar o modo de *power save*, contém ainda um sistema que permite recorrer a um divisor de tensão para definir o limiar a que deve desligar. Os supercondensadores quando estão totalmente descarregados são vistos como um curto circuito pela fonte, é desejável então que não descarreguem totalmente.

O conversor *buck* usado permite uma corrente máxima na saída de 600mA, para que a bateria de lítio não descarregue na totalidade foi adicionado um circuito integrado, modelo TPS3803-01, a partir de um divisor de tensão é possível definir qual o limiar mínimo que a bateria suporta sem se danificar, assim que detete o limiar programado vai atuar no *enable* do conversor *buck* desligando-o.

3.4.7 Gestão de energia

Com a utilização de *energy harvesting* no robô faz sentido que este integre sistemas de gestão de energia elétrica, para tal foi projetado um medidor de potências de forma a conhecer a potência fornecida à bateria, a potência consumida pelo robô e ainda a tensão aos terminais do painel solar. Depois de conhecidos os valores, é possível estimar se uma determinada tarefa pode ou não ser realizada/concluída. A minimização de consumos pode ser feita de várias formas, alguns exemplos podem ser: Controlo de velocidades dos motores responsáveis pela deslocação do robô; Controlo da taxa periódica de comunicação entre robôs; Controlo dos LEDs; Colocação de periféricos em modo *sleep*; Controlo de alimentação dos barramentos onde os periféricos se encontram ligados. Para perceber a última opção é exibida a figura 3.15, onde se encontram todos os periféricos que utilizam I2C, SPI (protocolo SPI [64]) para comunicarem com o microcontrolador e ainda o sistema de captação de sons com microfones e recetor de infravermelhos.

Os MOSFETs da figura 3.15 podem ser controlados por software, controlam a alimentação nos barramentos I2C e SPI, o MOSFET P-1, controla a alimentação de todo o barramento I2C, enquanto que o MOSFET P-3 controla a alimentação do barramento de comunicação SPI. Os MOSFETs P-2 e N-1 controlam a alimentação dos encoders usados nas rodas, foram colocados porque o consumo era relevante (cerca de 5mA cada), sendo assim aconselhado que sejam ativos somente para a leitura da posição e posteriormente desligados. O MOSFET P-4 controla a alimentação do circuito de microfones, existindo ainda a possibilidade de alimentar ou não o recetor de infravermelhos, selecionando na PCB através de um *solder jumper* de onde provém a alimentação. O MOSFET P-5 controla a alimentação do oscilador de 36kHz, onda portadora da comunicação por infravermelhos. O sensor de cores não tem qualquer tipo de controlo de alimentação, pois durante a fase de testes entrava em falha corrompendo o barramento de comunicação I2C0.

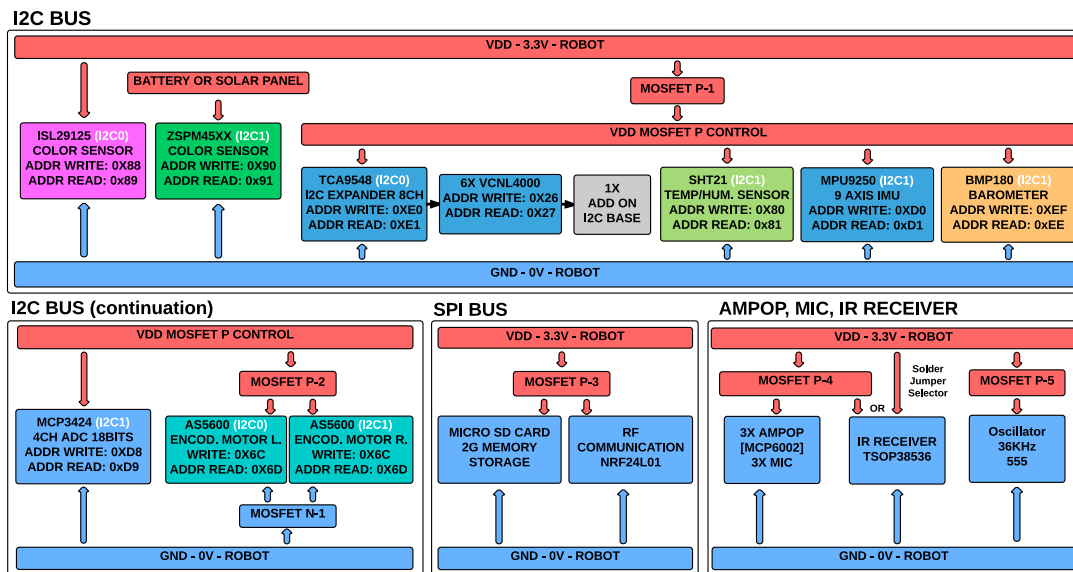


Figura 3.15: Diagrama de controle de alimentação de barramentos I2C e SPI, distribuição de periféricos pelos canais de I2C0 e I2C1 e controle de alimentação de sistema de microfones e recetor de infravermelhos;

Medidor de potências

O medidor de potências desenvolvido é composto por um ADC do fabricante Microchip[®], modelo MCP3424, contém quatro canais de leitura analógica diferenciais de 18 *bits* e um amplificador interno com um ganho até oito vezes. Para a leitura de tensão foram usados divisores de tensão e uma referência de tensão externa (MCP1525). Para leitura de corrente foi usado o método tradicional que utiliza uma resistência de potência de precisão, em que o ADC faz a leitura da queda de tensão aos seus terminais. A figura 3.16 apresenta o circuito usado.

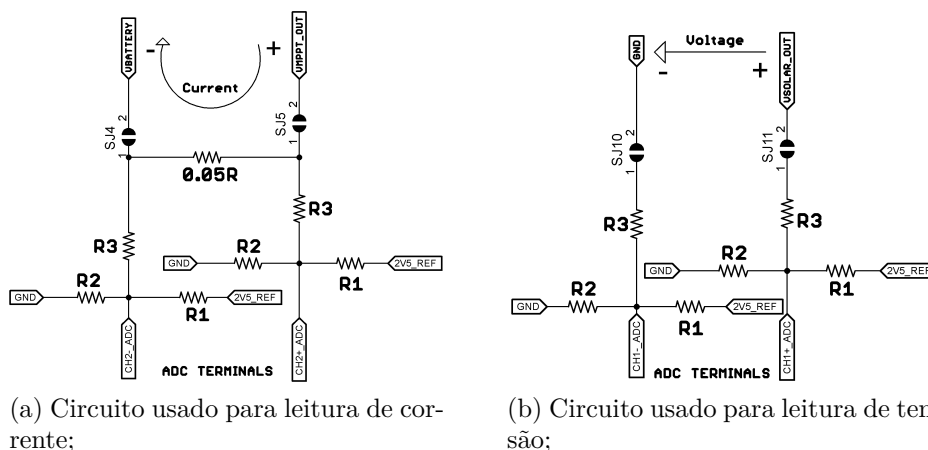


Figura 3.16: Circuitos usados para leitura de corrente e tensão na ADC diferencial de quatro canais;

Analisando o circuito da figura 3.16 e aplicando o teorema da sobreposição consegue-se chegar à equação 3.9 que relaciona o valor de tensão medido pela ADC e a tensão nos terminais do circuito. Para mais detalhe nos cálculos pode ser consultado o *Script Matlab*[®] no apêndice I.

$$V_{in_{circuit}} = -\frac{((-V_{in_{adc}}/Ganho)(R1R2 + R1R3 + R2R3))}{(R1R2)} \quad (3.9)$$

Deve-se ter em conta o valor do ganho na leitura, pois se este não entrar nos cálculos irá influenciar o resultado obtido. Para conhecer qual o valor da corrente é necessária a aplicação da lei de Ohm, em que $I = V_{in_{circuit}}/R$, com $R = 0.05\text{Ohm}$.

Para o desenvolvimento do medidor de potências foram elaborados vários testes com circuitos mais simples, no entanto não se conseguiram obter resultados experimentais satisfatórios, existiam erros de leitura sempre que o *ground* era ligado diretamente ao ADC e sempre que a tensão no canal positivo do ADC ultrapassava a tensão de $V_{dd} + 0.3V$. Optou-se então pela configuração de divisores de tensão em estrela, a mesma topologia usada pela placa de aquisição de dados *NI USB 6008* da *National Instruments*[®]. Na figura 3.16 são também visíveis *solder jumpers* (SJx), foram colocados de modo a efetuar a calibração do ADC de forma simples, ao retirar as soldas fica isolado do restante robô. Deve ser ajustada a tensão de *offset* e deve ser colocado um *loop* de corrente constante de modo a calibrar o valor da *rshunt* (resistência de potência). A calibração deve ser feita quando se deseja leituras com maior grau de certeza. Os dados relativos à calibração efetuada podem ser guardados no cartão de memória do robô.

3.4.8 Carregamento do robô

Em situações em que não exista radiação solar suficiente para que o painel solar carregue a bateria, é necessário colocar o robô a carregar de outra forma. Foram projetadas três formas de carregamento, através de um cabo *micro USB type B*, por indução, ou recorrendo aos pinos mola colocados na parte frontal do robô. Na presente secção são explicadas em detalhe as três formas de carregamento. O diagrama 3.17 ilustra a arquitetura de carregamento do robô.

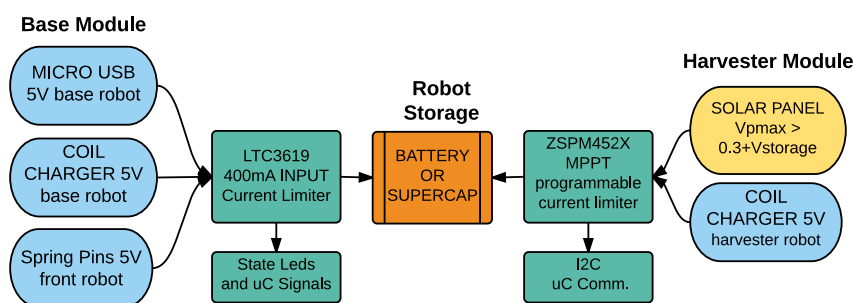


Figura 3.17: Formas de carregamento do robô;

No caso de armazenamento de energia recorrendo ao uso de baterias de lítio e a carga ser efetuada pelo integrado LTC3619, o robô deve estar ligado de modo a gerar alarmes de temperatura excessiva caso estes existam. Devido à falta de saídas no microcontrolador não foi possível acrescentar um sinal de *enable* ligado diretamente ao integrado.

Carregamento por USB

O carregamento por USB utiliza os 5V disponíveis na porta de comunicação para carregar o tipo de armazenamento usado. A corrente de entrada encontra-se limitada a 400mA sendo possível o ajuste através de uma resistência colocada entre um pino do LTC3619 e a massa. O circuito integrado encontra-se ligado através de sinais digitais ao microcontrolador permitindo saber qual o estado da carga. A tabela 3.3 relaciona o estado dos sinais digitais e o estado de carga.

Tabela 3.3: Sinais digitais provenientes do LTC3619 e respetivo estado de carga;

Microcontroller Signals		Storage
USB Connect Signal	Li-Ion or SuperCap State Chager	Final State
High	High	Charging
High	Low	Charged
Low	X	Disconnected

Carregamento por indução

O carregamento por indução permite a inexistência de ligações físicas ao robô. A bobina recetora pode ser colocada no módulo *base* por baixo dos motores, diretamente ligada ao integrado LTC3619, ou pode ser colocada no módulo *harvester* substituindo assim o painel solar, neste caso ligada ao MPPT. A bobina deve conter circuitos de retificação e regulação, pois o robô está preparado para receber 5VDC. Para mais detalhe relativo a testes e eficiências obtidas pode ser consultado o apêndice C.3.

Carregamento frontal com pinos-mola

Na parte frontal do robô encontram-se dois pinos-mola visíveis na figura 3.1, podem ser utilizados para carregar o robô quando este se encosta a um dispositivo previamente concebido com duas réguas condutoras. Uma boa aplicação seria a construção de uma estação de carga automática que através de comunicação e da utilização do *buzzer*, conseguia atrair o robô, permitindo que este se encostasse e desse início ao carregamento. A polaridade das réguas condutoras deve ser tida em atenção, pois se for trocada pode danificar alguns circuitos integrados.

3.5 Plataforma de programação ARM[®]mbedTM

Toda a programação do robô pode ser realizada online utilizando a plataforma de programação ARM[®]mbedTM [65], incorpora um editor de texto e um compilador *online*, em que a linguagem de programação usada é C/C++. Com a utilização da biblioteca mbed.h é possível ter acesso a um conjunto funções de alto nível para as mais variadas funcionalidades do microcontrolador. Para além de guardar os códigos *online* na conta do utilizador é uma plataforma *open source* que permite o fácil acesso e partilha de livrarias. Uma das vantagens da utilização é a rapidez no desenvolvimento de protótipos, pois não é necessário perder tempo a instalar *Integrated Development Environment* (IDE), compiladores e entre outros. O ambiente de programação pode ser visualizado na figura 3.18;

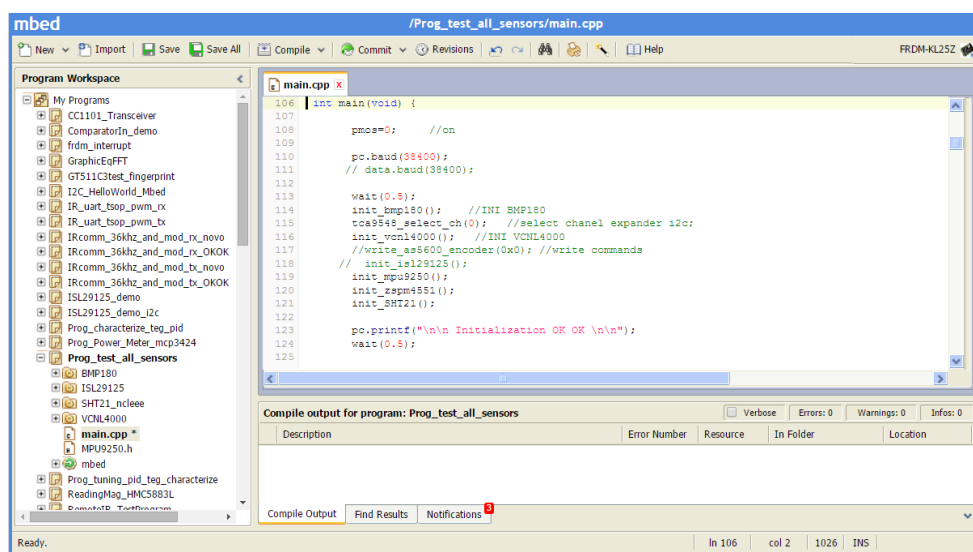


Figura 3.18: Ambiente gráfico da plataforma de programação *online* ARM[®]mbedTM;

A plataforma ARM[®]mbedTM suporta um conjunto alargado de placas de desenvolvimento fabricadas pelas marcas de microcontroladores ARM[®]. Neste caso a placa de desenvolvimento escolhida foi a do fabricante Freescale[®], modelo FRDM-KL25Z (figura 3.19). Existe também a possibilidade de programar *offline* recorrendo a IDE como *kinetis design studio*, *KEIL MDK uVision*, *CodeWarrior* e entre outros. Alguns destes são compatíveis com a plataforma ARM[®]mbedTM sendo possível o download do código online compatível com estes *softwares*. Para programar o microcontrolador do robô é usado o circuito que a placa de desenvolvimento incorpora, sendo assim uma solução fácil e de baixo custo. São utilizados os pinos do conector disponível SWD que posteriormente são ligados ao conector do robô. Para mais detalhe deve ser consultado o apêndice J.

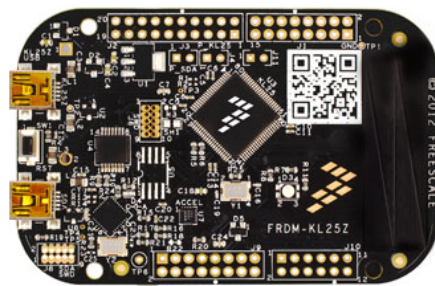


Figura 3.19: Placa de desenvolvimento usada, Freescale® - FRDM-KL25Z;

Capítulo 4

Testes Experimentais e Resultados

Neste capítulo são apresentados os principais testes e resultados a que o robô foi sujeito. Devido às características do trabalho desenvolvido, existem inúmeros testes que podem ser realizados, analisando assim em detalhe todos os sensores e atuadores existentes. Como o objetivo principal do trabalho passou pela utilização de energy harvesting para a alimentação do robô, foi dada maior relevância aos testes relacionados com questões energéticas. No apêndice E encontram-se outros testes, relacionados com alguns periféricos.

4.1 Testes gerais de hardware

Na realização de um projeto que envolve hardware é importante que este seja bem idealizado de modo a minimizar a probabilidade de erro. Para tal foram testados durante a fase de projeto praticamente todos os componentes usados no robô. Os resultados obtidos foram excelentes, o robô encontra-se 100% funcional, ou seja sem qualquer tipo de restrição a nível de hardware.

4.2 Ensaio relacionados com questões energéticas

Nesta secção são apresentados resultados relativos a requisitos energéticos do robô. Numa fase inicial é dado a conhecer os consumos relacionados com os diversos periféricos ativos, de seguida é apresentada uma tabela que relaciona a autonomia, utilização de periféricos e o uso da energia solar, dando maior relevância ao uso de supercondensadores. Posteriormente são apresentadas as curvas de carga dos supercondensadores e da bateria de lítio, usando o carregamento por USB (5VDC) e carregamento recorrendo à *energy harvesting*. Por último são dadas a conhecer as curvas de descarga dos supercondensadores em circuito aberto e com o robô desligado.

4.2.1 Consumos

As medições dos consumos apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 foram realizadas no barramento principal de alimentação do robô (3.3V), figura 4.1, ou seja logo após o conversor DC/DC. Podem ser visualizados diferentes consumos relacionados com o número de periféricos ativos. Durante a medição de consumos os motores foram acionados de modo a que o robô rodasse sobre o seu eixo central, este fator significa um aumento na ordem dos dois miliampères no consumo total relativamente ao deslocamento linear.

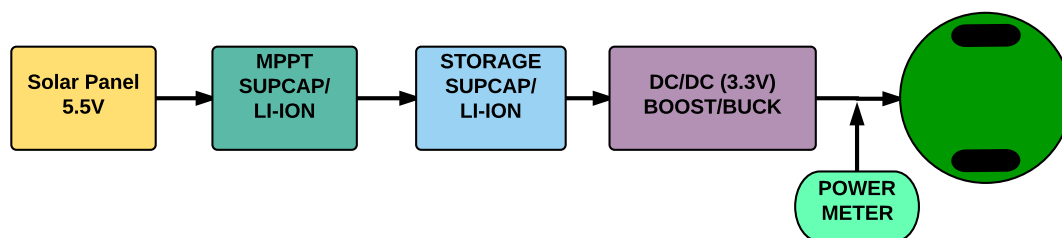


Figura 4.1: Ponto de medição de consumos, barramento 3.3V;

Tabela 4.1: Consumos no barramento 3.3V com diversos casos de periféricos ativos e motores desligados;

Motores	Bus I2C	Bus SPI	Microf.	L. RGB	L. WHITE	ENCOD.	BUZZER	Cons. [mA]-3,3V	Potê. [W]
0%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	25,7	0,085
0%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	27,9	0,092
0%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	37,2	0,123
0%	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	22,3	0,074
0%	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	33,2	0,110
0%	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	34,6	0,114
0%	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	44,8	0,148
0%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	70,3	0,232
0%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	79,1	0,261

Analisando a tabela 4.1 verifica-se que o consumo mínimo do robô é de aproximadamente 22.3mA, sendo importante salientar que o BUS SPI se encontra ligado. A explicação do sucedido deve-se ao facto do cartão MICRO SD consumir corrente pelos pinos de comunicação, ou seja o BUS SPI deve estar ligado para o consumo ser menor, a outra solução passa por retirar o cartão MICRO SD do robô, caso não seja necessário. O consumo dos *encoders* é relevante, cerca de 10mA, sendo importante a sua alimentação somente para leitura do valor da posição das rodas.

A redução do consumo de *standby* é possível uma redução de consumo em *standby* adicional utilizando os modos mais avançados de *deep sleep* do microcontrolador.

A tabela 4.2 apresenta um conjunto de situações comuns na utilização do robô perante a realização de tarefas. São visíveis resultados que comparam diferentes velocidades dos motores e diferentes periféricos ativos.

A velocidade dos motores é um fator crucial para a autonomia, se a velocidade do deslocamento não for importante na realização de uma determinada tarefa, os

Tabela 4.2: Consumos no barramento 3.3V com situações comuns de funcionamento do robô;

Motores	Bus I2C	Bus SPI	Microf.	L. RGB	L. WHITE	ENCOD.	BUZZER	Cons. [mA] - 3,3V	Potê. [W]
35%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	45,2	0,149
50%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	47,8	0,158
100%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	54,3	0,179
35%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	44,9	0,148
50%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	48,5	0,160
100%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	59,9	0,198
35%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	58,7	0,194
50%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	63,3	0,209
100%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	77,2	0,255

motores devem permanecer com valores de *duty cycle* compreendidos no intervalo de 35% a 50%.

Tabela 4.3: Consumos no barramento 3.3V com possíveis situações espontâneas que possam existir;

Motores	Bus I2C	Bus SPI	Microf.	L. RGB	L. WHITE	ENCOD.	BUZZER	Cons. [mA] - 3,3V	Potê. [W]
35%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	84,7	0,280
50%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	89,8	0,296
75%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	94,6	0,312
100%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	101,4	0,335
100%	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	105,3	0,347
100% bloq.	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	287	0,947
100% bloq.	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	295	0,974

Observando a tabela 4.3 são visíveis situações espontâneas que podem ocorrer durante a realização de tarefas, onde foram abordadas situações limite. O consumo máximo com todos os periféricos ligados é cerca de 105mA, foram ainda efetuados testes com os motores bloqueados mecanicamente, obtendo um consumo máximo de 295mA, aproximadamente o triplo do consumo sem qualquer tipo de carga aplicada.

É importante realçar que as medições foram efetuadas no barramento 3V3 do robô, portanto a potência à entrada do conversor DC/DC é maior devido a eficiência da conversão. Os fatores que afetam diretamente a eficiência, ou seja ponto de funcionamento, são a corrente que flui no conversor e a tensão proveniente da bateria. A topologia *buck* na maioria dos casos apresenta melhores eficiências que a topologia *boost*.

Os consumos provenientes de comunicações não se encontram nos testes realizados, pois são consumos não estacionários. Mais informações relativas aos consumos da comunicação via rádio e via infravermelhos encontram-se anexo no apêndice E.2.

4.2.2 Autonomia

A autonomia do robô depende de variados fatores, sendo os mais importantes o tipo de armazenamento usado, tipo de periféricos ativos e a exposição à radiação solar. As tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram os resultados obtidos para diferentes

situações. Os dados referentes ao armazenamento e à potência do painel solar encontram-se visíveis na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dados relativos ao armazenamento e painel solar fotovoltaico;

Supercondensadores	Bateria de lítio	Painel Solar
Tensão Max [V]: 2,7	Tensão [V]: 3,7	Tensão PotMáx [V]: 4,84
Capacidade [F]: 10	Capacidade [Ah]: 2,05	Corrente PotMáx [mA]: 71,03
Unidades: 4	Unidades: 1	Unidades: 1
Energia T.[J]: 145,8	Tensão trabalho [V]: 4,2 a 2,75	Potência Máxima [mW]: 344,7
Energia T.[Wh]: 0,0405	Peso [g]: 45	Eficiência [%]: 13,5

Para que o robô não se afastasse do local na realização dos testes, os motores foram acionados de modo a que rodasse sobre o seu eixo central. Foram aplicadas velocidade iguais mas com direções opostas.

Tabela 4.5: Autonomia do robô em diversos casos com recurso ao armazenamento em supercondensadores **sem** exposição à radiação solar;

Motores	Bus I2C	Bus SPI	Microf.	L. RGB	L. WITE	ENCOD.	BUZZER	Sol	Duração [h]
35%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	NÃO	00:08:19
50%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	NÃO	00:07:31
100%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	NÃO	00:06:52
35%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:11:22
50%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:09:52
100%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:08:16
35%	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:11:43
50%	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:10:19
100%	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:08:37
35%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:11:50
50%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:10:25
100%	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:09:19
35%	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:12:26
50%	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:10:59
100%	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NÃO	00:09:38

Analisando a tabela 4.5 são visíveis os resultados de autonomia para diversas situações, como seria de esperar a autonomia obtida com os *encoders* e os LED RGB ativos é menor, pois estes consomem uma quantidade de energia considerável. É visível um ligeiro aumento na autonomia quando BUS SPI se encontra ativo relativamente à situação em que todos os periféricos estão desativados, resultado que faz todo o sentido comparativamente aos consumos medidos.

A tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos com o robô exposto ao sol recorrendo ao armazenamento em supercondensadores. Os testes foram efetuados mantendo a coerência no que diz respeito à intensidade da radiação solar, ou seja, aqueles que resultam numa maior autonomia foram realizados em três dias diferentes mas com semelhanças na radiação solar ($1000 W/m^2$).

Na tabela 4.6 são visíveis aumentos na autonomia consideráveis, traduzindo assim a importância da utilização de *energy harvesting* em aplicações deste tipo. Na coluna mais à direita encontra-se o valor em percentagem relativo ao aumento da autonomia que relaciona situações idênticas com e sem exposição à radiação solar. O aumento menos significativo de autonomia é de 223% e aumento mais significativo de 2027%.

Tabela 4.6: Autonomia do robô em diversos casos com recurso ao armazenamento em supercondensadores **com** exposição à radiação solar;

Motores	Bus I2C	Bus SPI	Microf.	L. RGB	L. WITE	ENCOD.	BUZZER	Sol	Início [h]	Fim [h]	Duração [h]	Aument. [%]
35%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	SIM	11:42:32	12:04:43	00:22:11	267
50%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	SIM	11:21:00	11:38:35	00:17:35	234
100%	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	SIM	14:19:25	14:34:46	00:15:21	224
35%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	SIM	12:12:00	15:43:18	03:31:18	1859
50%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	SIM	12:10:15	15:30:15	03:20:00	2027
100%	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	SIM	12:23:17	13:16:26	00:53:09	643

Os testes de autonomia recorrendo ao uso da bateria de lítio encontram-se na tabela 4.7, devido à sua capacidade de armazenamento elevada foram efetuados testes com praticamente todos os periféricos ativos.

Tabela 4.7: Autonomia do robô em diversos casos com recurso ao armazenamento na bateria de lítio **sem** exposição à radiação solar;

Motores	Bus I2C	Bus SPI	Microf.	L. RGB	L. WHITE	ENCOD.	BUZZER	Sol	Duração Total
100%	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	NÃO	29:18:27

Analisando a tabela 4.7 é perceptível o grande número de horas de autonomia que o uso da bateria de lítio proporciona, esta solução é indicada para tarefas que requerem uma duração elevada ou em locais onde não exista a presença de radiação solar suficiente. Na realização de tarefas que exponham o robô à radiação solar existirá um normal aumento da autonomia.

4.2.3 Curvas de carga

Uma restrição na realização de tarefas com o robô pode passar pelo desconhecimento da curva de carga do armazenamento, para tal foram analisados os tempos de carga em diversas situações. Foi dada maior importância à carga dos supercondensadores, pois é a solução com a menor capacidade de armazenamento, sendo necessário recorrer ao seu carregamento um número maior de vezes quando comparado com o uso da bateria de lítio. O ponto de medição é visível na figura 4.2.

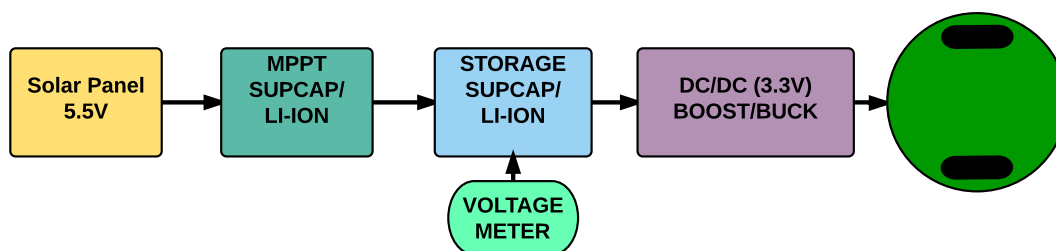
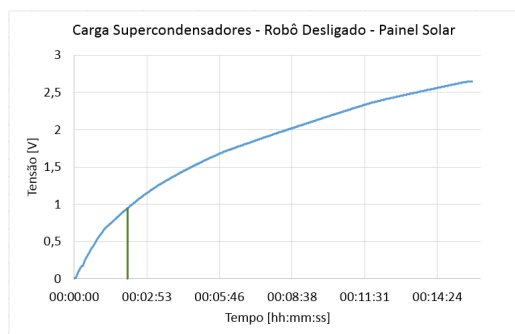


Figura 4.2: Ponto de medição das curvas de carga e descarga;

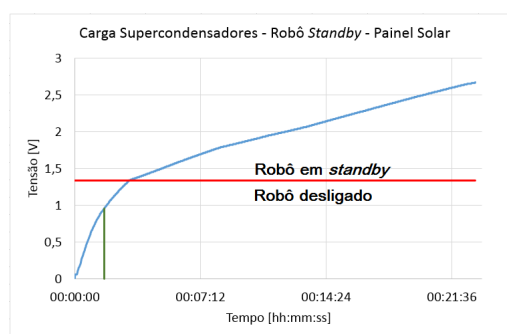
Carga através do painel solar

A análise da curva de carga dos supercondensadores recorrendo ao painel solar teve em conta duas situações distintas, no caso em que o robô se encontra total-

mente desligado, ou seja com o *switch* ON/OFF em circuito aberto e no caso em que o robô se encontra ligado mas com os periféricos todos inativos (*standby*) exceto o BUS SPI, visto que o consumo é menor quando este se encontra ligado. A figura 4.3 exibe os resultados obtidos durante os testes realizados num dia de sol, sem nuvens, onde se estima que a radiação solar seja aproximadamente $1000W/m^2$.



(a) Curva de carga dos supercondensadores com o robô desligado exposto à radiação solar;



(b) Curva de carga dos supercondensadores com o robô em *standby* exposto à radiação solar;

Figura 4.3: Curvas de carga com a exposição do robô à radiação solar com um valor aproximado de $1000W/m^2$;

A figura 4.3 (a) exibe a curva de carga completa dos supercondensadores perante a exposição do robô desligado à radiação solar. O tempo de carga total ronda os 16 minutos, embora numa situação normal a configuração do conversor *boost* impede que o valor de tensão dos supercondensadores baixe além dos $0.95V$, permitindo uma menor perda de eficiência numa fase inicial e uma redução para cerca de 13.5 minutos do tempo de carga (carga a partir da linha verde no gráfico). A percentagem de energia desperdiçada relativa aos $0.95V$ é de aproximadamente 12.51% da capacidade dos supercondensadores.

A figura 4.3 (b) exibe a curva de carga completa dos supercondensadores perante a exposição do robô em *standby* à radiação solar. O tempo de carga total ronda os 23 minutos, embora numa situação normal devido à configuração do conversor *boost*, o tempo reduz sensivelmente para 21 minutos (carga a partir da linha verde no gráfico). A linha vermelha visível no gráfico representa a alteração do estado desligado para *standby*, deve-se à configuração do conversor para permitir que o robô inicie só quando a tensão atinja $1.34V$, ou seja na descarga o robô desliga aos $0.95V$ e no processo de carga só liga aos $1.34V$.

Os resultados permitem a realização de tarefas, como por exemplo, deixar o robô estrategicamente colocado de um dia para o outro numa zona onde incida o sol, sabendo à partida que os supercondensadores irão carregar e o robô irá ligar dando continuidade à tarefa.

Foi realizado um teste expondo o painel solar à iluminação fluorescente disponível no laboratório, a corrente medida foi aproximadamente $0.8mA$ verificando-se que o painel não gera tensão suficiente para a excitação do MPPT. A solução

passa pela colocação de um painel de maior tensão ou utilização de um MPPT com topologia *boost*.

De modo a validar o MPPT responsável pela carga da bateria de lítio, o robô foi exposto ao sol durante quatro horas e analisada a evolução da tensão da bateria, os resultados obtidos encontram-se na figura 4.4.

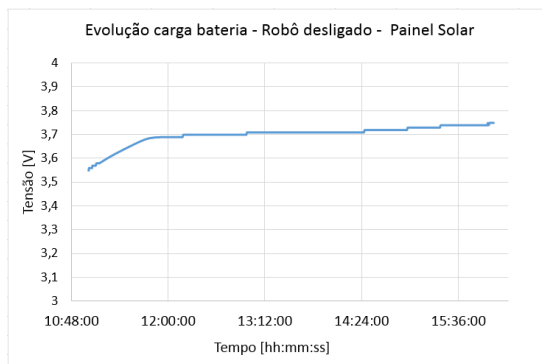


Figura 4.4: Evolução da curva de carga da bateria de lítio com o robô desligado exposto a radiação solar durante quatro horas;

Durante as quatro horas de carga o aumento de tensão da bateria foi de 0.2V, a tensão inicial de 3.55V e a final de 3.75V, já seria de esperar um aumento pouco significativo devido à capacidade elevada de armazenamento e à potência máxima que o painel consegue disponibilizar.

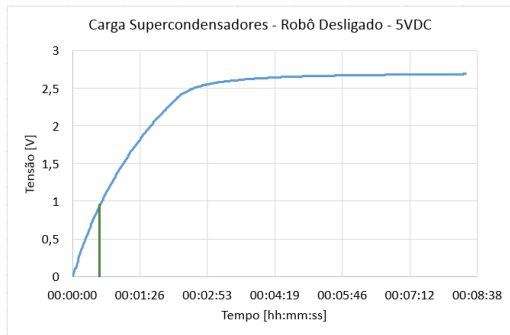
Carga através de USB

A carga dos supercondensadores recorrendo aos 5VDC pode ser efetuada através do conector USB ou através dos pinos mola que se encontram na zona frontal do robô. É importante observar as curvas de carga na situação em que o robô se encontra desligado e em *standby*, visto que na maioria dos casos em que recarrega usando os pinos mola, encontra-se ligado, podendo no entanto desligar os seus periféricos ficando em *standby* (periféricos todos desligados exceto o BUS SPI). A figura 4.5 apresenta os resultados obtidos.

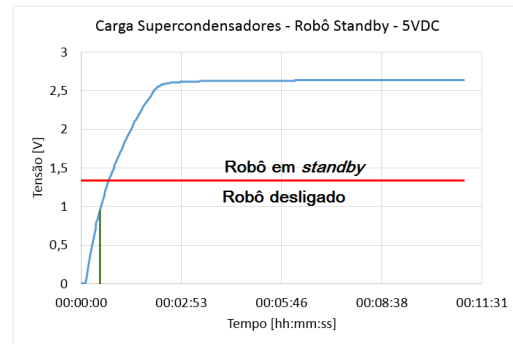
Visualizando a figura 4.5 (a) é perceptível que o tempo de carga total com o robô desligado é cerca de 8.5 minutos, numa situação normal aproximadamente 8 minutos devido à configuração do conversor como já referido anteriormente.

A figura 4.5 (b) apresenta os resultados no caso em que o robô se encontra em *standby*, comparando com os resultados obtidos com o robô desligado não existem diferenças significativas, porém numa fase terminal o facto de estar em *standby* dá origem a um maior tempo de estabilização até a tensão atingir os 2.65V, sendo aproximadamente 11 minutos. A máxima eficiência da conversão DC/DC registada durante a carga foi aproximadamente 68% com a tensão nos supercondensadores de 2.48V.

Foram realizados testes de carga com o kit de indução C.3 e os resultados foram semelhantes aos do carregamento por USB, o que era de esperar pois a



(a) Curva de carga dos supercondensadores com o robô desligado através do USB ou pinos mola;



(b) Curva de carga dos supercondensadores com o robô em *standby* através do USB ou pinos mola;

Figura 4.5: Curvas de carga através do USB ou pinos mola;

bobina disponibiliza 5VDC tal como o USB. No entanto existe uma perda de eficiência resultante da conversão DC/AC - AC/DC.

Os testes relativos à carga da bateria de lítio foram superficiais, a bateria contém uma capacidade de armazenamento considerada elevada, oferecendo uma boa autonomia ao robô. A figura 4.6 exibe a curva de carga com a aplicação de 5VDC sendo o teste realizado com o robô desligado e sem a presença de radiação solar a incidir sobre o painel.

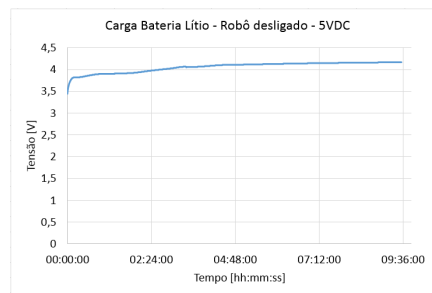


Figura 4.6: Curva de carga da bateria de lítio com o robô desligado através do USB ou pinos mola;

Analisando a figura 4.6 é perceptível que o tempo de carga ronda as 9.5 horas, cerca de um terço tempo de autonomia que a bateria oferece. A limitação de corrente durante a carga foi projetada de modo a aumentar o tempo de vida útil da bateria, não expondo a ciclos de carga rápidos que originam fluxos de corrente elevados. A máxima eficiência da conversão DC/DC registada durante a carga foi aproximadamente 78% com a tensão na bateria de 4.00V.

4.2.4 Curvas de descarga

Foram realizados testes aos tempos de descarga dos supercondensadores usados em duas situações. Os gráficos obtidos encontram-se no anexo D, a figura D.1 (a) exibe a descarga de um supercondensador de 10F em circuito aberto e a figura D.1 (b) exibe a curva de descarga dos supercondensadores do robô no estado desligado.

O teste relativo ao supercondensador em circuito aberto teve uma duração total de 14 dias e aproximadamente 16 horas. Inicialmente foi carregado até atingir uma tensão de 2.65V, posteriormente foram recolhidos valores com o voltímetro. Analisando os resultados obtidos conclui-se que a perda de tensão durante o teste foi de 1.38V representando 77.9% da capacidade de armazenamento.

O teste efetuado com o robô desligado usando os quatro supercondensadores ($4 \times 10\text{F} = 40\text{F}$), foi realizado com condições idênticas ao anterior, no entanto foram retirados valores até que a tensão chegasse a 0V. O tempo total de descarga demorou aproximadamente 5 dias, relativamente à tensão mínima necessária para que o robô ligue (1.34V), 4 dias e 10 horas, ou seja é o intervalo em que o robô pode ser ligado, depois de ter sido carregado e desligado.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusão

O trabalho realizado nesta dissertação focou-se no desenvolvimento de um robô móvel multi-funcional, de baixo custo e de dimensões reduzidas, alimentado com recurso a *energy harvesting*.

No decorrer da presente dissertação foi possível concluir que:

- A solução de *energy harvesting* que se mostra viável passa pela utilização de células solares fotovoltaicas, a potência máxima do painel solar usado é de 344 *mW* e tem um rendimento na conversão de aproximadamente 13.5%. Para captação de energia em ambientes interiores (*indoor*) deve ser usado um painel solar de maior tensão pois o MPPT necessita de 3.2V para entrar em funcionamento. No que diz respeito à utilização de TEG para gerar energia é necessário gradientes de temperatura consideráveis ($dt > 30^{\circ}\text{C}$) entre faces, sendo difíceis de obter neste tipo de aplicações.
- O consumo mínimo (*standby*) do robô é de 73,6mW e foi obtido com o BUS SPI ligado, portanto o estado lógico do BUS deve permanecer ativo durante a realização de tarefas. A diminuição do consumo de *standby* é possível recorrendo a funções de baixo nível, de forma a baixar a velocidade de processamento do microcontrolador e da sua colocação em *sleep*. O consumo máximo é de 1347,5mW e foi obtido com todos os periféricos ligados na máxima intensidade, representa assim um aumento de 422% relativamente ao consumo de *standby*, sublinhando a importância do controlo seletivo dos periféricos.
- A autonomia do robô depende do tipo de armazenamento, quantidade de periféricos ativos e exposição à radiação solar, os testes realizados indicam que pode variar entre os 6 minutos e as 30 horas. Foi possível também verificar que existe um aumento significativo quando é usada a energia solar fotovoltaica, proporcionando a resolução parcial ou até mesmo total do problema da autonomia perante a realização de tarefas. O aumento menos significativo de autonomia utilizando supercondensadores é de 223% (06:52

min - 15:21 min) e o máximo 2027% (9:52 min - 3:20:00 h), destacando a utilização de tecnologias de energy harvesting neste tipo de robôs. A possibilidade de optar por dois tipos de armazenamento de energia torna-se importante, pois permite que sejam feitos estudos avançados, como por exemplo concursos de máxima autonomia com a limitação de energia disponível, definindo o número de supercondensadores usados.

