



Sistema Autónomo de Alimentação para Monitorização Ambiental

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Lina Maria Fernandes Teixeira

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÃO E REDES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

Novembro | 2010

UMA

Sis

Dedicatória

A Nossa Senhora de Fátima

Aos meus pais, irmãs, cunhados e sobrinhos

Ao meu namorado

Resumo

Este projecto tem como principal objectivo a criação de sistemas autónomos de alimentação para redes de sensores sem fios (RSSF) que prolonguem a autonomia das mesmas. Considerando que, geralmente, a alimentação das RSSF é fornecida por baterias e devido à limitação que estas impõem a nível de durabilidade e autonomia é crucial desenvolver sistemas capazes de captar e armazenar energia ambiental de modo a disponibilizá-la aos nós sensores quando estes necessitarem. Assim sendo, este projecto apresenta três protótipos cujo intuito visa prolongar a longevidade dos nós sensores. Nesta conformidade recorreu-se ao aproveitamento da energia produzida pelo sol, vento e cursos de água.

Foram estudados dois protótipos solares, um com ligação directa ao elemento de armazenamento e o outro com um circuito que deve transferir o máximo de potência fornecida pela fonte. Para o aproveitamento do fluxo de ar foi desenvolvido um pequeno gerador trifásico com uma estrutura de captação de energia segundo o modelo de pás do aerogerador *Savonius*. As características (tensão e corrente) foram analisadas com o objectivo de poder desenvolver um circuito de controlo de carga para as baterias. O último sistema de controlo foi dirigido ao aproveitamento da água proveniente das levadas ou ribeiras. Este sistema também é composto por um pequeno gerador trifásico ao qual foi associado um sistema de pás do tipo *Pelton*. Este protótipo foi proposto para situações em o caudal à saída de um reservatório se mantém constante evitando desta forma, a necessidade de utilização de elementos de armazenamento de energia

Todos os sistemas possuem circuitos que permitem a monitorização de variáveis fundamentais para a avaliação dos mesmos. Para a transferência de dados foi utilizada uma rede de sensores sem fios, com recurso a um rádio *XBee*. Estes dados são encaminhados para uma base de dados presente na estação central. Após todo o tratamento de dados, a informação é disponibilizada através de uma página da *Internet*.

Palavras – chave:

Captação de energia, Máximo Ponto de Transferência de Potência (MPPT), Conversor DC-DC, Energia Fotovoltaica, Energia Eólica, Energia Hídrica, Redes Sensores sem Fios (RSSF)

Abstract

The main purpose of this project is creating autonomous powered systems for wireless sensor networks in order to increase their autonomy. Usually, the wireless sensor networks are battery powered, but considering their limited durability and autonomy it is crucial the development of capable systems to harvest and store environmental energy in order that power be available wherever the sensor nodes need. Therefore, this project presents three prototypes whose intent is to prolong the sensors nodes longevity making use of the solar, eolic and hydric energies. Two solar prototypes were studied: the first one was directly connected to the stored element and the second one making use of a circuit whose function is to transfer the highest level of power generated by the source. In order to exploit the air-flow, a small three-phase generator was developed, whose energy harvesting structure was built accordingly the Savonius wind turbine prototype. The characteristics (tension and current) were analyzed in order to develop a circuit to control the batteries charges. The last control system was applied to make good use of the streams and “levadas” waters. This system is also composed by a small three-phase generator combined with a Pelton wind turbine. This prototype was purposed for those situations of constant caudal at the reservoir outflow, avoiding by this means the utilization of stored energy resources.

All the elements are equipped with circuits which allow monitoring fundamental variables to self-evaluation. The data transference was performed by a wireless sensor network through a *XBee* radio. These data are directed to an existing data-base at the central station. When the data treatment is completed, the information is disposed in an internet web page.

Key-words: Energy harvesting; Maximum power point tracker (MPPT); DC-DC converter, Photovoltaic energy; Eolian energy; Hydraulic energy, Wireless sensor networking (WSN).

Agradecimentos

O meu primeiro e permanente agradecimento é dirigido ao meu Orientador, Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo, pela aceitação deste desafio, pela atenção, interesse e pela total dedicação.

À Universidade da Madeira, como instituição de acolhimento, em particular ao Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia.

Ao Engenheiro Filipe Santos pela colaboração intensa nas várias fases deste trabalho.

Aos Professores Dionísio Barros, Luís Gomes e Gabriel Lira, pela disponibilidade, apoio e ajuda no decurso do projecto.

Aos meus pais, por todo o amor, apoio incansável e incondicional e por sempre acreditarem em mim.

Às minhas irmãs e cunhados, por todos os empurrões ajuda e coragem.

À energia e símbolos de esperança dos meus três sobrinhos: Guilherme, Hugo e João Pedro.

Ao meu namorado, Tiago pelo companheirismo e amizade, pela presença constante, pela sua colaboração em todo este trabalho e por toda a partilha de conhecimentos.

Aos meus colegas, Tony Pereira, Jenny Gouveia, Carla Santos, Catarina Bruno, Ana Gonçalves e Bruna Ramos pelo apoio e amizade em todos os momentos.

A todos os que me ajudaram no decurso deste projecto.

Índice

Dedicatória.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
Introdução.....	xxi
Motivação da Tese	xxi
Objectivos	xxi
Estrutura do Trabalho	xxii
1 Sistemas de Energia Para Redes Sensores Sem Fios.....	1
1.1 Captação de Energia do Meio ambiente	1
1.2 Tipos de Energia.....	2
1.3 Sistemas de Captação	3
1.3.1 Energia solar – Sistema Fotovoltaico	3
1.3.1.1 Características das células solares	4
1.3.1.2 Característica da I/V das células solares.....	5
1.3.1.3 Módulos fotovoltaicos	6
1.3.1.4 Exemplos de sistemas alimentados por energia solar.....	6
1.3.2 Energia eólica	10
1.3.2.1 Características do fluxo aéreo.....	10
1.3.2.2 Característica VI de um aerogerador	11
1.3.2.3 Exemplos de sistemas alimentados por energia eólica.....	12
1.3.3 Energia termoelétrica	14
1.3.3.1 Orientações para recolha de energia termoelétrica	14
1.3.3.2 Eficiência de conversão	15
1.3.3.3 Exemplos de sistemas alimentados por energia térmica	15
1.3.4 Vibração.....	16
1.3.4.1 Conversor de potência com base em vibração.....	17
1.3.4.2 Exemplos de sistemas alimentados por energia vibracional	17
1.4 Ponto de Máxima Potência	18
1.4.1 Algoritmos de controlo MPPT	18
1.4.2 Conversores DC/DC	20
1.4.2.1 Conversor redutor	21

1.4.2.2	Conversor elevador	24
1.4.2.3	Conversor redutor-elevador	27
1.5	Buffers de energia	30
2	Sistema Solar	33
2.1	Estudo do painel solar de 0,5 Watt	33
2.2	Modelos de carregamento	36
2.2.1	Modelo ON-OFF.....	37
2.2.2	Modelo Painel/Condensador	38
2.2.3	Modelo para máxima transferência de potência	39
2.3	Sistema para Testes.....	44
3	Sistema Eólico e Sistema Hídrico.....	47
3.1	Geradores trifásicos.....	47
1.1	Construção dos geradores trifásicos.....	49
3.2	Sistema Eólico.....	51
3.2.1	Turbinas eólicas	51
3.2.2	Construção do aerogerador	52
3.2.3	Modelo do controlador de carga para o sistema eólico.....	57
3.3	Sistema para Testes.....	61
3.4	Sistema Hídrico.....	62
3.4.1	Turbinas Hídricas	63
3.4.2	Construção do gerador hídrico	63
3.5	Sistema para Testes.....	65
4	Sistema de Medição, Controlo e Comunicação	67
4.1	Sistemas de medição	67
4.1.1	Sensor de Corrente	67
4.1.2	Sensor de Luminosidade	68
4.2	Módulo de controlo e transmissão de dados	69
4.2.1	Sistema de controlo.....	69
4.2.2	Sistema de comunicação	70
4.2.2.1	Rádio <i>XBee</i>	70
4.2.2.2	Protocolo <i>ZigBee</i>	72
4.2.3	Modelo final do sistema de controlo e comunicação	74
4.3	Sistema de comunicação de dados	75
4.3.1	Configuração dos nós.....	76
4.3.2	Fluxograma	78
4.3.2.1	Sistema Solar.....	78
4.3.2.2	Fluxograma para o Sistema Eólico	79
4.3.2.3	Fluxograma para o Sistema Hídrico.....	80
4.4	Tratamento e armazenamento de dados	81
5	Resultados	83
5.1	Localização dos sistemas	83

5.2	Sistema Solar	84
5.2.1	Painel solar em ambiente real	85
5.2.2	Modelo de Painel e condensador	86
5.2.3	Modelo ON-OFF	87
5.3	Modelo MPPT	90
5.4	Sistema Eólico	93
5.5	Sistema Hídrico	95
6	Conclusões e trabalho futuros	99
6.1	Conclusões.....	99
6.2	Trabalhos Futuros	100
	Referências	101
	Anexos.....	107
	Anexo A – Algoritmos de Máxima transferência de Potência	107
	Anexo B – Desenhos das placas no <i>Ultiboard</i>	109
	Anexo C – Características do sensor de luminosidade.....	111
	Anexo D- Identificação dos pinos do módulo <i>XBee</i>	111
	Anexo E – Programação em Linguagem C Para o Sistema Solar	112
	Anexo F – Programação em Linguagem C para o Sistema Eólico.....	117
	Anexo G- Programação em Linguagem C Para o Sistema Hídrico.....	123

Índice de Figuras

Figura 1.1- Constituição de uma célula solar[14].....	4
Figura 1.2 - Ligação das células solares em série[14].....	4
Figura 1.3- Curva característica I/V de uma célula solar[16].....	5
Figura 1.4- Arquitectura do <i>Heliomote</i> [21].....	6
Figura 1.5 – Protótipo do <i>Heliomote</i>	7
Figura 1.6- Arquitectura do <i>Prometheus</i> [3].	8
Figura 1.7- Arquitectura do <i>Everlast</i>	8
Figura 1.8 – Corrente em função da tensão para várias velocidades angulares[25].....	11
Figura 1.9 – Curva característica para um sistema de aerogeração[25].....	11
Figura 1.10 – Potência em função da tensão produzida pelo aerogerador[25].....	12
Figura 1.11 – Curvas característica para o sistema <i>Ambimax</i> [26]. (a) Velocidade do vento vs frequência do rotor; (b) Tensão do gerador vs frequência do rotor	12
Figura 1.12- Coeficiente de potência da turbina vs velocidade do vento[4].	13
Figura 1.13- Potência de saída do gerador em função da resistência de carga [4].....	13
Figura 1.14- Diagrama de blocos do sistema implementado para recolha de energia eólica para alimentação de nós sensores[4].	14
Figura 1.15- Máxima potência em função da temperatura para componentes produzidos pela indústria <i>Tellurex</i>	15
Figura 1.16- <i>Micropelt thermoelectric power bol</i> [27].....	16
Figura 1.17- Componente desenvolvido pela <i>Sentilla</i> , para implementar em nós <i>wireless</i>	16
Figura 1.18 – Modelo <i>AdaptivEnergy Joule-Thief™ Random Vibration Energy Harvesting</i> [29]	17
Figura 1.19 - Circuito equivalente de um conversor PWM do tipo <i>Redutor</i> . a) Circuito geral. b) Circuito equivalente quando o interruptor S está no modo ON. c) Circuito equivalente quando o interruptor está no modo OFF [40].....	21
Figura 1.20 - Circuito equivalente de um conversor PWM do tipo <i>Boost</i> . a) Circuito geral. b) Circuito equivalente quando o interruptor S está no modo ON. c) Circuito equivalente quando o interruptor está no modo OFF.	24
Figura 1.21 - Circuito equivalente de um conversor PWM do tipo <i>Redutor-Elevador</i> . a) Circuito geral. b) Circuito equivalente quando o interruptor S está no modo ON. c) Circuito equivalente quando o interruptor está no modo OFF.	27
Figura 1.22 – Esquema de um condensador[41].	30
Figura 1.23- Curvas de carga e descarga para baterias de NI -MH[44].	31
Figura 2.1- Esquema de montagem para determinar a curva característica do painel solar.....	33
Figura 2.2- Curvas características para os diferentes valores de corrente	34
Figura 2.3 – Curvas características para a potência e tensão.....	34
Figura 2.4 – Valores de impedâncias para o ponto de máxima potência.	35
Figura 2.5- Comportamento das baterias em função da variação da corrente.....	35
Figura 2.6- Diagramas de blocos para os diferentes circuitos estudados. (a) Modelo On-Off; (b) Modelo com condensador; (c) Modelo com MPPT.....	36

Figura 2.7- Circuito eléctrico do modelo ON-OFF.....	37
Figura 2.8- <i>Omeron latching relay_G6JY</i> [45].....	38
Figura 2.9- Esquema eléctrico do modelo com condensador.	39
Figura 2.10 - Configuração eléctrica para teste do conversor redutor.	42
Figura 2.11- Resultados experimentais do conversor redutor.....	42
Figura 2.12 - Esquema eléctrico final do modelo com máxima transferência de potência.	44
Figura 2.13- Projecto do modelo On-Off impresso em papel de acetato. (a) Face Superior; (b) Face Inferior.....	45
Figura 2.14 - Protótipos finais para testes. (a) Modelo On_Off; (b) Modelo MPPT.....	45
Figura 3.1- Ondas sinusoidais geradas por um sistema trifásico[46].	48
Figura 3.2- Associação das bobinas em triângulo ou delta.....	48
Figura 3.3- Rectificador trifásico com ponte de díodos (ondas completas) [48].....	49
Figura 3.4- Construção das espiras e construção do estator: (a) e (b) - processo de fixação dos parafusos nas espiras; (c) espira pronta a ser fixada; e (d) colocação das espiras nas paredes do estator.	49
Figura 3.5- Esquema de ligação de bobinas.....	50
Figura 3.6- Esquema de montagem do rotor.....	50
Figura 3.7- Ondas produzidas pelo gerador trifásico, desfasadas de 120° - (a) gerador para sistema eólico; (b) gerador para sistema hídrico.....	50
Figura 3.8 - Placa do circuito de rectificação. (a) Face superior; (b) Face inferior.	51
Figura 3.9- Onda após rectificação trifásica - (a) Gerador eólico; (b) Gerador hídrico.	51
Figura 3.10 - Projecção do rotor de <i>Savonius</i> , em vista lateral e de topo[51].	52
Figura 3.11 - Comparação de desempenho para turbinas eólicas convencionais [52].	53
Figura 3.12 - Sistema final do aerogerador.....	53
Figura 3.13 - Esquema de montagem para averiguar o ponto de máxima potência para o sistema eólico.....	54
Figura 3.14 - Resultados da tensão face à velocidade do vento.....	55
Figura 3.15 - Resultados para a resistência mais adequada ao ponto de máxima potência.	55
Figura 3.16 - Resultados do aerogerador para corrente em função da tensão.	56
Figura 3.17 - Resultados da potência em função da tensão, para o respectivo aerogerador....	56
Figura 3.18 - Conversor DC-DC, tipo elevador-redutor.....	58
Figura 3.19 - Diagrama de blocos do sistema eólico.	59
Figura 3.20 - Esquema eléctrico para o controlador de carga do sistema eólico.....	60
Figura 3.21 - Protótipo de testes para o sistema eólico.....	61
Figura 3.22 – Tabela gráfica para selecção de turbinas para centrais mini-hídricas [57].....	63
Figura 3.23 – Turbina construída para o sistema pico-hídrico.	64
Figura 3.24 - Gerador hídrico. (a) Vista superior; (b) Vista inferior.	64
Figura 3.25 – Esquema de montagem para obtenção das curvas características do sistema hídrico.	64
Figura 3.26 – Potência em função da resistência de carga.....	65
Figura 3.27 – Diagrama de blocos para o protótipo de testes para o sistema hídrico.....	66
Figura 3.28 – Esquema eléctrico para o sistema hídrico.....	66
Figura 4.1-Esquema eléctrico do sensor de corrente.	67