- O tempo de carga dos supercondensadores recorrendo à exposição do robô no estado desligado à radiação solar é cerca de 16 minutos e em *standby* aproximadamente 23 minutos, representando assim um aumento de 144% no tempo de carga. Para que a diferença baixe significativamente é necessário que o robô tenha um consumo de *standby* menor, de qualquer das formas consegue carregar no estado *standby* e dar continuidade à tarefa a realizar. O facto de existirem cinco sensores frontais de luminosidade e o medidor de potências, permite que seja analisada o valor da tensão do armazenamento bem como a tensão do painel solar, de modo a deslocar o robô para um local de maior incidência de luz. Relativamente à carga dos supercondensadores por USB a duração é aproximadamente 8.5 minutos com o robô desligado e 11 minutos em *standby*, permite assim a realização de testes rápidos com conhecimento exato da quantidade de energia disponível. O carregamento completo da bateria de lítio tem uma duração de 9.5 horas, aproximadamente 32% do tempo de autonomia que proporciona.

5.2 Trabalho futuro

O trabalho desenvolvido resultou num primeiro protótipo, logo existe uma grande variedade de trabalho futuro que pode ser realizado, visando a evolução e validação pormenorizada do projeto. De seguida encontra-se descritas algumas propostas de trabalho futuro tanto a nível de hardware como software.

- Desenvolver uma estação de carga inteligente capaz de atrair o robô e de lhe proporcionar várias soluções de carregamento, seja através dos pinos mola frontais ou através do carregamento por indução. Pode ser utilizado grande parte do *hardware* já desenvolvido de modo a facilitar o seu desenvolvimento;
- Desenvolver módulos adicionais de modo a aumentar o número de aplicações do robô. Devido à arquitetura modular é possível desenhar/utilizar módulos específicos para uma determinada tarefa;
- Desenvolver um módulo de calibração e teste automático dos medidores de potência do módulo *harvester*. O contacto elétrico entre PCBs pode ser efetuado através de pinos mola sendo aplicados valores de referência em tensão e corrente;

- Desenvolver uma PCB com o objetivo de seguir o sol, a rotação do robô pode solucionar um eixo e a aquisição de um motor capaz de levantar o painel o segundo eixo. Podem ser colocados quatro fotodiodos, um em cada lateral do painel solar e um microcontrolador auxiliar que através de I2C comunica com o microcontrolador do robô. Esta solução iria aumentar a captação de energia nos momentos em que a fonte de luz não se encontra perpendicular ao painel.
- Explorar soluções de MPPT de topologia *boost* (exemplo LTC3105) de modo a obter melhores resultados na recolha de energia em ambientes *in-door*. O facto de ser *boost* permite que a tensão da fonte seja inferior ao armazenamento;
- Complementar e melhorar os códigos fonte desenvolvidos para testar todos os sensores e atuadores que o robô integra;
- Complementar a aplicação já desenvolvida em LabVIEW® de modo a acionar os atuadores e obter dados de todos os sensores, deve ainda fazer *broadcast* identificando quantos robôs estão na área, sendo possível escolher posteriormente qual o robô hospedeiro;
- Desenvolver funções de baixo nível capazes de alterar a velocidade do oscilador do microcontrolador e da sua colocação em *sleep*, de modo a minimizar os consumos *standby*;
- Testar e implementar algoritmos de otimização de consumos de energia, proporcionando um aumento da autonomia do robô. Podem ser explorados com mais detalhe as funcionalidades relacionadas com o sistema de gestão de energia;
- Testar e implementar algoritmos de enxame de modo a avaliar e validar o *hardware*, efetuando se for o caso propostas de melhorias. O facto do robô conter uma arquitetura modular concede fáceis alterações a um custo reduzido.

Bibliografia

- [1] R. Allan, *Energy Harvesting Powers Wireless Sensor Networks In Industrial Apps*, Sep 2012. <http://electronicdesign.com/4g/energy-harvesting-powers-wireless-sensor-networks-industrial-apps>.
- [2] R. Calìò, U. B. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Stefanini, G. de Petris, and C. M. Oddo, *Piezoelectric Energy Harvesting Solutions*, 2014. <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4755/pdf>.
- [3] J. C. Quadrado, *Medição da radiação solar*, Sep 2008. http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15.
- [4] M. Ângelo Silveiro Valente, *Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico*, 2011. http://run.unl.pt/bitstream/10362/6110/1/Valente_2011.pdf.
- [5] B. Dodson, *Breakthrough allows inexpensive solar cells to be fabricated from any semiconductor*, 2012. <http://www.gizmag.com/screening-engineered-field-effect-photovoltaics-solar-cell/23539/>.
- [6] F. M. González-Longatt, *Model of Photovoltaic Module in Matlab*, 2005. <http://matlabproject.ir/forms/files/618671.pdf>.
- [7] U. of Hawai i at Manoa, *THERMOELECTRIC DEVICES*, 2011. http://www.spacegrant.hawaii.edu/reports/22_FA09-SP10/SLee_FA09.pdf.
- [8] A. Montecucco, J. Siviter, and A. R. Knox, “The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel,” *Applied Energy*, vol. 123, no. 0, pp. 47 – 54, 2014.
- [9] V. Gupta, A. Kandhalu, and R. R. Rajkumar, *Energy Harvesting from Electromagnetic Energy Radiating from AC Power Lines*. <http://users.ece.cmu.edu/~vikramg/docs/hotemnets11.pdf>.
- [10] F. Khan and I. Ahmad, “Vibration-based electromagnetic type energy harvester for bridge monitoring sensor application,” in *Emerging Technologies (ICET), 2014 International Conference on*, pp. 125–129, Dec 2014.

- [11] M. O. J. Paul and R. Zhao, *A comparative study of Lithium-Ion Batteries*, May 2010. http://www-scf.usc.edu/~rzhao/LFP_study.pdf.
- [12] F. Hoffart, *Proper Care Extends Li-Ion Battery Life*, Abr 2008. http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/portable_power_management/battery_charger_ics/804PET22li-ion-battery-life.pdf.
- [13] A. Schneuwly and R. Gallay, *Properties and applications of supercapacitors From the state-of-the-art to future trends*, 2000. <http://www.garmanage.com/atelier/root/public/Contacting/biblio.cache/PCIM2000.pdf>.
- [14] I. I. C. Inc., *Supercapacitors*. <http://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/supercapacitors.pdf>.
- [15] W. Kester and B. Erisman, *SWITCHING REGULATORS SECTION 3 SWITCHING REGULATORS*. <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/ptmsect3.pdf>.
- [16] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Scituate, MA, USA: Bradford Company, 2004.
- [17] J. Carpenter, Y. Ramadass, and T. Instruments, *Fundamentals of ambient energy transducers in energy harvesting systems*, Mar 2012. <http://www.ecnmag.com/articles/2012/03/fundamentals-ambient-energy-transducers-energy-harvesting-systems>.
- [18] P. das Energias Renováveis, *Tecnologias: Paineis Fotovoltaicos (PV)*, Mai 2015. http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=43&ID_area=8&ID_sub_area=26.
- [19] N. Kularatna, *Supercapacitors Enhance LDO Efficiency- Part 2: Implementation Issues*, Mai 2011. <http://powerelectronics.com/power-management/supercapacitors-enhance-ldo-efficiency-part-2-implementation-issues>.
- [20] F. Arvin, J. Murray, C. Zhang, and S. Yue, *Colias: An Autonomous Micro Robot for Swarm Robotic Applications*, May 2014. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/47293.pdf>.
- [21] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st ed., 2008.
- [22] G. J. Snyder, *Small Thermoelectric Generators*, Mar. 2008. https://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf.
- [23] I. Nanopower, *Human gait energy scavenger*, 2014. http://www.instepnanopower.com/2_Technology/Technology.aspx.

- [24] A. Khaligh and O. Onar, *Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems*. Energy, Power Electronics, and Machines, CRC Press, 2009.
- [25] K. Munzer, K. Holdermann, R. Schlosser, and S. Sterk, “Thin monocrystalline silicon solar cells,” *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 2055–2061, Oct 1999.
- [26] C. M. Tartagni, *Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems*, 2009. http://www2.imec.be/content/user/File/EAS_report_v28.pdf.
- [27] S. Spataru, *Experiment Based Teaching of Solar Cell Operation and Characterization Using the SolarLab Platform*, 2014. http://vbn.aau.dk/ws/files/198852776/IWTPV14_Solarlabv4.pdf.
- [28] A. Technologies, *IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A*, 2009. <http://www.ccontrols.ch/cms/upload/applikationen/Solar-Cell/5990-4428EN.pdf>.
- [29] F. Spertino and J. Akilimali, “Are manufacturing $i-v$ mismatch and reverse currents key factors in large photovoltaic arrays,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 4520–4531, Nov 2009.
- [30] N. Aeronautics and S. Administration, *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG)*, 2013. http://mars.jpl.nasa.gov/files/mep/MMRTG_Jan2008.pdf.
- [31] J. Carmo, J. Antunes, M. Silva, J. Ribeiro, L. Gonçalves, and J. Correia, “Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior,” *Measurement*, vol. 44, no. 10, pp. 2194 – 2199, 2011.
- [32] A. Toprak and O. Tigli, “Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges,” *Applied Physics Reviews*, vol. 1, no. 3, pp. –, 2014.
- [33] E. Arroyo, A. Badel, F. Formosa, Y. Wu, and J. Qiu, “Comparison of electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesters: Model and experiments,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 183, no. 0, pp. 148 – 156, 2012.
- [34] R. F. Rangel, *Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica*, 2014. <http://www.piezoinstitute.com/resources/piezo-history/>.
- [35] H. Vocca and F. Cottone, *ICT - Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology*, 2014-02-12. <http://www.intechopen.com/books/export/citation/BibTex/ict-energy-concepts-towards-zero-power-information-and-communication-technology-kinetic-energy-harvesting>.

- [36] P. S. INC, *PIEZOELECTRIC BENDING SENSORS*. <http://www.piezo.com/prodbg7qm.html>.
- [37] Solmetric, *Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays*, Mar 2011. <http://resources.solmetric.com/get/Guide%20to%20Interpreting%20I-V%20Curves.pdf>.
- [38] F. C. L. Guedes, *Conversor DC-DC em tecnologia CMOS para energy harvesting*, Out 2013. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/27731/1/Fernanda%20Catarina%20Louren%C3%A7o%20Guedes.pdf>.
- [39] A. DOLARA, R. FARANDA, and S. LEVA, *Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems*, Set 2009.
- [40] A. Mansoor and EPRI, *Emerging Technologies Enable “No Regrets” Energy Strategy*, Jan 2013. <http://www.powermag.com/emerging-technologies-enable-no-regrets-energy-strategy/?pagenum=8>.
- [41] M. Whittingham, “History, evolution, and future status of energy storage,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 1518–1534, May 2012.
- [42] D. A. Katz, *BATTERIES*, Jan 2003. <http://www.chymist.com/batteries.pdf>.
- [43] R. V. Noorden, *The rechargeable revolution: A better battery*, Mar 2014. <http://www.nature.com/news/the-rechargeable-revolution-a-better-battery-1.14815>.
- [44] S. Netherlands, “Electric vehicle integration into modern power networks,” in *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, 2196-3185, p. 325, Springer Netherlands, 2013.
- [45] L. Global, *Lithium-ion Battery Overview*, May 2012. https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/67_Issue10_Lithium-ionBattery_TechNote_final.pdf.
- [46] L. B. R. 2007, *Capacitors and Capacitance*, 2007. <http://www.physics.byu.edu/faculty/rees/220/book/lesson6.pdf>.
- [47] P. A. M. e Silva, *ISEP - Pedro Alberto Macedo e Silva - SUPERCONDENSADORES*, 2013.
- [48] M. Wens and M. Steyaert, “Basic dc-dc converter theory,” in *Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC-DC Converters in Standard CMOS*, Analog Circuits and Signal Processing, pp. 27–63, Springer Netherlands, 2011.

- [49] NASA, *NASA's GROVER Debuts On Greenland's Ice Sheet*, Mai 2013. https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2506.html.
- [50] NASA, *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*, Feb 2010. https://solarsystem.nasa.gov/rps/docs/MMRTGfactsFeb_2010.pdf.
- [51] U. of Sydney, *Ladybird developer awarded researcher of the year*, Jun 2014. <http://sydney.edu.au/news/84.html?newsstoryid=13686>.
- [52] Gadgetify, *Scrobby Solar Robot Keeps Your Solar Panels Clean*, Set 2011. <http://www.gadgetify.com/scrobby-solar/>.
- [53] Hizzok, *Alice*, Jan 2009. <http://www.hizook.com/projects/alice>.
- [54] M. Patil, T. Abukhalil, and T. Sobh, *Hardware Architecture Review of Swarm Robotics System*, 2013. <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/849606/cta/>.
- [55] Y. Mohan and S. Ponnambalam, "An extensive review of research in swarm robotics," in *Nature Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on*, pp. 140–145, Dec 2009.
- [56] E. puck Official, *Spirit of the e-puck project*, Nov 2010. http://www.e-puck.org/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=3.
- [57] S. organizing systems reasearch group, *The Kilobot Project*, 2008. <http://www.eecs.harvard.edu/ssr/projects/progSA/kilobot.html>.
- [58] S. B. Official, *Swarm-bots: Swarms of self-assembling artifacts*, 2014. <http://www.swarm-bots.org/>.
- [59] J. A. de Carvalho Gonçalves, *Controlo de robots omnidireccionais*, Feb 2005. https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1583/1/msc_jose_goncalves.pdf.
- [60] D. J. M. M. de Campos Pereira Batista, *SIMULADOR DE NAVEGACAO REACTIVA DE UMA PLATAFORMA MOVEL DE CONDUCAO DIFERENCIAL - Apóio às aulas práticas*.
- [61] L. Angel, C. Hernandez, and C. Diaz-Quintero, "Modeling, simulation and control of a differential steering type mobile robot," in *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese*, pp. 8757–8762, July 2013.
- [62] Y. Sun and Element14, *Solution Guide to I2C BUS Communication*, Out 2011. <https://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/39403-102-1-224317/Solution%20Guide%20to%20I2C%20BUS.pdf>.

- [63] Nicegear, *Pololu Micro Metal Gearmotor HP*. <https://nicegear.co.nz/robotics/pololu-micro-metal-gearmotor-hp-10001/>.
- [64] C. Ababei, *Lecture 12: SPI and SD cards*, Mai 2013. http://www.dejazzer.com/ee379/lecture_notes/lec12_sd_card.pdf.
- [65] A. mbed, *ARM mbed Developer Site*. <https://developer.mbed.org/>.
-

Apêndice A

Caracterização de Painéis Fotovoltaicos

Para uma análise detalhada de um painel fotovoltaico é necessário fazer o estudo da curva de características que relaciona a corrente com a tensão, normalmente designada por curva I-V. Para tal foi desenvolvida uma aplicação em LabVIEW® e todo o *hardware* necessário de modo a obter a curva característica de módulos fotovoltaicos. No presente apêndice para além de ser apresentada aplicação desenvolvida é dada a conhecer em detalhe todo o *hardware* desenvolvido.

A.1 Descrição Geral

O sistema de caracterização de painéis solares fotovoltaicos desenvolvido, permite a obtenção da curva de característica I-V de forma automática, sendo necessário apenas definir alguns parâmetros na aplicação desenvolvida. Para obter a curva de características é usado um método simples, o painel solar é exposto diretamente à radiação solar e aplicado aos seus terminais uma carga variável controlada pela aplicação em LabVIEW®. No fim de cada teste é possível exportar todos os dados para um ficheiro Excel (formato .xls), de modo a serem analisados posteriormente. Para perceber arquitetura geral do sistema desenvolvido é apresentada a figura A.1.

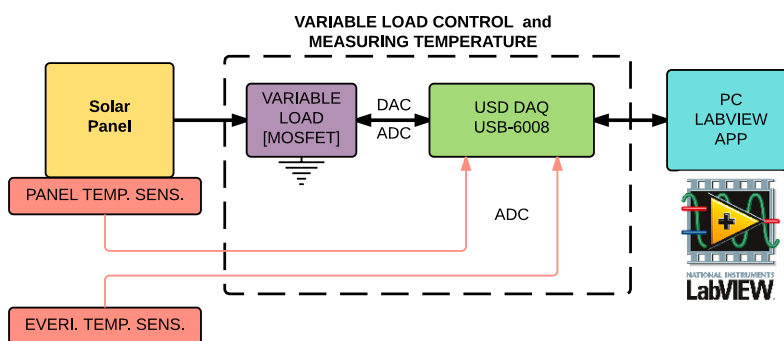


Figura A.1: Arquitetura do sistema de caracterização de painéis fotovoltaicos;

Visualizando a figura A.1 é perceptível a existência de um módulo responsável pelo controlo da carga variável e aquisição de temperaturas, sendo estas a temperatura do painel solar e a temperatura ambiente. É composto por uma placa de aquisição de dados *NI USB 6008* da *National Instruments*[®] e por uma carga variável que integra um MOSFET. No início do teste de caracterização, a carga variável apresenta uma resistência infinita aos terminais do painel e à medida que este vai avançando, a resistência vai diminuindo até simular um curto circuito no painel solar.

A.2 GUI desenvolvido em LabVIEW[®]

De forma a que a caracterização de painéis fotovoltaicos fosse perceptível foi desenvolvido um GUI (*Graphical User Interface*) em LabVIEW[®] onde é possível ver em tempo real a obtenção da curva de características I-V. Apresenta uma interface gráfica simples proporcionando uma fácil alteração de parâmetros por parte do utilizador. O GUI é apresentado na figura A.2.

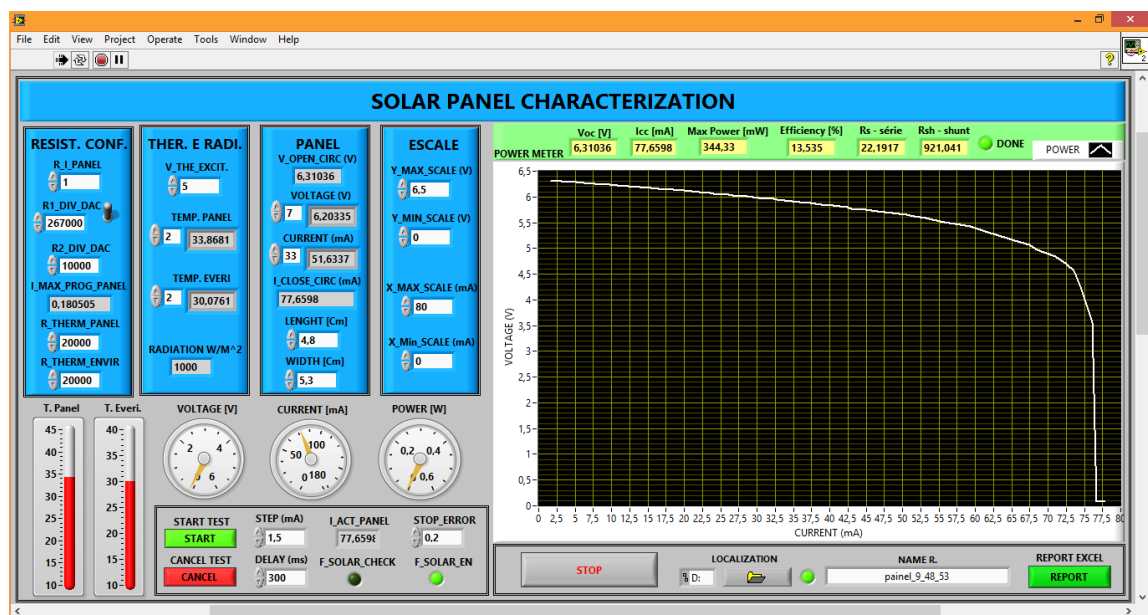


Figura A.2: GUI (*Graphical User Interface*) desenvolvido em LabVIEW[®] para sistema de caracterização de painéis fotovoltaicos;

O GUI visualizado na figura A.2 apresenta as seguintes opções/funcionalidades:

- Definição dos valores das resistências usadas na carga variável - É possível alterar os valores relativos ao *rshunt* e às resistências que compõem o divisor de tensão da carga variável, permitindo duas escalas de correntes máximas possíveis.
- Alteração do valor da tensão de excitação dos termístores - Permite que sejam excitados com diferentes valores de tensão aplicados;

- Definição do tamanho do painel solar - Dados são necessários para o cálculo da eficiência do painel;
- Seleção da localização do ficheiro a exportar - Permite escolher a localização e nome dos ficheiros Excel exportados no final de cada teste;
- Definição de parâmetros relativos à caracterização - É possível definir qual o *step* em miliamperes e qual o tempo em milissegundos entre *steps* durante a caracterização, esta pára automaticamente quando não houver evolução da corrente durante três iterações seguidas.

No final de cada teste são apresentados os resultados na parte superior do gráfico visível na figura A.2, sendo estes:

- Tensão em circuito aberto - V_{OC} [V];
- Corrente de curto circuito - I_{CC} [mA];
- Potência Máxima - $MaxPower$ [mW];
- Eficiência - $Efficiency$ [%];
- Resistência série equivalente - $R_s - serie$ [Ohm];
- Resistência paralelo equivalente - $R_{sh} - shunt$ [Ohm];

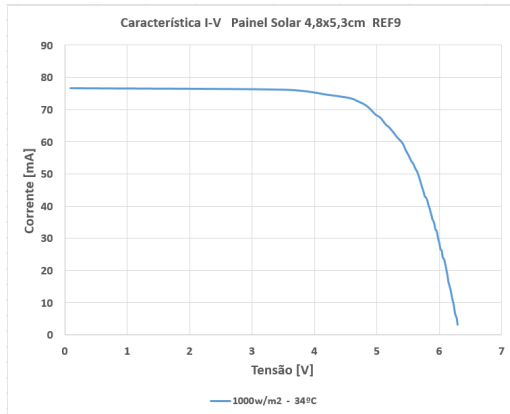
A.3 Testes experimentais

Para o desenvolvimento do robô foram adquiridos alguns painéis compostos por células monocristalinas. Os testes foram efetuados expondo os painéis à radiação solar num dia de sol, sem nuvens, sensivelmente ao meio dia, onde se estima que a radiação solar seja aproximadamente $1000W/m^2$. São apresentados nas figuras A.3, A.4 e na tabela A.1 resultados relativos ao teste de dois painéis fotovoltaicos diferentes.

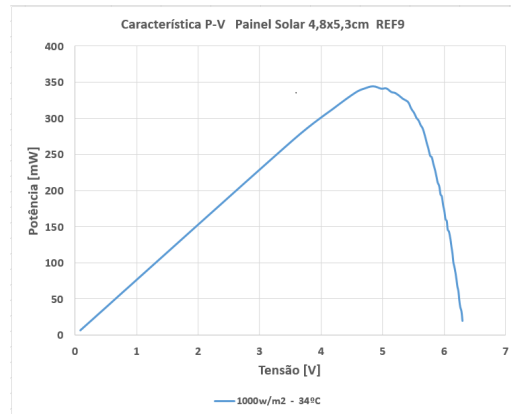
Tabela A.1: Resultados obtidos na caracterização dos dois modelos de painéis fotovoltaicos;

Painel	Parâmetros							
	Voc [V]	Icc [mA]	Pot. Máx [mW]	Vmax_pw [V]	Imax_pw [mA]	Rs [Ohm]	Rsh [Ohm]	Eficiênc. [%]
4.8x5.3cm REF9	6.31	77.6	344.3	4.84	71.03	20.7	736.7	13.5
4.5x5.5cm REF8	5.74	73.57	300.7	4.42	67.96	19.4	787.9	12.2

Os valores de Rsh são valores estimados pela equação descrita em 2.6, no entanto a resistência pode ser medida com um ohmímetro inversamente ligado aos terminais do painel solar.

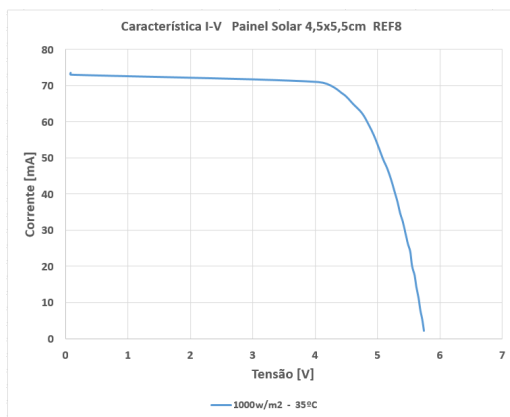


(a) Curva característica I-V do painel fotovoltaico 4.8x5.3cm REF9;

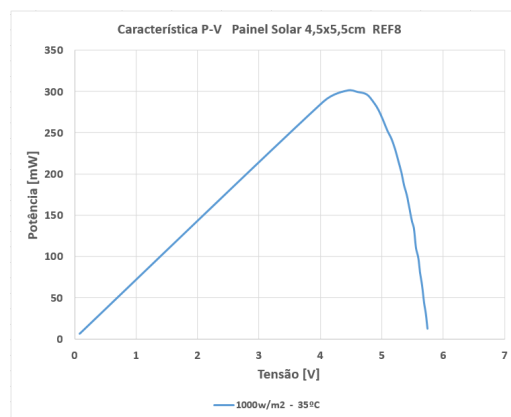


(b) Curva característica P-V do painel fotovoltaico 4.8x5.3cm REF9;

Figura A.3: Curvas de característica do painel fotovoltaico 4.8x5.3cm REF9, com uma radiação solar de aproximadamente $1000W/m^2$;



(a) Curva característica I-V do painel fotovoltaico 4.5x5.5cm REF8;



(b) Curva característica P-V do painel fotovoltaico 4.5x5.5cm REF8;

Figura A.4: Curvas de característica do painel fotovoltaico 4.5x5.5cm REF8, com uma radiação solar de aproximadamente $1000W/m^2$;

Fazendo uma avaliação dos resultados é possível verificar que a forma das curvas de características I-V e P-V é idêntica às existentes na literatura, o que prova que os resultados são coerentes. Relativamente ao rendimento dos painéis, apresentam um resultado satisfatório, é importante salientar que os painéis fotovoltaicos são de baixo custo. Os valores encontrados para as resistências R_s e R_{sh} são estimativas dos valores reais, pois seria necessário efetuar várias iterações com várias radiações diferentes a incidir no painel para se obter um valor mais próximo do valor real. O painel que apresenta melhores resultados é o modelo 4.8x5.3cm REF9, solução indicada para aplicar no robô desenvolvido.

A.3.1 Ficheiro Excel exportado

No fim de cada caracterização é possível gerar um ficheiro em Excel (formato .xls). A tabela A.2 apresenta o exemplo de um ficheiro exportado, onde são visíveis os dados que o compõem para uma posterior análise.

Tabela A.2: Ficheiro exportado da aplicação em LabVIEW[®] resultante da caracterização de um painel fotovoltaico;

Voc[V] : 5,73	Icc[mA] : 73,5	MAX PW[mW] : 300,7	LENGHT [Cm]: 4,5	WIDTH [Cm]: 5,5	EFFIC. [%]: 12,2	RS [R]: 19,4
RSH [R]: 787,9	22/07/2015	12:00				
VOLT (V)	CURR (mA)	POWER (mW)	ITERATION	T. PANEL (°C)	T. EVERI (°C)	RAD (W/m ²)
5,7397	2,13	12,225561	0	35,38	29,63	1000
5,7142	5,2	29,71384	1	34,37	29,47	1000
5,6836	7,75	44,0479	2	34,37	29,52	1000
5,653	11,32	63,99196	3	34,43	29,63	1000
5,6174	14,38	80,778212	4	34,54	29,69	1000
5,5919	17,44	97,522736	5	34,54	29,74	1000
5,5511	19,99	110,966489	6	34,65	29,86	1000
5,5206	24,08	132,936048	7	34,71	29,97	1000
5,4849	26,12	143,265588	8	34,71	30,02	1000
5,4441	29,18	158,858838	9	34,77	30,08	1000
5,4034	32,24	174,205616	10	34,82	30,08	1000
5,3575	34,79	186,387425	11	34,94	30,13	1000
5,3167	37,86	201,290262	12	34,94	30,19	1000
5,2658	40,92	215,476536	13	34,99	30,24	1000
5,2148	43,98	229,346904	14	34,99	30,3	1000
5,1537	47,04	242,430048	15	35,05	30,19	1000
5,0875	49,59	252,289125	16	35,1	30,3	1000
5,0212	52,65	264,36618	17	35,16	30,3	1000
4,9397	56,23	277,759331	18	35,27	30,3	1000
4,8531	59,29	287,740299	19	35,27	30,3	1000
4,7512	62,35	296,23732	20	35,33	30,35	1000
4,6085	64,9	299,09165	21	35,33	30,3	1000
4,425	67,96	300,723	22	35,38	30,3	1000
4,048	71,03	287,52944	23	35,33	30,41	1000
0,0838	73,07	6,123266	24	35,38	30,41	1000
0,0838	73,58	6,166004	25	35,44	30,35	1000

A.4 Hardware

Na presente secção é apresentado o *hardware* desenvolvido para o sistema de caracterização de painéis fotovoltaicos. Inicialmente é dada a conhecer a carga variável e posteriormente a topologia usada para a medição de temperaturas.

A.4.1 Carga variável

A carga variável é basicamente uma resistência de valor controlável, para perceber o funcionamento desta é apresentada a figura A.5 que contém o circuito utilizado.

O divisor de tensão tem a função de diminuir a amplitude da tensão proveniente da DAC de modo a ter o máxima resolução na escala de corrente que se pretende medir. A montagem do amplificador operacional, é uma montagem comparadora, analisa o sinal da entrada positiva e modula a sua saída, de modo a que as amplitudes de tensão nas entradas fiquem iguais. Sabemos à partida que a corrente que flui no MOSFET é igual ao valor da tensão que se encontra na entrada positiva do amplificador, visto que a resistência de potência (*rshunt*)

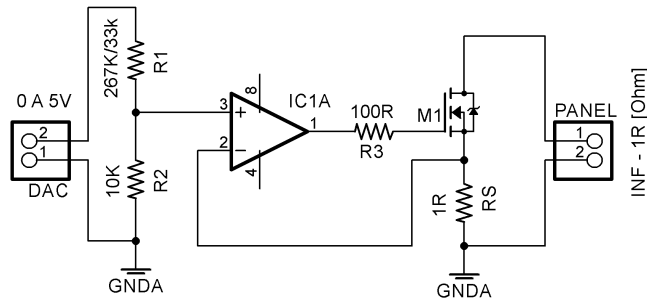
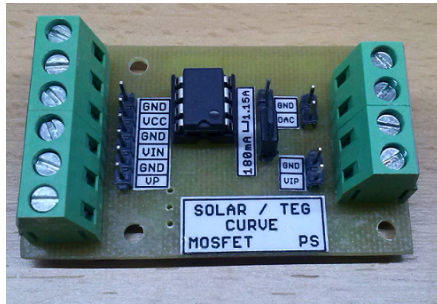


Figura A.5: Circuito da carga variável;

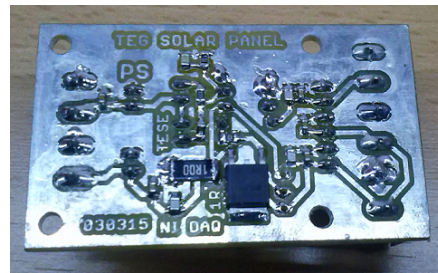
tem o valor de 1 Ohm. A equação A.1 relaciona o valor do DAC com o valor da corrente que flui através do MOSFET.

$$V_{DAC} = \frac{I \cdot RS(R2 + R1)}{R2} \quad (A.1)$$

Através da seleção da resistência R1 é possível definir duas escalas de correntes máximas que podem fluir no MOSFET. Se for selecionado o valor de 267KOhm a corrente máxima é de 180mA, caso seja selecionado o valor de 33KOhm a corrente máxima é de 1.16A. A figura A.6 apresenta a PCB desenvolvida.



(a) PCB da carga variável *top*;



(b) PCB da carga variável *bottom*;

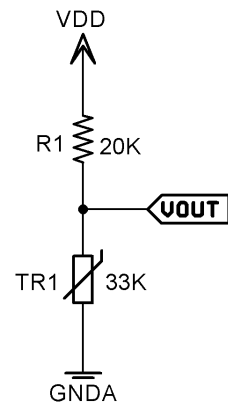
Figura A.6: PCB desenvolvida para carga variável;

A.4.2 Medição de temperatura

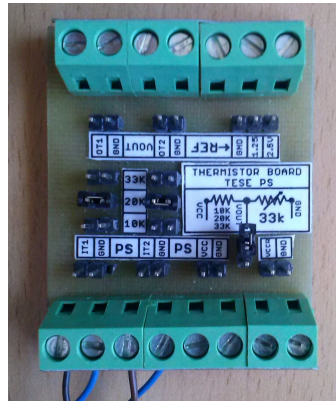
Os sensores usados para a medição de temperatura foram termístores *Negative Temperature Coefficient* (NTC), este tipo de solução tem um custo reduzido e apresentam uma boa sensibilidade a variações de temperatura. No entanto é necessário um circuito de excitação de forma a obter posteriormente a tensão aos seus terminais. O circuito usado e a PCB desenvolvida são visíveis na figura A.7.

Analisando o circuito pode-se obter a equação A.2 que relaciona o V_{OUT} com o valor da resistência do termístor R_{TR1} .

$$R_{TR1} = \frac{R1 \cdot V_{OUT}}{V_{DD} - V_{OUT}} \quad (A.2)$$



(a) Circuito de excitação usado;



(b) PCB desenvolvida para medição com termístores;

Figura A.7: Circuito de excitação e PCB desenvolvida para a medição de temperaturas com termístores;

A PCB desenvolvida permite a utilização de dois termístores em simultâneo, sendo possível ainda o ajuste da resistência R1 visível na figura A.7 (a), para o caso da utilização de sensores com outros valores de resistência. A placa disponibiliza também dois valores de tensão de referência (1.25V e 2.5V) tornando-a versátil em aplicações deste tipo. Depois de concluída e de efetuados alguns testes de leituras de temperatura, a próxima etapa foi a calibração dos termístores de forma a minimizar o erro na medição, para tal foi utilizada uma resistência PT100 calibrada, juntamente com uma placa de aquisição de dados na *National Instruments*[®] NI 9217 específica para ler este tipo de sensores. A figura A.8 apresenta os componentes utilizados no processo de calibração dos termístores.

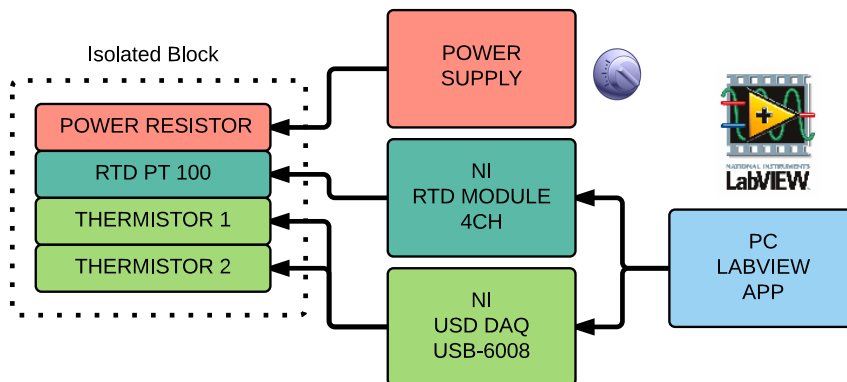
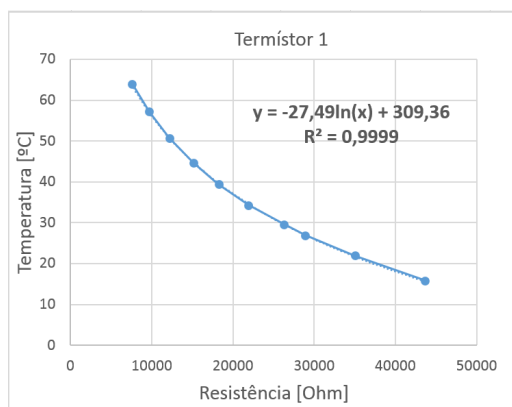


Figura A.8: Componentes usados no processo de calibração dos termístores;

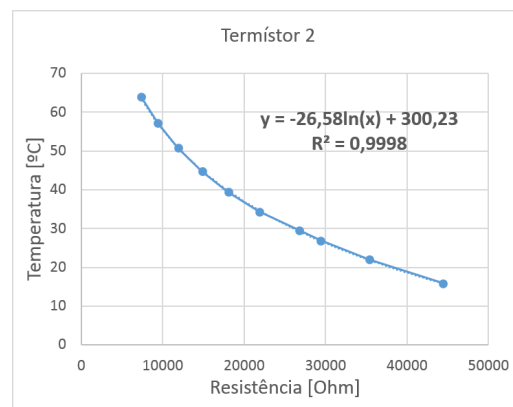
De forma a uniformizar a temperatura durante o processo de calibração, os componentes presentes no bloco da figura A.8 foram fisicamente encostados uns aos outros e inseridos num invólucro fechado de modo a conservar a temperatura produzida pela resistência de potência. Para a calibração dos termístores foram efetuados os seguintes passos:

1. Ajuste manual da fonte de alimentação fornecendo uma potência constante à resistência de modo a que esta aquecesse;
2. Estabilização da temperatura dissipada pela resistência de potência;
3. Registo de valores de temperatura da resistência PT100 e dos valores da resistência atual dos termístores;

Os passos acima descritos devem ser repetidos sendo incrementada a potência da fonte de alimentação de forma a registar valores para várias temperaturas de estabilização. Os resultados obtidos para cada termístor são apresentados na figura A.9.



(a) Curva de calibração obtida para o termístor 1;



(b) Curva de calibração obtida para o termístor 2;

Figura A.9: Resultados obtidos na calibração dos termístores a partir da utilização de uma resistência PT100 calibrada;

Depois de conhecidas as expressões que relacionam a resistência do termístor com a temperatura, facilmente é implementada uma rotina de leitura de sinais analógicos, que a partir do circuito de excitação se conhece a resistência do termístor e calculada posteriormente a temperatura.

A.4.3 Montagem do *hardware*

A figura A.10 apresenta a montagem do hardware utilizado durante a fase de caracterização dos painéis fotovoltaicos. O sistema apresenta uma boa robustez tanto a nível de hardware como a nível de software, não existindo falhas nem a presença de perturbações durante os testes.

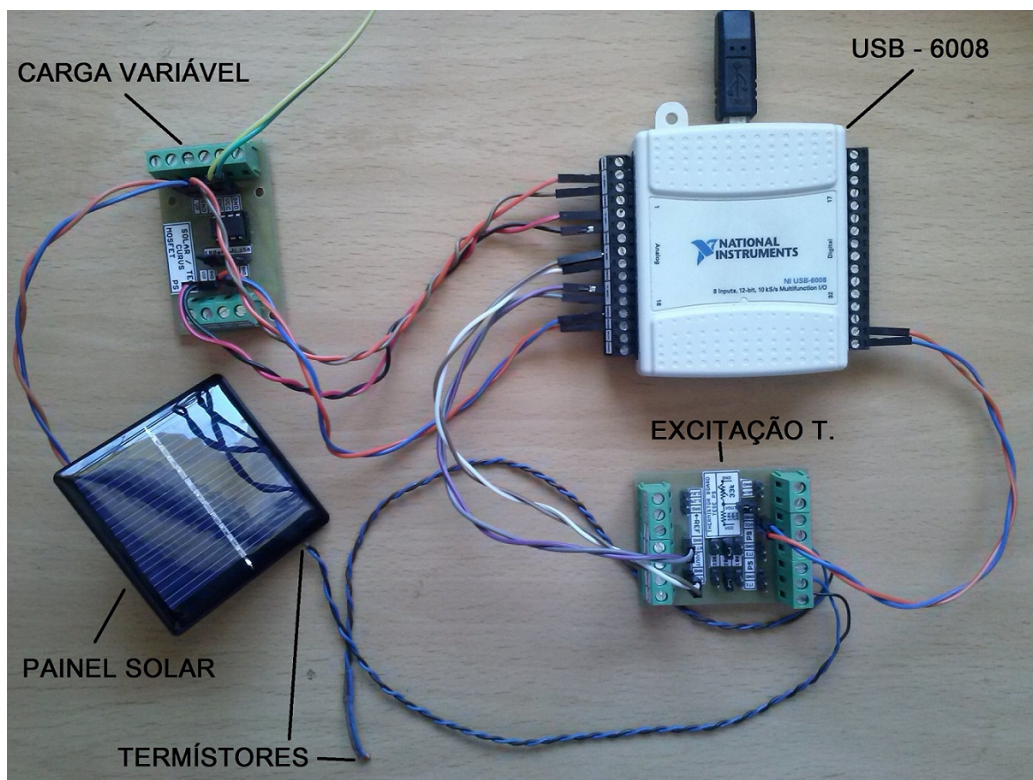


Figura A.10: Montagem do *hardware* necessário para a caracterização de módulos fotovoltaicos;

Apêndice B

Caracterização de TEG

Numa fase inicial do desenvolvimento do robô um dos objetivos relativos ao módulo de *energy harvesting* passava pela utilização de um TEG para gerar energia elétrica a partir de diferenças de temperatura. Para tal, era necessário caracterizar os módulos TEG adquiridos, surgiu então a ideia de desenvolver uma aplicação em LabVIEW® e utilizar parte do *hardware* já desenvolvido para a caracterização dos painéis fotovoltaicos, de modo a obter a curva de características I-V do TEG. No presente é exibida a aplicação desenvolvida e a montagem do *hardware* utilizado.

B.1 Descrição Geral

O sistema de caracterização de TEG desenvolvido permite a obtenção da curva de característica I-V de forma automática, sendo necessário apenas definir alguns parâmetros na aplicação desenvolvida. No fim de cada teste é possível exportar todos os dados para um ficheiro Excel (formato .xls), de modo a serem analisados posteriormente. Para perceber a arquitetura geral do sistema desenvolvido é apresentada a figura B.1.

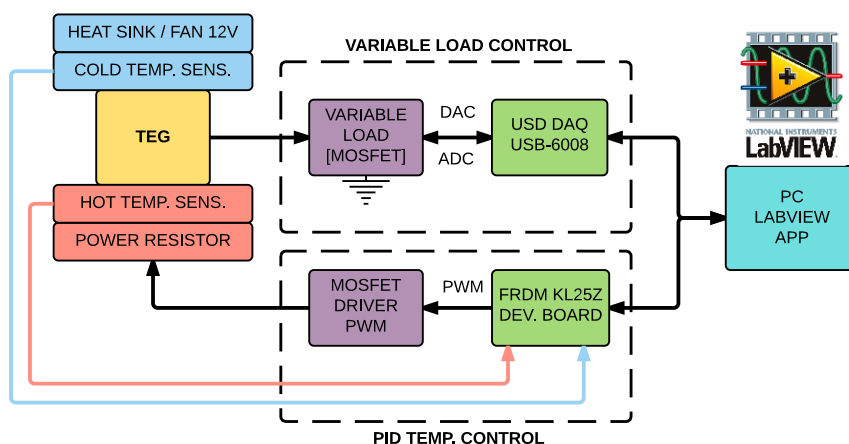


Figura B.1: Arquitetura do sistema de caracterização de TEG;

Visualizando a figura B.1 é perceptível a existência de dois módulos, o módulo da carga variável e o módulo do controlo de temperatura. O módulo da carga variável é composto por uma placa de aquisição de dados *NI USB 6008* da *National Instruments*[®] e por uma carga variável que integra um MOSFET. Este módulo é responsável pelo controlo da resistência variável e pela leitura de tensão e corrente do TEG. A aplicação em LabVIEW[®] controla a resistência do MOSFET da carga variável recorrendo à DAC da placa de dados, que varia de 0-5V, a leitura da tensão e corrente é feita através dos ADCs. Para que a caracterização tenha o máximo de rigor é necessário que a temperatura entre faces do TEG seja constante, para tal foi projetado um controlador PID, que através do conhecimento da temperatura de cada face do TEG, atua com uma saída em PWM nas resistências de potência colocadas na face quente do TEG. De forma a dissipar o calor na face fria do TEG foi colocado um dissipador de alumínio juntamente com um ventilador.

B.2 GUI desenvolvido em LabVIEW[®]

De forma a que a caracterização do TEG fosse perceptível foi desenvolvido um GUI (*Graphical User Interface*) em LabVIEW[®] (figura B.2), onde é possível ver em tempo real a curva de características I-V a ser obtida. Apresenta uma interface gráfica simples sendo fácil a alteração de parâmetros por parte do utilizador.

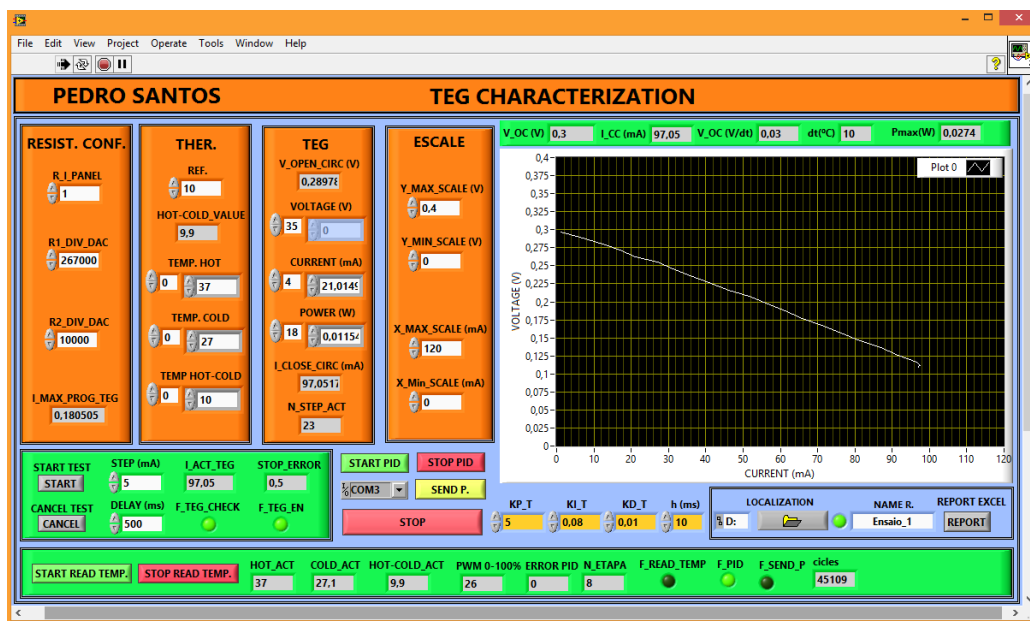


Figura B.2: GUI (*Graphical User Interface*) desenvolvido em LabVIEW[®] para sistema de caracterização de TEG;

O GUI visualizado na figura B.2 apresenta as seguintes opções/funcionalidades:

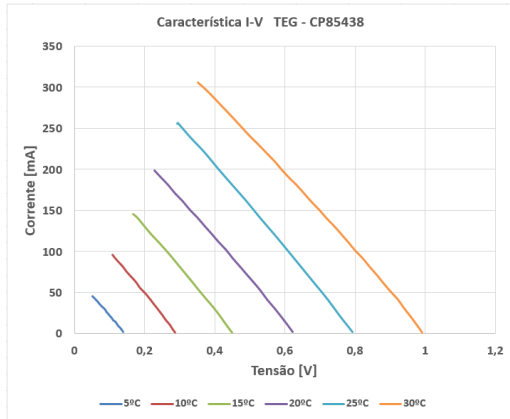
- Definição dos valores das resistências usadas na carga variável - É possível alterar os valores relativos ao *rshunt* e às resistências que compõem o divisor de tensão da carga variável, permitindo duas escalas de correntes máximas possíveis;
- Definição do valor de referência de temperatura entre faces do TEG - É possível alterar o valor de referência do controlador PID, sendo constantemente enviado para o microcontrolador da placa FRDM KL25Z;
- Alteração dos ganhos do controlador PID e envio para o microcontrolador - De forma a alterar a resposta do controlador é possível alterar os ganhos do mesmo e envia-los de imediato para o microcontrolador;
- Seleção da localização do ficheiro a exportar - Permite escolher a localização e nome dos ficheiros excel exportados no final de cada teste;
- Leitura de temperaturas no TEG - Esta opção permite a constante leitura de temperatura nas faces do TEG de modo a afinar o melhor possível os ganhos do controlador.
- Definição de parâmetros relativos à caracterização - É possível definir qual o *step* em miliamperes e qual o tempo em milissegundos entre *steps* durante a caracterização, esta pára automaticamente quando não houver evolução da corrente durante três iterações seguidas.

B.3 Testes experimentais

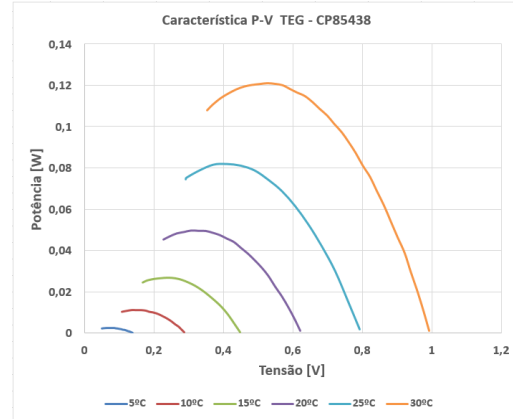
Para a realização de testes relativos ao uso de TEG foram usados dois modelos de TEG distintos:

- Modelo CP85438 - Potência máxima de 75W; Tensão máxima de 15.4V; Tamanho te 40x40x3.8mm;
- Modelo TEC1-12706 - Potência máxima de 61.4W; Tensão máxima de 16V; Tamanho te 40x40x3.8mm;

Foram efetuados testes para diferentes temperatura entre faces dos geradores termoeletricos, 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C e 30°C. Os resultados obtidos na caracterização encontram-se nas figuras B.3 e B.4, apresentam a curva de características que relaciona a corrente (mA) e potência (W) com a tensão (V).

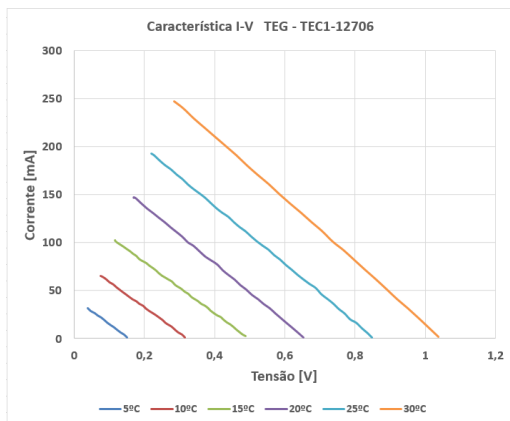


(a) Curva característica I-V do modelo CP85438;

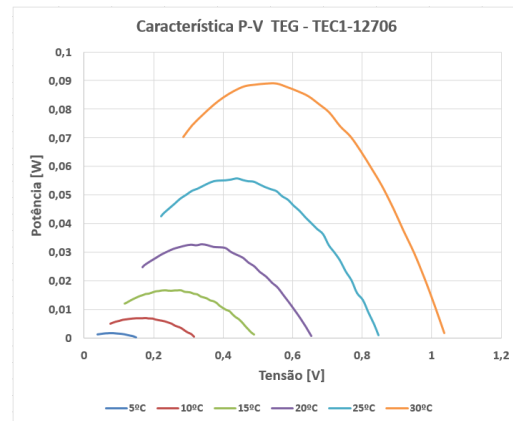


(b) Curva característica P-V do modelo CP85438;

Figura B.3: Curvas de característica do modelo TEG - CP85438 para várias diferenças de temperatura aplicadas;



(a) Curva característica I-V do modelo TEC1-12706;



(b) Curva característica P-V do modelo TEC1-12706;

Figura B.4: Curvas de característica do modelo TEG - TEC1-12706 para várias diferenças de temperatura aplicadas;

Analisando as figuras B.3 e B.4 e relacionando os resultados obtidos com as características dos módulos TEG, chegamos à conclusão que fazem sentido, o modelo TEG CP85438 apresenta maior potência entregue à carga relativamente ao modelo TEG TEC1-12706, embora o TEC1-12706 apresente uma tensão maior em circuito aberto. A forma das curvas características são semelhantes às da literatura o que prova que os resultados obtidos são coesos. A explicação do facto das curvas de característica I-V e P-V não estarem completas, isto é, o valor da tensão não chegar a zero, deve-se ao valor da resistência *rshunt* ser de 10 Ω , o que leva a que tenha uma queda de tensão de $V = RI$, impedindo o curto circuito ideal aos terminais do TEG. Relativamente às diferenças de

temperatura aplicadas e à potência máxima obtida, pode concluir-se que para diferenças de temperatura baixas (5°C, 10°C) a potência fornecida é baixa, não sendo viável a utilização deste tipo de solução no robô. Para aumentar a diferença de temperatura entre faces seria necessário a utilização de uma chapa metálica que absorvesse radiação solar e um dissipador de alumínio, o que iria aumentar o volume do robô não compensando a relação volume,peso/potência fornecida na viabilidade do sistema.

B.3.1 Ficheiro Excel exportado

No fim de cada caracterização é possível gerar um ficheiro em Excel (formato .xls). A tabela B.1 apresenta o exemplo de um ficheiro exportado, sendo visíveis os dados que o compõem para uma posterior análise.

Tabela B.1: Ficheiro exportado da aplicação em LabVIEW® resultante da caracterização do TEG;

(Voc/dt)0,030	KP-5,000	KI-0,080	KD-0,010	h-10	21/07/2015	12:52
VOL (V)	CUR (V)	POWER (W)	ITER	TEMP. H(°C)	TEMP. C(°C)	TEMP. H-C (°C)
0,4487	1,11	0,0005	0	43,3	28,2	15,1
0,4309	11,32	0,0049	1	43,3	28,2	15,1
0,4141	21,53	0,0089	2	43,3	28,2	15,1
0,3957	31,73	0,0126	3	43,3	28,2	15,1
0,3774	40,92	0,0154	4	43,3	28,2	15,1
0,3575	51,12	0,0183	5	43,3	28,2	15,1
0,3392	60,82	0,0206	6	43,3	28,2	15,1
0,3198	71,03	0,0227	7	43,3	28,2	15,1
0,301	80,72	0,0243	8	43,3	28,2	15,1
0,2806	91,44	0,0257	9	43,3	28,2	15,1
0,2613	101,13	0,0264	10	43,3	28,2	15,1
0,2399	111,34	0,0267	11	43,3	28,2	15,1
0,2195	120,53	0,0265	12	43,3	28,2	15,1
0,2006	130,22	0,0261	13	43,3	28,2	15,1
0,1798	140,94	0,0253	14	43,2	28,2	15
0,1675	145,53	0,0244	15	43,2	28,3	14,9

B.3.2 Montagem do *hardware*

A figura B.5 apresenta a montagem do *hardware* utilizado durante a fase testes da caracterização dos módulos TEG. O sistema apresenta uma boa robustez tanto a nível de *hardware*, como a nível de *software*, não existindo falhas nem a presença de perturbações durante os testes.

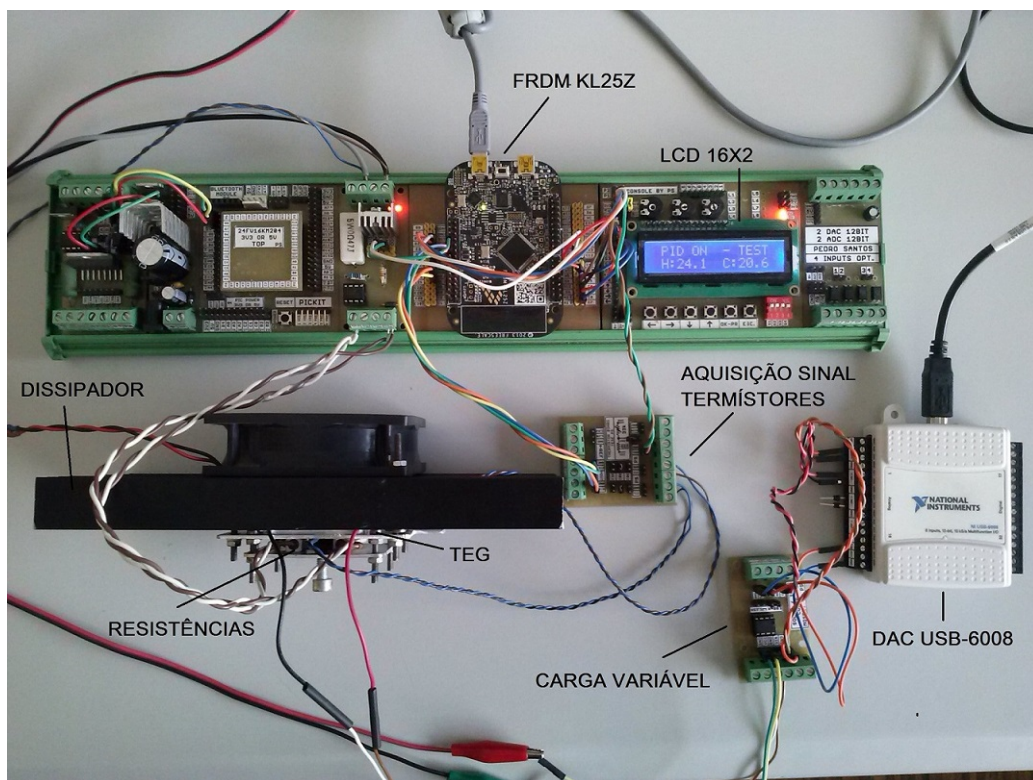


Figura B.5: Montagem do *hardware* necessário para a caracterização de módulos TEG;

Apêndice C

Analizador de eficiências de conversores DC/DC

Quando se opta pela escolha de um conversor DC/DC é necessário ter em conta alguns parâmetros, um deles é a sua eficiência nas condições a que vai operar. Por vezes, a folha de dados do circuito integrado não apresenta as curvas de eficiência necessárias para a aplicação em específico, para tal foi desenvolvido um analisador de eficiências, além de medir eficiências de conversores DC/DC, tem outras funcionalidades, como por exemplo registo de curvas de carga de baterias ou supercondensadores, ou simplesmente a utilização como voltímetro ou amperímetro num dado circuito. No presente apêndice é exibida a aplicação em LabVIEW[®] desenvolvida e todo o *hardware* utilizado. É importante salientar que o medidor de potências é de baixo custo, isto significa que apesar de ser calibrado os resultados obtidos têm um grau de certeza moderado, ou seja, não podem ser exigidas medições com um grau de certeza aproximado das marcas de topo (Fluke[®], HP[®], e entre outras) existentes no mercado.

C.1 Descrição Geral

O analisador de eficiência de conversores DC/DC permite a obtenção das curvas de eficiência para diferentes valores de carga e tensão de entrada. É composto por dois medidores de potência e uma carga variável. A aplicação desenvolvida permite que sejam registados os valores de forma automática num ficheiro Excel (formato .xls), de modo a serem analisados posteriormente. Para perceber a sua arquitetura é ilustrada a figura C.1;

Visualizando a figura C.1 é perceptível a existência de dois módulos, um denominado por medidor de potências e conversão DC/DC, o outro denominado por carga, que tal como o nome indica é a carga aplicada ao sistema, pode ser variável, controlada pela aplicação desenvolvida ou podem ser baterias, supercondensadores e entre outros. O medidor de potências utilizado encontra-se explicado em detalhe na secção 3.4.7.

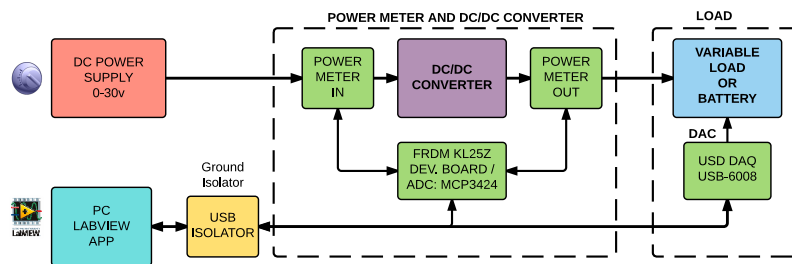


Figura C.1: Arquitetura do sistema de caracterização de eficiências de conversores DC/DC;

C.2 GUI desenvolvido em LabVIEW®

De forma a que a caracterização de conversores fosse perceptível foi desenvolvido um GUI (*Graphical User Interface*) em LabVIEW® (figura C.2), onde é possível ver em tempo real os valores e gráficos relativos às potências, tensões, correntes de entrada e saída, e ainda a eficiência do conversor. Apresenta uma interface gráfica simples sendo fácil a alteração de parâmetros por parte do utilizador.

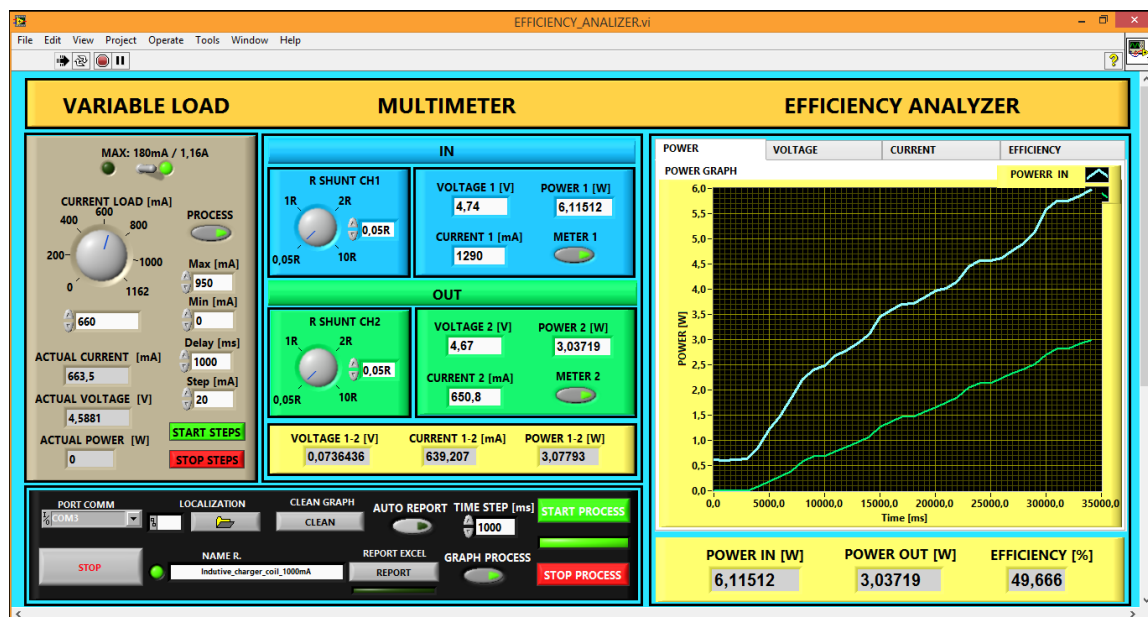


Figura C.2: GUI (*Graphical User Interface*) desenvolvido em LabVIEW® para sistema de caracterização de eficiências de conversores DC/DC;

O GUI visualizado na figura A.2 apresenta as seguintes opções/funcionalidades:

- Definição da escala de corrente da carga variável - É possível alterar a partir do *switch* o valor da escala de correntes da carga variável, de modo a ter mais precisão no seu controlo;

- Definição dos parâmetros de *steps* automáticos da carga variável - Permite que sejam ajustados os parâmetros, de modo a que a carga variável incremente *steps* de corrente de forma automática;
- Definição do valor da *rshunt* do amperímetro- Parâmetro necessário para que o cálculo da corrente seja efetuado corretamente;
- Seleção da localização do ficheiro a exportar - Permite escolher a localização e nome dos ficheiros Excel exportados durante ou no final de cada teste;
- Seleção do período de exportação de dados - O *switch* de *AUTO REPORT* permite que sejam exportados os valores de forma automática para o Excel, no entanto deve ser definido o tempo entre amostras.

É possível selecionar qual o gráfico que se deseja ver, basta selecionar no menu superior do lado direito do GUI.

C.3 Testes experimentais - Carregamento por indução

Uma das formas de carregamento do robô é por indução, para perceber qual o rendimento deste tipo de conversão foi realizado um estudo relativamente ao *kit* adquirido para o efeito (figura C.3). Durante o presente projeto o sistema de análise de eficiências de conversor DC/DC é usado inúmeras vezes, sendo mencionado durante o documento.



Figura C.3: *Kit* adquirido para testes de carregamento por indução;

Para perceber qual o esquema de montagem do sistema é apresentada a figura C.4.

O isolador USB visível na figura C.4 foi colocado porque a massa do computador usado estava a induzir erros nas medições no ADC. Para a caracterização

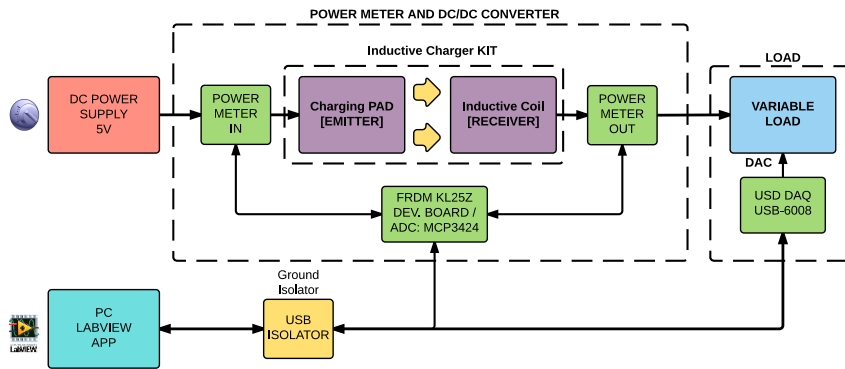
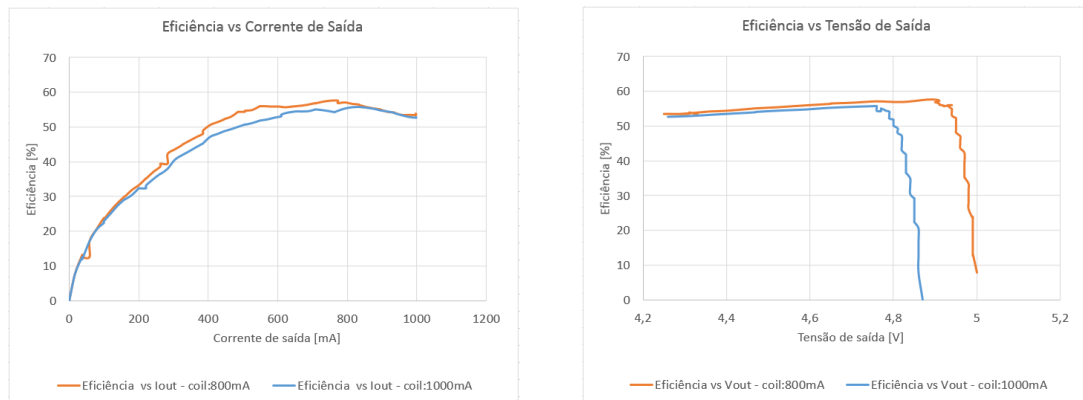


Figura C.4: Diagrama de montagem para análise de eficiência do kit de carregamento por indução adquirido;

de eficiência do sistema adquirido foram feitos testes com as duas bobinas receptoras. Os dados exportados pela aplicação em LabVIEW[®] foram analisados e os resultados encontram-se nas imagens C.5, C.6.

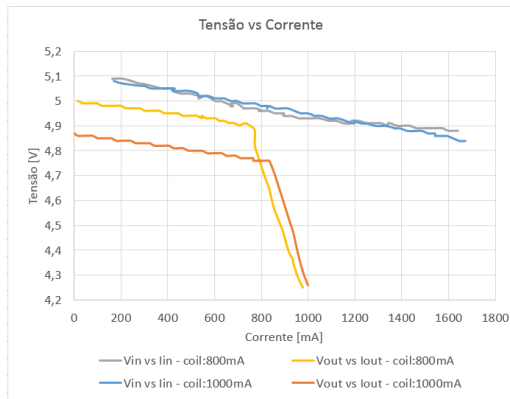


(a) Curva de eficiência vs corrente de saída; (b) Curva de eficiência vs tensão de saída;

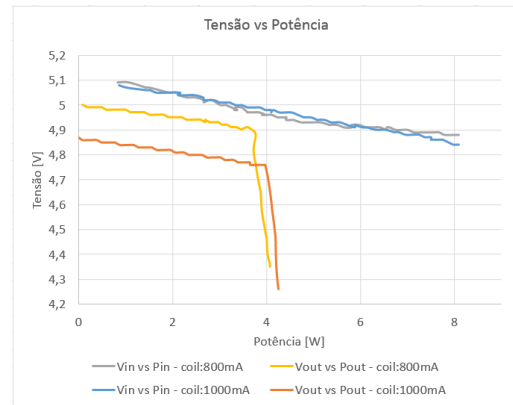
Figura C.5: Curvas de eficiência do *kit*, com bobinas de 800mA e 1000mA;

Analisando a figura C.5 verificamos que o sistema apresenta um comportamento ligeiramente diferente na utilização das duas bobinas, a bobina que apresenta melhor eficiência é o modelo de 800mA, embora a discrepância não seja exagerada relativamente ao modelo de 1000mA. No que diz respeito à eficiência global, ronda os 55% sendo necessário uma corrente de carga de pelo menos 600mA, é um resultado satisfatório pois é um processo de transferência de energia sem fios. Para correntes de carga abaixo de 300mA a eficiência decai com grande declive. De seguida são apresentadas as curvas que relacionam tensões, correntes e potências do sistema.

Fazendo uma avaliação dos resultados é possível verificar que as tensões e correntes de entrada são semelhantes. Devido à resistência dos condutores usados nos testes, é visível o declive de tensão com o aumento da corrente. Relativamente às tensões de saída, o modelo da bobina de 800mA apresenta uma amplitude da



(a) Curvas de relacionamento de tensões vs correntes;



(b) Curvas de relacionamento de tensões vs potências;

Figura C.6: Curvas de relacionamento de tensões, correntes e potências nas bobinas de 800mA e 1000mA;

tensão superior ao modelo 1000mA, no entanto a bobina que fornece uma maior potência é a de 1000mA como seria de esperar. Em suma o ponto ideal de carga utilizando este sistema é cerca de 700mA sendo preferível o uso do modelo da bobina de 800mA.

C.3.1 Ficheiro Excel exportado

Durante o processo de caracterização é possível gerar automaticamente ou manualmente pontos das medições efetuadas, sendo gerado um ficheiro em Excel (formato .xls). A tabela C.1 apresenta o exemplo de um ficheiro exportado, sendo visíveis os dados que o compõem para uma posterior análise.

C.3.2 Montagem do *hardware*

A figura C.7 apresenta a montagem do hardware utilizado durante a fase testes da caracterização do conversor. O sistema apresenta uma boa robustez tanto a nível de hardware como a nível de software, não existindo falhas nem a presença de perturbações.

Tabela C.1: Exemplo de ficheiro exportado da aplicação em LabVIEW[®] resultante da caracterização da eficiência do *kit* de carregamento por indução adquirido;

P. IN (W)	P. OUT (W)	V. IN (V)	V. OUT (V)	C. IN (mA)	C. OUT (mA)	EFF (%)	T (ms)	D (date)	H. (h)
0,6859	0	5,06	4,87	135,4	0	0	4000	24/07/2015	20:29:35
0,6856	0	5,06	4,87	135,4	0	0	5000	24/07/2015	20:29:36
0,6857	0	5,06	4,87	135,4	0	0	6000	24/07/2015	20:29:37
0,6863	0	5,06	4,87	135,5	0	0	8000	24/07/2015	20:29:39
1,1364	0,2328	5,06	4,85	224,8	48	20,5	8000	24/07/2015	20:29:40
1,8442	0,4809	5,02	4,84	367	99,4	26,1	9000	24/07/2015	20:29:41
2,3399	0,7251	5,01	4,82	467,5	150,4	31	10000	24/07/2015	20:29:42
2,7444	0,9663	4,98	4,81	551,2	201,1	35,2	11000	24/07/2015	20:29:43
3,1016	1,2069	4,96	4,79	625,7	251,9	38,9	12000	24/07/2015	20:29:44
3,4023	1,4507	4,95	4,77	687,2	303,8	42,6	13000	24/07/2015	20:29:45
3,7083	1,6882	4,93	4,76	752,6	354,7	45,5	14000	24/07/2015	20:29:46
3,9671	1,9239	4,92	4,74	806	405,5	48,5	15000	24/07/2015	20:29:47
4,2896	2,1558	4,9	4,73	875,3	455,7	50,3	16000	24/07/2015	20:29:48
4,6822	2,3936	4,88	4,72	959,1	507,5	51,1	17000	24/07/2015	20:29:49
5,023	2,63	4,87	4,7	1031,5	559,1	52,4	18000	24/07/2015	20:29:50
5,3645	2,8625	4,87	4,69	1101,8	610,1	53,4	19000	24/07/2015	20:29:51
5,7509	3,0882	4,86	4,68	1184,2	659,6	53,7	20000	24/07/2015	20:29:52
6,1245	3,3151	4,85	4,68	1262,3	709	54,1	21000	24/07/2015	20:29:53
6,5106	3,5146	4,86	4,67	1338,9	752,5	53,4	22000	24/07/2015	20:29:54
6,8741	3,7869	4,86	4,66	1415,2	813,3	55,1	23000	24/07/2015	20:29:56
7,1565	3,9433	4,85	4,56	1474,7	865,5	55,1	24000	24/07/2015	20:29:57
7,4161	3,9673	4,85	4,33	1530,5	917	53,5	25000	24/07/2015	20:29:58
7,4581	3,576	4,85	3,69	1539	969,3	47,9	26000	24/07/2015	20:29:59
2,6245	0	4,96	4,86	529,3	0	0	27000	24/07/2015	20:30:00

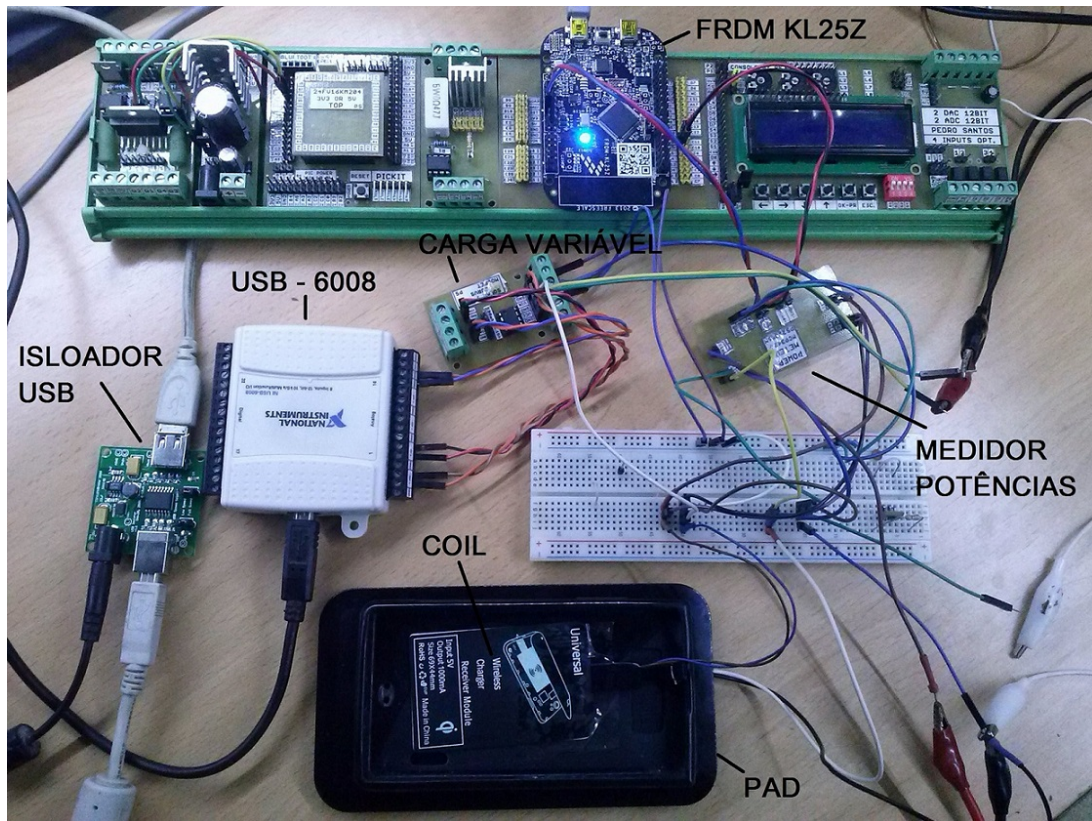
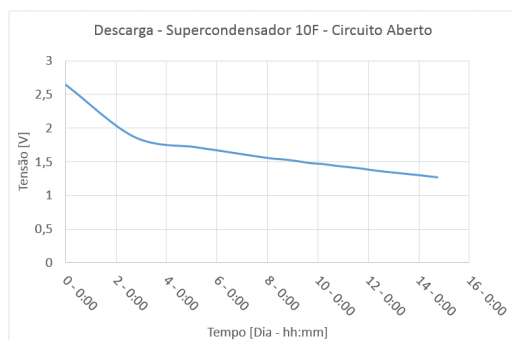


Figura C.7: Montagem do *hardware* necessário para a caracterização de eficiências de conversores DC/DC;

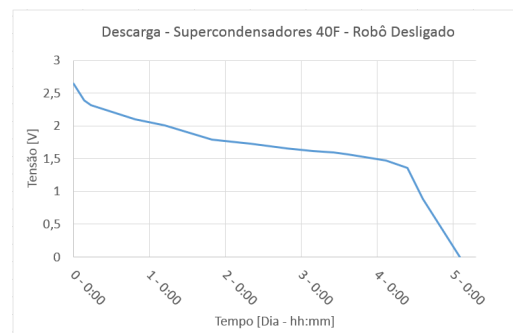
Apêndice D

Descarga Supercondensadores

D.1 Curvas de descarga dos supercondensadores



(a) Curva de descarga do supercondensador 10F em circuito aberto;



(b) Curva de descarga dos supercondensadores do robô no estado desligado;

Figura D.1: Curvas de descarga dos supercondensadores;

Apêndice E

Testes e Resultados Complementares

No presente apêndice são dados a conhecer os testes complementares realizados ao robô, quer isto dizer, que são apresentados testes e resultados não diretamente relacionados com questões de energia. O apêndice encontra-se dividido em três secções: Na primeira secção são apresentados os testes relativos ao sistema de microfones que o robô integra; Na segunda é dado a conhecer o alcance máximo da comunicação via rádio e via infravermelhos; Na terceira encontram-se dados relativos à velocidade de locomoção do robô.