Figura 4.2 – Circuito de transimpedância utilizado no sensor de luminosidade[59].	69
Figura 4.3 – Microcontrolador <i>ATmega168</i> [60].	69
Figura 4.4-Módulos <i>XBee</i> e antenas disponíveis. (a) conector UFL; (b) antena <i>chip</i> ; (c) conector RPSMA; (d) antena <i>whip</i> .	71
Figura 4.5 – Estrutura da frame em modo de operação API[61].	72
Figura 4.6- Topologias de uma rede <i>ZigBee</i> [63].	74
Figura 4.7- Módulo de controlo e comunicação de dados. (a) Face superior da placa; (b) Face inferior.	75
Figura 4.8 – Esquema da rede implementada.	75
Figura 4.9 – Janela principal do programa X-CTU.	76
Figura 4.10 – Configuração do <i>Modem Configuration</i> .	77
Figura 4.11 – Nós presentes na rede.	77
Figura 4.12 – Fluxograma do sistema solar desenvolvido.	78
Figura 4.13 – Fluxograma configurado para o sistema eólico.	79
Figura 4.14 – Fluxograma referente ao sistema hídrico.	80
Figura 4.15 – Diagrama de entidade relação na base de dados.	81
Figura 4.16 – Diagrama de fluxo de dados da página da <i>Internet</i> .	82
Figura 4.17 – Página de <i>Internet</i> .	82
Figura 5.1 – Localização geográfica dos sistemas desenvolvidos.	83
Figura 5.2 - Protótipos para teste do sistema solar. (a) Circuito preparado para fixação, com todas as ligações necessárias para funcionamento; (c) Sistema solar pronto para testes.	84
Figura 5.3 – Visualização dos resultados para o sistema solar.	85
Figura 5.4 – Resultados do sistema solar. (a) Luminosidade; (b) Corrente de curto-circuito.	85
Figura 5.5 – Comportamento da luminosidade e da corrente durante um período de três dias.	86
Figura 5.6 – Resultados para o Modelo ON-OFF. (a) Tensão no painel solar quando ligado às baterias; (b) Corrente fornecida às baterias; (c) Tensão efectiva nas baterias.	88
Figura 5.7- Desempenho do modelo ON-OFF para um dia. (a) Luminosidade; (b) Corrente fornecida às baterias.	88
Figura 5.8 – Comportamento das baterias quando ligadas ao painel solar e tensão efectiva nas baterias.	89
Figura 5.9- Parâmetros referentes a um dia chuvoso. (a) Luminosidade; (b) Corrente fornecida às baterias	89
Figura 5.10 – Comportamento das baterias.	90
Figura 5.11 – Resultados do modelo MPPT. (a) Tensão fornecida pelo painel solar; (b) Tensão nas baterias; (c) Corrente fornecida pelo painel solar; (d) Corrente exigida pelas baterias.	91
Figura 5.12 - Desempenho do modelo MPPT para um dia. (a) Tensão no painel solar; (b) Tensão nas baterias.	91
Figura 5.13 – Comparação entre a corrente fornecida pelo painel solar face à corrente fornecida às baterias.	92
Figura 5.14 - Fixação do gerador eólico.	93
Figura 5.15 - Visualização dos resultados para o sistema eólico.	93

Figura 5.16 – Identificação dos estados face à corrente produzida pelo aerogerador. (a) Corrente no aerogerador; (b) Identificação do estado de funcionamento.	94
Figura 5.17 – Resultados obtidos para o sistema eólico. (a) Tensão gerada; (b) Corrente disponibilizada pelo aerogerador; (c) Tensão efectiva nas baterias.	95
Figura 5.18- Esquema de montagem para realização dos testes finais.	96
Figura 5.19 - Visualização dos resultados para o sistema hídrico.	96
Figura 5.20 – Comportamento do gerador hídrico para uma carga constante.	97
Figura 5.21 – Resultado dos testes para o sistema hídrico. (a) Tensão do aos terminais à entrada do nó sensor; (b) Corrente fornecida ao nó sensor.	97

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Caracterização das fontes energéticas[5] [7].....	3
Tabela 1.2 - Especificação dos módulos que realizam captação de energia solar para alimentar um nó [3].	9
Tabela 1.3 - Síntese do algoritmo P&O [31].	19
Tabela 3.1 - Comparação do ponto de máxima potência para os diferentes valores de velocidade de vento.	57
Tabela 3.2 - Valores do coeficiente de desempenho para as	57
Tabela 3.3 - Resultados para eficiência do sistema de conversor redutor-elevador projectado.	58
Tabela 3.4 - Classificação das centrais mini-hídricas [56].	62
Tabela 3.5 – Resultados obtidos para a potência face ao valor da resistência de carga.	65
Tabela 4.1- Resultados experimentais para os diferentes tipos de resistências.	68
Tabela 4.2 – Comparação entre as bandas de frequências utilizadas no protocolo ZigBee.	73
Tabela 5.1 – Tabela de resultados para 55 mA.	87

Lista de Acrónimos

AC	<i>Alternating Current</i>
CCM	<i>Continuous Conduction Mode</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DC	<i>Direct Current</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
I _{sc}	<i>Short Circuit Current</i>
IT	<i>Information Tecnology</i>
MEM	<i>Micro Electro- Mechanical Systems</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
NIMH	<i>Nickel Metal Hybrid</i>
NIMH	<i>Nickel-metal hydride</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PFM	<i>Pulse Frequency Modulated</i>
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RISC	<i>Reduction Instruction Set Computer</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores Sem Fios</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
STC	<i>Standard Test Condition</i>
V _{oc}	<i>Open Circuit Voltage</i>
WIT	<i>Wireless Industrial Technologies</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais motivações para a concretização deste trabalho sendo, também enunciados os principais objectivos a alcançar no âmbito da proposta apresentada. No final é exposta a estrutura do trabalho.

Em geral, as redes de sensores sem fios utilizam baterias para alimentarem os seus componentes sendo a unidade de alimentação um elemento fundamental para o bom funcionamento destas redes. Desta forma é sempre necessário prever o consumo do nó e a durabilidade da rede para o tipo de baterias que a alimenta, uma vez que estas dispõem de uma capacidade limitada de energia.

As energias renováveis são tidas como alternativa para solucionar este problema. O aproveitamento dos recursos que rodeiam os nós da rede torna-se viável ao desenvolvimento de sistemas que permitam recarregar baterias ou então alimentar os nós sensores de forma directa. Para esse efeito é necessário conhecer a energia disponibilizada pela fonte e a potência exigida pelo nó. Embora o problema de tornar os nós mais autónomos já venha a ser investigado desde há algum tempo, ainda não existem sistemas capazes de responderem a muitas aplicações práticas.

A necessidade de melhorar o fornecimento de energia aos nós sensores tem incidido no desenvolvimento de vários protótipos para a captação de energia. Perante esta solução é fundamental continuar a desenvolver e melhorar as técnicas aplicadas a esta temática.

Motivação da Tese

Tendo em conta a evolução das Redes de Sensores sem Fios (RSSF), que são utilizadas muitas vezes com o intuito de monitorizar espaços ambientais que possibilitam a obtenção de vários parâmetros fundamentais, para controlo do espaço onde estão inseridas surge o problema de como realizar a alimentação dos nós que constituem a rede. Esta dificuldade advém do facto de que a colocação destes sistemas ter de ser realizada em ambientes exteriores, não fazendo qualquer sentido a passagem de cablagem em meios com vegetação densa ou de difícil acesso para realizar a alimentação dos nós sensores.

Uma possível solução para ultrapassar esta dificuldade baseia-se na captação da energia disponibilizada pelo meio envolvente, para efectuar a alimentação dos diversos sistemas a serem implementados nesse meio. Este procedimento beneficiará a autonomia e a eficiência dos sistemas.

Já existem várias fontes de energia que são aproveitadas com este objectivo, nomeadamente as energias: solar, eólica, hídrica, das marés, vibracional e térmica.

Objectivos

Como já foi descrito existem diversificadas fontes de energia que podem ser utilizadas para carregar as baterias existentes nas RSSF. Assim, o primeiro objectivo consiste na

realização de um estudo de cada uma dessas fontes de energia, mais especificamente, energia solar, energia eólica e energia hídrica.

Após a realização do estudo é essencial proceder à fase de planeamento e construção de protótipos micro-geradores que sejam capazes de desempenhar o mais próximo possível a função pretendida tendo em conta, todos os parâmetros impostos pelo nó sensor. Assim, cada protótipo deve:

- ser capaz de aproveitar o máximo de energia disponibilizada pela fonte;
- apresentar um controlador de carga, o qual deverá transferir o máximo de energia disponível para o elemento de armazenamento;
- gerar potência suficiente para alimentar um nó sensor;
- possuir um circuito de monitorização de variáveis essenciais à avaliação da eficiência de cada sistema.

É também um objectivo a colocação dos protótipos desenvolvidos no meio adequado para a realização dos testes, de forma a aferir a viabilidade de cada sistema. A informação resultante dos testes é transmitida para uma estação central com recurso a uma rede de sensores sem fios. Esta estação tem como função todo o tratamento de dados (manipulação e armazenamento) que posteriormente serão apresentados através de uma interface de visualização, mais concretamente uma página da *Internet*.

Estrutura do Trabalho

O presente relatório é composto por seis capítulos.

O primeiro capítulo faz a contextualização das fontes de energia, onde são expostas as características principais de cada fonte. Neste capítulo consta ainda um levantamento de sistemas que já foram desenvolvidos para garantir autonomia às RSSF.

O segundo capítulo aborda o sistema solar. Primeiramente é realizada, a análise ao painel solar de 0,5W e posteriormente são estudados e descritos dois protótipos desenvolvidos para o efeito carregamento de baterias.

No que respeita ao terceiro capítulo, neste são apresentados os últimos sistemas, o sistema eólico e o sistema hídrico. Em ambos os casos são descritas as características intrínsecas a cada sistema sendo feita posteriormente, uma abordagem à construção de cada gerador, bem como o desenvolvimento de controladores de carga com base nos resultados característicos de cada sistema.

A abordagem feita no quarto capítulo refere-se à descrição dos componentes essenciais às medições, nomeadamente corrente e tensão, que permitem a análise da eficiência de cada sistema. Neste capítulo também são descritos os elementos utilizados para a criação da rede de comunicação para transmissão, aquisição e visualização dos dados fundamentais subjacentes a cada sistema.

O quinto capítulo expõe os testes e resultados alcançados após a fixação de cada sistema.

O sexto capítulo apresenta as conclusões aferidas com o desenvolvimento do trabalho.

1 Sistemas de Energia Para Redes Sensores Sem Fios

Neste capítulo é efectuada a contextualização dos sistemas de energia no âmbito da alimentação de nós sensores. Primeiramente é realizada uma pequena introdução, ao problema da autonomia dos nós sensores e é realizada a exposição teórica da captação de energia a partir de fontes de energias limpas. Posteriormente é realizado o estudo, sobre as principais fontes de energia e sobre os sistemas já desenvolvidos com a intenção de aumentar a autonomia dos nós sensores.

1.1 Captação de Energia do Meio ambiente

Nos dias que correm vivemos, cercados por uma grande diversidade de sistemas distribuídos e descentralizados.

Aplicações piloto são facilmente identificadas nos telemóveis, portáteis e PDA's (*Personal Digital Assistant*). No entanto, os sistemas distribuídos, principalmente baseados em componentes MEMS (*Micro Electro- Mechanical Systems*), foram invadindo não só o sector da tecnologia da informação (IT - *Information Technology*), mas qualquer área que envolve o nosso dia-a-dia. Existem várias aplicações que utilizam estes dispositivos, como por exemplo: no sector automóvel, nos sistemas distribuídos de sensores, no sector de fabrico industrial, no sector medicinal e, mais recentemente, em sistemas MEMS-RFID (*Micro Electro-Mechanical Systems – Radio Frequency Identification*) utilizados na logística e transportes públicos [1].

Enquanto a comunicação por rádiofrequência representa, uma maior flexibilidade na transmissão de dados, num sistema distribuído a alimentação continua sendo fornecida por baterias ou fios[1]. Os desenvolvimentos tecnológicos durante a última década desencadearam diversas “plataformas” embutidas para realizar a detecção de diversos parâmetros do meio físico, para processar esses dados e para realizar a transmissão dos mesmos para um servidor central. Uma consequência directa desta evolução foi a emergência da investigação em grande escala na área das redes de sensores por parte da engenharia [2].

Uma rede de sensores (WSN - *Wireless Sensor Network*) é composta por diversos dispositivos (nós sensores) que operam de forma cooperativa de modo a recolher os dados para análise da aplicação específica [3].

Dependente da aplicação da rede, esta possuirá diferentes topologias, dimensões, formas de comunicação, modos de armazenamento de dados, custo, tipo de fonte de energia e arquitectura de distribuição [3]. Existe uma vasta gama de aplicações em que a alimentação é realizada com recurso a baterias [4].

As aplicações típicas deste tipo de redes são: monitorização ambiental, aplicações com fins militares, aplicações médicas e industriais [1][3][5].

Como já foi referido, normalmente a alimentação de nós sensores é realizada por baterias. Estas conseguem tornar possíveis aplicações de sensores em áreas remotas ou de difícil acesso, [3-4], isto é, quando os microsensores estão introduzidos em estruturas sem qualquer ligação física [5].

O inconveniente da utilização das baterias é que estas possuem, uma capacidade de alimentação finita fazendo com que, o funcionamento do nó esteja limitado à duração das mesmas. Esta limitação impõe um custo e complexidade adicional ao sistema, devido à necessidade de mudar regularmente as baterias dos nós [3].

Geralmente, os nós sensores têm um consumo muito baixo devido aos componentes de baixa potência que os integram. Como estes nós sensores são colocados em meios exteriores, o mais conveniente e adequado é extrair energia do meio circundante para realizar a alimentação dos mesmos [2-5].

Como o funcionamento do nó é limitado pela energia que é recolhida, num período em que captação não esteja a ser realizada, o nó sensor gere a energia armazenada de forma a conseguir o melhor desempenho para o sistema até realizar nova recolha [3].

Uma técnica em investigação e conhecida é a captação da energia solar e a sua conversão em energia eléctrica. A energia solar é incontrolável, isto é, a intensidade da luminosidade numa dada direcção não pode ser controlada, mas é previsível diariamente.

Outra das técnicas para a captação de energia, consiste na conversão da energia mecânica em energia eléctrica[3][6]. São exemplos deste tipo de captação a energia eólica e a energia hídrica.

Desde que a fonte de recolha de energia seja variável é necessário verificar, qual a melhor fonte a ser aplicada.

1.2 Tipos de Energia

Os sistemas que são directamente suportados pela captação de energia dependem, da fonte natural de alimentação que lhes é intrínseca. Desta forma, a fonte vai ditar a quantidade de energia disponível num determinado momento.

As fontes de energia possuem diferentes características em função de serem ou não controláveis de serem previsíveis ou imprevisíveis[3].

1. Incontrolável mas previsível - Este tipo de fonte de energia não pode ser controlada para produção de energia nos tempos desejados, mas o seu comportamento pode ser modelizado para prever a disponibilidade esperada num dado momento com uma certa margem de erro. Exemplo deste tipo de fonte é a, energia solar que não pode ser controlada, mas, os modelos de previsão em ciclos diurnos e sazonais podem ser usados de forma, a “conhecer” essa disponibilidade. O erro de previsão pode ser diminuído através das previsões disponíveis para a região onde é implementado o sistema [3].
2. Incontrolável e imprevisível – A fonte de energia não pode ser controlada para gerar energia quando for desejado, não sendo fácil prever a sua disponibilidade.

Os modelos de previsão são muito complexos, como é exemplo a previsão padrões de vibração num ambiente exterior [3].

A Tabela 1.1 descreve as características para as diferentes fontes de energia. A energia solar é a mais promissora de entre as fontes disponíveis para exploração sendo incontroável, mas previsível diária e sazonalmente, com nascer e pôr-do-sol a ter horários bastante bem estimados [3].