E.1 Testes aos microfones

Para testar os microfones foi emitida uma onda sonora de 2kHz a um metro de distância do robô, nas direções, frontal, traseira, direita e esquerda. O passo seguinte passou pela análise dos sinais analógicos provenientes dos amplificadores operacionais e dos sinais digitais resultantes da comparação dos sinais analógicos com o DAC do microcontrolador. Os sinais foram retirados do robô através de fios soldados nas vias da PCB, existentes propositadamente para o efeito. Para perceber qual a exposição do robô perante o emissor sonoro é exibida a figura E.1.

Na figura E.1 é visível a existência dos três microfones colocados no módulo *sensor* e a respetiva legenda. O *buzzer* emissor, foi colocado de forma similar ao do robô, de modo a que os resultados sejam o mais próximos possível, simulando existência de dois robôs iguais. As cores das ondas apresentadas nos gráficos retirados do osciloscópio, dizem respeito a cada microfone respetivamente.

E.1.1 Sinais analógicos

As figuras E.2 e E.3, apresentam as imagens retiradas do osciloscópio durante os testes realizados aos sinais analógicos. É visível o desfasamento temporal entre ondas relativamente à posição do *buzzer* emissor.

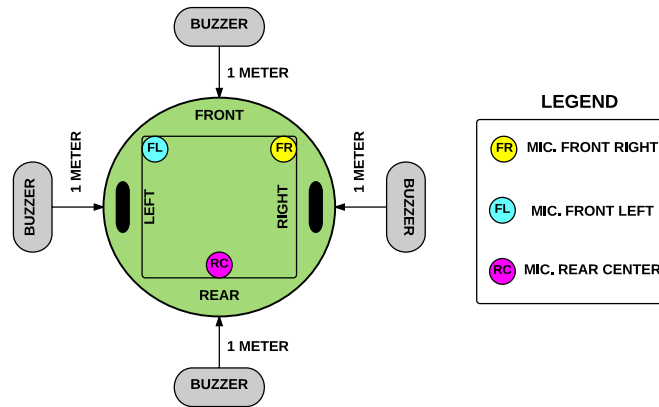
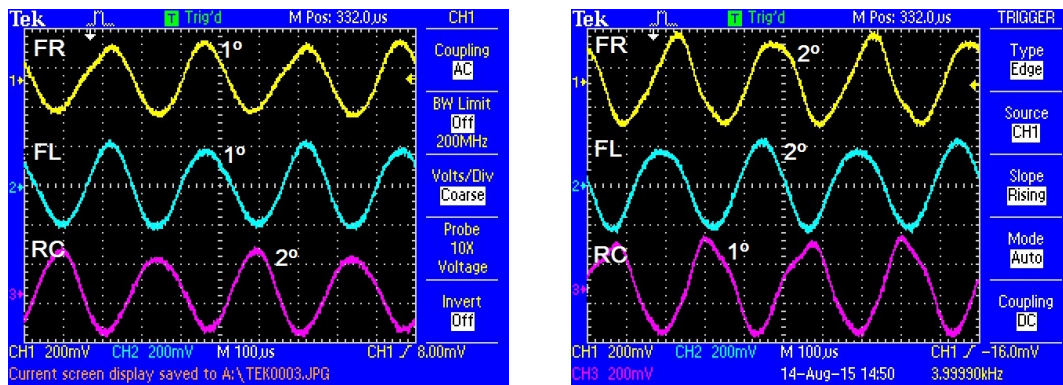


Figura E.1: Diagrama de exposição do robô perante o emissor sonoro;



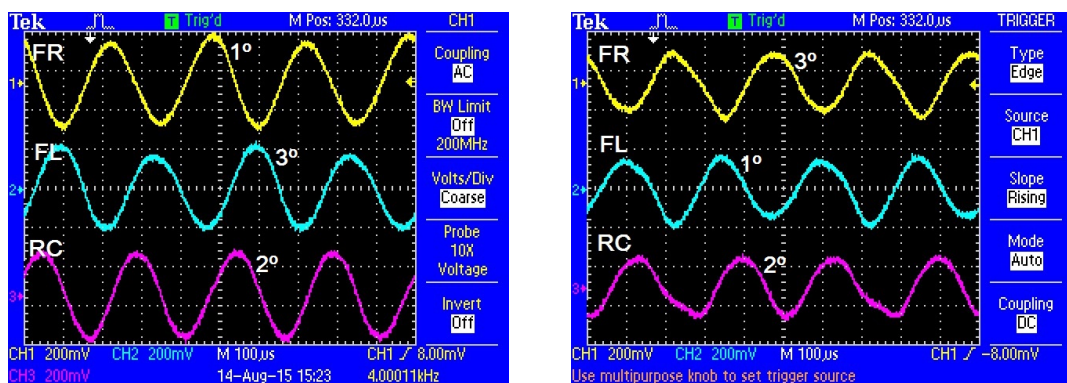
(a) Sinais analógicos - buzzer na zona frontal;

(b) Sinais analógicos - buzzer na zona traseira;

Figura E.2: Sinais analógicos com buzzer colocado à frente e atrás do robô;

Analisando a figura E.2 é perceptível que duas ondas são recebidas praticamente no mesmo instante, este acontecimento dá-se porque os dois microfones frontais estão alinhados entre si e o sinal é emitido na zona frontal do robô ou na zona traseira. Existe sim, um desfaseamento entre as ondas recebidas pelos microfones frontais (FR e FL) e microfone traseiro (RC). Quando o som é emitido na zona frontal do robô, os microfones frontais recebem em primeiro o sinal e posteriormente é recebido pelo microfone traseiro. A ordem de chegada do sinal é invertida quando é emitido na zona traseira do robô.

Nos casos em que o sinal emitido é proveniente da zona direita ou esquerda, (figura E.3) é visível o desfaseamento temporal entre as três ondas recebidas. Quando o som é emitido na zona direita E.3 (a) é primeiro recebido o sinal no microfone direito, de seguida no microfone traseiro e posteriormente no microfone esquerdo. Resultados que fazem sentido quando comparados à disposição dos microfones no módulo *sensor*. Quando o som é emitido do lado esquerdo a situação é oposta, mantendo se o sinal do microfone traseiro com a segunda



(a) Sinais analógicos - *buzzer* na zona direita;

(b) Sinais analógicos - *buzzer* na zona esquerda;

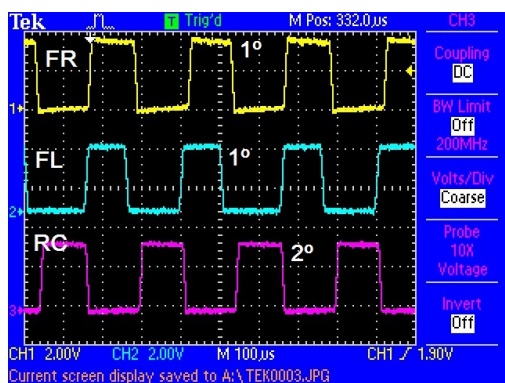
Figura E.3: Sinais analógicos com *buzzer* colocado à direita e à esquerda do robô; ordem de chegada.

O ganho atual dos amplificadores operacionais é de cem vezes, no entanto pode ser modificado alterando os valores das resistências responsáveis pela amplificação. Com o aumento do ganho é possível analisar sinais com maiores distâncias entre robôs. As entradas analógicas do microcontrolador são de dezasseis *bits* e o tempo de cada leitura é cerca de trinta e um microsegundos, efetuando a leitura com funções de alto nível. Para ler os três sinais é necessário então noventa e três microsegundos, é possível diminuir o tempo de leitura de cada amostra reduzindo o número de *bits* de resolução do ADC, porém é necessário recorrer à programação em baixo nível para o efeito, sendo uma consequência, o aumento da dificuldade da programação.

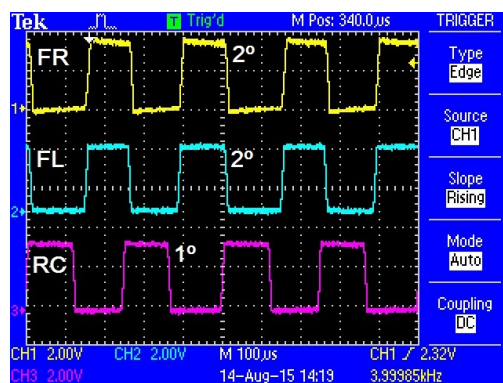
E.1.2 Sinais digitais

As figuras E.4 e E.5, apresentam as imagens retiradas do osciloscópio durante os testes realizados aos sinais digitais resultantes da comparação dos sinais analógicos com o DAC do microcontrolador. O valor da tensão de comparação proveniente do DAC é de 1.687V. É visível o desfaseamento temporal entre ondas relativamente à posição do *buzzer* emissor.

Analisando as figuras E.4 e E.5, verifica-se que os resultados são idênticos aos dos sinais analógicos, embora os sinais resultantes sejam digitais, que se encontram conectados a pinos de interrupção externa do microcontrolador. Através desta funcionalidade é possível obter resolução entre interrupções externas na ordem do microsegundo, o que permite estimar com precisão qual a orientação e distância da pose de um robô perante outro robô.

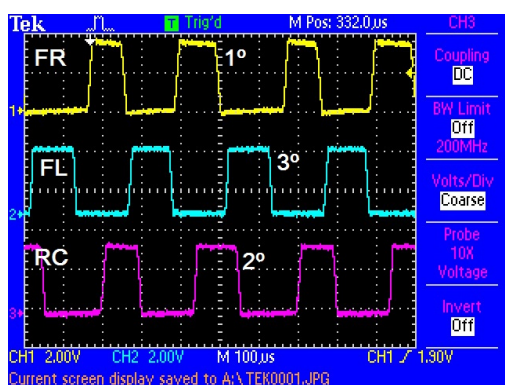


(a) Sinais digitais - *buzzer* na zona frontal;

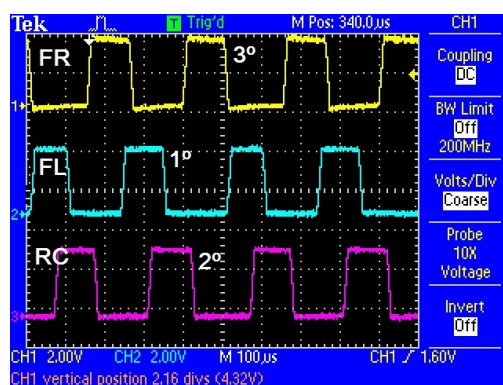


(b) Sinais digitais - *buzzer* na zona traseira;

Figura E.4: Sinais digitais com *buzzer* colocado à frente e atrás do robô;



(a) Sinais digitais - *buzzer* na zona direita;



(b) Sinais digitais - *buzzer* na zona esquerda;

Figura E.5: Sinais digitais com *buzzer* colocado à direita e à esquerda do robô;

E.2 Testes de comunicação

As principais formas de comunicação do robô são via rádio e via infravermelhos, sendo assim importante conhecer o alcance máximo sem existir perda de dados na transmissão. A comunicação via rádio oferece uma maior alcance e uniformidade do sinal no meio ambiente, ou seja pode ser usada para fazer chegar informação a todos os robôs. Por infravermelhos o alcance é menor sendo usada para comunicar com robôs vizinhos. Para a realização dos testes foi usado um robô e uma PCB desenvolvida E.6 de modo a simular outro robô.

E.2.1 Testes de comunicação via rádio

Foram efetuados testes de alcance máximo da antena nrf24l01 para diferentes valores de atenuação de potência emitida. A placa desenvolvida E.6 emitiu um sinal para o robô, que posteriormente, foi devolvido para a placa e recebido no computador. Para uma melhor percepção dos resultados é apresentada a tabela

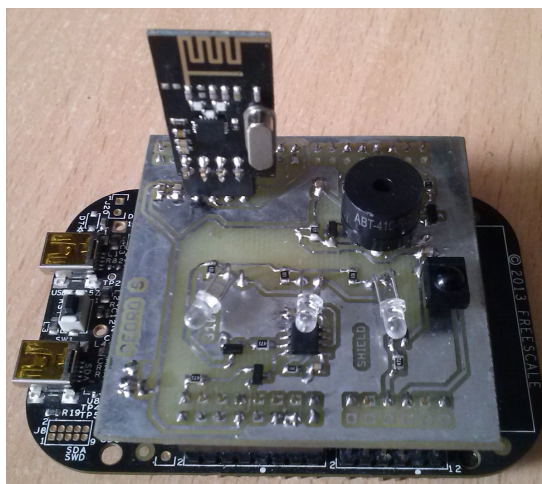


Figura E.6: Placa de circuito impresso desenvolvida para simulação de segundo robô;

E.1.

Tabela E.1: Resultados de alcance máximo de comunicação via rádio relativamente à potência de sinal emitida;

Atenuação	Alacnce [m]	Consumo TX [mA]
0 dB	19,5	11,3
6 dB	14	9
12 dB	11,5	7,5
18 dB	8	7

Analisando a tabela verifica-se que na maioria dos casos a utilização da máxima atenuação deve ser suficiente, pois existe um raio de alcance com cerca de oito metros. O consumo em miliamperes foi retirado da folha de dados do circuito integrado que compõem a antena, verifica-se que a corrente absorvida é praticamente igual com as atenuações de sinal de 18dB e 12dB.

E.2.2 Testes de comunicação via infravermelhos

O módulo de comunicação por infravermelhos integra sete *LEDs* em circulo e um recetor central, para compreender como estão expostos é exibida a figura E.7.

O alcance máximo sem perda de dados é de 2 metros e o consumo ronda os 28mA quando os *LEDs* e o circuito oscilador se encontram ligados. A alimentação do oscilador é controlada por um MOSFET sendo necessário ligar o oscilador momentos antes de comunicar. A utilização da interrupção da porta Uart permite a receção de dados a qualquer momento.

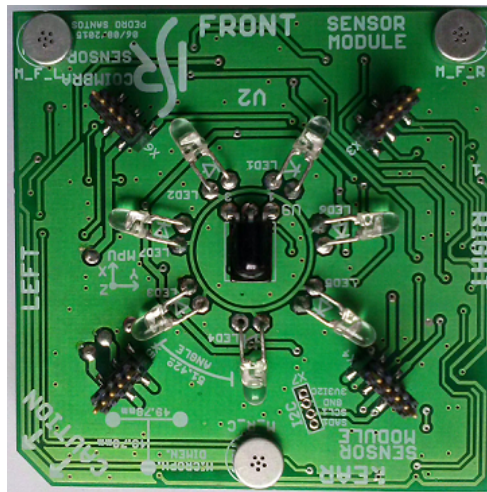


Figura E.7: Exposição dos *LEDs* e recetor de infravermelhos no módulo *sensor*;

E.3 Testes de Velocidades de Locomoção

A presente secção dá a conhecer os resultados obtidos com a aplicação de vários valores de tensão média aos motores do robô. Os motores são DC com escovas e os testes foram efetuados com a aplicação de PWM a uma frequência de 2kHz. O diâmetro das rodas usadas é de 16mm, informação necessária para o cálculo da velocidade. Para melhor interpretação dos resultados é exibida a tabela E.2 e o gráfico E.8.

Tabela E.2: Resultados obtidos de velocidade na locomoção do robô;

Duty cycle [%]	Tensão média [V]	RPM	RPS	Vel [m/s]
35	1,155	15,43	0,257	0,026
50	1,65	24,06	0,401	0,040
100	3,3	53,59	0,893	0,090

Analisando a tabela E.2 pode concluir-se que a velocidade linear máxima do robô é de 9cm/s e a mínima é de 2.6cm/s . O valor de *duty cycle* não deve ser menor do que 35% pois é plausível que os motores não consigam responder, resultado da baixa tensão média aplicada.

Como seria de esperar a relação do valor da velocidade e de *duty cycle* é linear, sendo traduzido pela equação E.1. Em que y representa a velocidade em m/s e x o valor de *duty cycle* em %.

$$y = 0.001x - 0.0088 \quad (\text{E.1})$$

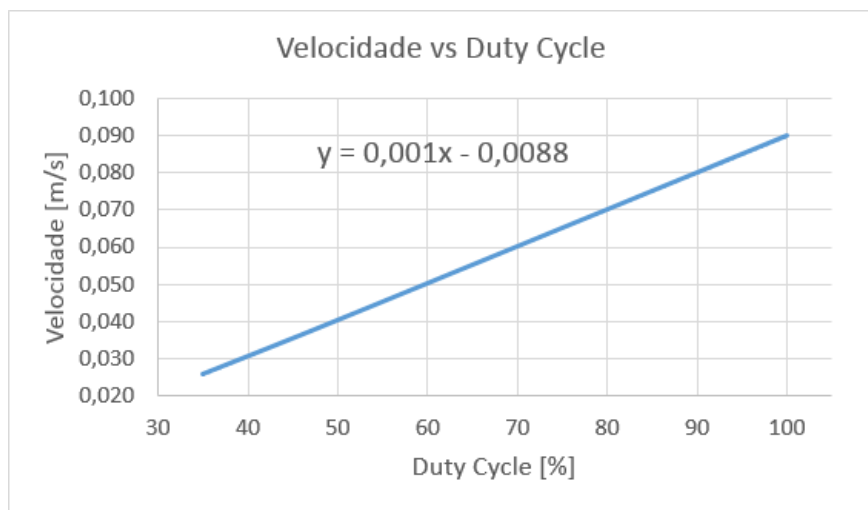


Figura E.8: Relação de velocidade linear vs *duty cycle* aplicado aos motores;

Apêndice F

Calibração do Medidor de Potências

No presente apêndice é dado a conhecer o método de calibração usado para os medidores de potências incorporados no robô e os resultados obtidos sob forma de tabela. O medidor de potências desenvolvido é composto por um ADC e por resistências que embora sejam de precisão (0.1% e 0.5%) têm sempre um erro associado. A calibração visa compensar o erro de modo a que medição seja o mais próxima da ideal.

F.1 Alterações *hardware*

Para implementar o método de calibração adotado é necessário isolar o ADC do restante circuito da PCB, para tal foram soldados fios auxiliares nos *solder jumpers* existentes nos módulos *harvester* como mostra a figura F.1.

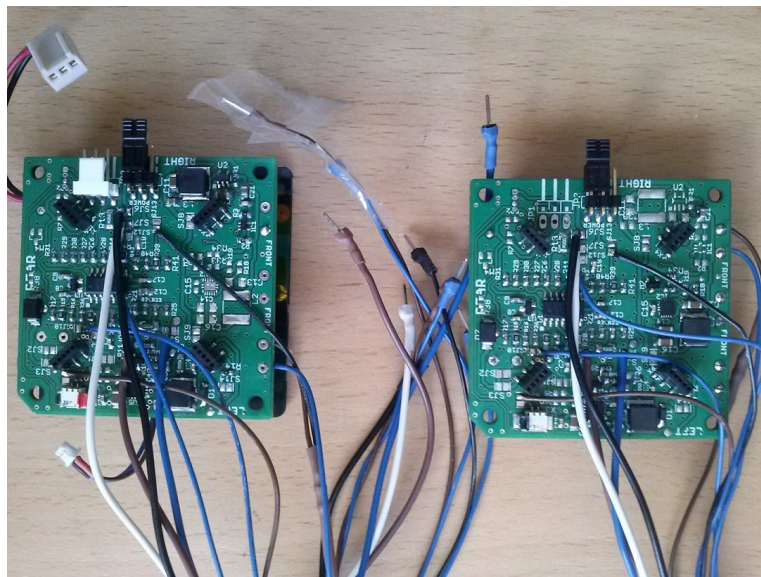


Figura F.1: Fios auxiliares para calibração dos medidores de potências;

Os fios usados para o voltímetro têm uma secção de 0.25mm^2 e os fios usados para o amperímetro têm uma secção de 0.5mm^2 de modo a minimizar a queda de tensão. A soldadura deve ser efetuada com atenção para não existirem erros nas ligações ou curto-circuitos que liguem o ADC ao restante circuito da PCB.

F.2 Método de calibração e resultados obtidos

Para efetuar a calibração do medidor de potências foi usado um método simples que consiste na realização dos seguintes passos:

1. Colocação dos fios dos voltímetros em curto-circuito e dos fios dos amperímetros em circuito aberto;
2. Efetuar leitura dos valores de tensão e corrente atuais, sendo chamados de valores de *offset*;
3. Se os valores de *offset* forem positivos devem ser subtraídos ao valor lido ou caso sejam negativos devem ser somados, ficando posteriormente as medidas atuais todas a zero.
4. Aplicar uma tensão ou corrente constante medida por um aparelho calibrado e se possível de boa precisão;
5. Registrar os valores adquiridos pelo ADC e pelo equipamento de medida, efetuando a divisão entre o valor do equipamento de medida e o valor lido pelo ADC, resultando assim o fator multiplicativo de erro.
6. Multiplicar o fator multiplicativo de erro pelo valor lido. Resultando a seguinte expressão: $ValorFinal = (ValorLido \pm offset) \times FatorMultiplicativo$.

Os resultados obtidos na calibração dos medidores de potências encontram-se visíveis nas tabelas F.1 e F.2.

Tabela F.1: Resultados obtidos da calibração do medidor de potências do módulo *harvester* - supercondensadores:

Dados	offset	Fluke 177	Medida Robô	Fator Mult.
Tensão painel [V]	0,00099	7	6,9934	1,00094
Tensão bateria [V]	0,00050	7	6,9864	1,00195
Corrente in [A]	0,01145	0,1001	0,10313	0,97062
Corrente out [A]	0,00400	0,1152	0,1193	0,96563

Tabela F.2: Resultados obtidos da calibração do medidor de potências do módulo *harvester* - bateria lítio:

Dado	offset	Fluke 177	Medida Robô	Fator Mult.
Tensão painel [V]	0,00022	5,501	5,3973	1,01921
Tensão bateria [V]	0,00000	4,007	3,99627	1,00269
Corrente in [A]	0,00011	0,1011	0,104913	0,96366
Corrente out [A]	0,00000	0,121	0,124028	0,97559

Os resultados obtidos depois do medidor de potências estar calibrado foram extremamente satisfatórios, mostrando assim ser possível a construção de um medidor de baixo custo para aplicações deste género.

Os dados de *offset* e fator multiplicativo resultantes da calibração podem ser guardados no cartão MICRO SD, sendo verificados quando o robô inicia o programa, isto permite que seja usado o mesmo programa para todos os robôs em caso de aplicações de enxame.

Apêndice G

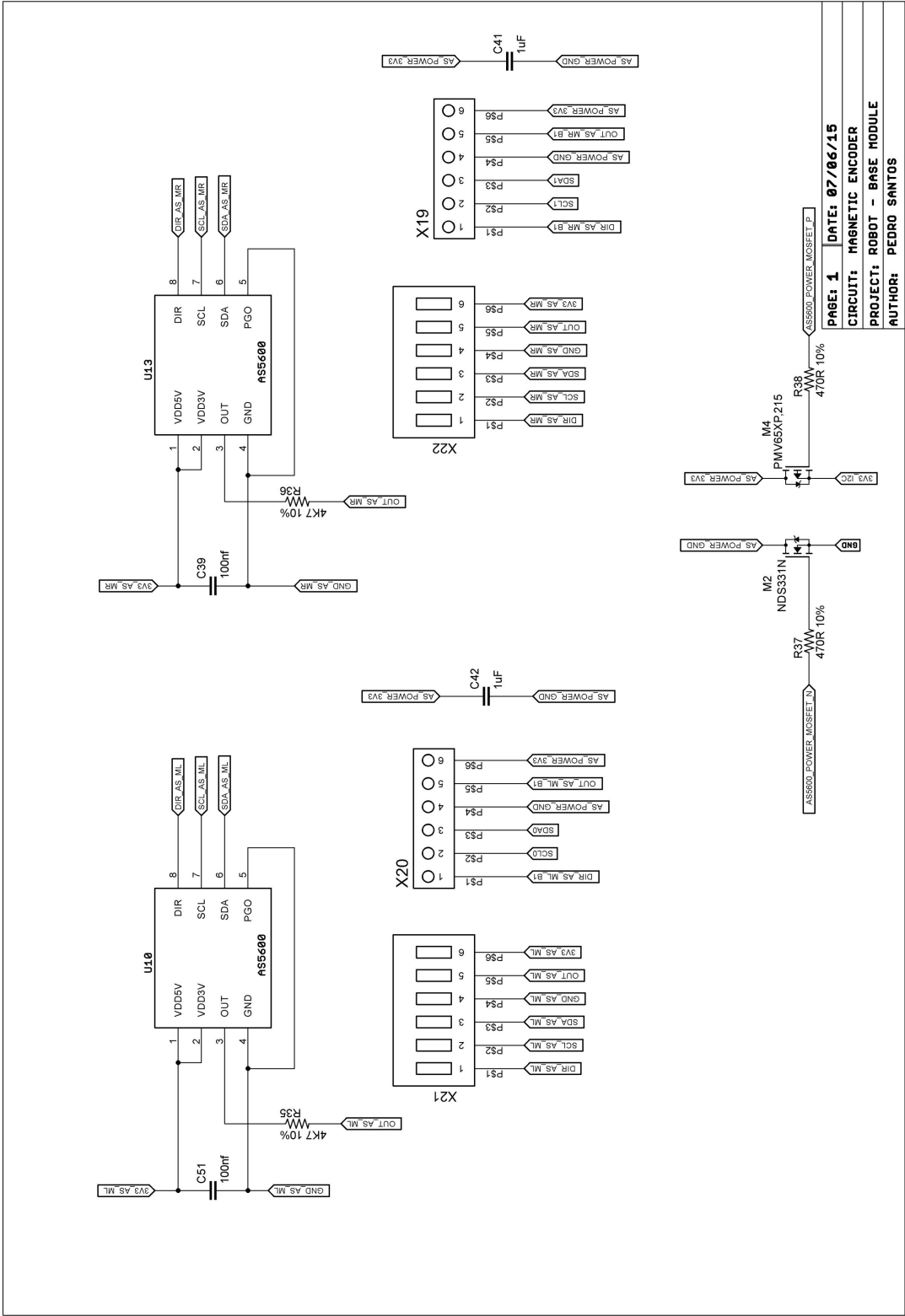
Esquema, PCB, Lista de material do robô

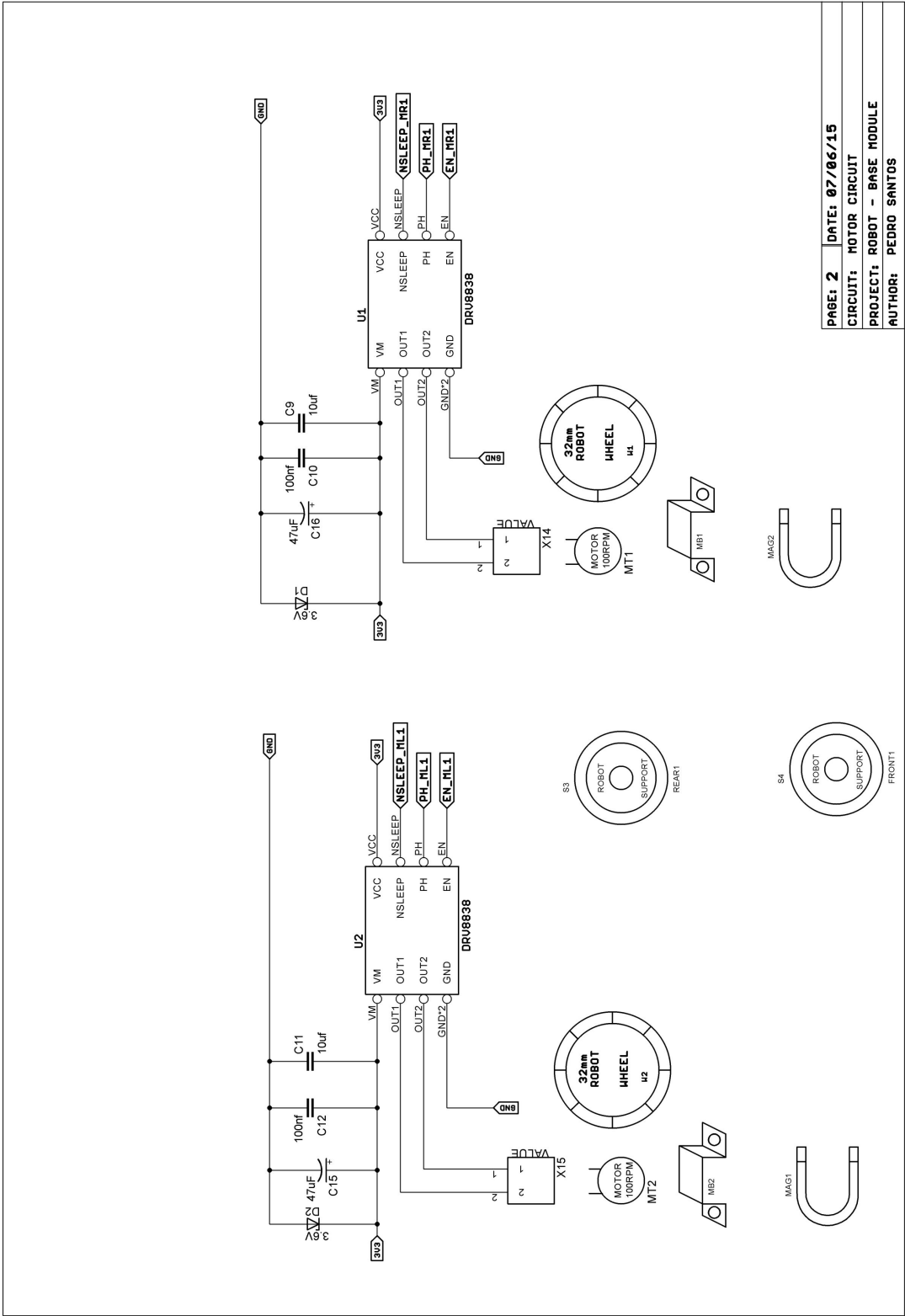
No presente apêndice, numa fase inicial é dado a conhecer o esquema completo do robô desenvolvido, posteriormente é apresentada a PCB e por último a lista de material completa de cada módulo.

G.1 Esquema Completo do Robô

O esquema do robô foi desenhado com o maior dos cuidados no que diz respeito à prevenção de não existência de erros, foi desenhado gradualmente sempre depois dos circuitos serem testados previamente em placas de ensaio ou PCB fabricadas para o efeito. Durante a fase de testes foram desenhadas e fabricadas cerca de trinta placas para circuitos integrados.

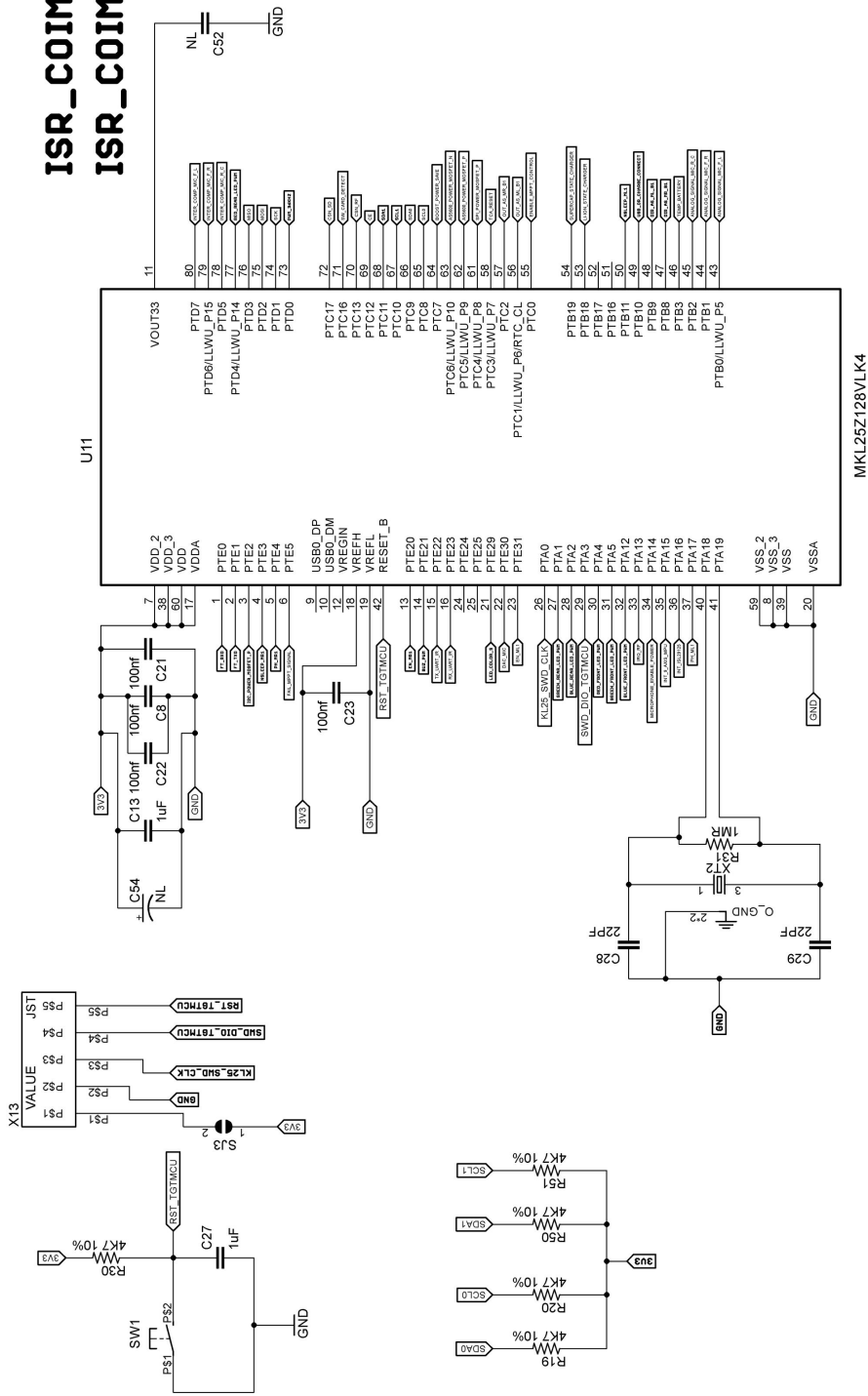
G.1.1 Esquema módulo *Base*





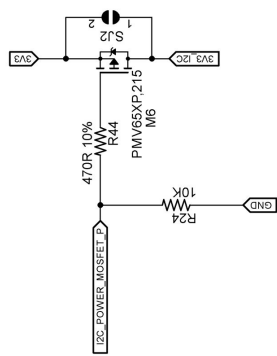
PAGE: 2	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: MOTOR CIRCUIT	
PROJECT: ROBOT - BASE MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	

ISR_COIMBRA ISR_COIMBRA

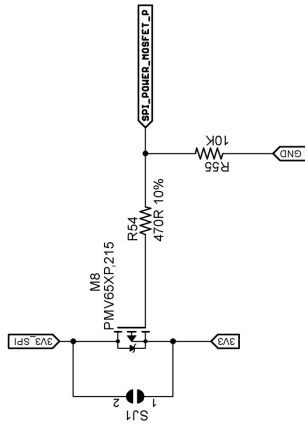
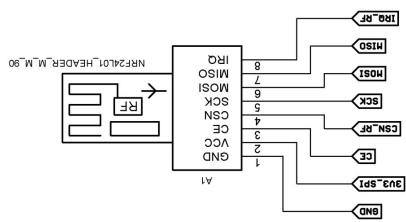


MKL25Z128VLK4

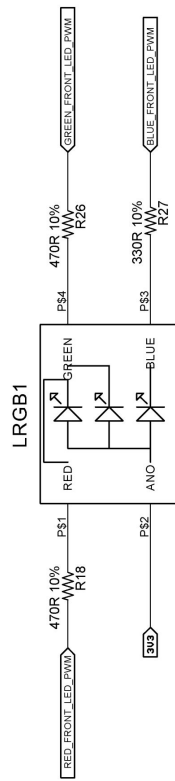
PAGE: 3	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: ARM H0 UC	
PROJECT: ROBOT - BASE MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	



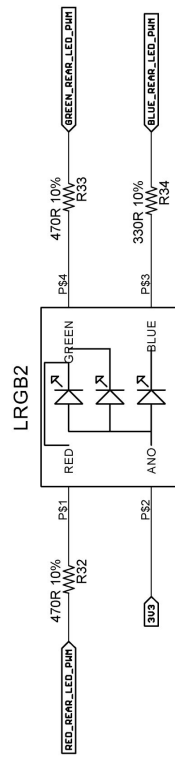
PAGE: 4 | **DATE: 07/06/15**
CIRCUIT: 12C POWER BUS
PROJECT: ROBOT - BASE MODULE
AUTHOR: PEDRO SANTOS



PAGE: 5	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: RF COMM -SPI NRF24L01	
PROJECT: ROBOT - BASE MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	



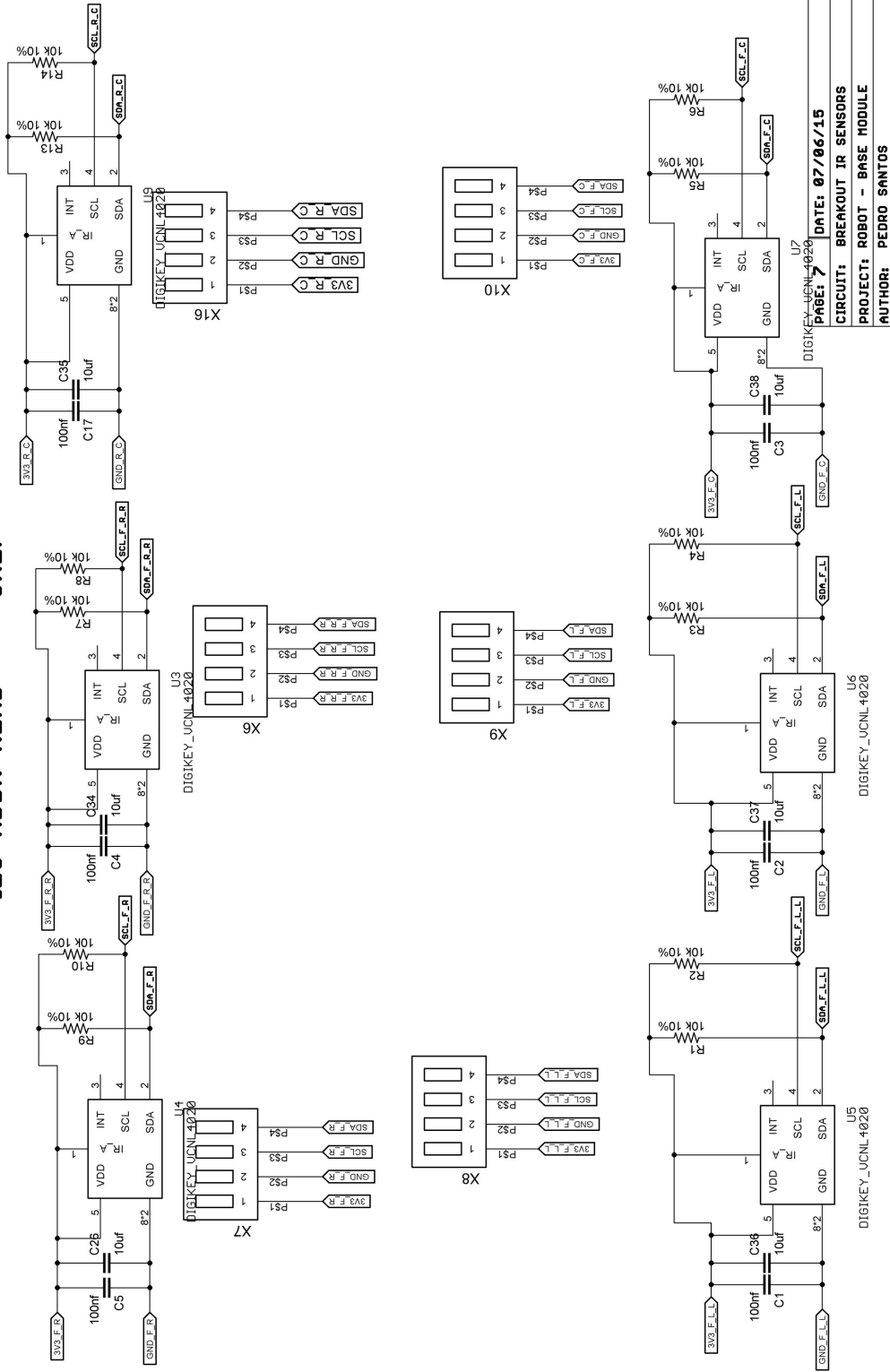
CLV1A-FKB-CJ1M1F1BB7R4S3



CLV1A-FKB-CJ1M1F1BB7R4S3

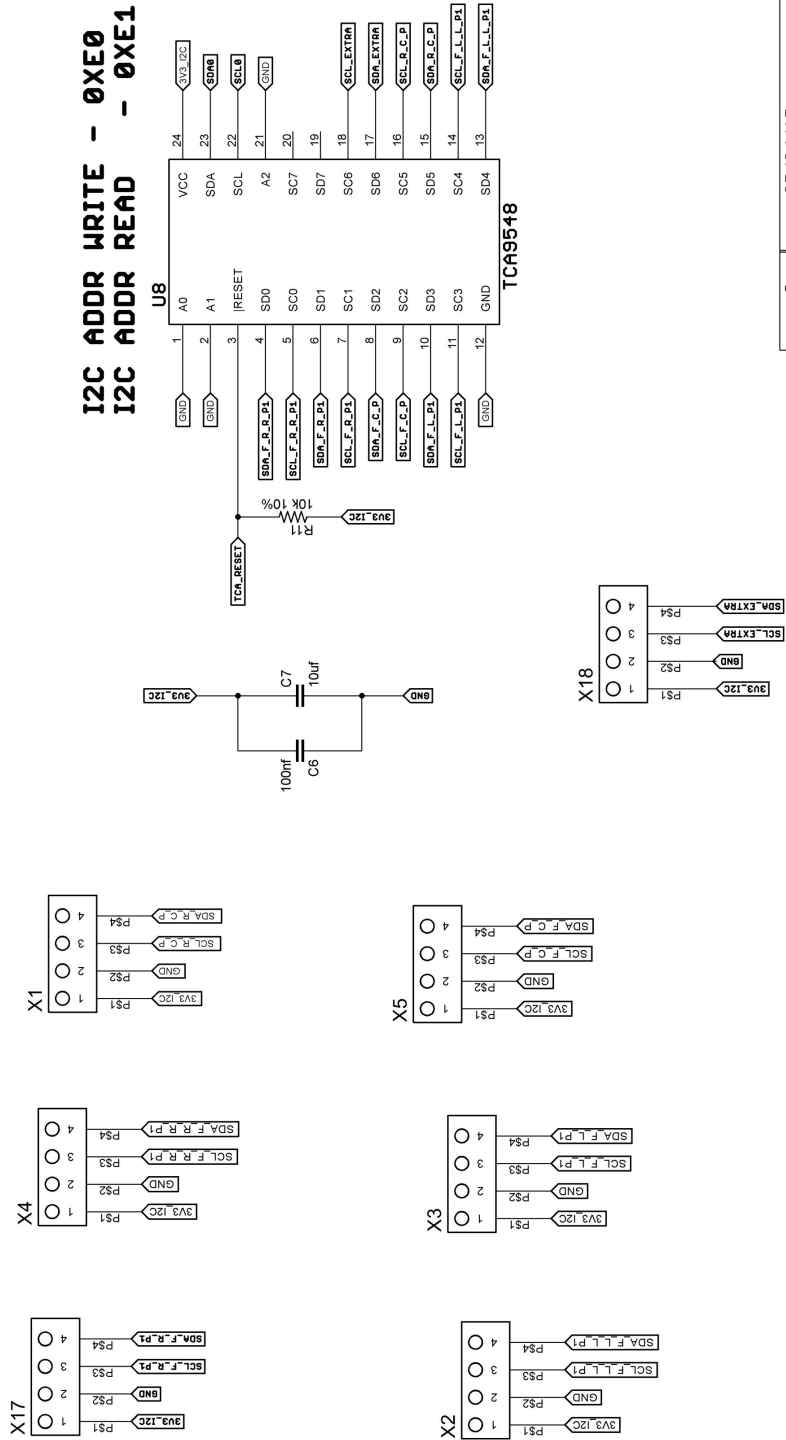
PAGE: 6 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: RGB LEDS
 PROJECT: ROBOT - BASE MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS

I2C ADDR WRITE - 0X26
I2C ADDR READ - 0X27

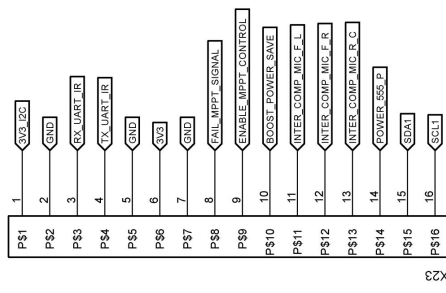


DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: BREAKOUT IR SENSORS
 PROJECT: ROBOT - BASE MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS

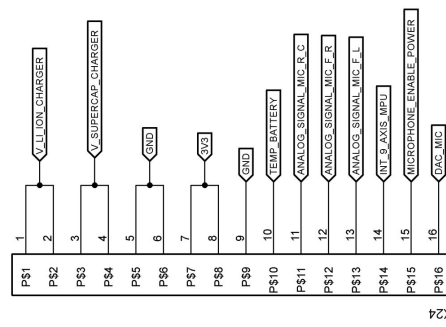
**I2C ADDR WRITE - 0XE0
I2C ADDR READ - 0XE1**



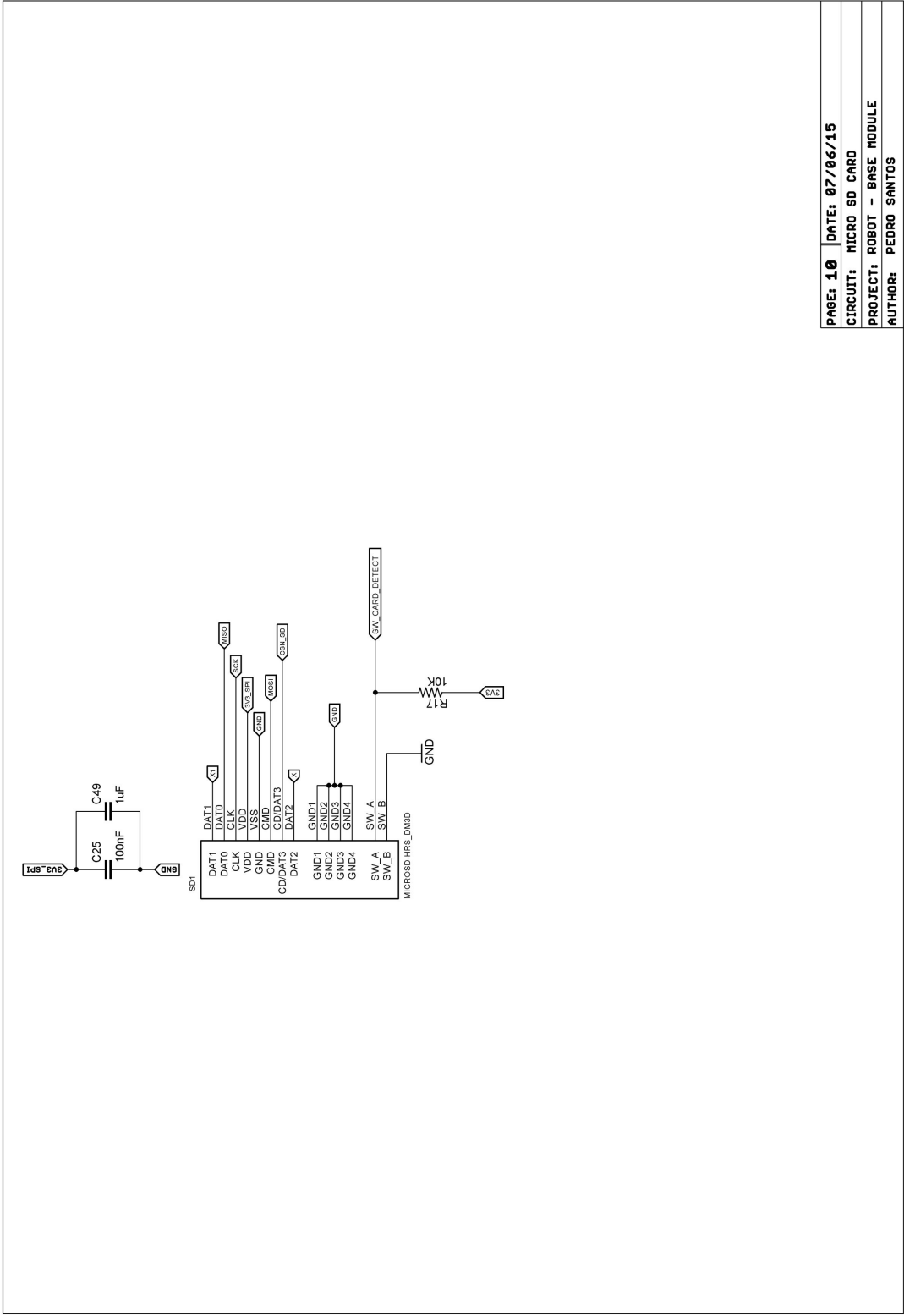
PAGE: 8 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: I2C EXPANDER AND IR SENSORS
 PROJECT: ROBOT - BASE MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS

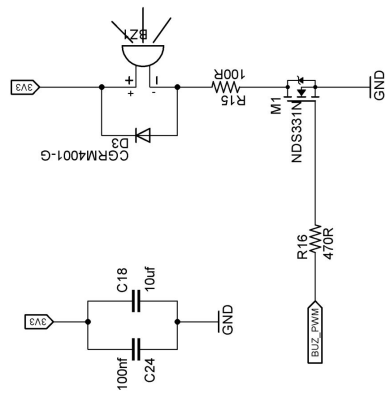


X24

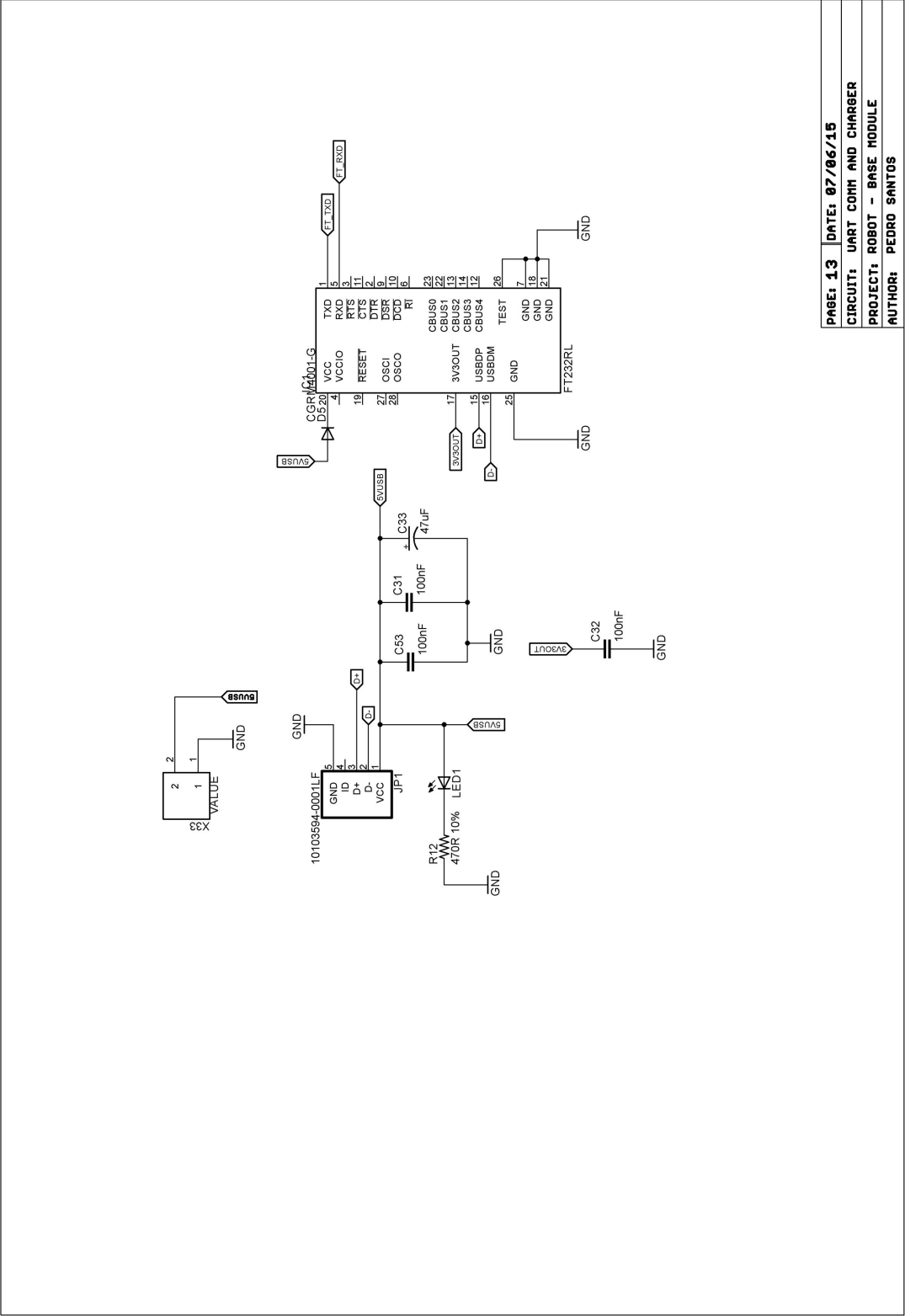


X24

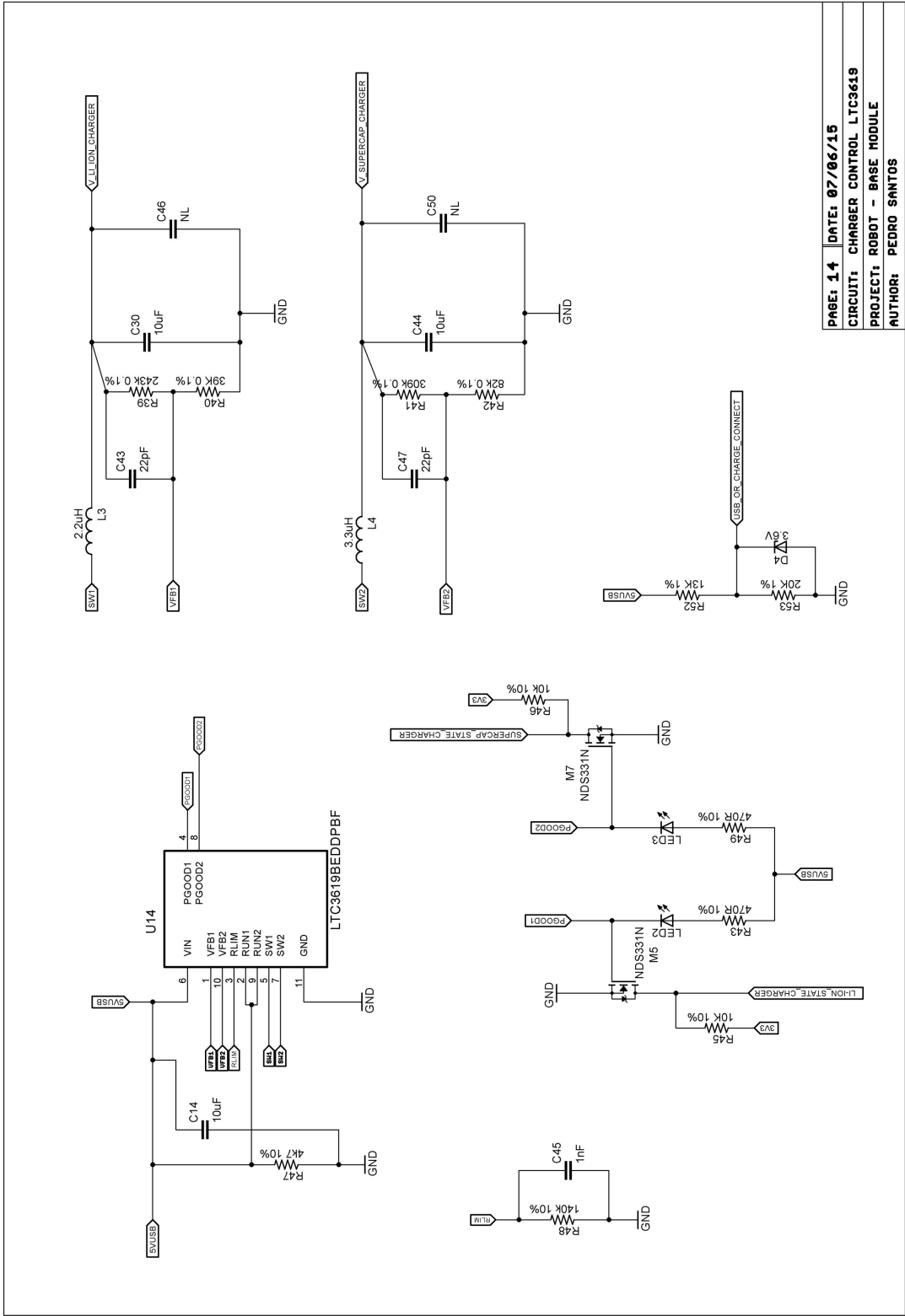




PAGE: 11	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: BUZZER	
PROJECT: ROBOT - BASE MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	

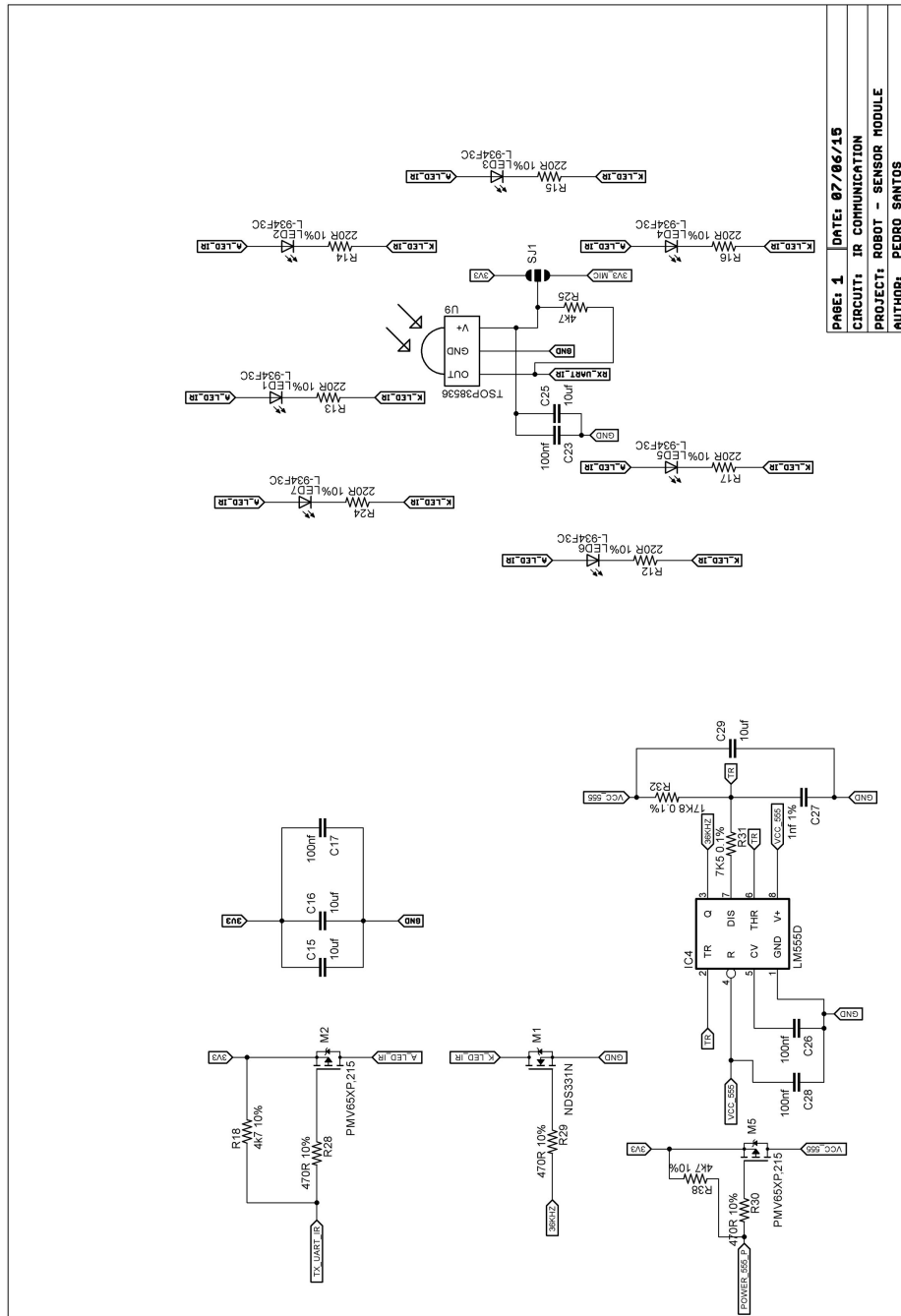


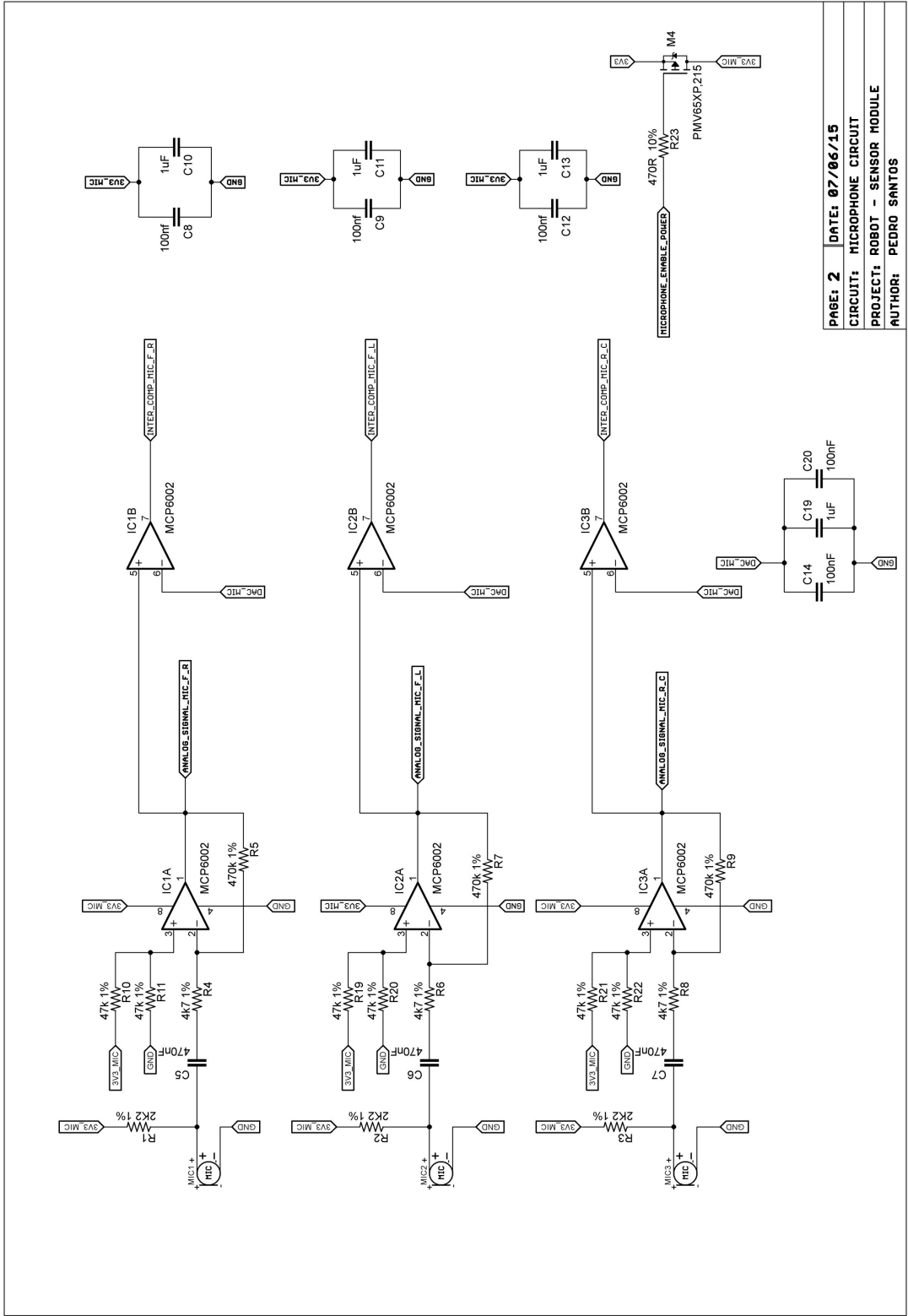
PAGE: 13 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: UART COM AND CHARGER
 PROJECT: ROBOT - BASE MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS



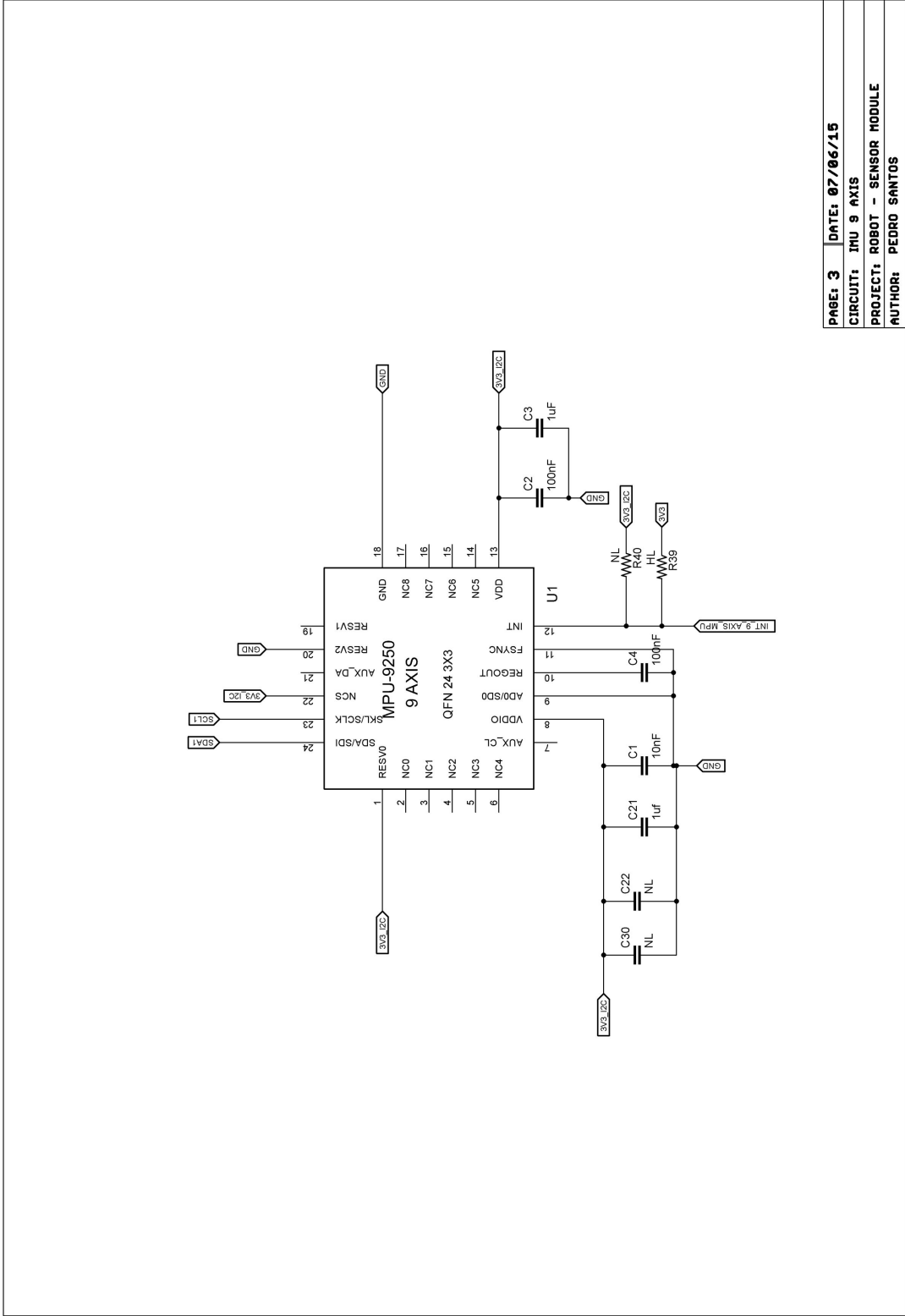
PAGE: 14 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: CHARGER CONTROL LTC3618
 PROJECT: ROBOT - BASE MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS

G.1.2 Esquema módulo *Sensor*

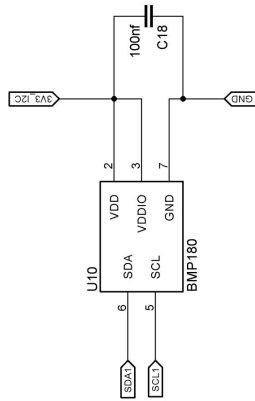




PAGE: 2 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: MICROPHONE CIRCUIT
 PROJECT: ROBOT - SENSOR MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS



PAGE: 3 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: IJU 9 AXIS
 PROJECT: ROBOT - SENSOR MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS

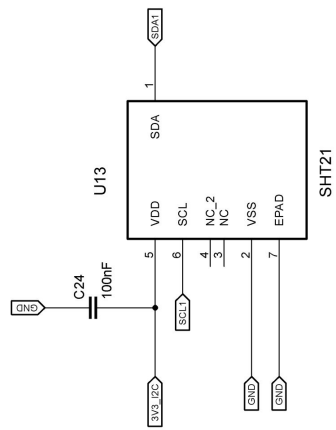


PAGE: 4 | DATE: 07/06/15

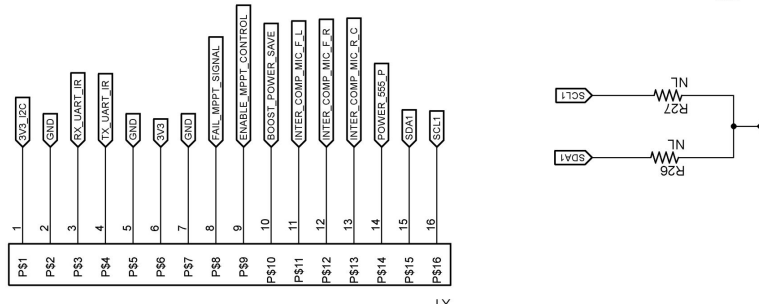
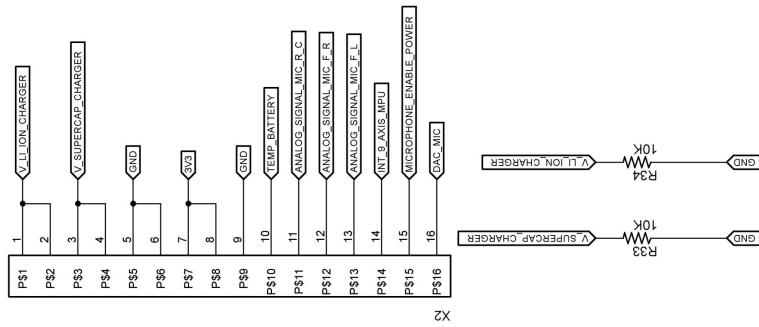
CIRCUIT: BAROMETER

PROJECT: ROBOT - SENSOR MODULE

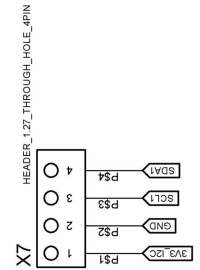
AUTHOR: PEDRO SANTOS



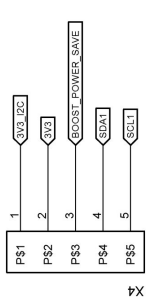
ISR_COIMBRA ISR_COIMBRA



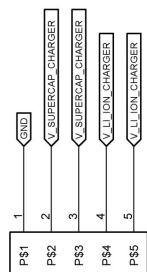
Module
57x67mm



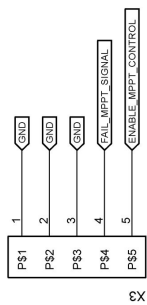
PAGE: 6	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: BUS ROBOT BASE CONNECT	
PROJECT: ROBOT - SENSOR MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	



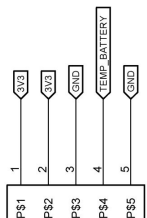
9X



9X



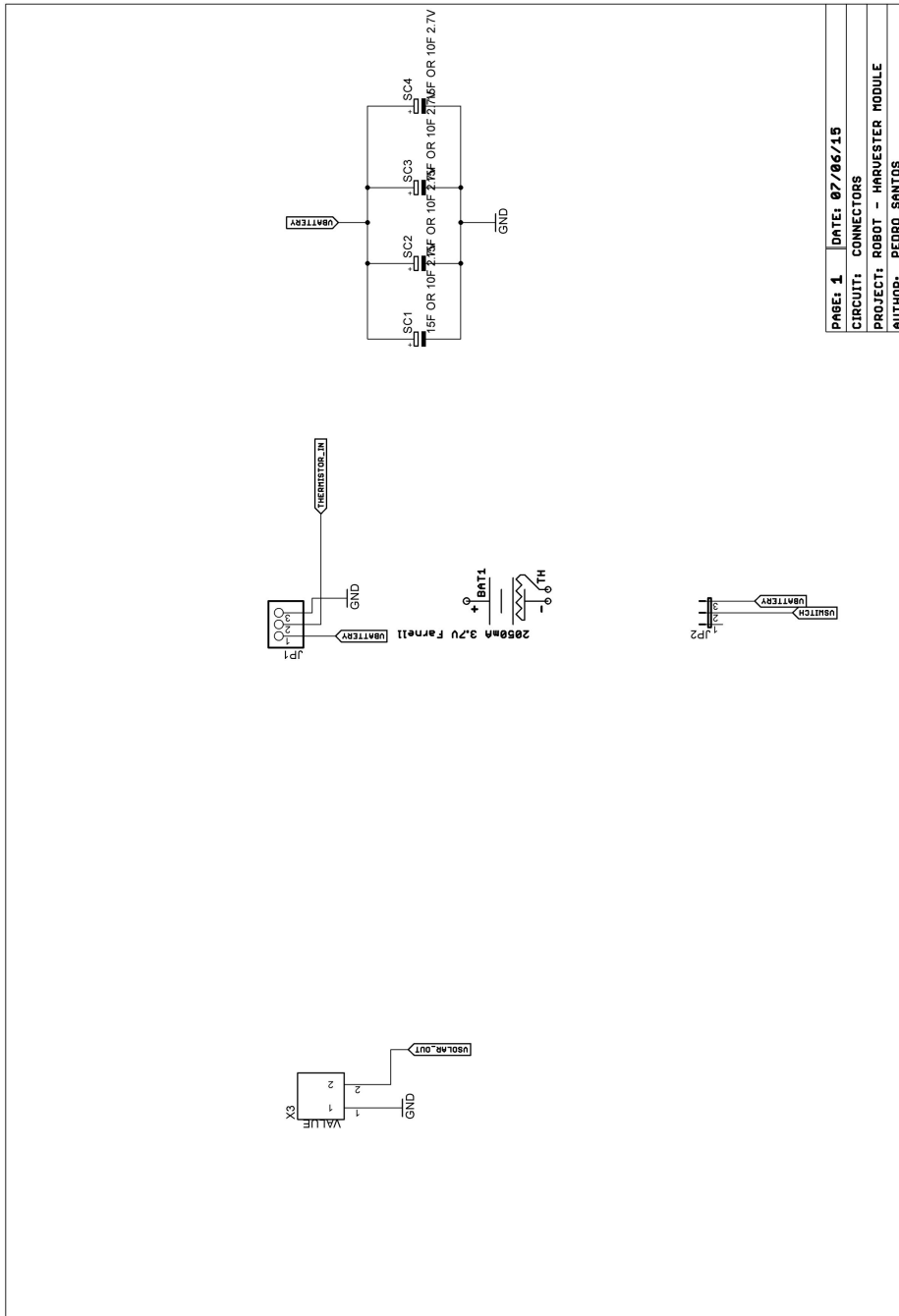
9X



9X

PAGE: 7	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: BUS ROBOT STORAGE CONNECT	
PROJECT: ROBOT - SENSOR MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	