Tabela 1.1 - Caracterização das fontes energéticas[5] [7].

Fontes de energia	Valores típicos para a densidade de potência
Solar (exterior)	15 mW/cm ² (sol directo)
	0,15 mW/cm ² (dia nublado)
Solar (interior)	0,01mW/cm ²
Ruído Acústico	3×10 ⁻⁶ mW/cm ² @ 75 dB
	9,6×10 ⁻⁴ mW/cm ² @ 100 dB
Gradiente de temperatura	15 mW/cm ² @ 10°C
Fluxo de ar/ líquido	0,4 mW/cm ³ @ 5 m/s e η=5%
Reacção Nuclear	80 mW/cm ³

1.3 Sistemas de Captação

Esta secção aborda os sistemas de captação existentes, a fim de alimentar os nós sensores. Em cada um dos sistemas são especificadas as principais características e os protótipos já desenvolvidos.

1.3.1 Energia solar – Sistema Fotovoltaico

O princípio de conversão da energia solar em energia eléctrica é o mais antigo no que se refere à captação de energia [8-9]. Para a captação de energia têm sido utilizadas células solares com sucesso. Esta tecnologia apresenta um grande êxito durante os vários anos de utilização, especialmente em áreas onde a intensidade luminosa é intensa.

Os painéis solares são constituídos principalmente por material semicondutor sendo o silício o mais usado [9-10].

Uma das principais tarefas é controlar as células dos painéis para produção de energia, o que se traduz na melhoria da eficiência das células de modo a maximizar a energia extraída. Para isto é necessário recorrer, à medição da corrente (I) em função da tensão (V), o que permite caracterizar o desempenho e determinar a impedância de carga que melhor se adapta às células do painel [3].

Os painéis solares são capazes de produzir energia seja ao ar livre ou numa área interna sendo os níveis de magnitude, do meio exterior duas a três vezes superiores aos dos que são produzidos na zona interior [3].

1.3.1.1 Características das células solares

As células solares apresentam características diferentes quando comparadas com baterias [11]. A conversão da energia solar em energia eléctrica recai sob o fenómeno do efeito fotovoltaico [12].

A célula fotovoltaica é composta por vários materiais semicondutores colocados em pilhas, com contactos metálicos colocados em lados opostos, de modo a fecharem o circuito [13], como mostra a Figura 1.1.

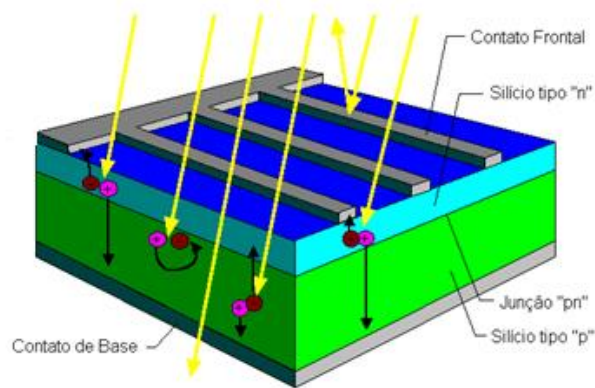


Figura 1.1- Constituição de uma célula solar[14].

O silício apresenta características intermédias entre um condutor e um isolante. Este semicondutor, na forma pura tem um número electrões livres, igual ao número de lacunas. Para aumentar o número de electrões livres ou lacunas procede-se à adição de outros elementos nas percentagens adequadas, através do processo de dopagem [9][12].

Conforme o tipo de material a utilizar na dopagem pode-se ter material tipo *N* (com mais electrões livres) ou material do tipo *P* (com ausência de electrões). Ao juntar as duas placas tem-se a junção P-N, o que origina um campo eléctrico devido à combinação entre electrões – lacunas [15]. Se a junção P-N for submetida a uma fonte luminosa, os fotões incidentes na junção fazem romper as ligações covalentes gerando pares electrão-lacuna. O campo existente faz com que os electrões passem para a camada *N* e que as lacunas passem para a camada *P*. Este fenómeno designa-se por efeito fotovoltaico.

Se se ligar um par de fios aos condutores externos gera-se, um fluxo de electrões (corrente eléctrica). Este fluxo é mantido durante o tempo em que a luz estiver a incidir na célula. A intensidade do fluxo de electrões gerada é directamente dependente da intensidade luminosa [15][13]. Um painel é constituído por um agrupamento de células fotovoltaicas interligadas em série como mostra a Figura 1.2.

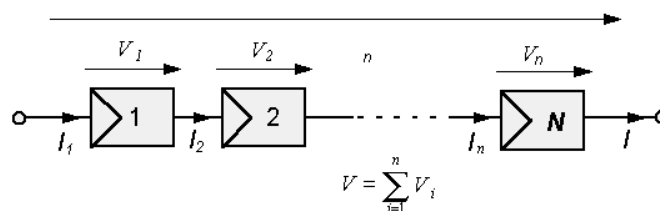


Figura 1.2 - Ligação das células solares em série [14].

O fluxo de electrões (corrente) repetir-se-á em cada célula, até chegar à última célula do painel, a qual entrega a corrente à bateria ou à carga a que estiver ligada [13].

A eficiência das células solares é limitada por características inerentes à tecnologia [8]. Esta eficiência é determinada pela quantidade de luz (fotões) que é absorvida por uma célula solar. Um fotão pode sofrer diferentes processos ao incidir numa célula podendo ser, reflectido, absorvido ou simplesmente atravessar o semi-condutor [8]. Com o intuito de reduzir o número de fotões que são reflectidos é aplicado, ao semi-condutor um revestimento, aumentando deste modo a eficiência.

Os factores ambientais, como a temperatura, também afectam a tensão de saída do painel solar [8]. Em Setembro de 2007, um laboratório desenvolveu um painel solar com 42,9% de eficiência, mas comercialmente estes painéis apresentam uma eficiência inferior a 30%.

1.3.1.2 Característica da I/V das células solares

A característica corrente/tensão para uma célula solar é não linear, o que torna difícil determinar o ponto máximo de potência.

É possível determinar o ponto máximo de potência (MPP - *Maximum Power Point*) efectuando o produto entre a tensão e a corrente e determinando o seu máximo [8]. Esta relação pode ser percebida na Figura 1.3.

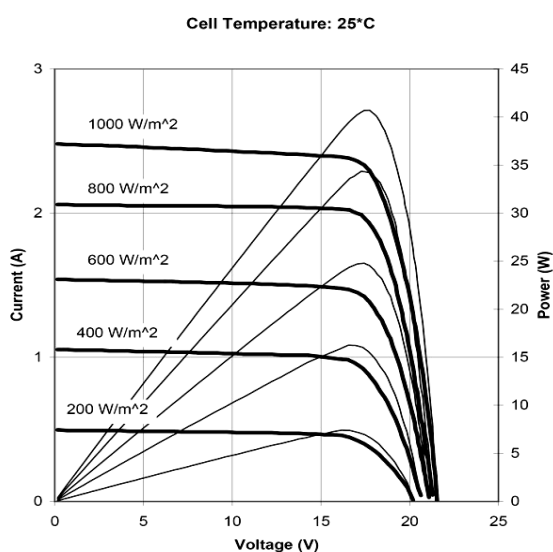


Figura 1.3- Curva característica I/V de uma célula solar[16].

À medida que a radiação solar aumenta ou diminui, a curva característica move-se para fora ou para dentro. Assim, o painel solar pode ser descrito como uma sequência de curvas, e cada uma delas poderá descrever a condição de radiação solar [17].

A característica de funcionamento de uma célula é apresentada por duas regiões de funcionamento: a região da fonte de corrente, onde a impedância interna da célula é elevada, e a região da fonte de tensão, que possui uma impedância interna baixa. Observando a Figura 1.3 pode-se ver, que do lado da fonte da corrente, a corrente de saída mantém-se quase constante [8][18].

1.3.1.3 Módulos fotovoltaicos

A utilização do painel solar tem uma maior incidência no carregamento de baterias secundárias. As células podem ser ligadas directamente às baterias através de um díodo em série para prevenir a ocorrência da descarga da bateria através da célula. Embora este circuito seja de simples implementação, não é óptimo, visto que o aproveitamento da potência não é o melhor [8][19].

Usualmente o fabricante fornece a folha de características do painel com os valores das medições das principais características baseado num modelo de teste, designado por STC (*Standard Test Condition*) sendo: a radiação luminosa de 1000 W/m^2 a uma distribuição espectral da massa de ar 1,5 e as células solares a uma temperatura de 25°C [20]. As principais especificações são:

Tensão em circuito aberto (V_{OC}): tensão máxima obtida quando não existe nenhuma carga ligada aos terminais do painéis fotovoltaicos.

Tensão de máxima potência (V_{max}): valor da tensão que maximiza a potência disponível.

Corrente de curto-circuito (I_{SC}): valor máximo de corrente gerada pelo painel solar quando os terminais deste se encontram em modo de curto-circuito.

Corrente de máxima potência (I_{max}): valor da corrente que maximiza a potência disponível.

1.3.1.4 Exemplos de sistemas alimentados por energia solar

Alguns sistemas já implementados, têm por base a captação da energia solar sendo de salientar: *Heliomote*, *Prometheus*, *Everlast* e *Ambimax*. Os primeiros três, são puramente baseados na captação de energia solar, enquanto *Ambimax* recorre à captação de energia solar e eólica. Cada um destes sistemas possui implementações diferentes, como as características dos painéis solares; tipo de bateria e capacidade; e a complexidade da construção do circuito [3].

Heliomote

Heliomote é um sistema que usa a plataforma *Mica2*. A Figura 1.4 mostra a arquitectura deste sistema.

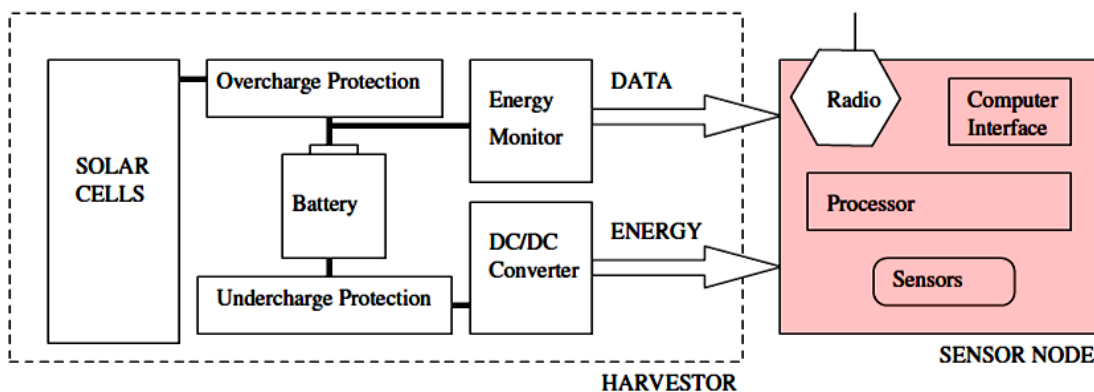


Figura 1.4- Arquitectura do *Heliomote* [21].

O sistema opera de forma completamente autónoma e gere todas as decisões relacionadas com a captação, armazenamento e fornecimento de energia, sem qualquer intervenção a partir do nó sensor [22]. O protótipo é ilustrado na Figura 1.5.



Figura 1.5 – Protótipo do *Heliomote*.

Este protótipo utiliza um painel solar de área 9,52 cm × 6,35 cm que gera 60 mA e uma tensão de 3,3 V. A potência proveniente deste painel solar é utilizada para carregar duas baterias do tipo NIMH (Níquel- hidreto metálico) com tamanho AA e de capacidade 1800 mAh cada uma. A sobrecarga de uma bateria pode levar à instabilidade do sistema, o que se torna perigoso, sendo utilizado um circuito de protecção. Do mesmo modo, o fornecimento de potência abaixo de um determinado limiar, faz com que o circuito actue de forma a interromper o fornecimento de energia, a fim de evitar a descarga completa da bateria [22].

Os circuitos de protecção supracitados integram um módulo de protecção baseados num comparador de histerese (*hardware*), que define uma faixa de tensões adequadas para alimentar o modo em funcionamento [3][11].

Este sistema também apresenta uma componente de monitorização de energia que permite ao nó sensor saber qual a energia disponível para ser utilizada. O componente que gere a energia do *Heliomote* (bloco *Energy Monitor*) transmite informações sobre, a quantidade e a variação de energia que é extraída. Fazendo uma análise do *Heliomote*, este sugere que se o tamanho da bateria for suficiente para suportar a variabilidade de energia extraída e se a taxa de consumo for menor que a taxa de “produção” de energia, então o sistema pode operar de forma continuada [3].

Prometheus

Este sistema capta energia solar e utiliza uma arquitectura de armazenamento duplo (Figura 1.6), construído sob a plataforma *TelosB*. A reserva primária alimenta o sistema e só recarregada quando existe recurso solar disponível. O primeiro elemento de armazenamento é um supercondensador e o segundo é uma bateria de iões de lítio. Assim, o supercondensador tem a capacidade de carregar a bateria quando existe um excesso de energia.

Por outro lado, quando o supercondensador encontra-se abaixo de um determinado limiar, a alimentação do nó sensor é realizada pela bateria até que o supercondensador volte a estar totalmente carregado [3].

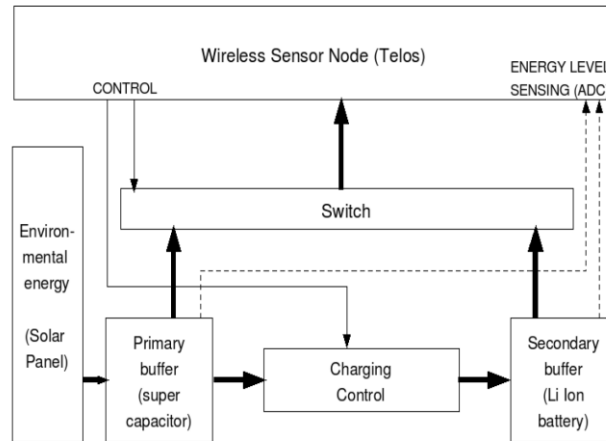


Figura 1.6- Arquitectura do *Prometheus* [3].

Como mostra a Figura 1.6 a arquitectura deste sistema é composta por fonte de energia solar (gera 40 mA e uma tensão 4,8 V), um elemento de armazenamento primário (supercondensador de 22 F), um elemento de armazenamento secundário (bateria de iões de lítio), um controlador de carga e um circuito comutador de alimentação [3][9][22]. Em comparação com a arquitectura *Heliomote*, as principais diferenças recaem na captação de energia, em que no *Prometheus*, existe uma fase adicional de armazenamento e o controlo é realizado pelo software [3].

Sempre que a energia solar é viável, a alimentação do nó sensor é realizada pelo supercondensador. A bateria só é utilizada quando não existe recurso suficiente para carregar o supercondensador, como durante a noite e em dias com pouca luminosidade [3].

Everlast

O sistema *Everlast* é composto por um supercondensador e por um painel solar. Ao contrário dos sistemas *Heliomote* e *Prometheus*, o *Everlast* não utiliza baterias [3][23]. *Everlast* é um sistema integrado com sensores rádio, sistemas de controlo, e subsistema de captação de energia diferindo de *Heliomote* e *Prometheus*, que são complementos para plataformas já existentes [3]. A arquitectura é apresentada na Figura 1.7.

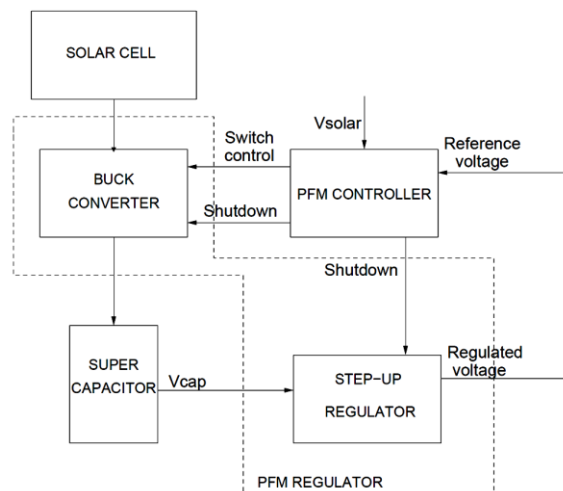


Figura 1.7- Arquitectura do *Everlast*.