G.1.3 Esquema módulo *Harvester*

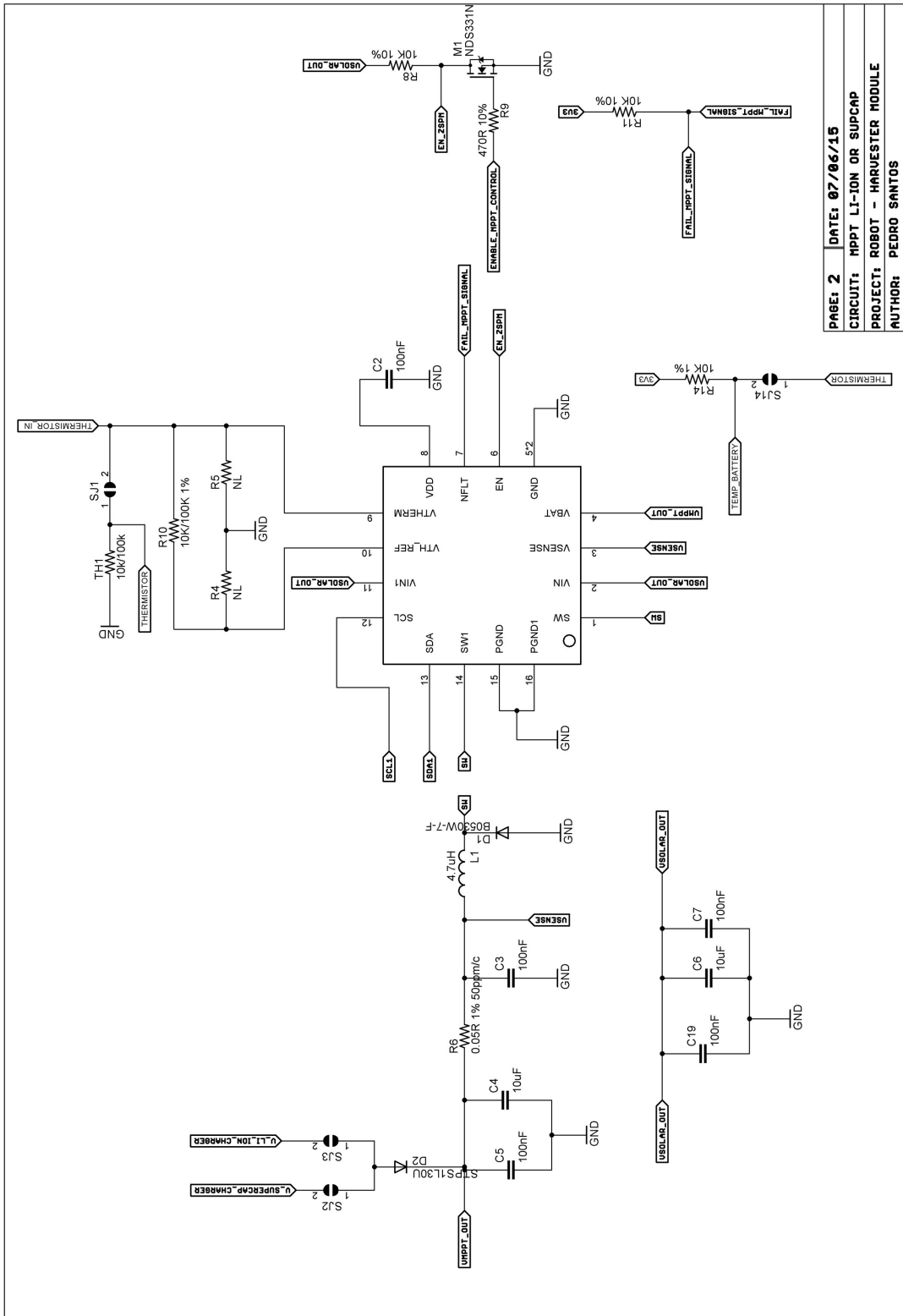


PAGE: 1 | DATE: 07/06/15

CIRCUIT: CONNECTORS

PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE

AUTHOR: PEDRO SANTOS

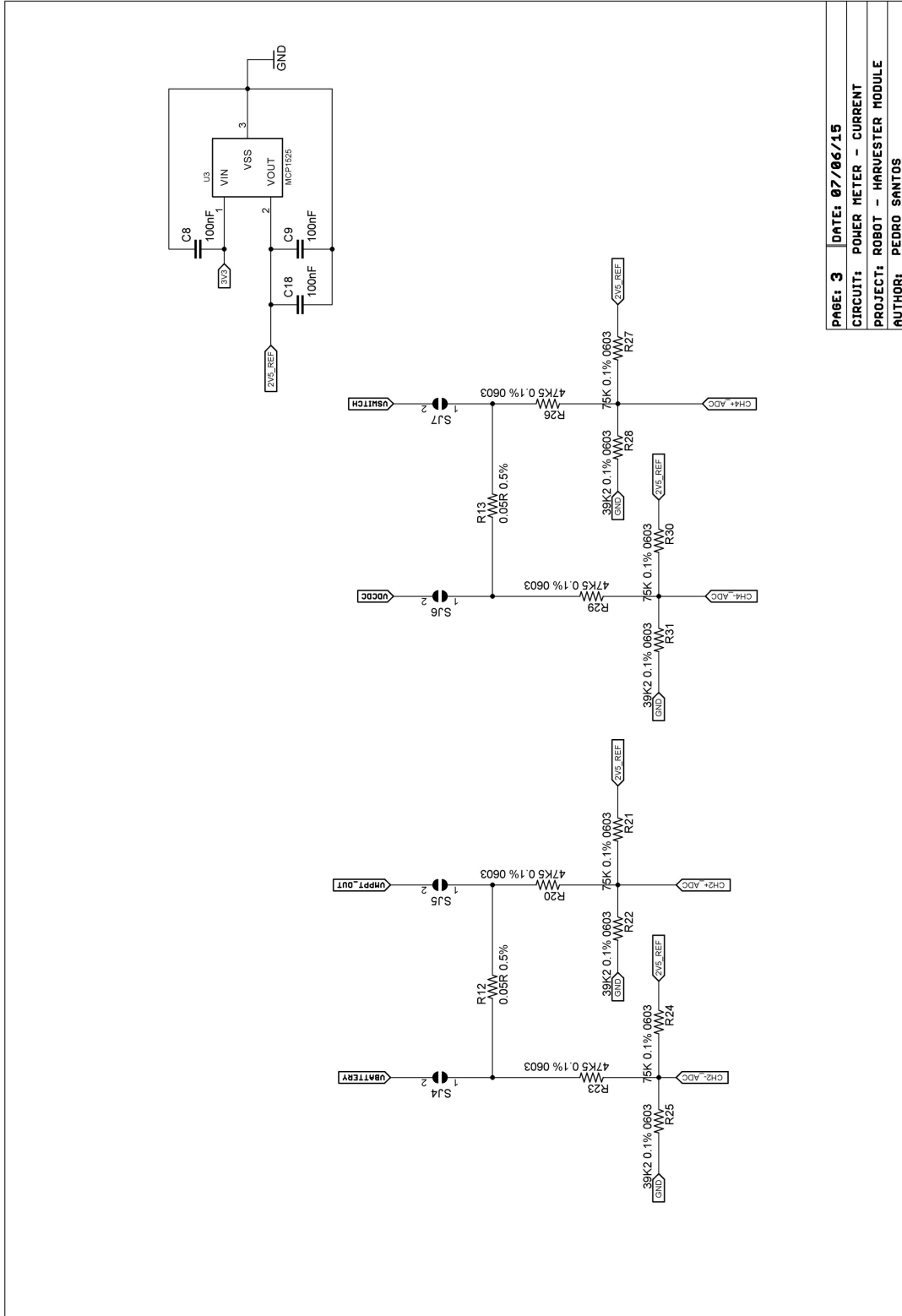


PAGE: 2 DATE: 07/06/15

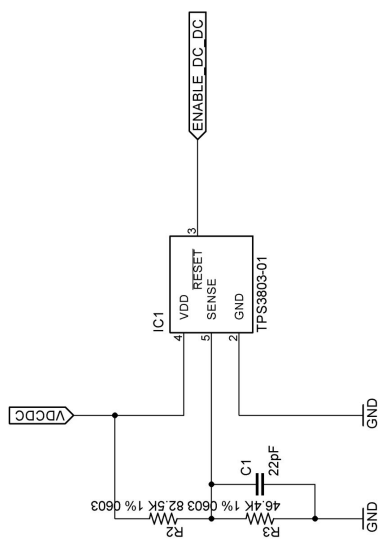
CIRCUIT: MPPT LI-ION OR SUPCAP

PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE

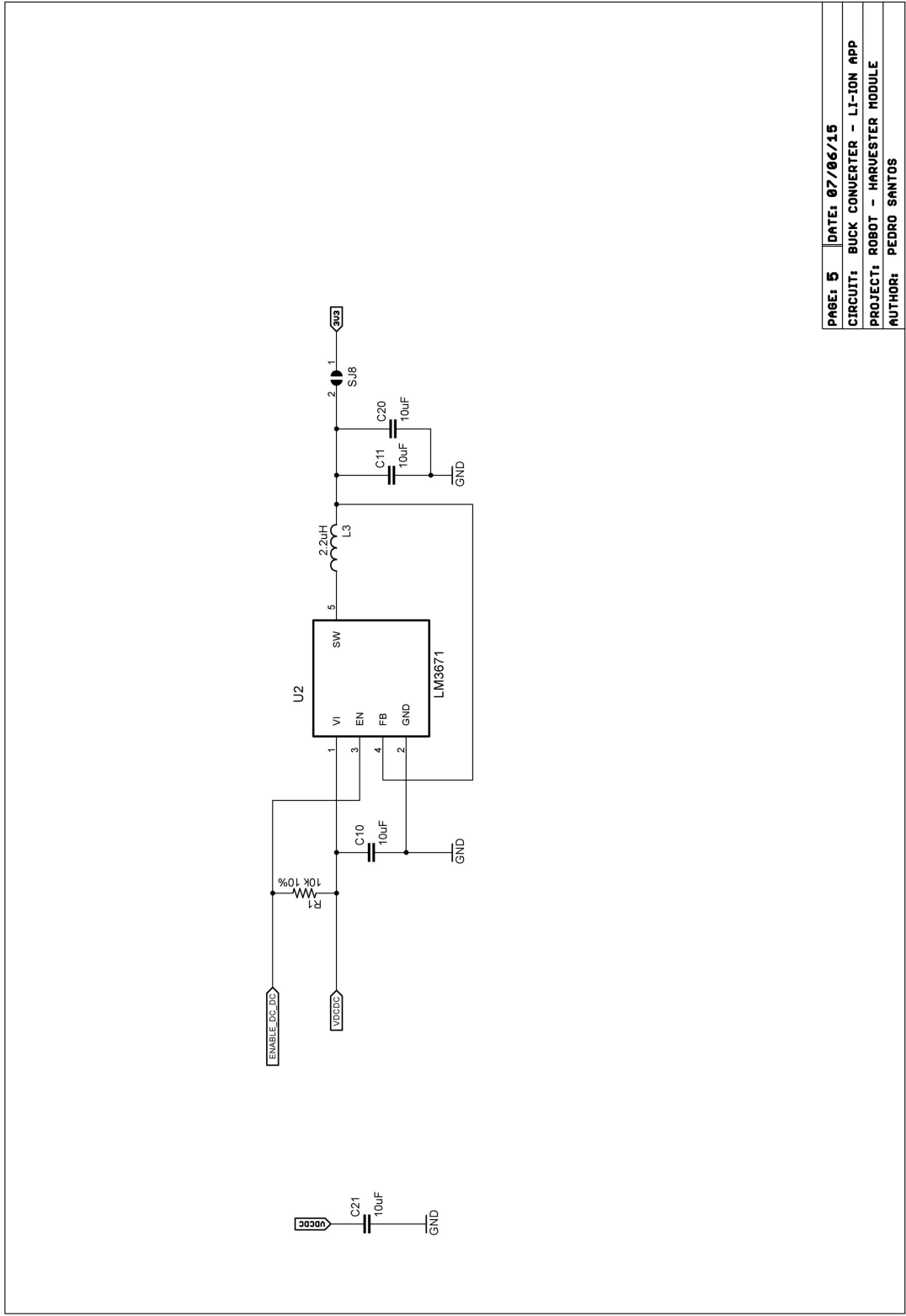
AUTHOR: PEDRO SANTOS



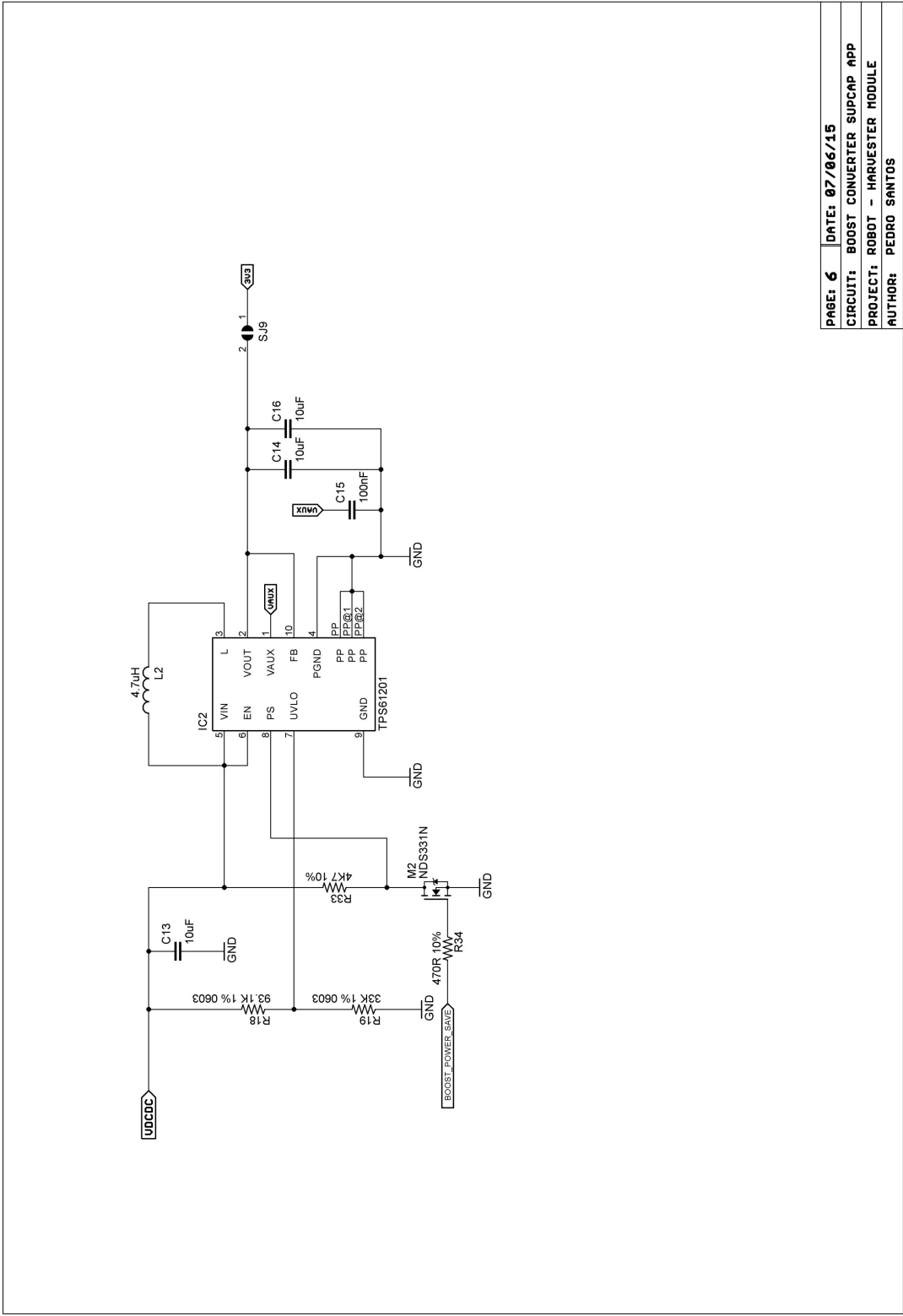
PAGE: 3 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: POWER METER - CURRENT
 PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS



PAGE: 4	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: LI-ION UNDER VOLTAGE PROTECT	
PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	

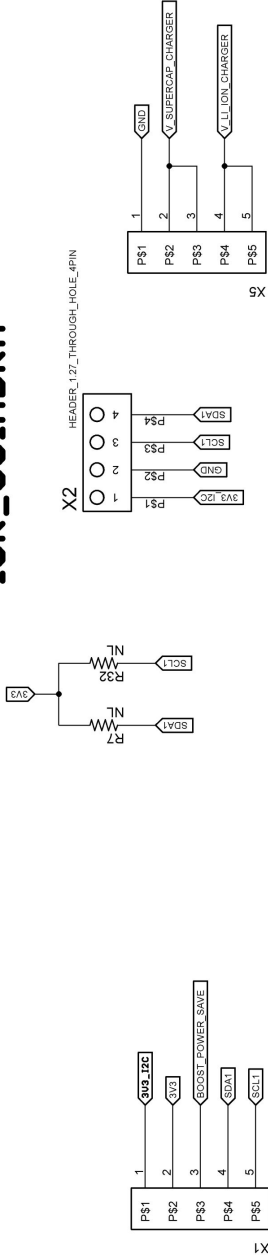


PAGE: 5	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: BUCK CONVERTER - LI-ION APP	
PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	

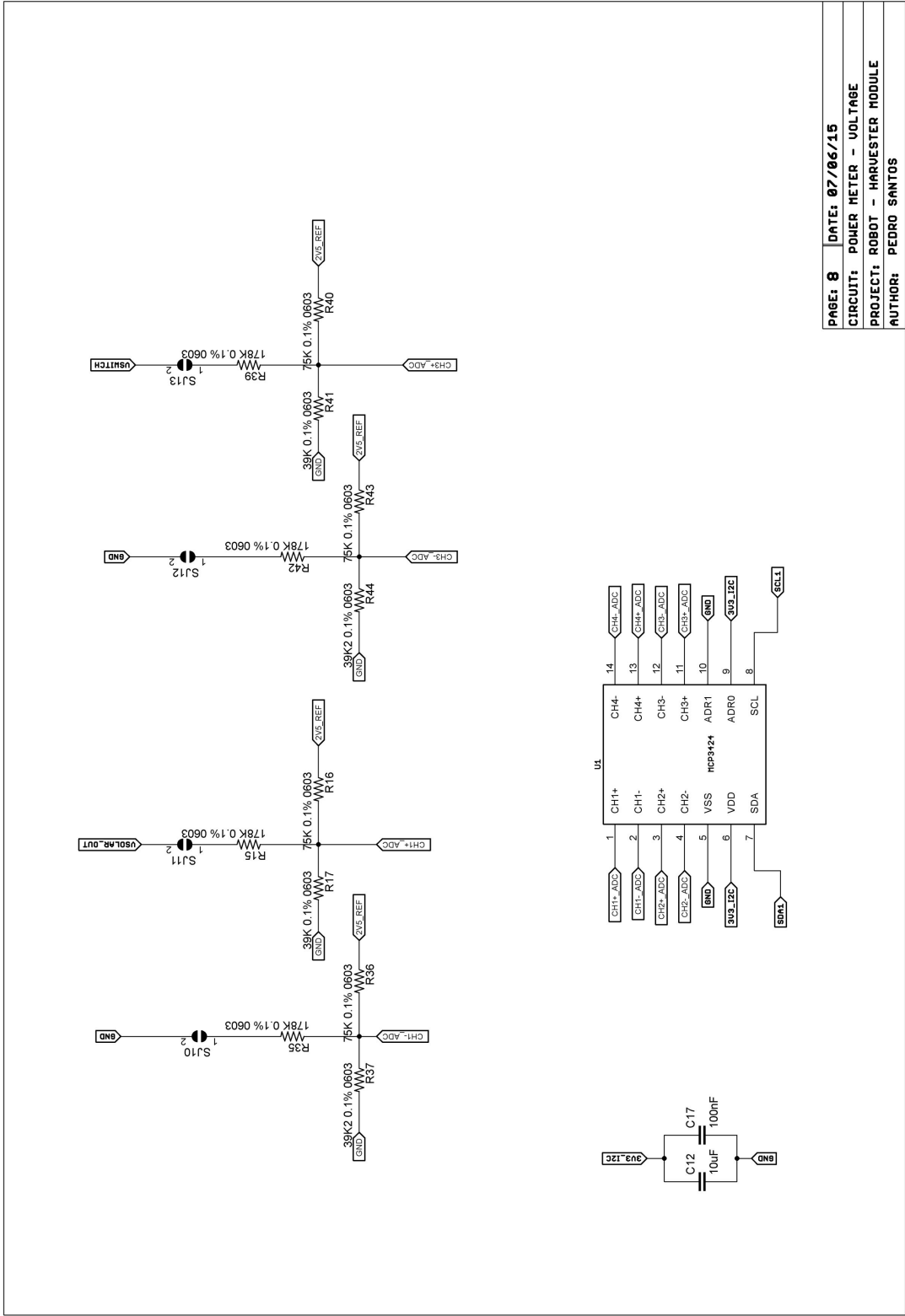


PAGE: 6	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: BOOST CONVERTER SUPCAP APP	
PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	

ISR_COIMBRA



PAGE: 7	DATE: 07/06/15
CIRCUIT: BUS ROBOT CONNECT SENSOR MODULE	
PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE	
AUTHOR: PEDRO SANTOS	



PAGE: 8
 DATE: 07/06/15
 CIRCUIT: POWER METER - VOLTAGE
 PROJECT: ROBOT - HARVESTER MODULE
 AUTHOR: PEDRO SANTOS

G.2 PCB

A PCB foi desenhada tendo em conta algumas considerações no que diz respeito à redução do ruído *ElectroMagnetic Interference* (EMI). As interferências eletromagnéticas são processos de transmissão de energia eletromagnética entre circuitos elétricos/eletrônicos, que podem dar origem à degradação significativa do funcionamento do sistema.

No presente projeto não existem fluxos de corrente considerados elevados, no entanto existem linhas de comunicações de frequências elevadas que requerem alguns cuidados. Foi tido em conta a largura, comprimento e ângulos retos das pistas.

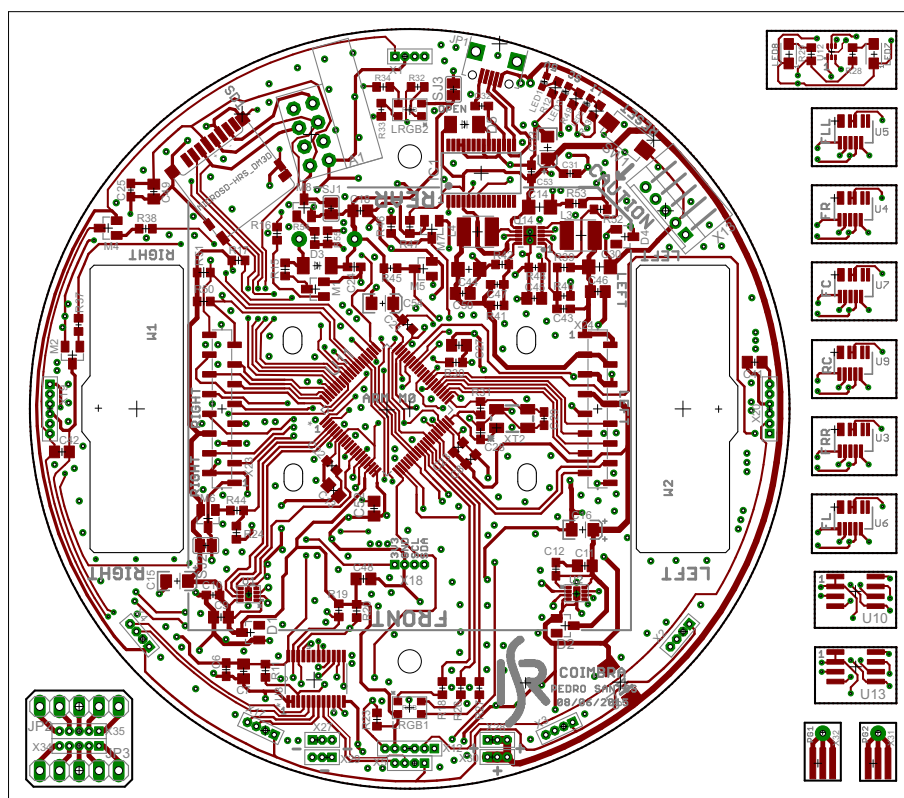


Figura G.1: *Layer top* do módulo *base*;

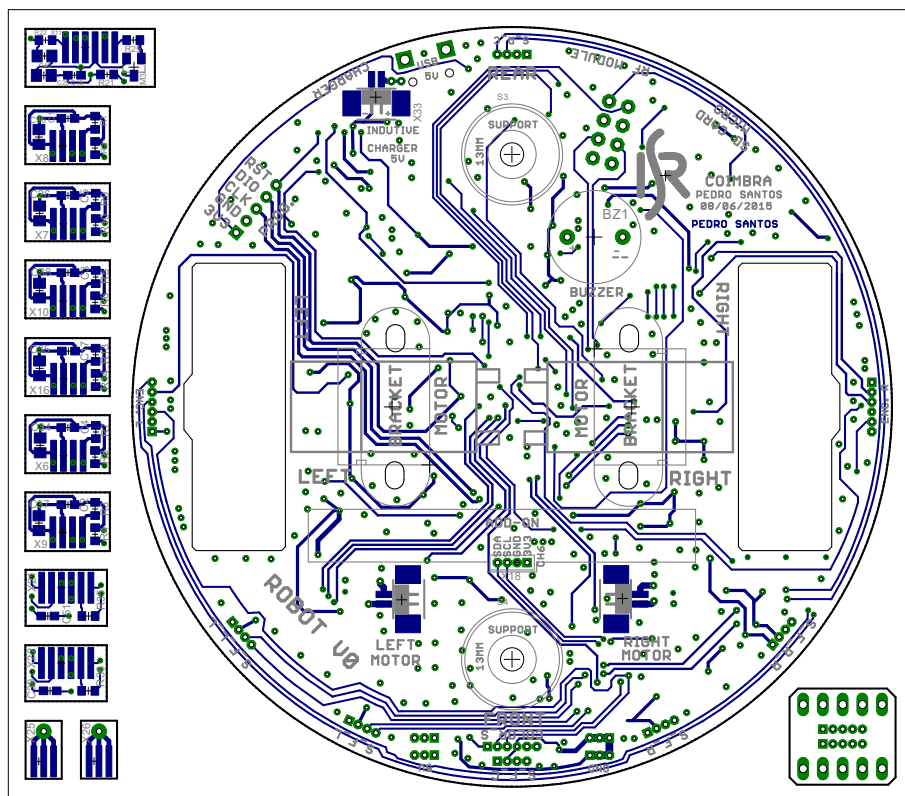


Figura G.3: *Layer bottom* do módulo *base*;

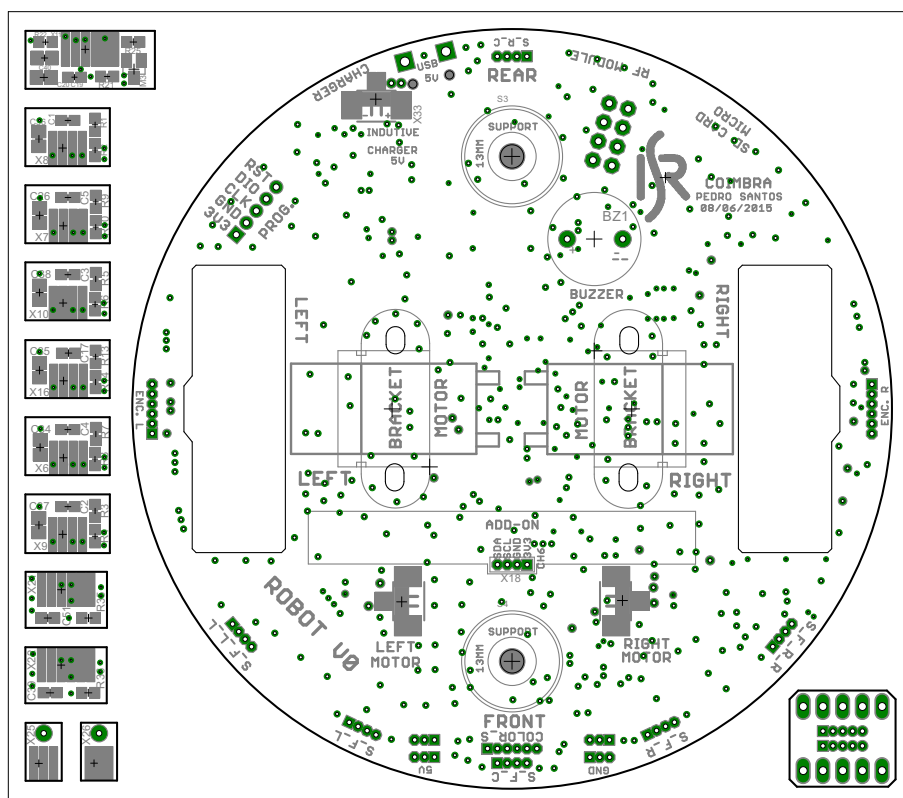


Figura G.4: *Layer bottom* com legenda do módulo *base*;

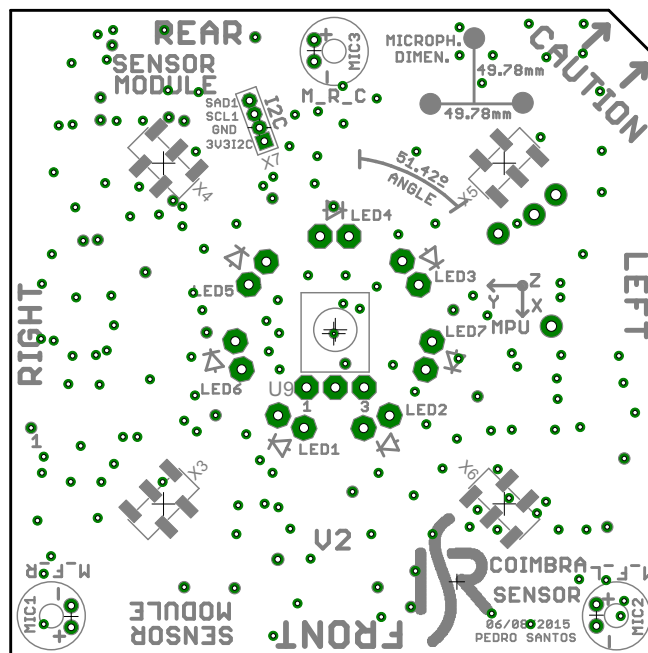


Figura G.6: *Layer top* com legenda do módulo *sensor*;

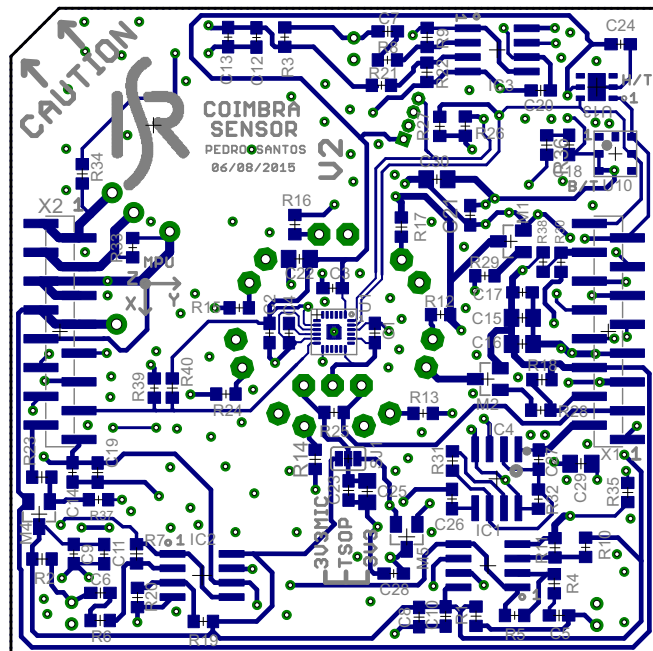


Figura G.7: *Layer bottom* do módulo sensor;

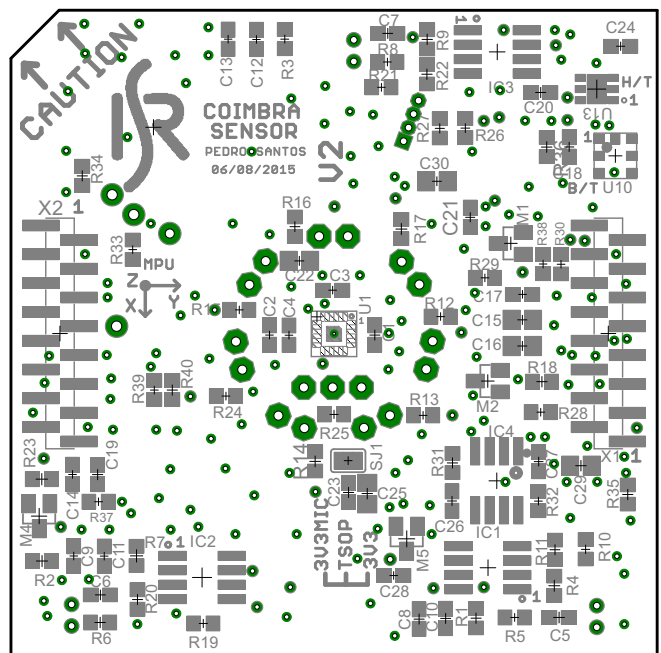


Figura G.8: *Layer bottom* com legenda do módulo *sensor*;

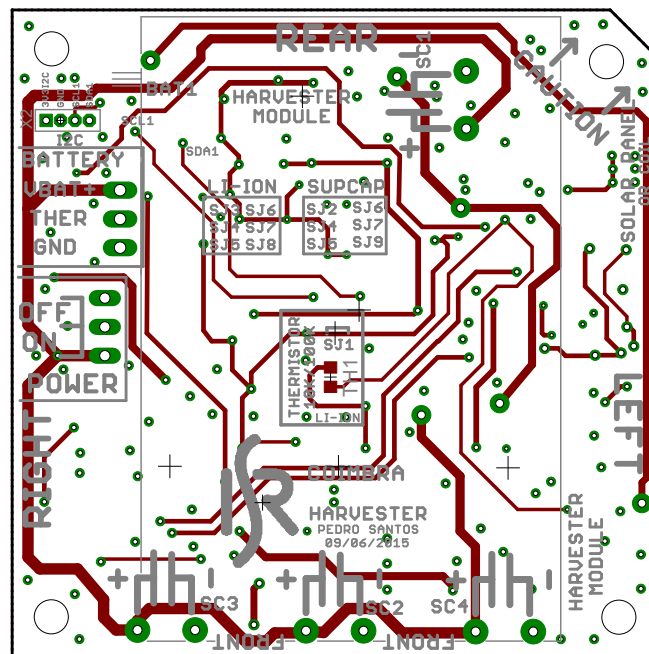


Figura G.9: *Layer top* do módulo *harvester*;

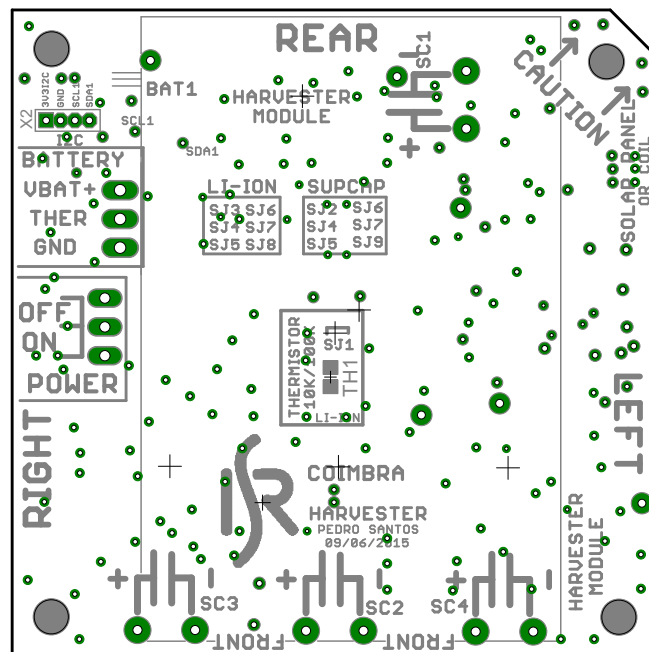


Figura G.10: *Layer top* com legenda do módulo *harvester*;

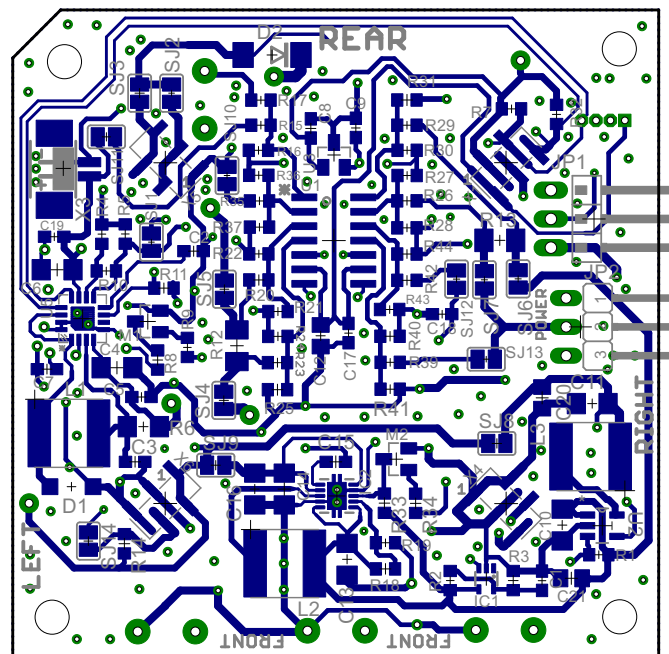


Figura G.11: *Layer bottom* do módulo *harvester*;

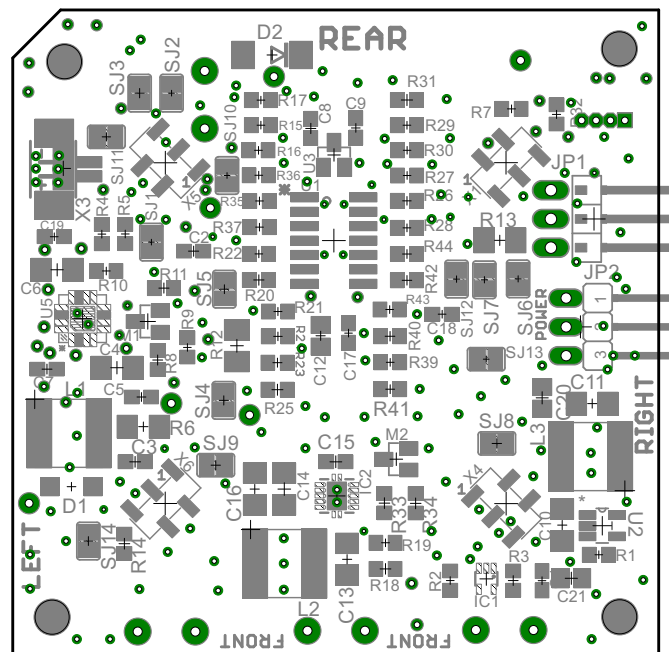


Figura G.12: *Layer bottom* com legenda do módulo *harvester*;

G.3 Lista de material

Tabela G.1: Lista de material do módulo base;

Design P/N	Value	Voltage	Power	Tolerance	Package	Man. Reference	Seller Reference	Seller	Qty
U10, U13	AS5600	Undef.	Undef.	Undef.	SOIC-8	AS5600-ASOM	985-AS5600-ASOM	Mouser	2
C42, C41, C27, C13, C49, C20	1nF	>=6,3	Undef.	Undef.	0805	MC0805B105K100CT	2320857	Farnell	6
C45	1nF	>=6,3	Undef.	Undef.	0805	C0805C102K1RACTU	1907054	Farnell	1
C51, C39, C12, C10, C22, C8, C21, C23, C5, C4, C17, C1, C2, C3, C6, C25, C24, C19, C31, C32, C53	100nF	>=6,3	Undef.	Undef.	0603	MC0603B104K160CT	1759016	Farnell	21
C11, C9, C26, C34, C35, C36, C37, C38, C7, C18, C48, C40	10uF	>=6,3	Undef.	Undef.	0805	MC0805B106K6R3CT	2320851	Farnell	12
C14, C30, C44	10uF	>=6,3	Undef.	Undef.	1206	JMK316B7106KL-T	2112908	Farnell	3
C29, C28, C43, C47	22pF	>=6,3	Undef.	Undef.	0603	MC0603N220K500CT	2309012	Farnell	4
C16, C15, C33	47nF	>=6,3	Undef.	Undef.	1206	293D476X96R3A2TE3	2353044	Farnell	3
C54	NL								
R35, R36, R19, R20, R50, R51, R30, R47	4K7	Undef.	Undef.	Undef.	0603	RC0603FR-074K7L	9238565	Farnell	8
R37, R38, R44, R54, R18, R26, R32, R33, R16, R25, R12, R43, R49	470R	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	RC0603FR-07470RL	9238441	Farnell	13
R31	1M	Undef.	Undef.	Undef.	0603	CR0603-FX-1004ELF	2321755	Farnell	1
R27, R34	330R	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	RC0603FR-07330RL	9238425	Farnell	2
R9, R10, R7, R8, R13, R14, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R11, R17, R22, R45, R46, R23, R24, R55	10K	Undef.	>=63mW	5%	0603	CRGH0603J10K	2331740	Farnell	20
R15, R21	100R	Undef.	>=100mW	Undef.	0603	CR0603-JW-101ELF	2333587	Farnell	2
R28, R29	10R	Undef.	>=100mW	Undef.	0603	RC0603FR-0710RL	9238247	Farnell	2
R39	243K	Undef.	>=63mW	0,10%	0603	RP73PF1J243KBTDF	2116932	Farnell	1
R40	39K	Undef.	>=63mW	0,10%	0603	CPF0603B39KE1	279-CPF0603B39KE1	Mouser	1
R41	309K	Undef.	>=63mW	0,10%	0603	RP73PF1J309KBTDF	2116943	Farnell	1
R42	82K	Undef.	>=63mW	0,10%	0603	CPF0603B82KE1	279-CPF0603B82KE1	Mouser	1
R52	13K	Undef.	>=63mW	1%	0603	CPF0603F13KC1	1527594	Farnell	1
R53	20K	Undef.	>=63mW	1%	0603	CPF0603F20KC1	1527615	Farnell	1
R48	140K	Undef.	>=63mW	1%	0603	MCTC0525B1403T5E	1576032	Farnell	1
A1	NRF2401	Undef.	Undef.	Undef.	Undef.	nRF24L01	nRF24L01	Roboshop	1
BZ1	ABT-410-RC	Undef.	Undef.	Undef.	TH	ABT-410-RC	1022402	Farnell	1
D1, D2	3, 6V	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	BZX84C3V6LT1G	2317468	Farnell	2
D4	NL								
D6	STPS1L30U	0,26	Undef.	Undef.	DO-214AA	STPS1L30U	1467550	Farnell	1
D3, D5	Undef.	Undef.	Undef.	Undef.	SOD-123	MBR0520LT1G	9556915	Farnell	2
IC1	FT232L	Undef.	Undef.	Undef.	SSOP	FT232RL	1146032	Farnell	1
L3	2, 2uH	Undef.	Undef.	Undef.	4x4x2,5	SRN4026-2R2Y	2428215	Farnell	1
L4	3, 3uH	Undef.	Undef.	Undef.	4x4x2,5	SRN4026-3R3M	2428216	Farnell	1
LED1	Green	Undef.	Undef.	Undef.	0603	KPHM-1608CGCK	2146434	Farnell	1
LED2, LED3	Red	Undef.	Undef.	Undef.	0603	KP-1608SURCK	2290329	Farnell	2
LED7, LED8	White	Undef.	Undef.	Undef.	2,7x2,0	CLM3C-WKW-CWBYA453	1855551	Farnell	2
LRGB1, LRGB2	Rgb	Undef.	Undef.	Undef.	SMD	CLV1A-FKB-CJ1M1F1BB7R4S3	1855553	Farnell	2
M1, M2, M3, M5, M7	NFET	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	NDS331N	1839006	Farnell	5
M4, M6, M8	PFET	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	PMV65XP, 215	1758119	Farnell	3
MAG1, MAG2	MD6SH-1	Undef.	Undef.	Undef.	6X2mm	AS5000-MD6SH-1	AS5000-MD6SH-1	Mas	2
Parafuso M2+porca M2	M2X10mm								
MB1, MB2	N20 Motor	Undef.	Undef.	Undef.	15x11,5x25	10PCS N20 Motor	10PCS N20 Motor	Ebay	2
MT1, MT2	298:1 100RPM	Undef.	Undef.	Undef.	Undef.	RB-Esm-07	RB-Esm-07	Roboshop	2
PG1, PG2	Spring Probe	Undef.	Undef.	Undef.	10,59mm	0914-0-15-20-77-14-11-0	1654368	Farnell	2
S3, S4	Nylon Support	Undef.	Undef.	Undef.	13x15d(utm)				2
SD1	DM3D-SF	Undef.	Undef.	Undef.	Socket	DM3D-SF	1764377	Farnell	1
SD CARD 2Gb									
SW1	EVQPE104K	Undef.	Undef.	Undef.	6x3,5mm	EVQPE104K	2079522	Farnell	1
U1, U2	DRV8838	Undef.	Undef.	Undef.	QFN8	DRV8838DSGT	2420232	Farnell	2
U3, U4, U5, U6, U7, U9	VCNL4020	Undef.	Undef.	Undef.	QFN11	VCNL4020-GS08	2251457	Farnell	6
U8	TCA9548	Undef.	Undef.	Undef.	SOIC24	TCA9548APWR	595-TCA9548APWR	Mouser	1
U11	MKL25Z128VLLK4	Undef.	Undef.	Undef.	LQFP-80	MKL25Z128VLLK4	2212797	Farnell	1
U12	ISL29125	Undef.	Undef.	Undef.	ODFN-6	ISL29125IROZ-T7A	968-ISL29125IROZ-T7A	Mouser	1
U14	LTC3619BDD#PBF	Undef.	Undef.	Undef.	DFN-10	LTC3619BDD#PBF	1839256	Farnell	1
W1, W2	INM-0125	Undef.	Undef.	Undef.	7x32mm	INM-0125	INM-0125	Inmotion	1
X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X16, X17, X11, X12, X18, X19, X20, X21, X22, X25, X31, X26, X32, X29, X27, X28, X30	20pin head.	Undef.	Undef.	Undef.	1,27mm pitch	M52-040023V2045	1099562	Farnell	4
X13 - HEADER 90°	5pins	Undef.	Undef.	Undef.	2mm pitch	S5B-PH-K-S (LF)(SN)	9492496	Farnell	1
X13 - RECEPTABLE	5pins	Undef.	Undef.	Undef.	2mm pitch	PHR-5	3616216	Farnell	1
X13- CONTACT	5pins	Undef.	Undef.	Undef.	2mm pitch	SPH-004T-P0.5S	1830762	Farnell	5
X14, X15, X33, - HEADER	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1,25mm pitch	10114830-10102LF	2100756	Farnell	3
X14, X15, X33- RECEPTABLE	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1,25mm pitch	10114826-00002LF	2100709	Farnell	3
X14, X15, X33- CONTACT	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1,25mm pitch	10114827-001LF	2100725	Farnell	8
X23, X24	16pins	Undef.	Undef.	Undef.	1,27mm pitch	M52-5052545	1099550	Farnell	2
JP1	5 pins	Undef.	Undef.	Undef.	Type b	10103594-0001LF	2293752	Farnell	1
XT2	8Mhz	Undef.	Undef.	Undef.	5x3,2mm	ABM3B-8.000MHZ-B2-T	2467818	Farnell	1

Tabela G.2: Lista de material do módulo *sensor*;

Design P/N	Value	Voltage	Power	Tolerance	Package	Man. Reference	Seller Reference	Seller Link	Quantity
C2, C4, C14, C20, C24, C8, C9, C12, C17, C18, C23, C28, C26	100nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0603	MC0603B104K160CT	1759016	Farnell	13
C1	10nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0603	MC0603B103K250CT	1759022	Farnell	1
C15, C16, C25, C29	10nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0805	MC0805B106K6R3CT	2320851	Farnell	5
C25	NL								
C3, C10, C11, C13, C19, C21	1uF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0603	MC0603B105K160CT	2320814	Farnell	6
C5, C6, C7	470nF	>=6, 4	Undef.	Undef.	0603	GRM188R71E474KA12D	1828901	Farnell	3
R12, R13, R14, R15, R16, R17, R24	220R	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	ERJ3EKF2200V	2303090	Farnell	7
R1, R2, R3	2K2	Undef.	>=63mW	0, 01	0603	RC0603FR-072K2L	9238522	Farnell	3
R23, R28, R29, R30	470R	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	RC0603FR-07470RL	9238441	Farnell	4
R5, R7, R9	470K	Undef.	>=63mW	0, 01	0603	RC0603FR-07470KL	9238808	Farnell	3
R10, R11, R19, R20, R21, R22	47K	Undef.	>=63mW	0, 01	0603	RC0603FR-0747KL	9238689	Farnell	6
R25, R4, R6, R8, R18, R38	4K7	Undef.	>=63mW	0, 01	0603	CRGH0603F4K7	2332011	Farnell	6
R32	18K2	Undef.	>=63mW	0,1	0603	RP73PF1J18K2BTDF	2116812	Farnell	1
R36, R35, R33, R34, R37	10K	Undef.	>=63mW	5%	0603	CRGH0603J10K	2331740	Farnell	5
R31	7K68	Undef.	>=63mW	0,1	0603	RP73PF1J7K68BTDF	2116772	Farnell	1
C27	1nF	>=6,3	Undef.	0,1	0603	GRM1885C1H102FA01D	1828913	Farnell	1
U10	BMP180	Undef.	Undef.	Undef.	QFN-7	BMP180	262-BMP180	Mouser	1
U13	SHT21	Undef.	Undef.	Undef.	QFN-6	SHT21	1855468	Farnell	1
IC4	LMC555	Undef.	Undef.	Undef.	SOIC8	LMC555CMM	9779302	Farnell	1
LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7	L-934F3C	Undef.	Undef.	Undef.	TH	L-934F3C	2290438	Farnell	7
IC1, IC2, IC3	MCP6002	Undef.	Undef.	Undef.	SOIC-8	MCP6002-E/SN	1332118	Farnell	3
U9	TSOP38536	Undef.	Undef.	Undef.	TH	TSOP38536	2251365	Farnell	1
U1	MPU9250	Undef.	Undef.	Undef.	QFN	MPU-9250	MPU-9250	IvenSense	1
MIC1, MIC2, MIC3	MIC_pul	Undef.	Undef.	Undef.	TH	POM-1644P-NF-R	1193040	Farnell	3
M1	NDS331N	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	NDS331N	1839006	Farnell	1
M2, M4, M5	PMV65XP, 215	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	PMV65XP, 215	1758119	Farnell	3
X1, X2	16pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 27 pitch	M52-040000P2545	1099572	Farnell	2
X3, X4, X5, X6	5pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 27 pitch	M52-5050545	1099547	Farnell	4

Tabela G.3: Lista de material do módulo *harvester* - supercondensador;

Design P/N	Value	Voltage	Power	Tolerance	Package	Man. Reference	Seller Reference	Seller Link	Quantity
C2, C3, C5, C7, C8, C9, C15, C17, C18, C19	100nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0603	MC0603B104K160CT	1759016	Farnell	10
C4, C6, C13, C14, C16	10nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	1206	JMK316B7106KL-T	2112908	Farnell	5
C12	10nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0805	MC0805B106K6R3CT	2320851	Farnell	1
R12, R13	0, 05R	Undef.	0, 5W	0, 5%	1206	LVK12R050DER	1462296	Farnell	2
R6	0, 05R	Undef.	0, 5W	1%	1207	LVK12R050FER	1462290	Farnell	1
R17, R22, R25, R28, R31, R37, R41, R44	39K2	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	RP73PF1J39K2BTDF	2116848	Farnell	8
R16, R21, R24, R27, R30, R36, R40, R43	75K	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	RP73PF1J75KBTDF	2116878	Farnell	8
R20, R23, R26, R29	47K5	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	RP73PF1J47K5BTDF	2116857	Farnell	4
R33	4K7	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	RC0603FR-074K7L	9238565	Farnell	1
R9, R34	470R	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	RC0603FR-07470RL	9238441	Farnell	2
R15, R35, R39, R42	178K	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	MCTC0525B1783T5E	1576043	Farnell	4
R8, R11	10K	Undef.	>=63mW	5%	0603	CRGH0603J10K	2331740	Farnell	2
R14	10K	Undef.	>=63mW	1%	0603	CRCW060310K0FKTA	1652827	Farnell	1
R19	33K	Undef.	>=63mW	1%	0603	RC0603FR-0733KL	9238662	Farnell	1
R18	93K1	Undef.	>=63mW	1%	0603	CRCW060393K1FKFA	2138494	Farnell	1
L1, L2	4, 7uH	Undef.	Undef.	Undef.	6x6x2, 8	SRN6028-4R7M	2428246	Farnell	2
D1	B0530W-7-F	<=0, 7	Undef.	Undef.	SOD-123	B0530W-7-F	1843690	Farnell	1
D2	STPS1L30U	10, 26	Undef.	Undef.	DO-214AA	STPS1L30U	1467550	Farnell	1
M1, M2	NDS331N	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	NDS331N	1839006	Farnell	2
SC1, SC2, SC3, SC4	15F or 10F	2, 7	Undef.	Undef.	TH	HV1030-2R7106-R	2148486	Farnell	4
U1	MCP3424	Undef.	Undef.	Undef.	SOIC-14	MCP3424-E/SL	1630424	Farnell	1
U3	MCP1525T	2, 5	Undef.	Undef.	SOT-23	MCP1525T-I/TT	9758500	Farnell	1
IC2	TPS61201	3, 3	Undef.	Undef.	QFN	TPS61201DRCT	1564952	Farnell	1
U5	ZSPM4523	2, 65	Undef.	Undef.	QFN16	ZSPM4523AA1W	2322440	Farnell	1
X3 - Header	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 25mm pitch	10114830-10102LF	2100756	Farnell	1
X3 - Receptable	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 25mm pitch	10114826-00002LF	2100709	Farnell	1
X3 - Contact	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 25mm pitch	10114827-001LF	2100725	Farnell	3
X1, X4, X5, X6	5pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 27 pitch	M52-5050545	1099547	Farnell	4
X1, X4, X5, X6	25 pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 27 pitch	HTMS-125-01-G-S	1930699	Farnell	1
JP2W	3Pins	Undef.	Undef.	Undef.	2, 54 pitch	61300311021	2356177	Farnell	1
Jumper ON/OFF	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	2, 54 pitch	881545-2	1654806	Farnell	1
SOLAR PANEL	66mA	5, 5V	0, 33W	Undef.	60x60			Ebay	1

Tabela G.4: Lista de material do módulo *harvester* - lítio;

Design P/N	Value	Voltage	Power	Tolerance	Package	Man. Reference	Seller Reference	Seller Link	Quantity
C2, C3, C5, C7, C8, C9, C17, C18, C19	100nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0603	MC0603B104K160CT	1759016	Farnell	9
C4, C6, C10, C11	10nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	1206	JMK316B7106KL-T	2112908	Farnell	4
C12, C20, C21	10nF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0805	MC0805B106K6R3CT	2320851	Farnell	3
C1	22pF	>=6, 3	Undef.	Undef.	0603	MC0603N220K500CT	2309012	Farnell	1
R12, R13	0, 05R	Undef.	0, 5W	0, 5%	1206	LVK12R050DER	1462296	Farnell	2
R6	0, 05R	Undef.	0, 5W	1%	1207	LVK12R050FER	1462290	Farnell	1
R17, R22, R25, R28, R31, R37, R41, R44	39K2	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	RP73PF1J39K2BTDF	2116848	Farnell	8
R16, R21, R24, R27, R30, R36, R40, R43	75K	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	RP73PF1J75KBTDF	2116878	Farnell	8
R20, R23, R26, R29	47K5	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	RP73PF1J47K5BTDF	2116857	Farnell	4
R9	470R	Undef.	>=63mW	Undef.	0603	RC0603FR-07470RL	9238441	Farnell	1
R15, R35, R39, R42	178K	Undef.	>=63mW	0, 1%	0603	MCTC0525B1783T5E	1576043	Farnell	4
R1, R8, R11	10K	Undef.	>=63mW	5%	0603	CRGH0603J10K	2331740	Farnell	3
R10, R14	10K	Undef.	>=63mW	1%	0603	CRCW060310K0FKTA	1652827	Farnell	2
R3	46K4	Undef.	>=63mW	1%	0603	CRCW060346K4FKEA	2138468	Farnell	1
R2	82K5	Undef.	>=63mW	1%	0603	CRCW060382K5FKEA	1469840	Farnell	1
TH1	10K	Undef.	Undef.	5%	0603	ERTJ1VG103FA	1892611	Farnell	1
L3	2, 2nH	Undef.	Undef.	Undef.	6x6x2, 8	SRN6028-2R2Y	2428242	Farnell	1
L1	4, 7uH	Undef.	Undef.	Undef.	6x6x2, 8	SRN6028-4R7M	2428246	Farnell	1
D1	B0530W-7-F	<=0, 7	Undef.	Undef.	SOD-123	B0530W-7-F	1843690	Farnell	1
D2	STPS1L30U	0, 26	Undef.	Undef.	DO-214AA	STPS1L30U	1467550	Farnell	1
M1	NDS331N	Undef.	Undef.	Undef.	SOT-23	NDS331N	1839006	Farnell	1
BAT1	2050mA	3, 7	Undef.	Undef.	TH	103456A-1S-3M	2401856	Farnell	1
U1	MCP3424	Undef.	Undef.	Undef.	SOIC-14	MCP3424-E/SL	1630424	Farnell	1
U3	MCP1525T	2, 5	Undef.	Undef.	SOT-23	MCP1525T-I/TT	9758500	Farnell	1
IC1	TPS3803	Ajust	Undef.	Undef.	SC-70	TPS3803-01DCKRG4	1234719	Farnell	1
U2	LM3671	3, 3	Undef.	Undef.	SOT-23	LM3671MF-3.3/NOBP	1685767	Farnell	1
U5	ZSPM4521	4, 175	Undef.	Undef.	QFN16	ZSPM4521AA1W	2322438	Farnell	1
X3 - Header	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 25mm pitch	10114830-10102LF	2100756	Farnell	1
X3 - Receptable	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 25mm pitch	10114826-00002LF	2100709	Farnell	1
X3 - Contact	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 25mm pitch	10114827-001LF	2100725	Farnell	3
X1, X4, X5, X6	5pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 27 pitch	M52-5050545	1099547	Farnell	4
X1, X4, X5, X6	25 pins	Undef.	Undef.	Undef.	1, 27 pitch	HTMS-125-01-G-S	1930699	Farnell	1
JP1	3 Pins	Undef.	Undef.	Undef.	2, 54 pitch	640457-3	588726	Farnell	1
JP2W	3Pins	Undef.	Undef.	Undef.	2, 54 pitch	61300311021	2356177	Farnell	1
Jumper ON/OFF	2pins	Undef.	Undef.	Undef.	2, 54 pitch	881545-2	1654806	Farnell	1
SOLAR PANEL	66mA	5, 5V	0, 33W	Undef.	60x60			Ebay	1

Apêndice H

Entradas e Saídas do Microcontrolador

Neste apêndice são apresentadas as listas de entradas e saídas do microcontrolador, encontram-se divididas por categorias: Lista de entradas digitais; Lista de saídas digitais; Lista de sinais analógicos; Lista de sinais de comunicação; Por último lista dos sinais para programação do robô.

H.1 Lista de I/O Microcontrolador

Tabela H.1: Lista de entradas digitais do microcontrolador;

Function	Pin	Note	Module
Encoder Right Direction	PTB8	Normal Input	Base
Encoder Left Direction	PTB9	Normal Input	Base
Interrupt MPU9250	PTA15	External Interrupt	Sensor
MICRO SD Card Detect	PTC16	Normal Input	Base
Interrupt ISL29125 Color S.	PTA16	External Interrupt	Base
Fail MPPT Signal	PTE5	Normal Input	Solar
USB Voltage detect	PTB10	Normal Input	Base
Supercap State Charger	PTB19	Normal Input	Base
Li-ion State Charger	PTB18	Normal Input	Base
Interrupt Comp Micro F L	PTD7	External Interrupt	Sensor
Interrupt Comp Micro F R	PTD6	External Interrupt	Sensor
Interrupt Comp Micro R C	PTD5	External Interrupt	Sensor

Tabela H.2: Lista de saídas digitais do microcontrolador;

Function	Pin	Note	Module
PWM Enable Motor Right	PTE20	Pwm	Base
Phase Motor Right	PTE4	Normal Output	Base
Nano Sleep Motor Right	PTE3	Normal Output	Base
PWM Enable Motor Left	PTE31	Pwm	Base
Phase Motor Left	PTA17	Normal Output	Base
Nano Sleep Motor Left	PTB11	Normal Output	Base
Power Enable i2c FET P	PTE2	Normal Output	Base
Power enable Micro	PTA14	Normal Output	Sensor
Led Red Front	PTA4	Normal Output	Base
Led Green Front	PTA5	Normal Output	Base
Led Blue Front	PTA12	Normal Output	Base
Led Red Rear	PTD4	Normal Output	Base
Led Green Rear	PTA1	Normal Output	Base
Led Blue Rear	PTA2	Normal Output	Base
Power LMC555 IR COM	PTD0	Normal Output	Base
Buzzer PWM	PTE21	Pwm	Base
AS5600 Power MOSFET N	PTC6	Normal Output	Base
AS5600 Power MOSFET P	PTC5	Normal Output	Base
SPI Power MOSFET P	PTC4	Normal Output	Base
Enable MPPT Control	PTC0	Normal Output	Harvester
Boost Power Save	PTC7	Normal Output	Harvester
Reset TCA9548	PTC3	Normal Output	Base
Led white pwm	PTE29	Pwm	Base

Tabela H.3: Lista de sinais analógicos do microcontrolador;

Function	Pin	Note	Module
Encoder Left Output_AS_MR	PTC2	Analog Input 16bits	Base
Encoder Right Output_AS_ML	PTC1	Analog Input 16bits	Base
Analog microphone F L	PTB0	Analog Input 16bits	Sensor
Analog microphone F R	PTB1	Analog Input 16bits	Sensor
Analog microphone R C	PTB2	Analog Input 16bits	Sensor
Temperature Battery	PTB3	Analog Input 16bits	Harvester
Dac_Comparator MIC	PTE30	Analog output 16bits	Sensor

Tabela H.4: Lista de sinais de comunicação do microcontrolador;

Function	Pin	Note	Module
SDA0 - BUS I2C0	PTC9	I2C0 BUS	Base
SCL0 - BUS I2C1	PTC8	I2C0 BUS	Base
SDA1 - BUS I2C1	PTC11	I2C1 BUS	All
SCL1 - BUS I2C1	PTC10	I2C1 BUS	All
MISO - BUS SPI	PTD3	SPI0 BUS	Base
MOSI - BUS SPI	PTD2	SPI0 BUS	Base
SCK - BUS SPI	PTD1	SPI0 BUS	Base
CE_NRF24L01	PTC12	CE_Spi	Base
CSN_NRF24L01	PTC13	Chip Select Spi	Base
IRQ_RF_NRF24L01	PTA13	External Interrupt	Base
CSN_MICRO_SD	PTC17	Chip Select Spi	Base
TX_UART_IR	PTE22	Uart2 Comm tx	Sensor
RX_UART_IR	PTE23	Uart2 Comm rx	Sensor
TX_UART_PC	PTE1	Uart1 Comm Rx	Base
RX_UART_PC	PTE0	Uart1 Comm Tx	Base

Tabela H.5: Lista de sinais para programação do microcontrolador;

Function	Pin	Note	Module
KL25_SWD_CLK	PTA0	Clock	Base
SWD_DIO_TGTMCU	PTA3	D_I/o	Base
RST_TGTMCU	RESET_B	Reset	Base

Apêndice I

Códigos em Matlab®

Neste apêndice são apresentados códigos em Matlab® necessários para calcular parâmetros relativos a circuitos integrados usados. Visto que é um projeto *Open Source* é importante a disponibilização de pormenores relativos ao projeto do robô.

I.1 MCP3424

```
clc
clear all
close all

R2=470e3
VOUT=3.3
VIN=6

%obtencao de r1 atraves dos dados acima
R1=(R2*(VIN-VOUT))/VOUT

R1=590e3
% divisor de tensao
VOUT=(R2/(R2+R1))*VIN

%VOUT=2.048;
%VINMAX=VOUT/(R2/(R2+R1))

disp('Calc for division star');

%%
% VOLTAGE DIVIDER FOR THREE RESISTANCES

%
%              Vout
%              |
% 2.5V-----R1-----R2-----GND
%              |
%              |
```

```

%           R3
%           |
%           |
%           Vin

VREF=2.5;
VIN=0.2;
R1=30.9e3;
R2=39.2e3;
R3=127e3;

R2PR3=(R2*R3)/(R2+R3);
R1PR2=(R1*R2)/(R1+R2);

VOUT=((R2PR3/(R1+R2PR3))*VREF)+((R1PR2/(R3+R1PR2))*VIN)

VOUT=1.25433;
VIN_one=-(((R2PR3)/(R1+R2PR3))*VREF)-VOUT)/((R1PR2)/(R3+R1PR2))

VOUT=1.24236;
VIN_two=-(((R2PR3)/(R1+R2PR3))*VREF)-VOUT)/((R1PR2)/(R3+R1PR2))
V_one_v_two=VIN_one-VIN_two

%SYMS -> FOR SIMPLIFY :)
syms r1 r2 r3 r2pr3 vref r1pr2 vout_pos vout_neg

r2pr3=((r2*r3)/(r2+r3));
r1pr2=((r1*r2)/(r1+r2));

vin_pos=-(((r2pr3)/(r1+r2pr3))*vref)-vout_pos)/((r1pr2)/(r3+r1pr2))

vin_neg=-(((r2pr3)/(r1+r2pr3))*vref)-vout_neg)/((r1pr2)/(r3+r1pr2))

%Vin final diferential :)
vout_dif=simplify(vin_pos-vin_neg)

```

I.2 LTC3619

```

clc
clear all
close all

%Calculate Rlimite for Ilimite charge battery:
A=0.4;
Rlim=(55000-A)/A

%Calculate Imax knowing RLim:
Rlim=158e3

```

```

Imax=(55000-1)/Rlim

%Calculate to R1 knowing R2 and Vout:    VOUT-R2-FB-R1-GND
disp('Calculate resistor for Vout select');
R1=(82e3*0.99)
Vout=2.65+0.26
R2=(R1*(Vout-0.6))/0.6
R2=(316e3*1.01)
Voutfinal=0.6*(1+(R2/R1))

disp('Calculate resistor for Current limiter:');
%Calculate L1 knowing Vin, Imax
Vout=2.65+0.26;
Vin=5;
Imax=0.4;
I=0.4*Imax;
L1=( (Vout) / (2.25e6*I) ) * (1- (Vout/Vin) )

```

I.3 TPS3803-01

```

clc
clear all
close all

R2=46.4e3
VDD=3.4058;
VOUT=1.226;

R1=(-R2*(VOUT-VDD))/VOUT

R1=82500
VDD_POSTERIOR=(VOUT*(R1+R2))/R2

```

I.4 TPS61201

```

clc
clear all
close all
% FALLING VOLTAGE =0.250V
VDD=0.95; %VMIN ADMISSIVEL
R4=33e3;
VOUT=0.250;
R3=(-R4*(VOUT-VDD))/VOUT

```



```
R3=93100
VDD_POSTERIOR=(VOUT*(R3+R4))/R4
% RISING VOLTAGE =0.350V
VOUT=0.350;
VDD_POSTERIOR=(VOUT*(R3+R4))/R4
```

Apêndice J

Modo de programação - SWD

No presente apêndice é dado a conhecer o método usado para programar o robô desenvolvido. É explicado em detalhe quais os passos necessários para a conexão do placa programadora ao robô e os pontos fulcrais tidos em conta.

J.1 *Hardware* necessário

Para programar o robô é necessário *hardware* de programação, ou seja, um programador e a ligação física entre os dois dispositivos. A figura J.1 apresenta o diagrama para a programação.

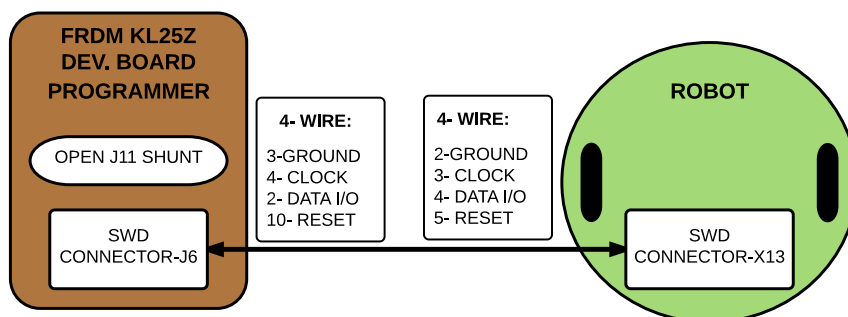


Figura J.1: Diagrama de programação do robô, programador - ligação - robô;

O programador utilizado está integrado na placa de desenvolvimento usada durante a realização do projeto, FRDM-KL25 (figura3.19) fabricada pela Freescale[®]. É utilizado o módulo SWD para programar o robô e foi adotado devido ao seu custo ser significativamente inferior ao de um programador específico universal. No entanto para usar a placa de desenvolvimento na programação é necessário proceder a alterações de *hardware*. Os passos que devem ser seguidos encontram-se nas imagens J.2, J.3 e J.4.

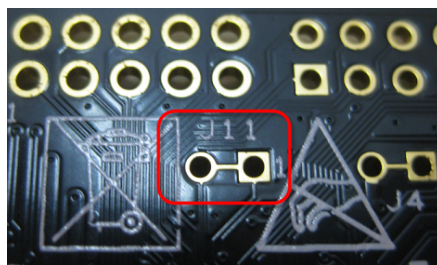


Figura J.2: Passo 1: Detecção do *solder jumper* SJ11;

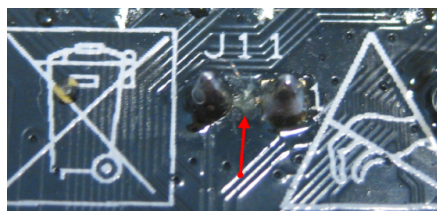


Figura J.3: Passo 2: Corte do *solder jumper* SJ11;

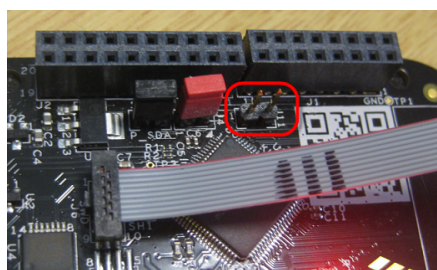


Figura J.4: Passo 3: Soldadura de *header-pitch 2.54mm* no *solder jumper* SJ11;

Sempre que se deseja programar, para além da ligação física entre a placa de desenvolvimento e o robô é necessário retirar o *jumper* de modo a isolar o microcontrolador que se encontra integrado na placa. Depois de efetuadas as alterações é necessário fazer a ligação física utilizando um cabo de quatro condutores, ligando assim o programador (conector J6) ao robô (conector X13).

J.2 *Drivers e firmware necessários*

Para que seja possível a utilização da plataforma ARM[®]mbedTM [65], é necessária a colocação de um *firmware* na placa FRDM kl25Z e instalar os *drivers* USB para o seu reconhecimento.

Drives USB: <https://developer.mbed.org/handbook/Windows-serial-configuration>

Firmware FRDM KL25Z: <https://developer.mbed.org/platforms/KL25Z/>

É importante salientar que o sistema operativo *Windows 8* por vezes não

reconhece a placa com o *firmware* de origem, sendo desejável colocar o *firmware* na placa a partir de outro sistema operativo. Depois de concluídos todos os passos descritos, irá aparecer no computador uma imagem J.5 com a unidade *mbedTM*.

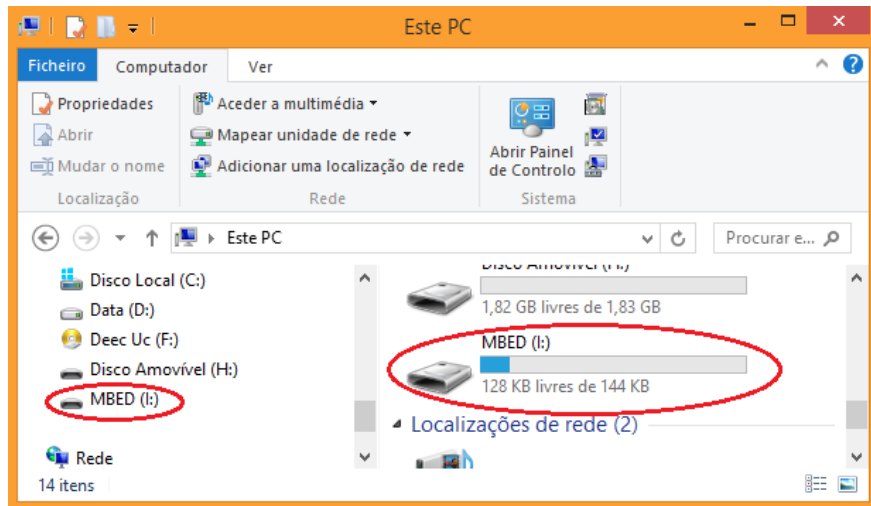


Figura J.5: Disco criado pela placa FRDM KL25Z através das *drivers mbedTM*;

Depois de compilar o ficheiro na plataforma *online mbedTM*, este faz automaticamente *download* para o computador, sendo necessário arrastar o ficheiro para o interior do disco MBED e de seguida pressionar o botão RESET da placa.

Apêndice K

Manual de Iniciação Rápida

O manual de iniciação rápida tem como objetivo a integração do utilizador com robô desenvolvido, numa fase inicial é apresentada a legenda dos componentes essenciais, de seguida uma lista de instruções ordenadas de forma a que o utilizador consiga iniciar o robô com sucesso e por último uma lista de perguntas frequentes e respetivas respostas.

K.1 Legenda dos pontos essenciais

As figuras seguintes exibem a legenda de cada módulo que compõem o robô, por fim é apresentada a montagem final de todos os módulos com os respetivos cuidados a ter em conta.

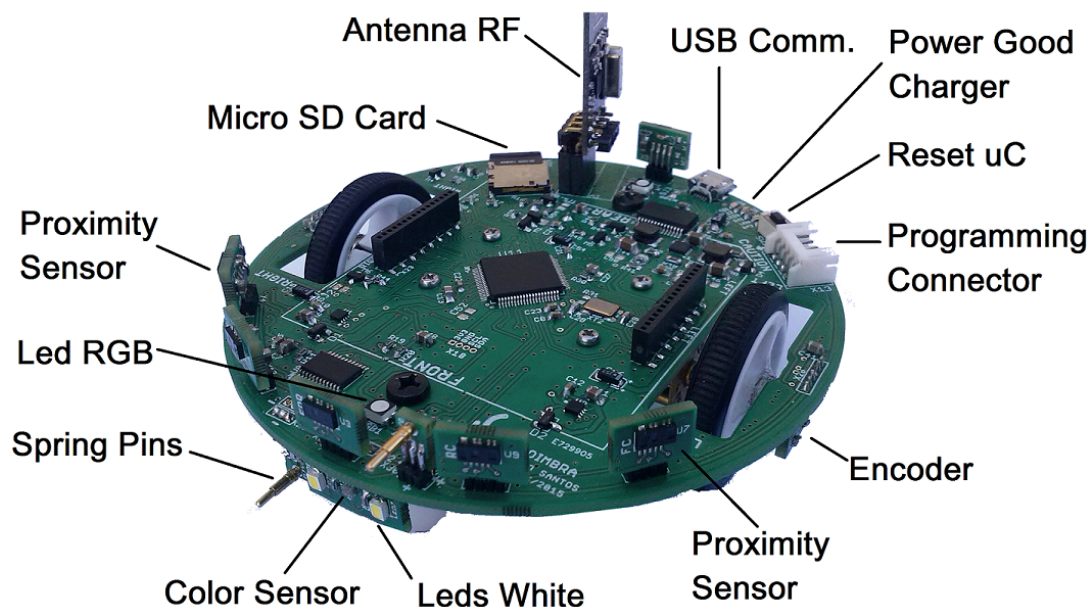


Figura K.1: *Layer Top* do módulo *base*;

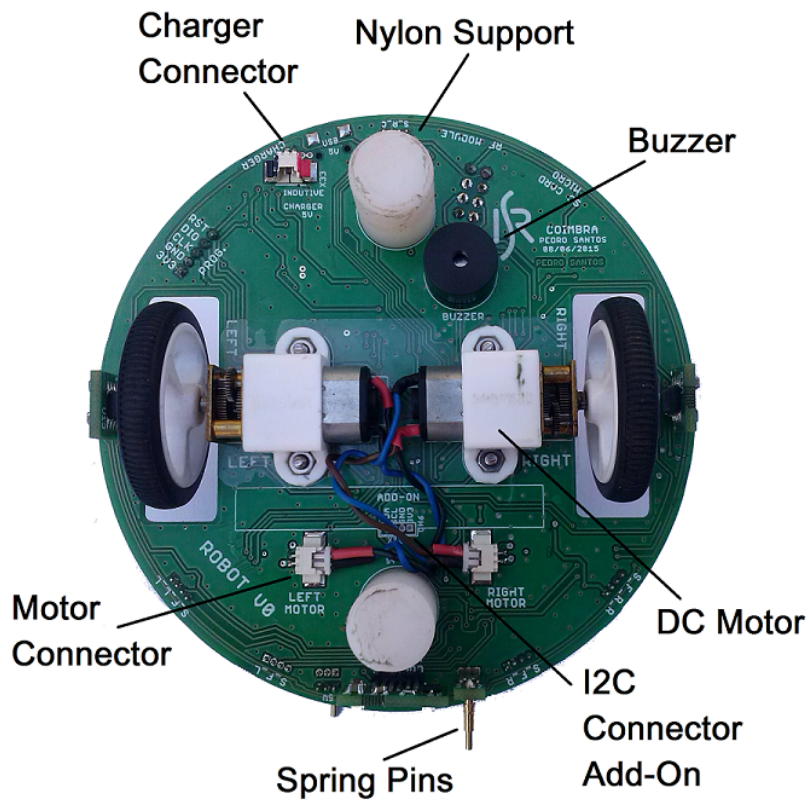


Figura K.2: *Layer Bottom* do módulo *base*;

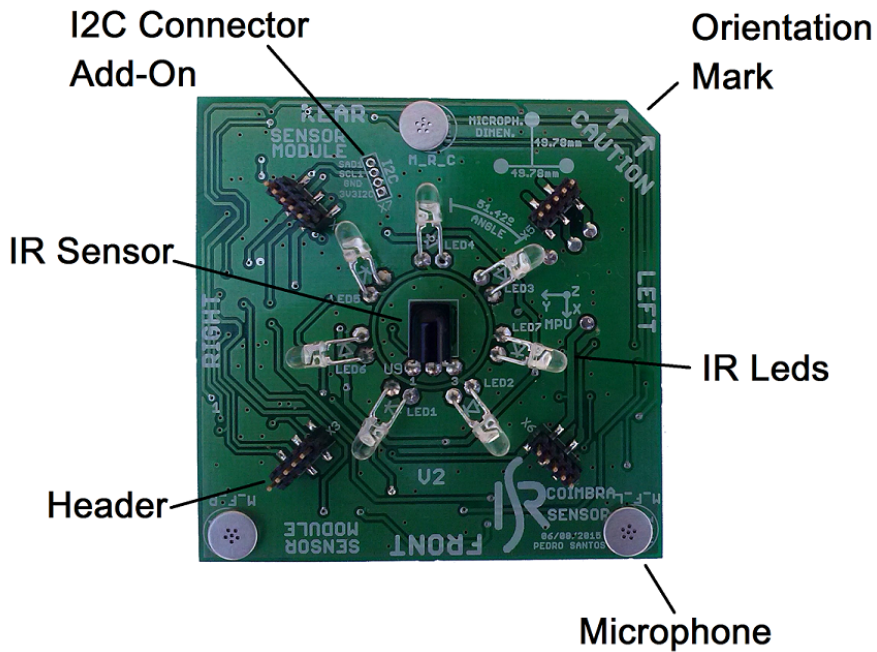


Figura K.3: *Layer Top* do módulo *sensor*;

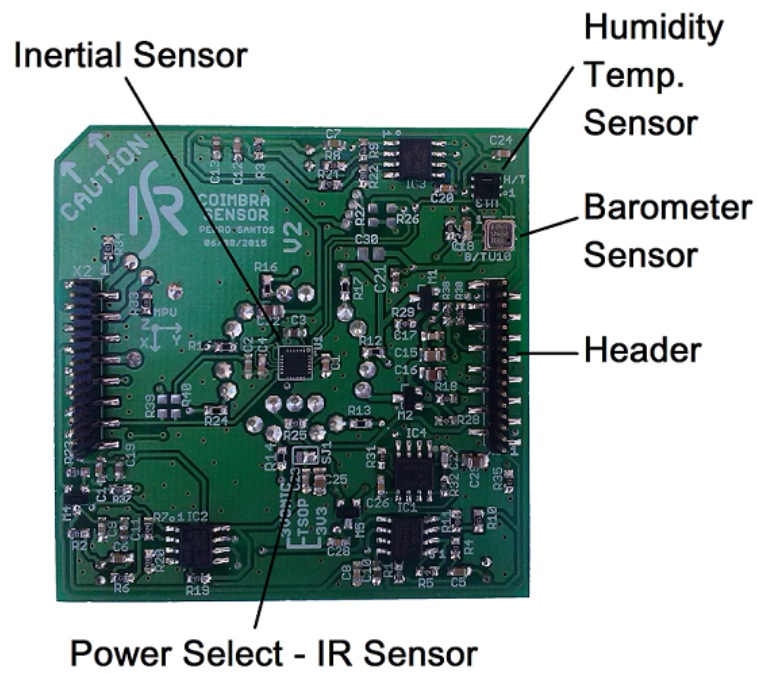


Figura K.4: *Layer Bottom* do módulo sensor;

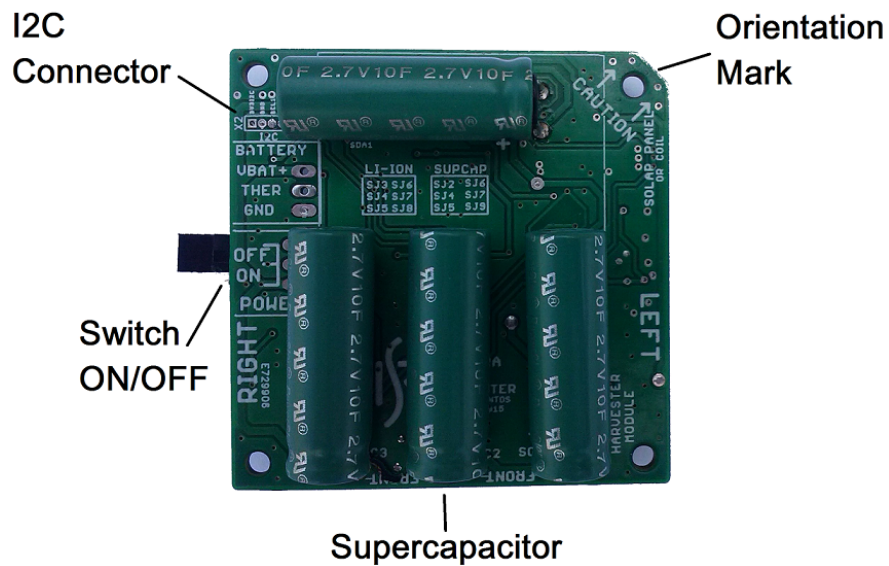


Figura K.5: *Layer Top* do módulo harvester sem painel;

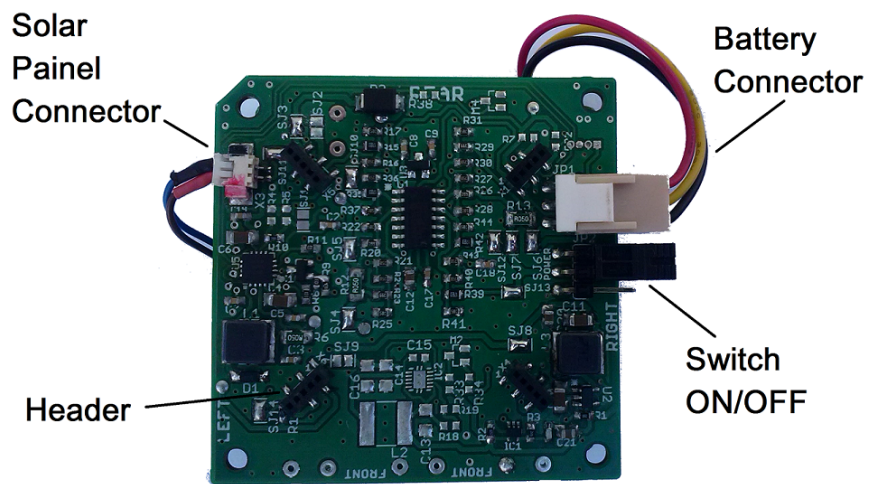


Figura K.6: *Layer Bottom* do módulo *harvester*;

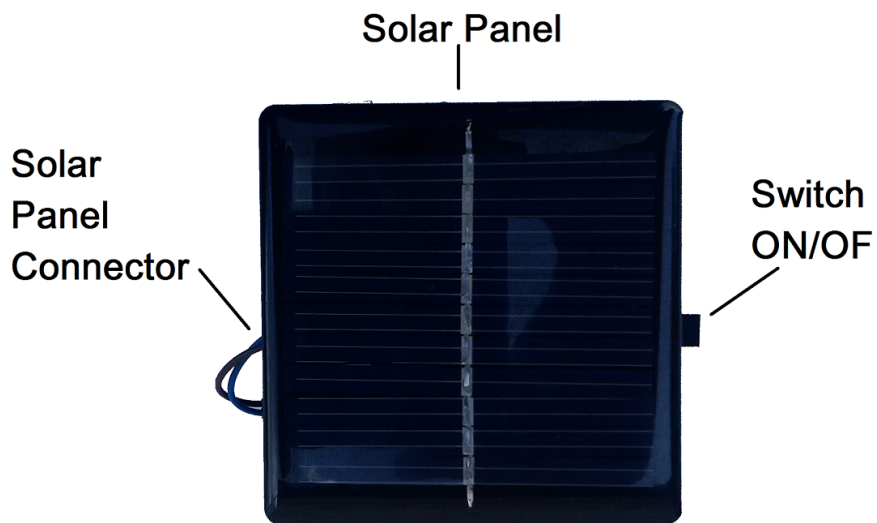


Figura K.7: *Layer Top* do módulo *harvester* com painel;

A figura K.8 exibe a montagem final com todos os módulos, é necessário respeitar as marcas de orientação indicadas, caso ocorra uma troca pode danificar os componentes que o robô integra.