O sistema foi projectado para realizar três tarefas primárias: carregar o supercondensador (100 F) através de regulador de impulso de frequência modulada, alimentar o controlador PFM (*Pulse Frequency Modulated*) através do MPPT do painel solar e, por fim, a última tarefa consiste nas funcionalidades básicas de uma rede sem fios, por exemplo: ler, processar e comunicar [23].

A função do regulador PFM é carregar o supercondensador até um determinado limite gerido pelo controlador PFM, e este faz com que o sistema comute, para que a energia do supercondensador seja transferida para o condensador de carga [3][23].

Ambimax

Este sistema armazena energia provinda de dois tipos diferentes de fonte de energia: a solar e a eólica. Contudo, a concepção é modulada para acomodar outros tipos de energia tais como a energia hídrica e a energia vibracional [3][11].

Neste ponto só será analisada a energia solar sendo o subsistema, que capta energia eólica apresentado na secção referente a essa energia. Muito semelhante ao *Prometheus*, o *Ambimax* possui um armazenamento primário (matriz com supercondensadores de 10 F) e um armazenamento secundário (bateria de polímero de lítio de 70 mAh). Ao contrário de *Prometheus*, no *Ambimax* o controlo de carga é realizado via *hardware* e não *software*. Além disso, cada subsistema referente à captação de energia possui o seu próprio supercondensador. Realiza MPPT de forma autónoma. Em vez de medir a tensão do painel solar, este sistema capta a intensidade da luz para controlar o regulador PWM para determinar o MPPT.

O subsistema para captação de energia solar é composto por um painel solar, com regulador comutador PWM (*Pulse With Modulation*) e um circuito MPPT. Assim, quando a energia solar cai abaixo do limite inferior da banda de histerese imposta pelo MPPT, o regulador encontra-se desligado sendo novamente ligado, quando a tensão proveniente do sol atinge o limite superior estipulado pela banda histerese de MPPT [3].

A utilização deste regulador de comutação tem como intuito o isolamento entre o painel solar e os condensadores, evitando, desta forma, que a tensão flua directamente para os condensadores ou que haja uma corrente inversa do condensador para a fonte. Esta característica permite que o condensador carregue de forma eficiente [3]. A Tabela 1.2 faz a comparação de alguns parâmetros dos exemplos expostos.

Tabela 1.2 - Especificação dos módulos que realizam captação de energia solar para alimentar um nó [3].

Nós e aplicações	Potência do painel solar	Tipo de armazenamento	Capacidade de armazenamento	Nó sensor	Presença de MPP
<i>Helimote</i>	190 mW	Baterias NI-MH	1800 mAh	Mica2	Não
<i>Everlast</i>	450 mW	Supercondensador	100 F	Integrated	Sim
<i>Prometheus</i>	130 mW	2 Supercondensadores e baterias de Li-ion	22 F 200 mAh	Telos	Não
<i>Ambimax</i>	400 mW	2 Supercondensadores e baterias de Li-ion	10 F 70 mAh	Eco	Sim

1.3.2 Energia eólica

Este ponto expõe a possibilidade de utilizar a captação do vento para alimentar os nós de uma RSSF [3].

A captação deste tipo de energia já provém de há muitos séculos, com a invenção do moinho a vento, que hoje em dia são utilizados, mas em menor escala [8].

A turbina eólica pode exibir duas configurações: segundo um eixo vertical ou segundo um eixo horizontal. A diferença na orientação dos eixos tem a ver com a aerodinâmica. As pás da turbina do eixo horizontal criam sustentação para fazer girar o rotor, ao passo que na concepção vertical, um lado das pás oferece maior resistência do que outro causando desta forma a rotação do eixo.

1.3.2.1 Características do fluxo aéreo

Para calcular a disponibilidade de energia eólica numa determinada área, parte-se da equação padrão da energia cinética para aproximação de um sistema em movimento [24]:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

onde m é o total de massa do ar existente na turbina em Kg e v é a velocidade instantânea do vento em m/s. Visto que [4][24]:

$$m = \rho Av\Delta t \Rightarrow E = \frac{1}{2}\rho Av^3\Delta t \quad (1.2)$$

onde ρ é tipicamente $1,25 \text{ Kg/m}^3$, A (m^2) é a área da face em que o vento incide e Δt (s) o período de tempo em que o estudo é realizado. Sabendo que a energia é o produto entre a potência e o tempo, a energia cinética pode ser convertida em potência como função da densidade do ar, área e velocidade do vento [19]. Desta forma, a potência do vento que incide nas pás da turbina é dada por:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \text{ [W]} \quad (1.3)$$

A potência que teoricamente é extraída através do gerador da turbina tem em conta, o coeficiente de potência (C_p),

$$P_T = C_p P_0 \quad (1.4)$$

Através da análise das duas últimas equações pode-se aferir que, P_T é proporcional à área da secção em que o vento embate e também é directamente proporcional ao cubo da velocidade do vento.

1.3.2.2 Característica VI de um aerogerador

Pode-se caracterizar o funcionamento de um aerogerador de duas formas: em função da velocidade do vento, ou, em função da velocidade angular do gerador. Esta análise permite avaliar o desempenho do sistema, e a potência extraída através da captação da energia do vento. Geralmente, esta característica é obtida com recurso a túneis de vento [25]. A Figura 1.8 exemplifica a característica de um aerogerador.

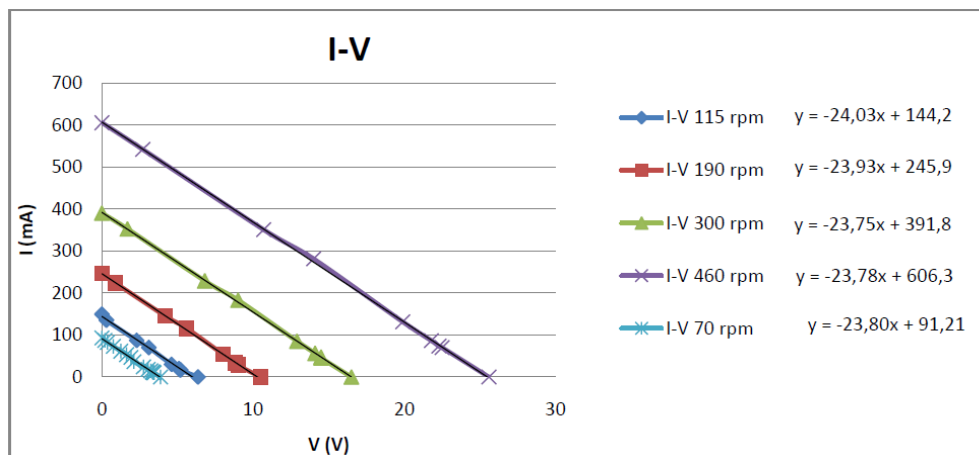


Figura 1.8 – Corrente em função da tensão para várias velocidades angulares [25].

Na Figura 1.8 pode-se ver que à medida que a tensão aumenta a corrente diminui, comportamento característico de uma fonte de tensão. Em relação à potência extraída do sistema, esta está dependente da carga que lhe é aplicada, tendo o comportamento apresentado na Figura 1.9.

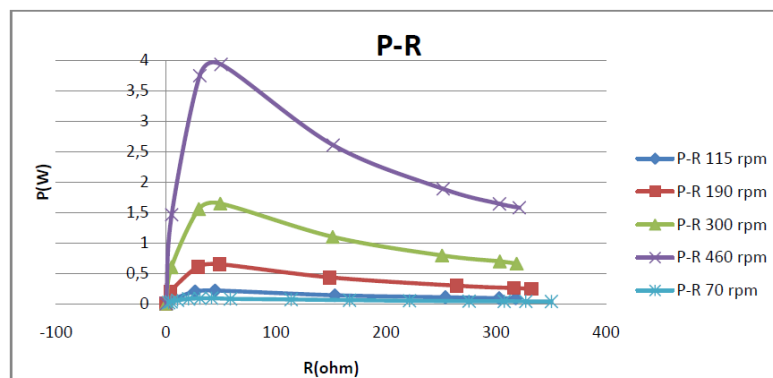


Figura 1.9 – Curva característica para um sistema de aerogeração [25].

Através da Figura 1.9 pode-se aferir, que os sistemas eólico também são caracterizados por um ponto de máxima potência, em função da resistência de carga. A relação entre a potência extraída e a tensão produzida é a apresentada na Figura 1.10.

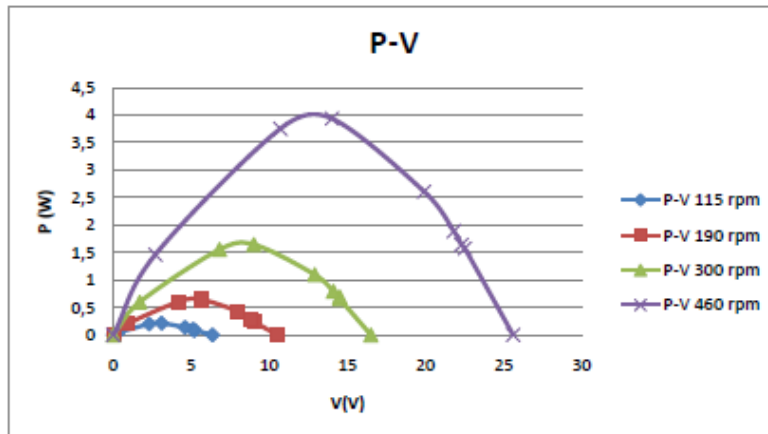


Figura 1.10 – Potência em função da tensão produzida pelo aerogerador[25].

A Figura 1.10 sugere um deslocamento, do ponto de máxima potência em função da velocidade angular.

Tal como ocorre no sistema solar, para um melhor aproveitamento da energia é comum utilizar-se controladores de carga para efectuar a máxima transferência de potência.

1.3.2.3 Exemplos de sistemas alimentados por energia eólica

Ambimax

Como já foi abordado, um sistema implementado que recorre a captação de energia eólica é o *Ambimax*. Utiliza um pequeno aerogerador de pás horizontais. A relação entre a velocidade do vento e a frequência do rotor é apresentada na Figura 1.11 (a).

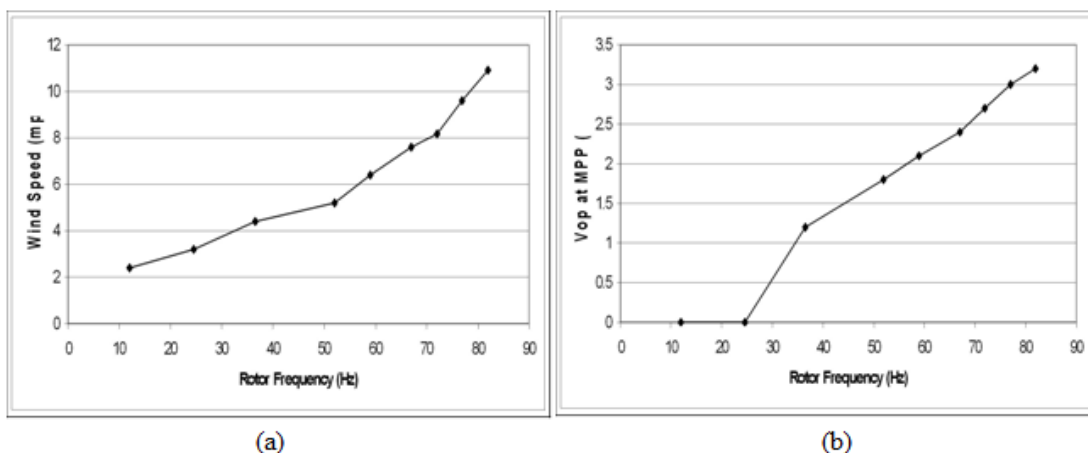


Figura 1.11 – Curvas característica para o sistema *Ambimax* [26]. (a) Velocidade do vento vs frequência do rotor; (b) Tensão do gerador vs frequência do rotor

Em relação à tensão do gerador verifica-se que, esta é aproximadamente proporcional à frequência do rotor, como mostra a Figura 1.11(b). Esta última constatação foi utilizada para projectar o circuito de máxima transferência de potência [26].

Outro exemplo de captação de energia eólica

Em [4] é proposto um sistema que utiliza uma pequena turbina para realizar a captação de energia eólica de forma a alimentar os circuitos integrados associados, bem como alimentar o nó sensor. Uma parte desta pesquisa é análoga apresentada em [24].

Este estudo faz, primeiramente, a análise da estimativa de potência que o gerador consegue oferecer ao circuito. Durante um determinado período com vento, a saída do gerador fornece energia eléctrica para alimentar todos os componentes electrónicos. A energia extra é utilizada para carregar um supercondensador, que efectua a alimentação do sistema para o período sem vento. As variáveis necessárias para fazer o cálculo da potência teórica são: raio das pás de 0,17 m; densidade do ar de 1,25 Kg/m²; velocidade média do vento de 4,5 m/s e o coeficiente de potência de 18%, obtido através do gráfico que relaciona o coeficiente de potência com a velocidade do vento (Figura 1.12) [4].

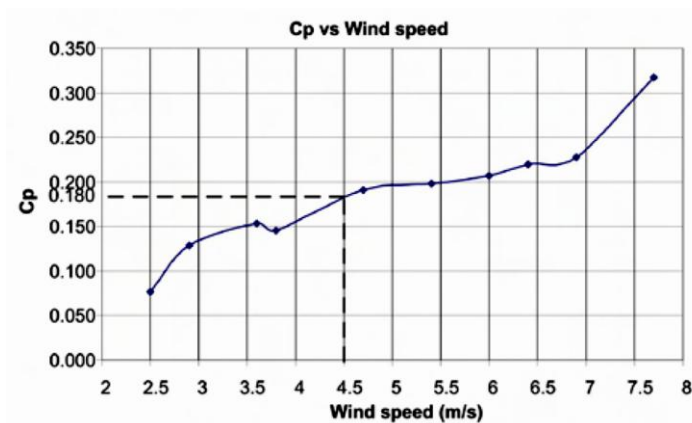


Figura 1.12- Coeficiente de potência da turbina vs velocidade do vento[4].

Através das expressões (1.3) e (1.4) obtém-se um valor de potência teoricamente gerada de 930 mW. A Figura 1.13. mostra a potência captada em função da carga.

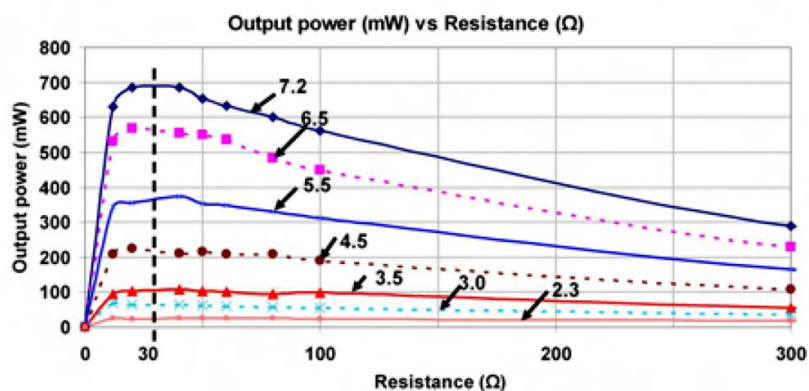


Figura 1.13- Potência de saída do gerador em função da resistência de carga [4].

Assim, através da análise gráfica pode-se aferir que a resistência que mais se adequa é a resistência de 30 Ω, em que a potência gerada é de 210 mW, para a velocidade média do vento [4].

Este sistema foi implementado tendo por base, o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.14.

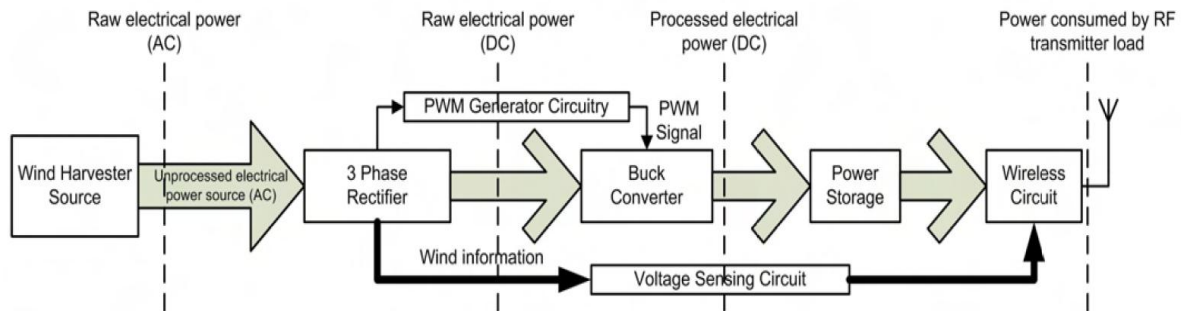


Figura 1.14- Diagrama de blocos do sistema implementado para recolha de energia eólica para alimentação de nós sensores [4].

A primeira parte do sistema consiste na captação da energia proveniente do vento. Esta gera uma corrente alternada (AC), posteriormente submetida ao bloco de rectificação composto por uma ponte de díodos (tensão DC). Esta tensão é encaminhada para um conversor DC/DC o qual encarrega-se de manter a tensão constante à entrada do bloco de armazenamento. O bloco final do diagrama é designado por bloco de carga. Entre o bloco de rectificação e o bloco de conversão é inserido um circuito que efectua a medição da tensão DC, com o intuito de medir a velocidade do vento, mas de forma indirecta [4].

1.3.3 Energia termoelétrica

Os geradores de energia termoelétrica exploram o efeito de *Seebeck*, segundo o qual a electricidade é gerada a partir de uma diferença de temperatura entre os segmentos opostos de um material condutor. A diferença de temperatura conduz a um fluxo de calor e, conseqüentemente, há um fluxo de carga desde o ponto mais concentrado até o ponto menos concentrado. Em geral, os dispositivos termoelétricos exigem um elevado gradiente de temperatura entre as duas superfícies, a fim de gerar potência [10].

1.3.3.1 Orientações para recolha de energia termoelétrica

A geração de energia termoelétrica apresenta algumas vantagens, como longa durabilidade, alta confiabilidade e baixo custo. Os inconvenientes dos geradores termoelétricos traduzem-se na baixa eficiência e no seu grande porte [27].

Os dois principais requisitos para a captação termoelétrica são: uma superfície quente e um dissipador de calor eficiente para o sistema em questão. O material padrão para esta aplicação é o telereto de bismuto (Bi_2Te_3) caracterizado por uma temperatura máxima de 175°C. A Figura 1.15 mostra a relação entre a potência gerada e o gradiente de temperatura a que o material com uma área de 25 cm² está submetido. Este gradiente refere-se à temperatura através do elemento termoelétrico e não, à diferença de temperatura entre o elemento e o ambiente [19].

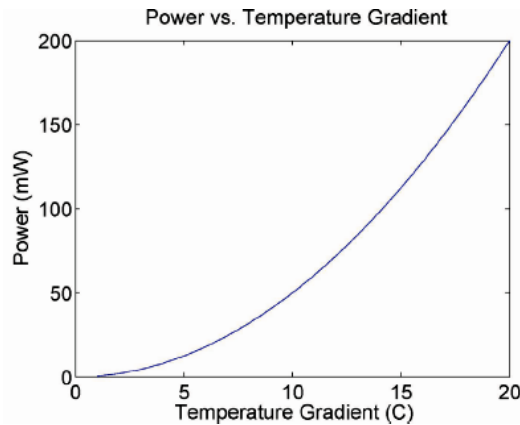


Figura 1.15- Máxima potência em função da temperatura para componentes produzidos pela indústria *Tellurex*.

O gradiente de temperatura através do elemento será sempre inferior ao gradiente de temperatura máximo sendo essencial um bom dissipador de calor para aplicações de extracção de potência máxima. Para sistemas que utilizem este tipo de captação de energia é, geralmente, dispensável a utilização de baterias secundárias, tendo em conta que, estas não são projectadas para operar em condições de temperatura extrema. No caso de serem necessárias, as baterias devem apresentar-se termicamente isoladas [19].

1.3.3.2 Eficiência de conversão

A eficiência máxima de conversão de energia a partir de um gradiente de temperatura é igual à eficiência de *Carnot* [11] que é dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{T_{sup} - T_{inf}}{T_{sup}} \quad (1.5)$$

Assumindo uma temperatura ambiente de 20°C, a eficiência é de 1,6% para uma fonte de energia de 5°C acima da temperatura ambiente.

1.3.3.3 Exemplos de sistemas alimentados por energia térmica

Micropet's TE-Power-Bolt

O sistema *Micropet's TE-Power-Bolt* é um elemento de captação de energia térmica de tensão ajustável, que utiliza o excesso de calor para gerar energia eléctrica, para dispositivos que consomem apenas alguns mW de potência. Como o seu micro termogerador é constituído por um parafuso de aço, este componente é capaz de recolher energia da superfície e das estruturas que apresentam valores entre 10 e 20 °C acima da temperatura ambiente. A saída pode apresentar variações desde 0,2 a 15 mW, estando este valor dependente das condições térmicas do momento e da tensão de estabilização de um conversor DC-DC que pode ser definido com uma tensão fixa entre 1,2 a 5 Volts. A Figura 1.16 ilustra o sistema *Micropet's TE-Power-Bolt* [27].



Figura 1.16- *Micropelt thermoelectric power bol* [27].

Sentilla

Um outro exemplo de dispositivo que realiza este tipo de captação de energia foi desenvolvido pela empresa *Sentilla* que o implementou em nós sensores através da *Wireless Industrial Technologies* (WIT). A Figura 1.17 mostra o componente desenvolvido [8].

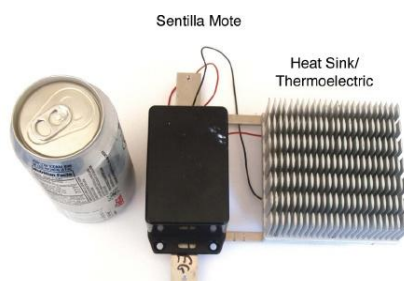


Figura 1.17- Componente desenvolvido pela *Sentilla*, para implementar em nós *wireless*.

1.3.4 Vibração

Outra fonte de energia que pode ser utilizada para produção de energia eléctrica é a vibração. As vibrações mecânicas podem ser encontradas em vários cenários: tubos de ar condicionado, automóveis, pequenos electrodomésticos, entre outros [19]. Existem três métodos que podem efectuar este tipo de captação de energia:

Electromagnético ou indutivo: Este geralmente envolve movimento do campo magnético através da utilização de uma bobina. Pela lei de *Faraday*, este movimento induz uma corrente numa bobina [28]. As formas de onda da tensão e da corrente são mais estáveis em relação aos outros dois métodos existentes. As frequências de ressonância dos transdutores electromagnéticos são tipicamente da ordem de alguns *hertz*, e com a dificuldade de produção em dimensões pequenas [8].

Electrostático: Utiliza a vibração proveniente do ambiente para efectuar o deslocamento de placas capacitivas. Assim, uma variação de capacidade gera uma corrente. Uma notável vantagem deste método é que ele é o mais fácil de implementar num micro sistema. Todos os protótipos desenvolvidos baseados neste método geram menos energia do que os outros dois métodos. Logo, com uma densidade de potência tão baixa, se o sistema exigir mais potência este método torna-se impraticável [8].

Piezoeléctrico: Este método utiliza as propriedades dos materiais piezoeléctricos, que geram potência quando se encontram sob pressão. Também são considerados

electrostáticos no sentido de poderem ser vistos como condensadores com propriedades dieléctricas. Os métodos piezoelétricos conseguem gerar energia sob a forma de tensão elevada e baixa corrente. Uma vantagem da utilização deste sistema é o tamanho em função da energia que podem oferecer. Uma desvantagem deste material é a sua impedância interna ter um valor elevado chegando em algumas situações a atingir alguns $M\Omega$ [8].

1.3.4.1 Conversor de potência com base em vibração

Tendo em conta o que é apresentado em [19] existe, um modelo simples de um conversor em que a potência de saída é dada por:

$$P_o = \frac{m\zeta A^2}{4\omega(\zeta_e + \zeta_m)^2} \quad (1.6)$$

onde P_o é a potência de saída, m é a massa de prova vibrante, A refere-se à magnitude da aceleração das vibrações de entrada, ω é a frequência das oscilações, ζ_m é o factor de amortecimento mecânico e ζ_e é o factor de amortecimento induzido.

Este modelo é utilizado para estimativas muito superficiais, visto ser muito rudimentar. Com este modelo pode-se aferir que [19]:

- A potência de saída é proporcional à massa vibrante;
- A potência de saída está dependente do quadrado da aceleração das vibrações de entrada;
- A potência de saída é inversamente proporcional à frequência de oscilação.

1.3.4.2 Exemplos de sistemas alimentados por energia vibracional

Joule-Thief™ Random Vibe Module

A Figura 1.18 ilustra o módulo *Joule-Thief™ Random Vibe*. Utiliza material piezoelétrico e converte o sinal provindo do material piezoelétrico num sinal regulado em tensão DC, através de um conversor electrónico desenvolvido pela mesma empresa [29].

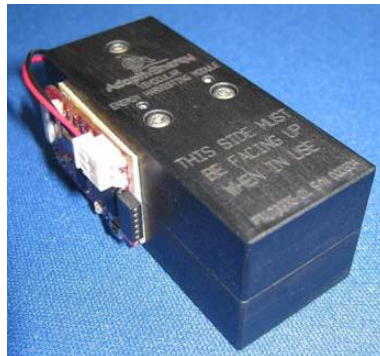


Figura 1.18 – Modelo *AdaptiveEnergy Joule-Thief™ Random Vibration Energy Harvesting* [29]

Este sistema emprega uma interface entre o sistema de captação de energia e a unidade de armazenamento que pode ser, um condensador, superbondensador, bateria de película fina ou então recarregável. Possui um circuito de protecção limitação das baterias, de modo a evitar a sobrecarga e o descarregamento total das mesmas. O sistema apresenta uma eficiência elevada em gamas de tensão reguladas quando são utilizadas vibrações baixas-médias. Várias melhorias estão em progresso, as quais incluídas em futuras versões nos circuitos de captação de energia, de modo a melhorar o desempenho em toda a gama de vibrações [29].

1.4 Ponto de Máxima Potência

A uma determinada temperatura e a um determinado nível de luminosidade as células de um painel solar fornecem um máximo de energia. Este máximo assume grande importância e é designado por ponto de máxima potência (MPP). Assim, é desejável e expectável que o painel e o circuito, em geral, operarem neste ponto. Contudo, da bibliografia é sabido que o MPP varia dentro de uma ampla gama dependendo da temperatura e da luminosidade a que o painel está exposto. Outros dos parâmetros que interferem directamente com a localização deste ponto são as condições, de sombra e a idade das células fotovoltaicas. O ponto de máxima potência depende da carga aplicada [30].

Deste modo, para obter as condições mais adequadas ao MPP é necessário desenvolver um circuito de adaptação, tendo em conta que, tanto as características do painel solar como as da carga variam ao longo do tempo. Este adaptador deve ter como principal objectivo fazer com que o painel opere, na maioria das vezes, na gama MPP independentemente das variações atmosféricas e das variações de carga. É esperado que seja entregue o máximo de potência disponível à carga sendo definido por ponto de máxima transferência de potência (MPPT) [30][18]. Dos circuitos que desempenham a função de MPPT é desejável a extracção da máxima potência disponível pela fonte.

Estes circuitos são construídos com recurso a um conversor DC-DC, que normalmente possuem um controlo PWM. Para um painel solar, sem este controlador de MPPT, o módulo do painel é obrigado a operar na tensão imposta pela carga, isto é, se o painel estiver ligado a uma bateria de 2,8 V, o painel operará nesta tensão, não havendo garantias de operação no ponto óptimo (MPPT) [18].

1.4.1 Algoritmos de controlo MPPT

Dependendo da fonte de energia que é utilizada, a capacidade máxima de aproveitamento de energia produzida ocorre, quando os módulos estão a operar no ponto de máxima potência, como supracitado. O objectivo deste ponto é apresentar algoritmos já desenvolvidos que tentam maximizar a eficiência global dos sistemas, isto é, têm como finalidade ajustar o ponto de máxima potência em função das condições atmosféricas e da carga [29-35].

Método de tensão constante (*Constant Voltage Method*)

Tendo em conta o que é apresentado em [31-32], o método da tensão constante é realizado com base na comparação da tensão gerada pela fonte energética com a tensão de referência do ponto de máxima potência do sistema. Assim, após efectuar a comparação, o desvio entre ambas é utilizado para alterar o *duty cycle* do conversor DC-DC inserido entre a fonte de energia e a respectiva carga, de forma a igualar a tensão da fonte à tensão de referência. Este método é caracterizado por ser de simples implementação. Em contrapartida existe um desperdício considerável de potência tendo em conta, que este algoritmo não considera os efeitos das variações atmosféricas [33][35]. Por sua vez também é necessário ter a curva característica de cada sistema para diferentes tensões geradas [33].

Método de Perturbação e Observação (*P&O*)

Este método é o mais comumente utilizado na maioria das aplicações que requerem a determinação do ponto de máxima potência sendo, para isso utilizado um método iterativo [31-32][36].

A fim de determinar o ponto de máxima potência é introduzida uma pequena perturbação. Esta traduz-se, num incremento ou num decremento do *duty-cycle* que realiza o controlo do conversor DC-DC [33-32]. A perturbação opera sobre as duas variáveis de interesse, isto é, com a variação do *duty-cycle* a corrente e a tensão de saída também serão alteradas, o que vai significar num aumento ou diminuição na potência de saída [33][35]. Desta forma, se a perturbação inicial provocar um aumento na potência de saída, a próxima perturbação mantém a mesma direcção que a perturbação anterior, de forma a chegar ao MPP. Caso exista um decréscimo na potência de saída, a próxima perturbação tem de seguir a direcção contrária à anterior [32][36-37]. A síntese deste algoritmo é apresentada na Tabela 1.3 - Síntese do algoritmo P&O [32].

Tabela 1.3 - Síntese do algoritmo P&O [32].

Perturbação	Mudança na Potência	Próxima Perturbação
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

O processo é repetido periodicamente até que o MPP seja alcançado. O sistema oscila em torno deste ponto. Esta oscilação pode ser minimizada quando é utilizado um passo muito reduzido para o incremento do *duty-cycle* [32][38-39]. O fluxograma é apresentado no anexo A[34]. Este algoritmo tem a desvantagem de ter uma resposta lenta a mudanças bruscas das condições atmosféricas, o que implica uma perda de potência [35] [40].

Método de incrementação de condutância (*IncCon*)

Este algoritmo é um complemento ao algoritmo anterior [40]. Este tenta reduzir as limitações existentes ao nível de oscilações em torno do MPP [36] devido às alterações das condições atmosféricas.

Este método é fundamentado na curva característica de cada sistema de energia. Cada curva apresenta um ponto máximo de potência, o que significa que a derivada da potência em ordem à tensão é nula nesse mesmo ponto [32-34][36]. Seja:

$$\begin{cases} dP/dV = 0, & \text{para MPP} \\ dP/dV > 0, & \text{esquerda do MPP} \\ dP/dV < 0, & \text{direita do MPP} \end{cases} \quad (1.8)$$

onde V e P são a tensão e a potência respectivamente do sistema.