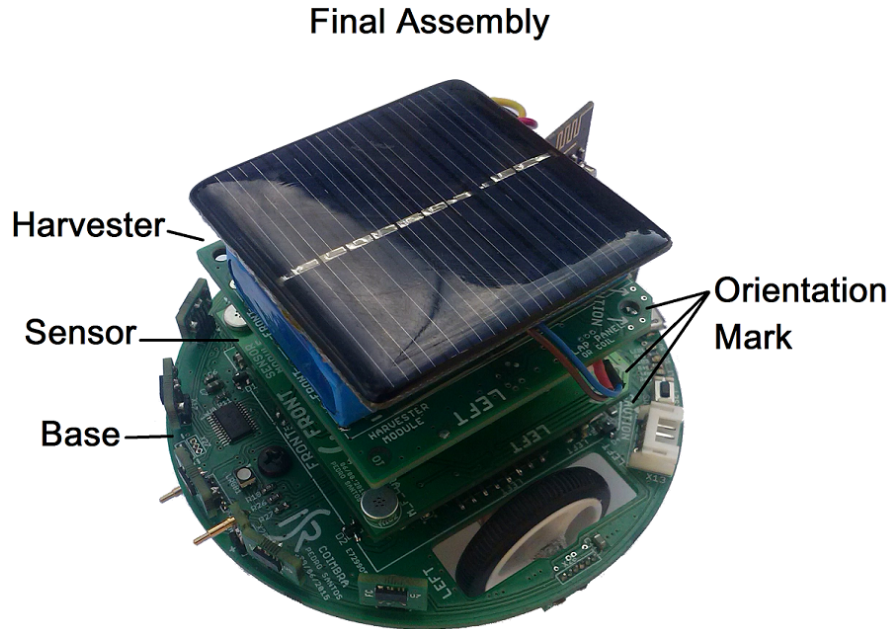


Figura K.8: Montagem final com todos os módulos;

K.2 Instruções e Procedimentos

Depois de visualizados os módulos, legendas e montagem final, são enumerados um conjunto de procedimentos para que o utilizador inicie com sucesso o robô, por forma a utiliza-lo.

Depois de adquiridos os módulos que o compõem deve-se dar início às seguintes instruções:

1. Montagem dos módulos como mostra a figura K.8, tendo em conta a orientação de cada módulo;
2. Ligar o painel solar ao conector (*Solar Panel Connector*) indicado na figura K.6, tendo em conta se a polaridade está correta;
3. Em caso de utilização da bateria de lítio, deve ser ligada ao conector (*Battery Connector*) indicado na figura K.6, verificando se a polaridade está correta;
4. Verificar se os conectores dos motores (*Motor Connector*) se encontram ligados ao módulo *base*, figura K.2;

5. Depois de o robô estar montado e com todas as ligações efetuadas, deve ser colocado à carga a partir de uma das soluções possíveis, por exemplo optar pela utilização de um cabo *Micro USB Type B* ligado ao computador.
6. Para proceder à programação é necessário instalar no computador as *drivers* que se encontram na página *online*:

- <https://developer.mbed.org/handbook/Windows-serial-configuration>

Posteriormente é necessário transferir o *firmaware* que se encontra na página:

- <https://developer.mbed.org/platforms/KL25Z/>

O *Windows 8* por vezes não reconhece a placa com o *firmaware* de origem, uma solução possível é efetuar esta operação noutro sistema operativo;

7. Ligar a placa programadora FRDM-KL25 ao USB do computador e o cabo de programação ao conector do robô (*Programming Connector*), indicado na figura K.1;
8. Abrir o programa *Hello World* na plataforma ARM®mbed™ e compilar, verificando a pasta de transferências do computador;
9. Arrastar o ficheiro da pasta de transferências para o disco mbed™ existente na diretoria Meu Computador;
10. Pressionar o botão (*Reset uC*) indicado na figura K.1.

Depois de efetuados os passos anteriores o robô deve ligar os *Leds RGB* e os *Leds white* alternadamente.

K.3 Questões Frequentes

Na presente secção são apresentadas as soluções às questões mais frequentes que podem existir durante a utilização do robô.

A baixo encontra-se a lista de questões com a resposta de resolução do problema:

1. **O robô não funciona mesmo com o *Switch ON/OFF* no estado ON?**
 - Deve novamente confirmar se o *Switch ON/OFF* se encontra na posição **ON**, se sim, deve colocar o robô à carga, colocando o *Switch* na posição **OFF** e esperar que os *leds* de (*Power Good Charger*) se apaguem. À partida se voltar a colocar *Switch* na posição **ON**, o robô irá funcionar;

2. O robô não carrega a partir do USB do computador?

- Deve ser trocado o cabo que liga o robô ao computador pois pode estar danificado. Se o problema persistir deve testar um USB de outro computador;

3. A comunicação entre o robô e o computador não funciona corretamente?

- Deve ser revista a velocidade de comunicação (*Baud Rate*) que se encontra definida tanto no robô como no computador. Depois de estarem iguais, a comunicação deve funcionar na perfeição. Se o problema persistir deve ser trocado o cabo USB usado pois pode estar danificado;

4. Um dos motores ou os dois motores não funcionam corretamente?

- Deve ser verificado conector (*Motor Connector*) situado na parte de baixo do módulo da *base*, figura K.1, se o problema persistir é provavelmente erro no *firmware* desenvolvido, deve ser testado um código simples para verificação dos motores;

5. Não é possível programar o robô?

- Deve ser verificada na diretoria Meu Computador se aparece o disco proveniente da placa FRDM-KL25, se sim, o problema pode estar na ligação entre a placa programadora e o robô, ou seja deve ser revista a ligação física, observando se o conector (*Programming Connector*) está bem encaixado e se os fios aparentam estar cortados. Se existirem anomalias devem ser reparadas seguindo o esquema de ligações e reprogramar;

6. Um sensor não funciona corretamente?

- Provavelmente existe um erro no código desenvolvido, é aconselhável descarregar um código simples do respetivo sensor e avaliar os resultados, se o problema não for ultrapassado é o *hardware* danificado. Deve ser verificado o MOSFET que alimenta o barramento I2C e o sensor em causa;

7. O MPPT não responde aos comandos por I2C?

- O MPPT só responde aos comandos enviados por I2C corretamente se existir luz a incidir no painel solar, ou seja é necessário expor o robô à radiação solar para escrever ou ler nos registos do MPPT;

8. O MICRO SD CARD não funciona?

- O MICRO SD CARD deve se formatado em **FAT** e a sua capacidade não deve exceder os 2Gb, de notar que a alimetação do BUS SPI deve estar ativa;

9. A antena RF não funciona?

- Deve verificar se a alimentação do BUS SPI se encontra ligada, caso o problema insista deve descarregar para o robô um código simples de novo a avaliar o comportamento;

10. Trocou a orientação de um módulo e o robô não funciona?

- Deve ser contactado o responsável pelo projeto de modo a avaliar os danos causados, para possível reparação.

Apêndice L

Interface de Testes ao Robô

No presente apêndice é exibida a aplicação desenvolvida em LabVIEW[®] com o intuito de testar alguns periféricos do robô. Foi dada maior relevância a questões relacionadas com energia mas no futuro a aplicação pode ser complementada de forma a testar todos os periféricos. Para perceber qual a topologia de comunicação usada é exibida a figura L.1.

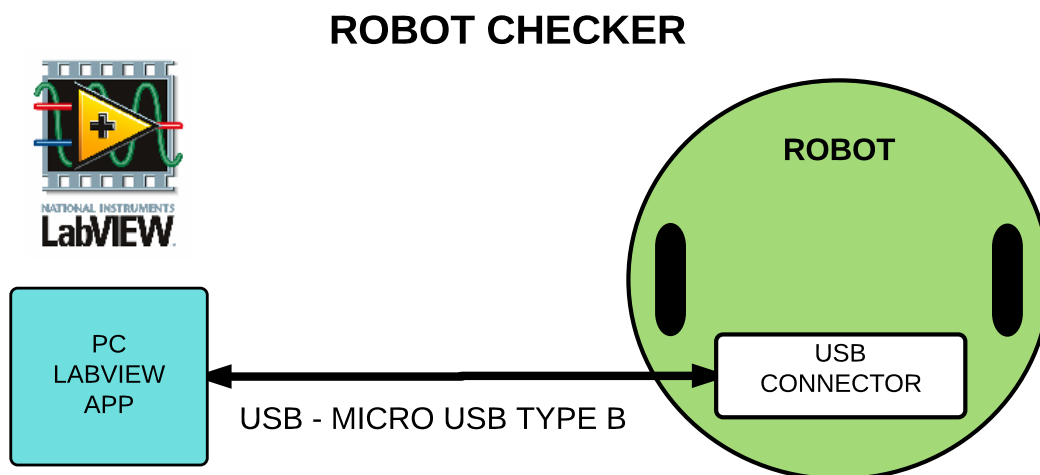


Figura L.1: Esquema de ligação do robô ao computador;

É visível na figura L.1 a utilização de um cabo USB para a ligação do computador ao robô, optou-se por esta solução devido a simplicidade na comunicação.

A figura L.2 apresenta o GUI (*Graphical User Interface*) desenvolvido para facilitar a interação com o utilizador, é possível conhecer dados em tempo real relativos ao medidor de potências, como a tensão do painel solar, potência de entrada e potência de saída. Existe ainda a possibilidade de alterar o estado dos principais atuadores do robô obtendo de imediato o *feedback* do consumo de energia. O gráfico denominado por *Angles - Wheels* exibe o ângulo atual de cada roda.

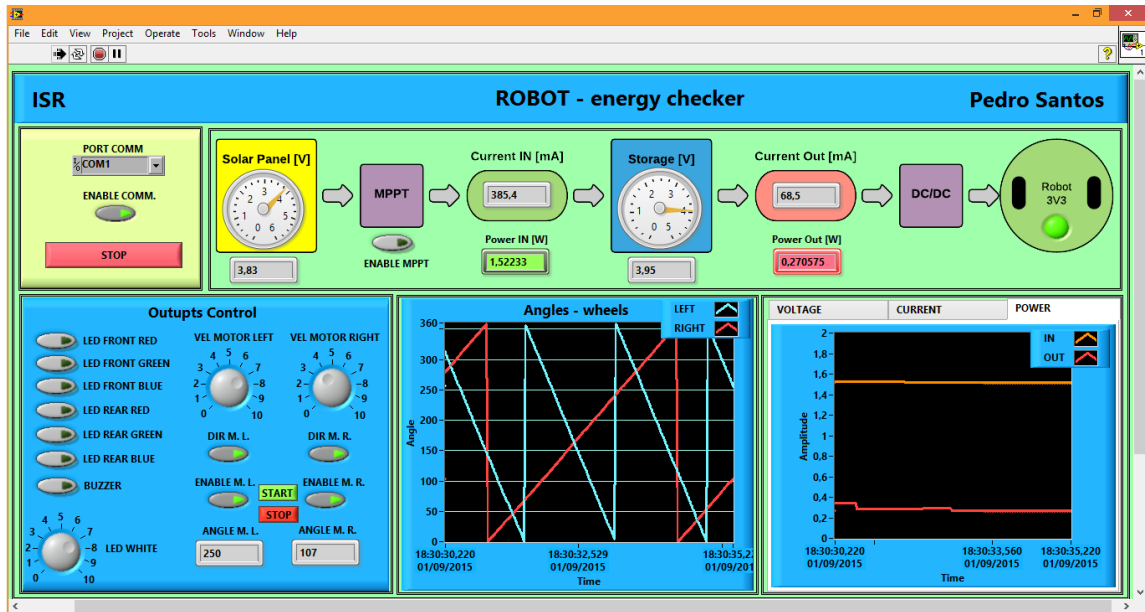


Figura L.2: GUI (*Graphical User Interface*) desenvolvido em LabVIEW[®] para testar o robô;

Os dados de calibração relativos aos medidores de potências encontram-se no apêndice F, para cada módulo *harvester* fabricado deve ser efetuada a calibração.

Apêndice M

Caixa de Transporte do Robô

No presente apêndice é ilustrada a caixa de transporte desenvolvida para o robô, o projeto foi elaborado a três dimensões num *software* apropriado e a caixa imprimida na impressora 3D. Para uma melhor percepção da estrutura física são exibidas as figuras M.1, M.2 e M.3.

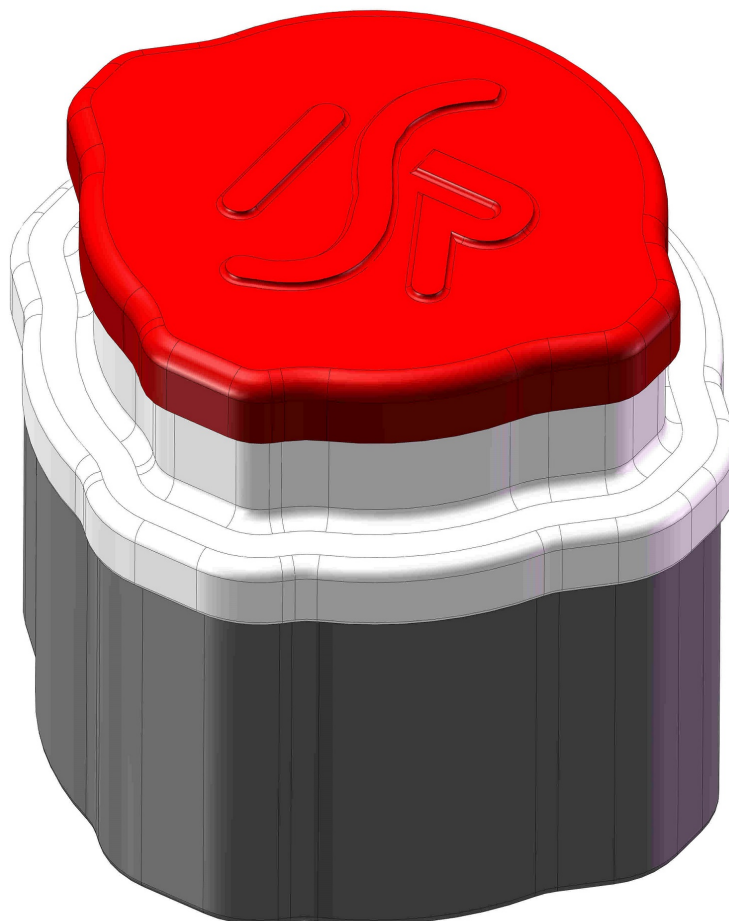


Figura M.1: Projeto 3D da caixa de transporte - caixa montada;

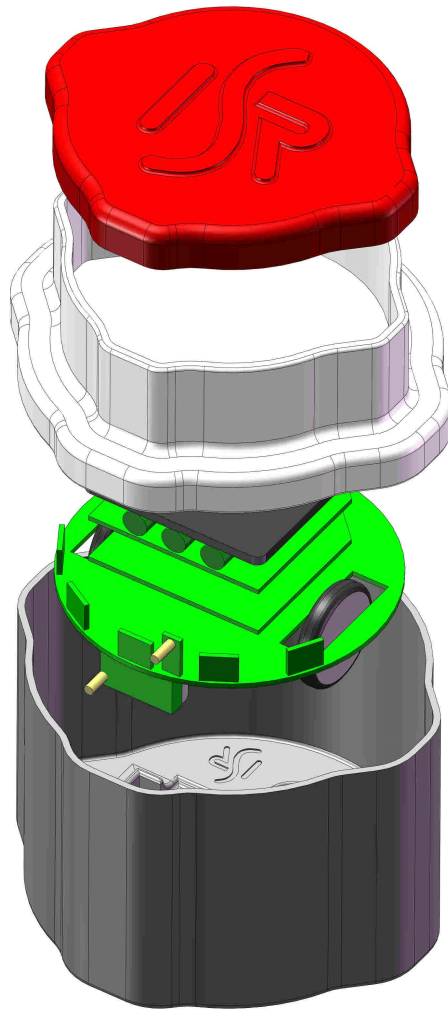


Figura M.2: Projeto 3D da caixa de transporte - caixa desmontada;

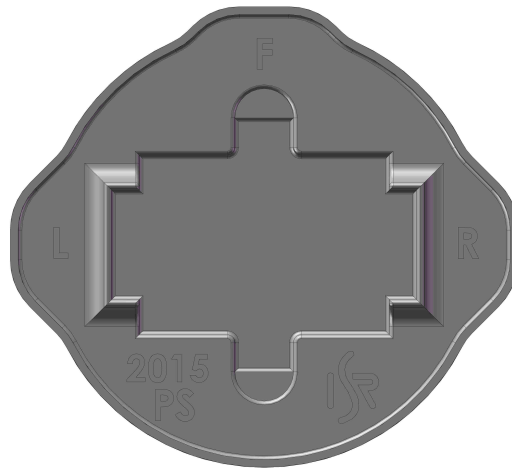
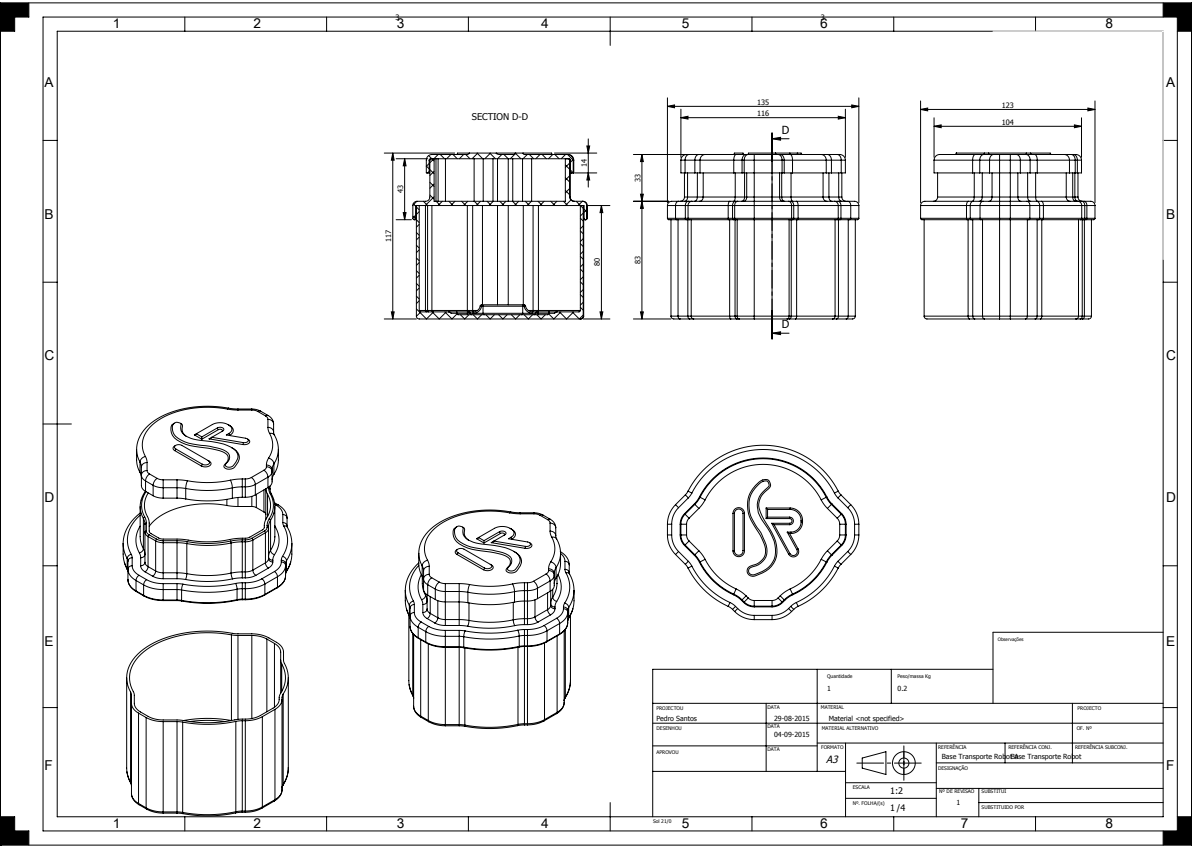


Figura M.3: Projeto 3D da caixa de transporte - base de acondicionamento;

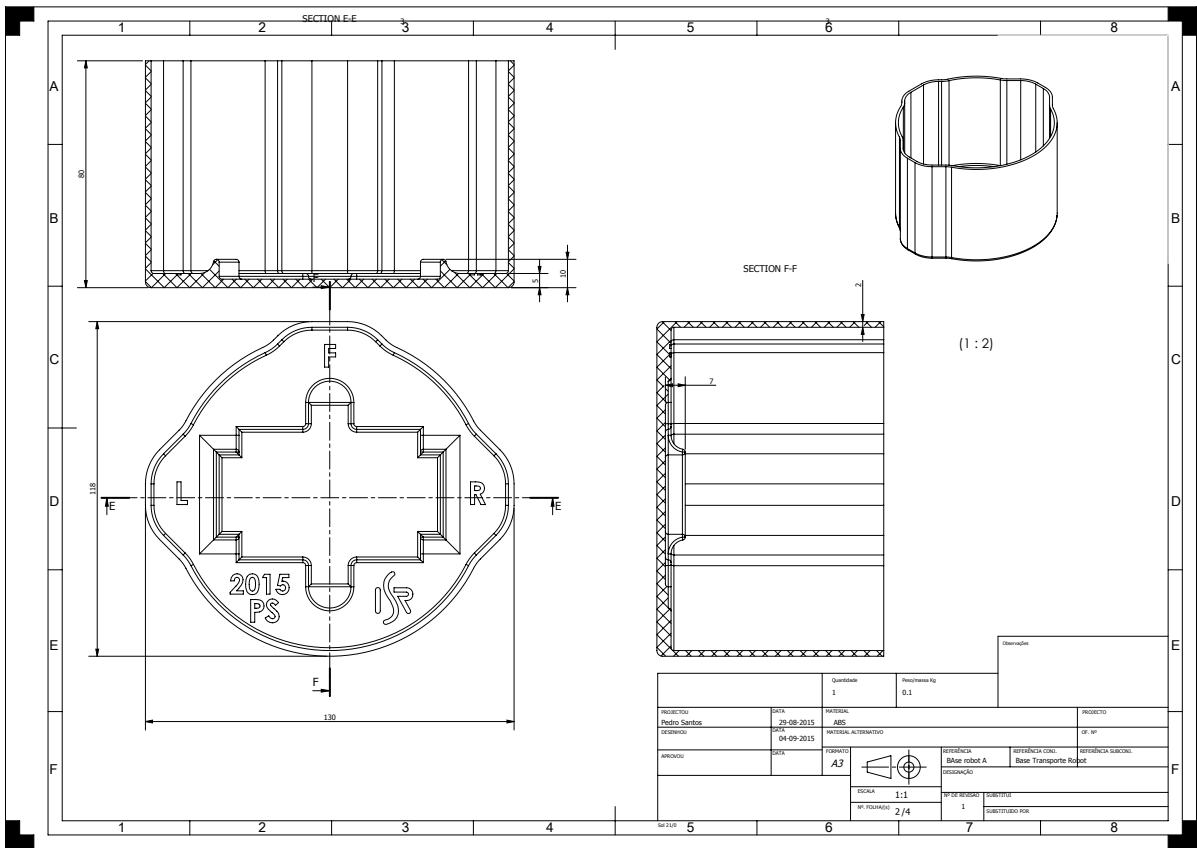
É visível nas imagens que a caixa é composta por uma base, uma tampa intermédia e uma tampa superior. A função da base é acondicionar o robô completo, a tampa intermédia para além de fechar a base serve de caixa para o módulo *harvester* que pode integrar o outro tipo de armazenamento de energia (supercondensadores ou bateria de lítio), por último a tampa final fecha a tampa intermédia.

O interior da base foi de desenhado de modo a que o robô encaixe nos suportes para um melhor acondicionamento, existe um retângulo visível na figura M.3 que tem como objetivo o acondicionamento da bobina de carga por indução *coil* 800mA do kit C.3.

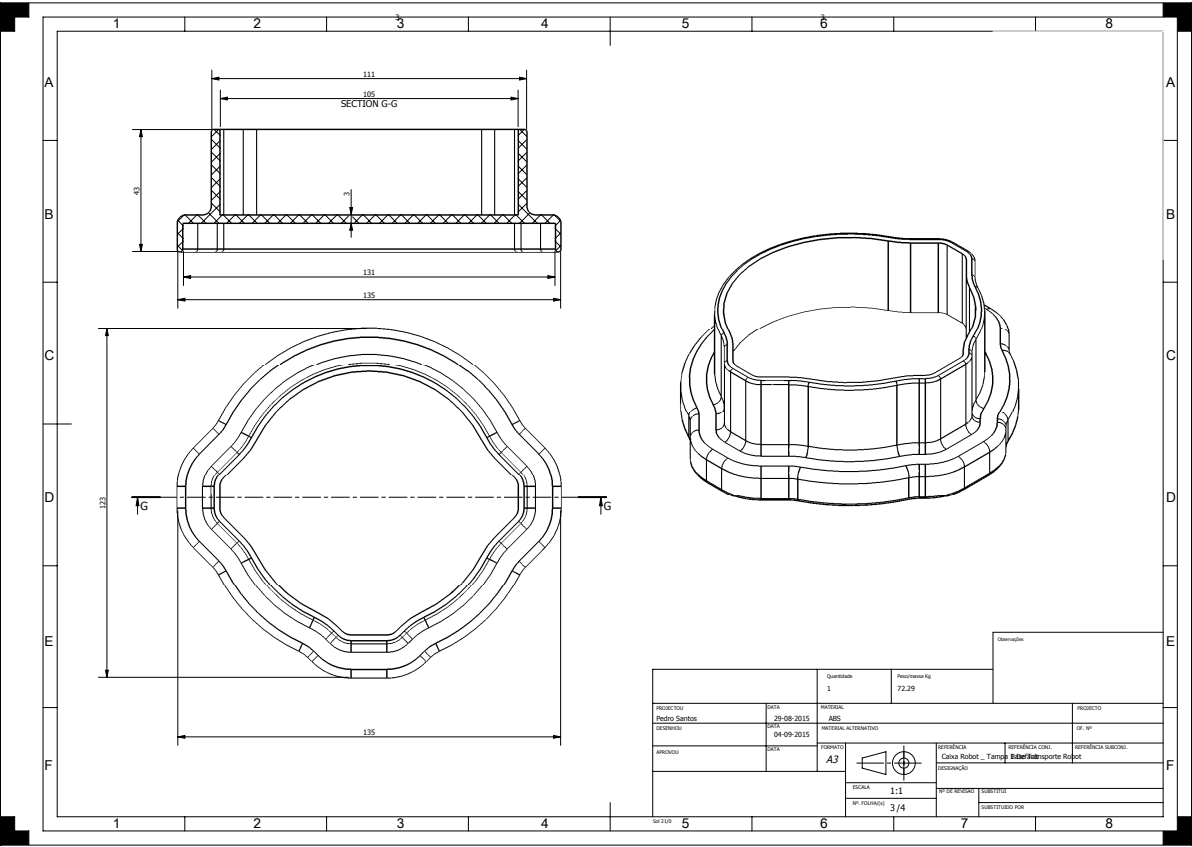
As páginas seguintes exibem o projeto planificado a 2D e respetivas medidas da caixa.



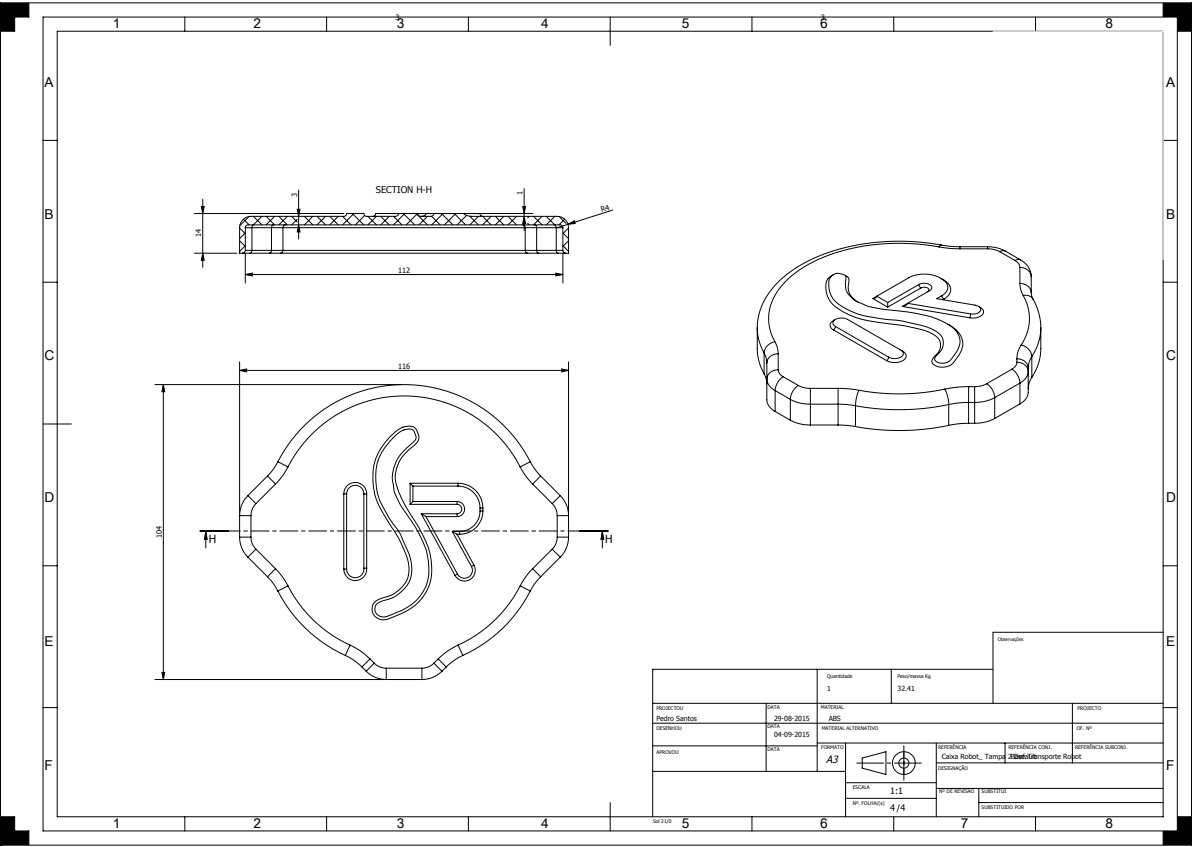
PROJETO:		Quantidade:	Projeções Kj:	Observações:	
Pedro Santos		1	0,2		
DATA:	VERSÃO:				
29-08-2015	<not specified>				
PROJETO:	PROJETO:				
04-09-2015	Material				
APROVADO:	DATA:	FORMAÇÃO:	REFERÊNCIA:	REFERÊNCIA LOCAL:	REFERÊNCIA SUBLOCAL:
A3			Base Transporte Robot	Base Transporte Robot	
ESCALA:		1/2			
Nº DE REVISÃO:		1			
Nº DE REVISÃO:		1/4			



PROJETO		Quantidade	Preço Unitário R\$	PROJETO	
Pedro Santos		1	0,1	nr. 01	
DATA	VERSÃO	REVISÃO ALTERNATIVO			
09-08-2015	ABS				
04-09-2015					
APROVADO	DATA	PROJETO	REFERÊNCIA	REFERÊNCIA LOCAL	REFERÊNCIA SUBLOCAL
AJ			Base robot A	Base Transporte Robot	
		ESCALA	1:1	QUANTIDADE	1
		nr. DE FOLHAS	2/4	SUSTITUIDO POR	



PROJETO:		Quantidade:	Projetado Kg:	Observações:	
Pedro Santos		1	72,29		
DATA:	MATERIAL:				
29-09-2015	ABS				
PROJETA:	MATERIAL ALTERNATIVO:				
04-09-2015					
APROVADO:	ESCALA:	REFERÊNCIA:	REFERÊNCIA LOCAL:	REFERÊNCIA SUBLOCAL:	
	A3		Caixa Robot - Tampa	Esterque Robot	
		Escala:		SISTEMA:	
		1:1		SISTEMA:	
		3/4		SISTEMA:	



PROJETO:		Quantidade:	Projeto em Kg:	Observações:	
Pedro Santos		1	32,41		
DATA:	VERSÃO:	PROJETO			
29-09-2015	ABS				
PROJETO:	REVISÃO ALTERNATIVO:	nr. nr.			
04-09-2015					
APROVADO:	DATA:	PROJETO:	REFERÊNCIA:	REFERÊNCIA LOCAL:	REFERÊNCIA SUBLOCAL:
		A3	Caixa Robot_Tampa	Transporte Robot	
		ESCALA:		PROJETO:	
		1:1		CONSTITUI:	
		nr. folhas:		SUBSTITUÍDO POR:	
		4/4			

Apêndice N

Poster IEEE-RAS - Robô Desenvolvido

Energy harvesting systems for low energy mobile robots

Technical Committee: Energy, Environment, and Safety Issues in Robotics and Automation

Aníbal T. de Almeida, Ricardo Faria, Pedro Santos
Institute of Systems and Robotics, University of Coimbra, Portugal

Toshio Fukuda
Meijo University, Japan

Tzyh Jong Tarn
Washington University, St. Louis, USA

Abstract: Energy harvesting is a prominent research area which continues to grow at rapid pace, with potential application in a wide range of applications. Some applications that benefit from this technology include distributed wireless sensor nodes for structural and health monitoring, embedded and implanted sensor nodes for medical applications, battery recharging, automotive systems monitoring, powering unmanned vehicles, autonomous robots, household security systems, etc.

In particular, one area with a large application potential is mobile robotics, in which energy storage capacity greatly limits their autonomy. By using energy harvesting is possible to run a robot during a significant long period of time, or even indefinitely. It should be noted that due to energy harvesting constrains, in terms of the amount of power that can be extracted from the environment, the mobile robots that can greatly benefit from this technology are in general small robots, with low energy consumption and low processing capabilities, such as robots used in swarm applications and environmental monitoring.

Proposal

- Energy harvesting is a prominent research area, with a large application potential is mobile robotics and sensor networks, in which energy storage capacity greatly limits their autonomy
- Using energy harvesting is possible to run a robot during a significant long period of time, or even indefinitely
- Small robots, with low energy consumption and low processing capabilities, can greatly benefit from this technology, such as robots used in swarm applications and environmental monitoring.

Goals and Audience

- Development of a low cost energy harvesting systems for low energy consumption mobile robot platforms, in which several energy harvesting solutions can be tested. One of the main goals of this proposal is to introduce robotics students to energy harvesting and energy management techniques by supplying them with a very low cost robotics platform that they can build themselves.
- Development of a simple mobile platform, with low energy consumption, low power wireless communication capabilities (using Bluetooth LE for instance) and sensor integration.
- The platform is intended to be used by undergraduate students with some level of programming and electronics skills and to validate the energy harvesting modules.

Course Materials

- Tutorial course on energy harvesting technologies, energy management and energy storage for mobile robotics, and autonomous wireless sensor nodes

User manual, including all schematics, PCB design, for the robotics kit to be distributed under an open source license scheme.

Development of a website with all the materials referred previously

Intention to organize a tutorial/workshop session in IROS 2015 to disseminate the training materials.

Stackable Architecture

- The mobile platform is constituted by three stacked modules:
 - Base module;
 - Sensor module;
 - Energy harvesting and storage module.
- By using a stackable architecture, adding new modules to the platform is a straight forward process;
- Adding new sensors is also simplified due to the of a expansion connector with standard bus communication interfaces (I2C and SPI).