Tendo em conta (1.8), o MPP é conseguido com base na comparação entre a condutância instantânea da fonte e a condutância incrementada. Assim, o algoritmo actua de forma a compensar a diferença destas através do ajuste do respectivo *duty cycle* do conversor DC-DC, até que seja satisfeita a seguinte condição [35]:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (1.9)$$

A principal vantagem deste método, face ao método P&O é a sua rapidez de processamento. Contudo apresenta a desvantagem, da saída ser muito instável devido à utilização da função de derivação no algoritmo [33]. O fluxograma deste algoritmo é apresentado no anexo A.2 [32].

Método de Perturbação e Observação Modificado (*MP&O*)

Como apresentado no algoritmo P&O, este possui a desvantagem de exibir valores menos exactos aquando da alteração rápida das condições atmosféricas. Devido ao facto de ser um método “*hill-climbing*” para elevadas potências de saída, a alteração dos parâmetros de entrada provoca a variação na forma de onda característica do sistema [33-34].

De forma a ultrapassar a limitação anterior, o método modificado de P&O isola as flutuações provocadas pelo processo de perturbação devido às mudanças bruscas das condições atmosféricas [34]. Este método é complementado pela inserção de um processo de estimativa de potência causada pelas mesmas mudanças. O fluxograma (Anexo A.3) demonstra como é realizado todo o processo deste algoritmo.

1.4.2 Conversores DC/DC

Dependendo do comportamento típico de cada sistema a ser utilizado, o tipo de conversor pode variar. Os três conversores DC/DC mais comuns são:

- Conversor redutor (*Buck converter*): tem por função baixar a tensão gerada pela fonte para a tensão desejada e imposta pela carga [18].
- Conversor elevador (*Boost converter*): permite elevar a tensão face à tensão nominal de entrada.
- Conversor redutor-elevador (*Buck-Boost converter*): tem por função apresentar uma saída superior ou inferior à tensão de entrada, dependendo do valor imposto à saída.

1.4.2.1 Conversor redutor

O conversor do tipo *reductor*, com modulação por impulso (PWM) consiste, basicamente em quatro componentes: um *mosfet* de potência utilizado, como um interruptor controlado (*S*), um diódo (*D*), uma bobina (*L*) e um filtro representado com condensador (*C*). A carga é representada pela resistência R_L .

Os *mosfets* são muito utilizados como interruptores devido à frequência de comutação [41]. Estes interruptores são geralmente um componente electrónico que possui dois modos de operação: em condução (modo ON), a saída da fonte está ligada à bobina causando, um armazenamento de energia; no modo de corte (OFF) está desligado da bobina [18]. O interruptor *S* é controlado por um modulador por impulsos e é comutado entre os dois estados com uma frequência de comutação de $f_s=1/T$ e com o *duty cycle* definido por [41]:

$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = f_s t_{on} \quad (1.10)$$

onde t_{on} é o intervalo temporal em que o interruptor encontra-se no modo de condução (ON) e t_{off} é o intervalo de tempo em que o interruptor está no modo de corte (OFF). Isto permite a regulação da tensão de saída em relação às variações de tensão de entrada V_I e da resistência R_L (ou da corrente de carga I_O). A tensão de saída de um conversor redutor é sempre inferior à tensão de entrada V_I . Portanto trata-se, de um conversor do tipo *step-down*. Devido à gate do *mosfet* não estar referenciada à massa, é difícil o transístor estar em condução. O conversor requer uma *gate* com condução flutuante [41].

Considerando que a operação é realizada em modo contínuo, a Figura 1.19 (b) (c), mostra o circuito equivalente para este modo. Quando o interruptor *S* está ON o diódo D_1 está OFF e quando o interruptor *S* está OFF o diódo D_1 está ON.

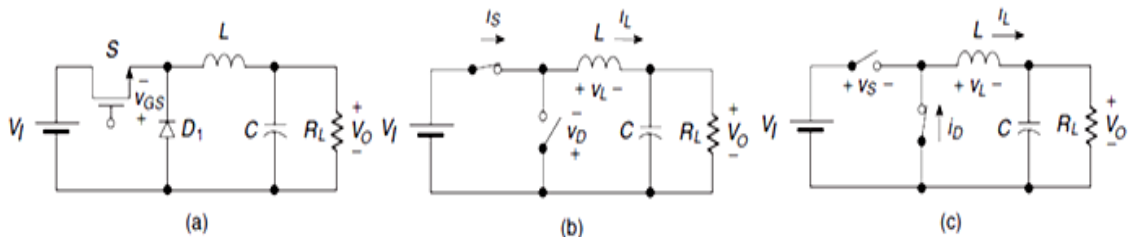


Figura 1.19 - Circuito equivalente de um conversor PWM do tipo *Redutor*. a) Circuito geral. b) Circuito equivalente quando o interruptor *S* está no modo ON. c) Circuito equivalente quando o interruptor está no modo OFF [41].

Considerando o instante de tempo $t=0$, o interruptor é ligado e conseqüentemente a tensão através do díodo é $v_D=-V_I$ polarizando-o inversamente. Isto induz uma tensão na bobina L de valor $v_L=V_I-V_O$. Assim, a corrente sobe de forma quase linear com um declive aproximadamente $(V_I-V_O)/L$. A corrente da bobina (i_L) passa através do interruptor fazendo com que $i_s=i_L$.

Durante este intervalo de tempo, a energia proveniente da tensão de entrada é transferida para a bobina, para o condensador e para carga. No instante $t=D/T$ o interruptor é desligado.

- Intervalo de tempo $0 < t < DT$

Quando o interruptor está em modo de condução (*ON*), a tensão no díodo v_D é aproximadamente igual a V_I polarizando inversamente o díodo, ilustrado na Figura 1.19 b). A tensão através do interruptor v_s e a corrente no díodo são nulas.

A tensão na bobina é:

$$v_L = V_I - V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.11)$$

Desta forma a corrente na bobina e no interruptor é:

$$i_s = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt + i_L(0) = \frac{V_I - V_O}{L} \int_0^t dt + i_L(0) = \frac{V_I - V_O}{L} t + i_L(0) \quad (1.12)$$

onde $i_L(0)$ é a corrente na bobina no instante $t=0$. A corrente de pico na bobina é:

$$i_L = \frac{(V_I - V_O)DT}{L} + i_L(0) \quad (1.13)$$

e a corrente de pico-a-pico com *ripple* é dada por:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(0) = \frac{(V_I - V_O)}{L} DT = \frac{(V_I - V_O)}{f_s L} D = \frac{V_I D(1 - D)}{f_s L} \quad (1.14)$$

A tensão no díodo é:

$$v_D = -V_I \quad (1.15)$$

Assim, a tensão inversa de pico é:

$$V_{DM} = V_I \quad (1.16)$$

A corrente média na bobina é igual à corrente de saída (I_O).

Deste modo, a corrente de pico no interruptor S é:

$$I_{SM} = I_0 + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (1.17)$$

O aumento da energia magnética armazenada na bobina durante o intervalo em questão ($0 < t < DT$) é dado por:

$$\Delta W_{L(in)} = \frac{1}{2} L [i_L^2(DT) - i_L^2(0)] \quad (1.18)$$

- Intervalo de tempo $DT < t < T$

Durante este período, o interruptor S opera em modo de corte (OFF) e o díodo D_I opera em modo ON . O circuito equivalente para este intervalo é representado pela Figura 1.19 c). Uma vez que a função de corrente é contínua, a corrente flui mesmo após o interruptor estar desligado. Tendo em conta que a bobina funciona como uma fonte de corrente significa que, o díodo fica directamente polarizado.

Analisando de forma mais minuciosa o referido intervalo, tanto a corrente no interruptor i_s como a tensão no díodo v_d apresentam um valor nulo, mas a tensão na bobina L é:

$$v_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.19)$$

A corrente que flui através da bobina e no díodo pode ser calculada através de:

$$i_D = i_L = \frac{1}{L} \int_{DT}^t v_L dt + i_L(DT) = -\frac{V_O}{L} \int_{DT}^t dt + i_L(DT) = -\frac{V_O}{L} (t - DT) + i_L(DT) \quad (1.20)$$

com $i_L(DT)$ a corrente nas condições iniciais no instante $t=DT$.

A corrente de pico-a-pico de *ripple* é:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{V_O T (1 - D)}{L} = \frac{V_O (1 - D)}{f_s L} \quad (1.21)$$

Esta corrente é independente da corrente de carga I_O , mas depende da tensão de entrada V_I e do *duty cycle* D . Para uma determinada tensão de saída fixa, o valor máximo para a corrente de pico-a-pico de *ripple* ocorre quando a tensão de entrada atinge o seu máximo V_{max} , que corresponde ao mínimo de *duty cycle* D_{min} . Esta tensão é dada por:

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{V_O (1 - D_{min})}{f_s L} \quad (1.22)$$

A tensão no interruptor v_s e a corrente máxima (V_{SM}) são definidos por $v_s = V_{SM} = V_I$. As correntes de pico-a-pico no diodo e no interruptor são dadas por:

$$I_{DM} = I_{SM} = I_O + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (1.23)$$

Este intervalo termina quando $t=T$.

A diminuição da energia magnética armazenada na bobina L durante o respectivo intervalo é descrita pela seguinte equação:

$$\Delta W_{L(out)} = \frac{1}{2} [i_L^2(DT) - i_L^2(T)] \quad (1.24)$$

Para um modo de operação estável o aumento de energia magnética na bobina é igual ao decréscimo da energia magnética na bobina, isto é:

$$\Delta W_{L(in)} = \Delta W_{L(out)} \quad (1.25)$$

1.4.2.2 Conversor elevador

O circuito conversor tipo *elevador* é apresentado na seguinte Figura 1.20. A tensão à saída (V_O) deste circuito é sempre superior à tensão de entrada (V_I). O circuito consiste numa bobina L , num *mosfet* S , num diodo D , num condensador e uma resistência de carga R_L [41]. O interruptor comuta entre o modo *ON* e *OFF* à frequência de $f_s = 1/T$, o que representa num *duty cycle* apresentado na equação (1.10):

Este conversor pode operar tanto no modo contínuo como no modo alternado dependendo da forma de onda da corrente no indutor. Este tipo de conversor não pode apresentar uma resistência de carga infinita tendo em conta que o condensador fica sem ter por onde descarregar. As Figura 1.20 (b) e (c) mostram os circuitos equivalentes de um conversor elevador a operar no modo contínuo.

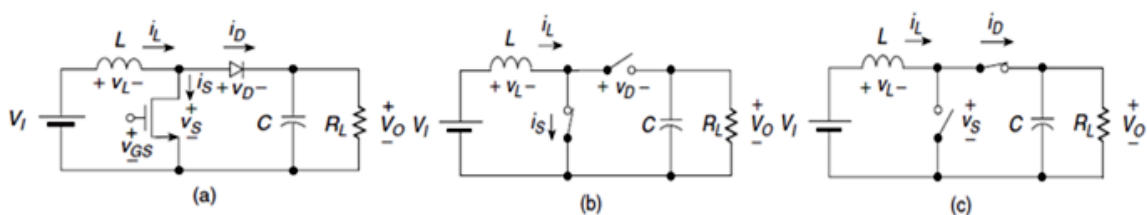


Figura 1.20 - Circuito equivalente de um conversor PWM do tipo *Boost*. a) Circuito geral. b) Circuito equivalente quando o interruptor S está no modo *ON*. c) Circuito equivalente quando o interruptor está no modo *OFF*.

Neste caso, quando o interruptor encontra-se em condução, o diodo encontra-se ao corte (*OFF*), e vice-versa.

Para o intervalo compreendido $0 \leq t \leq DT$, o interruptor opera no modo *ON*. Desta forma, a tensão que percorre o diodo é, $v_O = -V_D$ o que significa que o diodo fica inversamente polarizado.

A tensão aos terminais da bobina é $v_L=V_I$ resultando num aumento da corrente na mesma. Este aumento é linear com um declive de V_I/V_L , o que implica um aumento na energia magnética. Deste modo, a corrente no interruptor é igual à corrente na bobina.

No instante de comutação em que $t=DT$, o modo de operação do interruptor comuta, passando a funcionar ao corte através da tensão *gate-source* (V_{GS}) O indutor actua como fonte de corrente fazendo com que o díodo entre no seu estado *On*. A corrente no indutor é $v_L=V_I-V_O<0$, resultando no decréscimo da corrente na bobina com $(V_I-V_O)/L$. A corrente no díodo é igual à corrente na bobina. Durante este intervalo a energia é transferida desde a bobina L para o condensador e para a resistência de carga. Este conversor tem pouca capacidade para evitar transições bruscas.

- Intervalo de tempo: $0<t<DT$

Partindo do estado em que o interruptor é ligado (estado *ON*), o díodo parte do estado *OFF* no intervalo $0<t<DT$. Este estado é ilustrado na Figura 1.20 b).

Neste caso, o díodo apresenta uma tensão de $v_o=-V_D$. Logo o díodo apresenta-se inversamente polarizado. Assim, a tensão no interruptor e a corrente no díodo são iguais a zero. A tensão na bobina é:

$$v_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.26)$$

e a corrente na bobina e no interruptor são:

$$i_s = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt + i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^t V_I dt + i_L(0) = \frac{V_I}{L} t + i_L(0) \quad (1.27)$$

onde $i_L(0)$ é a corrente no indutor no instante $t=0$ segundos. Pela equação anterior, o pico de corrente na bobina é dado por:

$$i_L(DT) = \frac{(V_I)DT}{L} + i_L(0) \quad (1.28)$$

O valor de *ripple* da corrente no indutor pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(0) = \frac{(V_I)DT}{L} = \frac{(V_I)D}{f_s L} = \frac{(V_o)D}{M_{VDC} f_s L} = \frac{V_o D(1-D)}{f_s L} \quad (1.29)$$

com $M_{VDC} = V_o / V_I = \frac{1}{1-D}$.

Para valores fixos de V_o , f_s e L ,

$$\frac{d\Delta i_L}{dD} = \frac{V_o}{f_s L} (1-2D) \quad (1.30)$$

o valor da *ripple* da corrente na bobina é:

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{V_O}{4f_s L} \quad (1.31)$$

Conforme o *duty cycle* aumenta desde 0 a 1, o valor do *ripple* da corrente Δi_L aumenta desde zero até atingir o máximo em $D=0,5$ decrescendo posteriormente até zero. A tensão no díodo é:

$$v_D = -V_O \quad (1.32)$$

O valor médio da corrente que flui através do díodo é:

$$I_{SM} = I_I + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_O}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (1.33)$$

Este intervalo termina quando $t=DT$, o interruptor passa para o estado *OFF* A corrente i_L flui de forma contínua no modo de operação *CCM* (*Continuous Conduction Mode*).

O aumento da energia na bobina é dado por:

$$\Delta W_{L(in)} = \frac{1}{2} L [i_L^2(DT) - i_L^2(0)] \quad (1.34)$$

- Intervalo de tempo: $DT < t \leq T$

No decorrer do intervalo $DT < t \leq T$, o interruptor encontra-se desactivado (*OFF*). Este intervalo é ilustrado com o circuito da Figura 1.20 c). Tanto a corrente que atravessa o interruptor i_s como a tensão no díodo v_D são zero. A bobina descarrega durante este intervalo. A tensão dos terminais da bobina é dada por:

$$v_L = V_I - V_O = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (1.35)$$

o que significa que $V_O > V_I$.

A corrente que flui através da bobina e do díodo pode ser calculada por:

$$i_D = i_L = \frac{1}{L} \int_{DT}^t v_L dt + i_L(DT) = \frac{1}{L} \int_{DT}^t (V_I - V_O) dt + i_L(DT) = \frac{V_I - V_O}{L} (t - DT) + i_L(DT) \quad (1.36)$$

onde $i_L(DT)$ é a corrente que atravessa a bobina no instante $t=DT$.

O valor de *ripple* para a corrente na bobina é:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{(V_O - V_I)(1 - D)T}{L} = \frac{V_O D(1 - D)}{f_s L} \quad (1.37)$$

Com $V_I = V_O(1 - D)$. A tensão no interruptor é:

$$v_s = V_O = V_{SM} \quad (1.38)$$

As correntes médias de pico no diódo e no interruptor são dadas por:

$$I_{DM} = I_{SM} = I_I + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_O}{1 - D} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (1.39)$$

No pior caso, a expressão anterior fica:

$$I_{DMAX} = I_{SMAX} = I_{IMAX} + \frac{\Delta i_{LMAX}}{2} = \frac{I_{OMAX}}{1 - D_{MAX}} + \frac{\Delta i_{LMAX}}{2} \quad (1.40)$$

Este intervalo termina quando $t = T$, isto é, quando o interruptor volta ao estado activo. O decréscimo da energia magnética armazenada na bobina durante este intervalo $DT < t \leq T$ é:

$$\Delta W_{L(in)} = \frac{1}{2} L [i_L^2(DT) - i_L^2(T)] \quad (1.41)$$

No estado estável, a quantidade de energia magnética armazenada durante o intervalo $DT < t \leq T$ é igual à energia magnética cedida durante o mesmo.

1.4.2.3 Conversor redutor-elevador

O circuito típico deste tipo de conversor é apresentado na Figura 1.21 (a) [41]. Ele é constituído por um *mosfet*, que é utilizado como interruptor, uma bobina L , um diódo, um condensador e por uma resistência de carga. O interruptor comuta entre os modos *ON-OFF* à frequência $f_s = 1/T$, o que corresponde ao *duty-cycle* apresentado na equação (1.10).

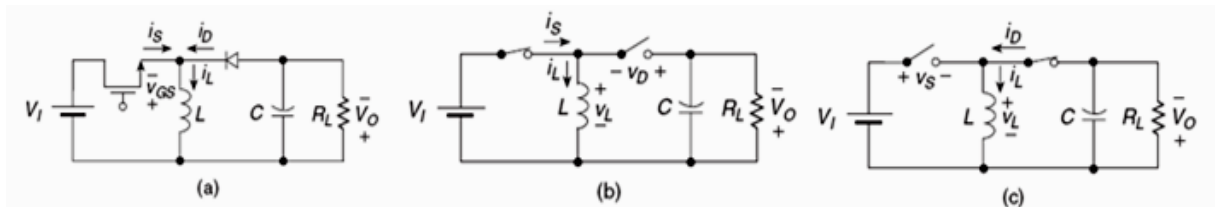


Figura 1.21 - Circuito equivalente de um conversor PWM do tipo *Redutor-Elevador*. a) Circuito geral. b) Circuito equivalente quando o interruptor S está no modo ON. c) Circuito equivalente quando o interruptor está no modo OFF.

Como nos outros dois casos, este circuito pode operar em modo contínuo (*CCM*) como em modo descontínuo (*DCM – Descontínuos Conduction Mode*). As Figura 1.21 b) e

c) mostram os equivalentes do circuito inicial (Figura 1.21(a)). Assim, mais uma vez, quando o interruptor encontra-se no modo activo o díodo encontra-se no modo off e vice-versa[41].

- Intervalo de tempo: $0 < t < DT$

Neste período de tempo $0 < t < DT$ o interruptor encontra-se estado activo (*ON*) e o díodo inactivo (*OFF*). Este intervalo corresponde ao circuito representado pela Figura 1.21b). Assim, quando o interruptor está *ON*, a tensão aos terminais do díodo é aproximadamente igual a $-(V_I + V_O)$, o que significa que o díodo fica inversamente polarizado. A tensão no interruptor e corrente no díodo são iguais a zero.

A tensão na bobina é:

$$v_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.42)$$

Daqui retira-se que as correntes na bobina e no interruptor são dadas pela equação (1.27) podendo-se concluir que, a tensão na bobina gera um aumento linear na corrente com um declive V_I/Li_L . representa a corrente na bobina no instante $t=0$.

Assim, o valor da corrente de pico na bobina é:

$$i_L(DT) = \frac{(V_I)DT}{L} + i_L(0) = \frac{V_I D}{f_s L} + i_L(0) \quad (1.43)$$

e o valor de *ripple* para a corrente de pico a pico é:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(0) = \frac{(V_I)DT}{L} = \frac{(V_I)D}{f_s L} \quad (1.44)$$

Tendo em conta que a função de transferência para a tensão (será mostrado mais à frente) é dada por $M_{VDC} = V_O/V_I = I_I/I_O = D/(1-D)$ pode-se calcular a tensão no díodo:

$$v_D = -(V_I + V_O) = -V_O \left(\frac{1}{M_{VDC}} + 1 \right) = -\frac{V_O}{D} \quad (1.45)$$

A corrente média na bobina (I_L) é igual à soma da corrente de entrada com a corrente de saída (I_O).

Desta forma, a corrente de pico no interruptor é:

$$I_{SM} = I_{L(peak)} = I_I + I_O + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_O}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (1.46)$$

Um aumento da energia magnética é dado pela expressão (1.34):

Este intervalo termina quando $t=DT$, ou seja, quando o interruptor comuta para o estado *OFF*.

- Intervalo de tempo: $DT < t < T$

Durante este intervalo, o interruptor está operando no modo *OFF* e o diodo no modo *ON*. A Figura 1.21 c) apresenta o circuito equivalente para este intervalo. A corrente no interruptor e a tensão no diodo são nulas. A tensão na bobina é:

$$v_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.47)$$

O resultado para a corrente na bobina e no diodo é:

$$\begin{aligned} i_D = i_L &= \frac{1}{L} \int_{DT}^t v_L dt + i_L(DT) = \frac{1}{L} \int_{DT}^t (-V_O) dt + i_L(DT) = \\ &= -\frac{V_O}{L} (t - DT) + i_L(DT) = -\frac{V_O}{L} (t - DT) + \frac{V_I D}{f_s L} + i_L(0) \end{aligned} \quad (1.48)$$

onde $i_L(DT)$ é o valor da corrente na bobina no instante $t=DT$.

O valor de *ripple* para a corrente de pico a pico na bobina é:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{V_O T (1 - D)}{L} = \frac{V_O (1 - D)}{f_s L} \quad (1.49)$$

Desde $V_O/V_I = D/(1-D)$, a tensão no interruptor é dada por:

$$v_s = V_{SM} = V_I + V_O = \frac{V_O}{D} \quad (1.50)$$

Resultando, desta forma, o valor da tensão máxima de pico tanto para o interruptor como para o diodo.

$$v_{SMAX} = V_{DMAX} = V_{IMAX} + V_O = \frac{V_O}{D_{MIN}} \quad (1.51)$$

A corrente máxima de pico para estes dois componentes é

$$I_{DMAX} = I_{SMAX} \approx I_{IMAX} + I_{OMAX} + \frac{\Delta i_{LMAX}}{2} = \frac{I_{OMAX}}{1 - D_{MAX}} + \frac{\Delta i_{LMAX}}{2} \quad (1.52)$$

Observe-se que o máximo de corrente de entrada ocorre em D_{Max} quando o máximo de *ripple* na corrente pico a pico, na bobina, é D_{Min} . A diminuição da energia magnética na bobina durante o intervalo é

$$\Delta W_{L(out)} = \frac{1}{2} L [i_L^2(DT) - i_L^2(T)] \quad (1.53)$$

Para um estado estacionário, a energia armazenada na bobina é igual à energia cedida.

1.5 Buffers de energia

Para este projecto foram utilizados dois tipos de *buffers* que são: baterias e supercondensadores.

Cada um dos *buffers* possui as suas vantagens e desvantagens.

Os condensadores já vêm há muito a ser utilizados para realizar o armazenamento de energia eléctrica. A apresenta Figura 1.22 o esquema de um condensador.

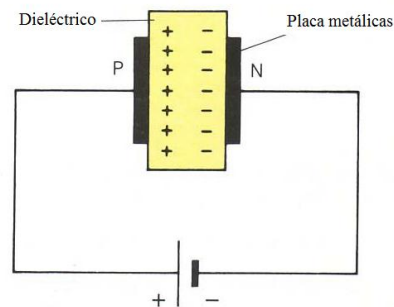


Figura 1.22 – Esquema de um condensador [42].

Este componente é muito limitado ao facto da capacidade de armazenamento de energia serem muito baixas. Apresentam a vantagem de possuírem um ciclo de vida elevado, quando comparados com o ciclo de vida das baterias, isto é, possuem um grande número de ciclos de carga/descarga de energia. Estes podem operar em situações adversas e não precisam de manutenção [43]. A energia armazenada por um condensador é dada por:

$$E(J) = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1.54)$$

onde C é a capacidade do condensador em *farads* e V a tensão de operação a que está sujeito. Na prática, a energia armazenada num condensador é limitada, isto porque, para um valor muito elevado de tensão existe uma descarga eléctrica no interior do condensador [43]. A energia armazenada por parte de um condensador de 5V/1,5F (condensador que será utilizado devidos a possuir correntes de fuga menores) que é aproximadamente 5,2 mAh.

No que respeita às baterias, as mais utilizadas actualmente para alimentar os nós sensores são as de *Nickel-metal hydride* [NiMH] [44]. Estas já assumem grande importância no mercado devido:

- à grande capacidade de condução do electrólito para aplicações com grandes potências;

- ao sistema de baterias poder ser selado por forma a minimizar a manutenção e as possíveis fugas;
- a operarem numa ampla gama de temperatura;
- apresentarem um maior “período de vida”, quando comparadas com outro tipo de bateria;
- à maior densidade de energia e menor custo por volt-hora [44].

Em caso de sobrecarga da bateria, esta pode ficar sujeita a uma elevada pressão suficiente para causar a ruptura da segurança podendo causar a explosão das mesmas. A Figura 1.23 mostra a curva característica de carga/descarga para baterias NiMH.

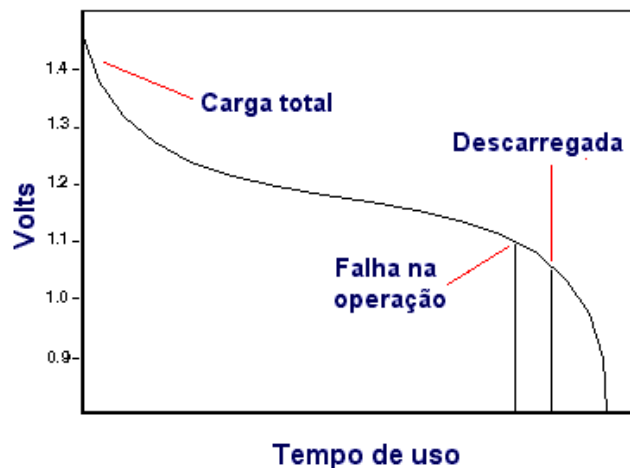


Figura 1.23- Curvas de carga e descarga para baterias de NI –MH [45].

Este tipo de bateria possui um determinado nível de auto-descarga, fenómeno que ocorre quando a bateria encontra-se em repouso. A taxa de auto-descarga é altamente influenciada e dependente da temperatura da pilha. Quanto mais elevada for a temperatura mais elevada será a taxa de auto-descarga [44].

2 Sistema Solar

Este capítulo aborda os vários protótipos desenvolvidos referentes ao sistema solar. Primeiramente são apresentados os parâmetros fundamentais para percepção dos vários sistemas explorados. Depois são devolvidos os sistemas de captação de energia e apresentados os protótipos finais para testes.

2.1 Estudo do painel solar de 0,5 Watt

O painel solar alvo desta componente do trabalho foi o modelo MSX005F, que possui as seguintes características [20]:

- Tensão em circuito aberto: 4,6 V
- Corrente em curto-circuito: 160 mA
- Corrente típica em carga: 150 mA
- Tensão típica em carga: 3,3 V

O primeiro passo deste estudo foi determinar a curva característica do painel solar de 0,5 W. Para tal foi implementado o esquema de montagem apresentado na Figura 2.1.

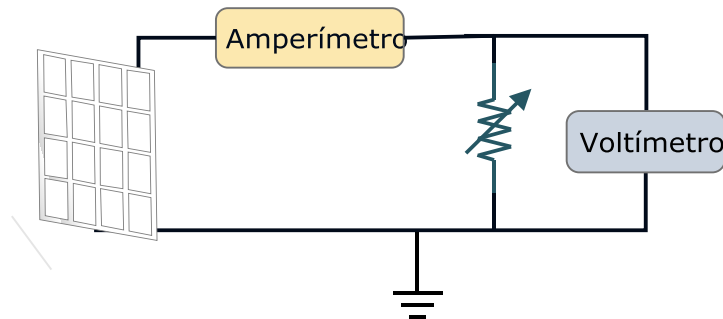


Figura 2.1- Esquema de montagem para determinar a curva característica do painel solar.

Orientou-se o painel solar directamente para o sol de forma a tentar captar a maior intensidade de radiação. Variou-se o valor do potenciômetro (R) e registaram-se os diferentes valores da corrente e da queda de tensão aos terminais do painel solar para os diferentes valores de resistência. Assim, tendo o valor das respectivas leituras, pela Lei de Ohm consegue-se saber a resistência de carga correspondente a cada ponto lido sempre que for necessário. Foi utilizado um luxímetro (*SILVA PRO ADC*) para medir a intensidade de radiação luminosa, de modo a permitir determinar a corrente produzida pelo painel solar a um determinado nível de radiação solar.

Através da análise dos resultados obtidos desenharam-se as seguintes curvas características para o painel solar em estudo para diferentes níveis de radiação solar, os

resultados são ilustrados na Figura 2.2. As unidades de radiação são indicadas em Lux, sendo 1 Lux igual a 1 Lúmen por m².

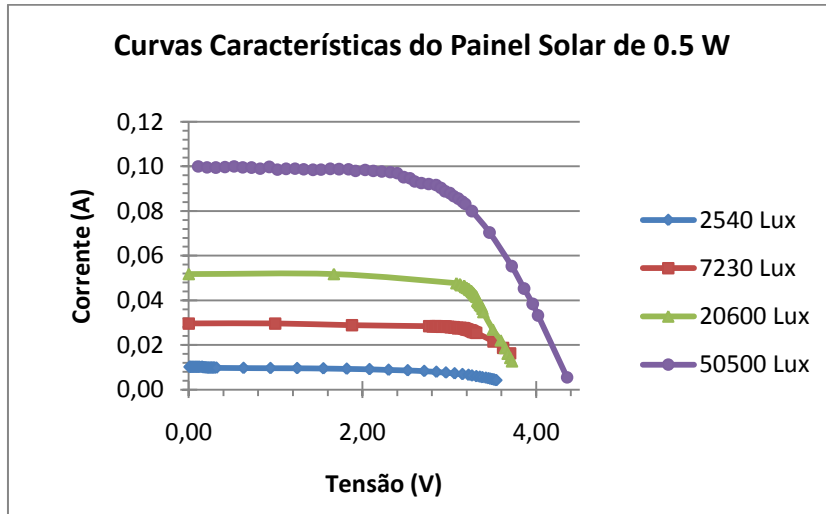


Figura 2.2- Curvas características para os diferentes valores de corrente.

Na Figura 2.2 pode-se aferir que o pannel solar tem um comportamento idêntico ao de uma fonte de corrente. Para valores baixos de tensão (abaixo dos 2,5 V) a corrente mantém-se constante e para valores mais elevados de tensão, a corrente tende a diminuir consideravelmente.

Trataram-se os dados de forma a conseguir determinar qual a potência disponibilizada pelo pannel solar para os diferentes valores de corrente alcançando os da Figura 2.3.

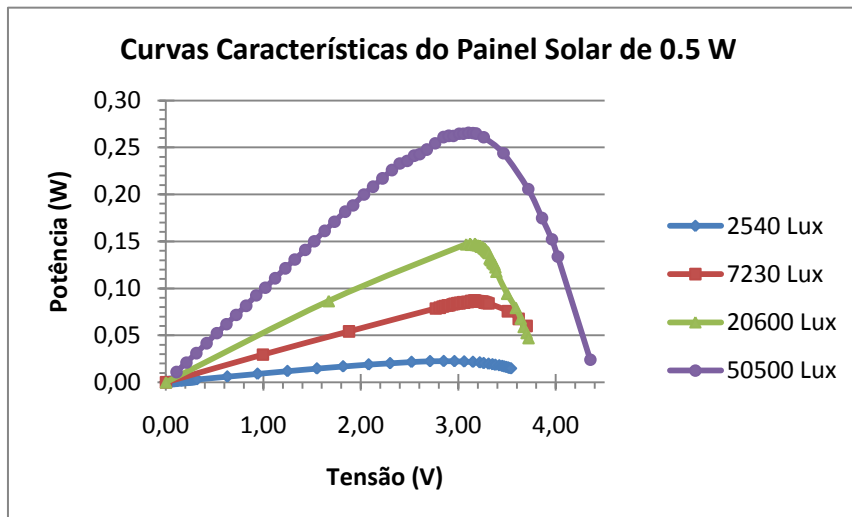


Figura 2.3 – Curvas características para a potência e tensão.

Observando os resultados verifica-se que, a tensão à qual se dá o ponto de máxima potência é em torno dos 3,1 V, para os vários valores de luminosidade. Repetiu-se novamente a experiência com o objectivo de analisar o efeito da temperatura no ponto de máxima potência e verificou-se que este desceu para os 2,3V.

No que se refere ao às impedâncias em que ocorre o ponto de máxima potência, estas são apresentadas na Figura 2.4.

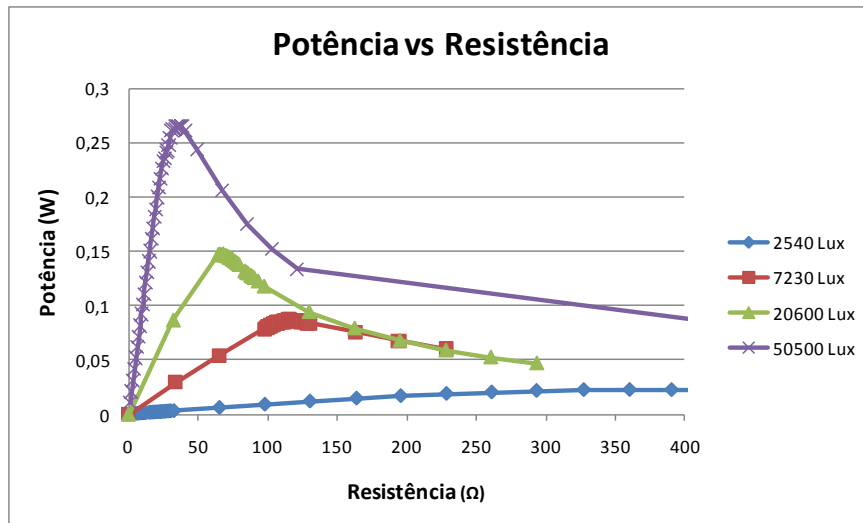


Figura 2.4 – Valores de impedâncias para o ponto de máxima potência.

Como a energia captada será armazenada em baterias, foi necessário verificar como é que estas respondem aos picos de corrente a que podem estar sujeitas devido. Assim, utilizou-se uma fonte de corrente ligada directamente às baterias, medindo o nível de tensão das baterias no período de um minuto, em que é aplicada uma determinada corrente 200 mA. Posteriormente foi medida a tensão nas baterias sem aplicação de corrente. Anotaram-se os valores da tensão aos terminais das baterias. A Figura 2.5 é o gráfico que ilustra a reacção da tensão aos terminais das baterias aquando um pico de corrente.

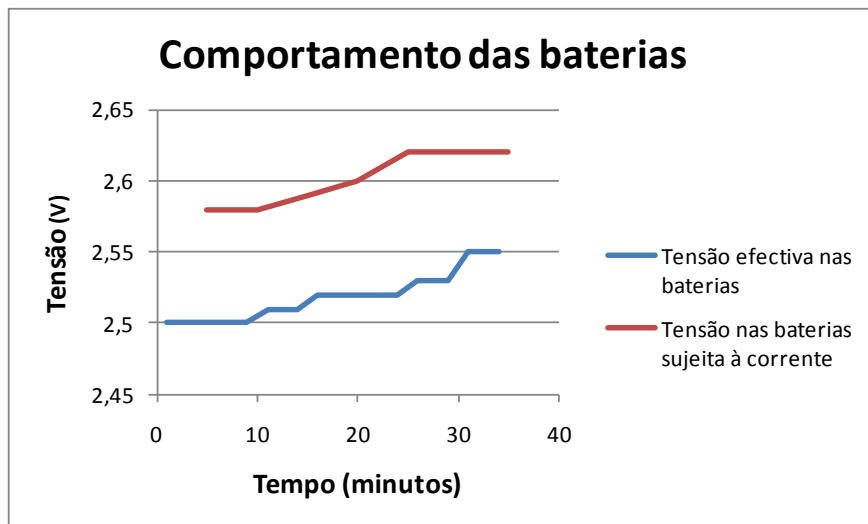


Figura 2.5- Comportamento das baterias em função da variação da corrente.

Verifica-se que a tensão aos terminais da bateria não corresponde à tensão aplicada. Desta forma, a bateria apresenta uma impedância interna que não pode ser desprezada.

2.2 Modelos de carregamento

Foram analisados três modelos de carregamento de baterias com recurso à energia solar, de modo a avaliar qual o melhor sistema para o efeito de armazenamento e aproveitamento de energia.

A Figura 2.6 mostra o diagrama de blocos geral para cada um dos modelos.

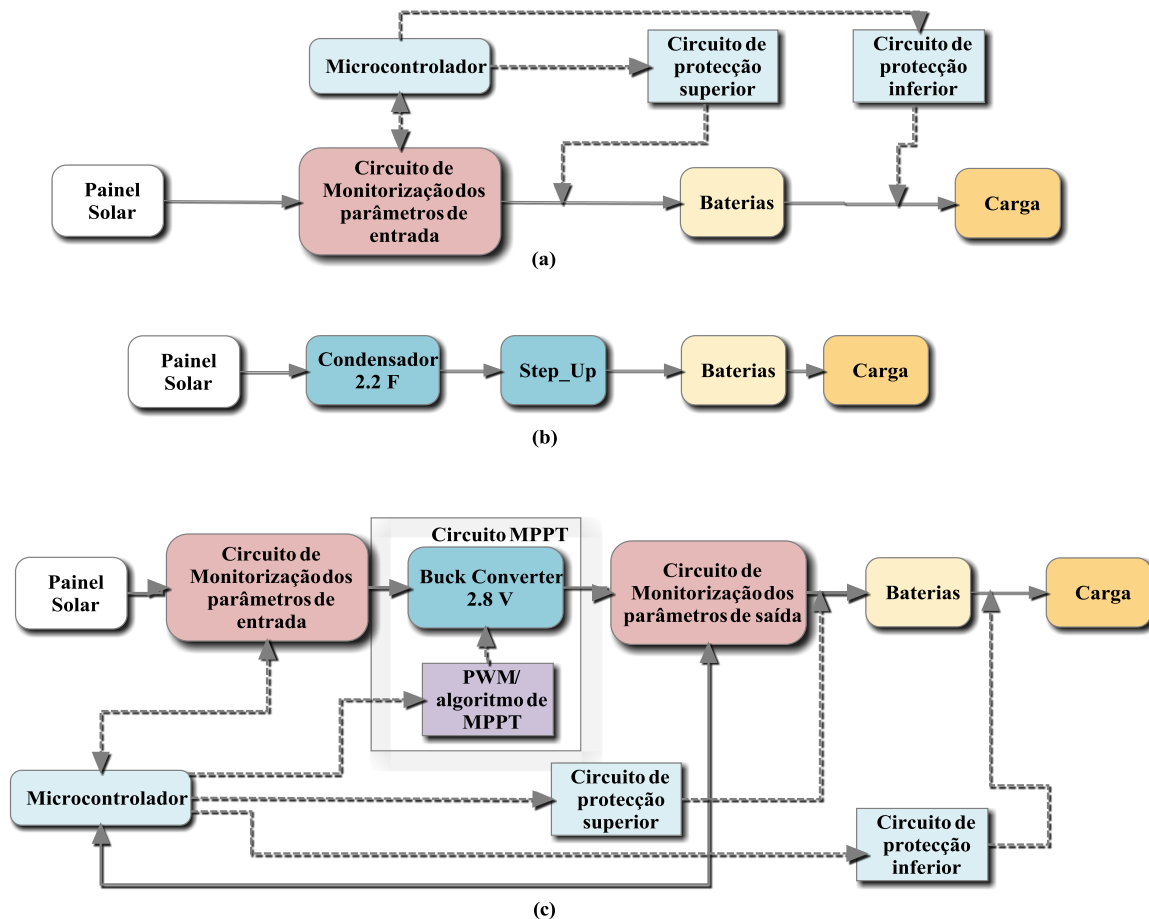


Figura 2.6- Diagramas de blocos para os diferentes circuitos estudados. (a) Modelo On-Off; (b) Modelo com condensador; (c) Modelo com MPPT.

A Figura 2.6 (a) mostra o primeiro sistema analisado. Ligou-se, um painel solar directamente a um par de pilhas tipo AA de (2500 mAh). Os circuitos de protecção permitem que a bateria não seja carregada acima do valor máximo permitido para a tensão nem que descarregue abaixo do limite inferior de tensão. A Figura 2.6 (b) expõe o segundo sistema alvo de análise, que consistiu na ligação de um painel ligado a um condensador, que por sua vez carregava as baterias através de um conversor tipo conversor elevador (*step-up ou boost*). Por fim, o terceiro circuito a ser estudado já permite um circuito de MPPT (Figura 2.6 (c)). O bloco referente ao MPPT foi desenvolvido com o intuito de aumentar e a eficiência do sistema.

O bloco referente ao controlo de carga (circuito de MPPT) assume um papel fundamental no que concerne à preservação dos *buffers* (carga/descarga) influenciando, desta forma, o seu tempo útil de vida e fiabilidade de todo o sistema. Este bloco é definido

pela tensão de operação do módulo e pelas respectivas correntes. Deve suportar a corrente total dos painéis a serem ligados.

As suas principais funções são:

- controlar o carregamento dos *buffers* de forma a otimizar o sistema;
- controlar a descarga para que o *buffer* não ultrapasse o nível mínimo de tensão que comprometa a sua utilização.
- protecção contra falhas que possam ocorrer nos sistemas ligados ao bloco.

Para avaliar os sistemas implementados foram obtidos os parâmetros de interesse, que são:

- corrente fornecida ao circuito pelo painel solar;
- corrente fornecida pelo controlador de carga aos *buffers*;
- corrente fornecida ao circuito de carga pelos *buffers*;
- tensão em cada um dos *buffers*;
- tensão no painel solar

De forma a não haver um aumento relevante do consumo de potência com a introdução dos circuitos de medição foi necessário escolher os circuitos adequados. O controlo do sistema e as leituras dos parâmetros de interesse foram realizados pelas portas ADCs presentes no microcontrolador ATMega168 de 8 bits. Os circuitos de monitorização e de comunicação de dados serão apresentados em detalhe no Capítulo 4.

2.2.1 Modelo ON-OFF

O modelo ON-OFF foi concebido para analisar a eficiência de um sistema sobre o qual não é realizado qualquer controlo de carga para máxima transferência de potência. A única atenção tida foi a construção de um circuito de protecção para as baterias, visto que estas possuem um nível de tensão máximo e mínimo admissível. A Figura 2.7 mostra o circuito eléctrico implementado, já com os circuitos de medição e controlo das varáveis necessárias para avaliar o desempenho do sistema.

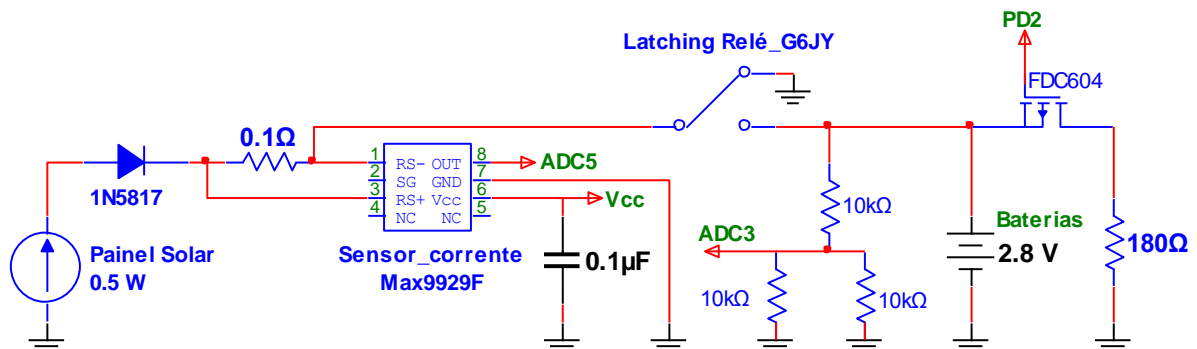


Figura 2.7- Circuito eléctrico do modelo ON-OFF.

O díodo de *Shockley* ligado ao painel solar é caracterizado por possuir uma baixa queda de tensão e suportar correntes até 1 A. A presença deste componente foi importante para impedir uma eventual descarga da corrente das baterias para a resistência interna do painel.

O circuito realiza a leitura de duas correntes (através do sensor de corrente MAX9929F): a corrente fornecida às baterias e a corrente de curto-circuito dependendo do estado do relé. O relé comuta de estado, aquando a recepção de um impulso imposto (3 V) por dois pinos digitais (PB0 e PB1) do microcontrolador Atmega_168. O relé escolhido foi o *Omeron latching relay_G6JY*, ilustrado na Figura 2.8.

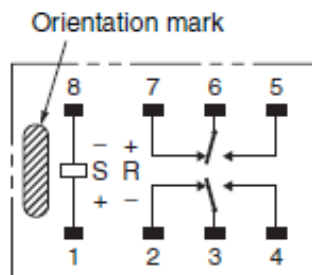


Figura 2.8- *Omeron latching relay_G6JY* [46].

Esta escolha foi baseada na função a desempenhar e nas próprias características do relé. Devido ao facto de ser *latching*, isto é, é biestável, quando é aplicada uma determinada corrente nos pinos *set* e *reset*, este comuta de estado permanecendo neste estado, mesmo quando é desligada a corrente. A vantagem deste tipo de relé é que o seu consumo (33 mA) apenas ocorre no acto da comutação de estado.

A leitura da corrente é realizada pela porta ADC5 presente no microcontrolador já supracitado. Este circuito também realiza duas medições de tensão (através de um divisor resistivo), uma referente à tensão aos terminais do painel quando ligado às baterias, e a outra referente à tensão efectiva nas baterias. Esta última é efectuada quando o relé encontra-se no estado em que coloca o painel em curto-circuito (estado presente na Figura 2.7). Os valores das resistências utilizadas para efectuar o dimensionamento correcto, devido às limitações da tensão máxima admitida nas portas ADC do microcontrolador, foram de 10 K Ω tendo em conta que este valor é o indicado pelo tutorial deste componente. A resistência de carga foi projectada para consumir uma corrente inferior a 16 mA e permite avaliar o efeito de descarga da bateria.

2.2.2 Modelo Painel/Condensador

Este modelo é constituído por um condensador de 2,2 F, ligado directamente a um painel solar, de modo a avaliar o desempenho do sistema. Para a medição das respectivas correntes e tensões foram utilizados multímetros. O objectivo do condensador é evitar constantes ciclos de carga e descarga por parte das baterias devido às variações na radiação solar. Tendo em conta os baixos valores de tensão nos terminais do condensador, a eficiência do sistema será pequena no início do carregamento. Para aumentar a eficiência,

o condensador não deve ser descarregado abaixo de um determinado limite. A Figura 2.9 apresenta o esquema eléctrico do circuito. De modo a diminuir o número ciclos de carga e descarga das baterias, a energia é enviada do condensador para as mesmas quando for atingido um determinado limite de tensão.

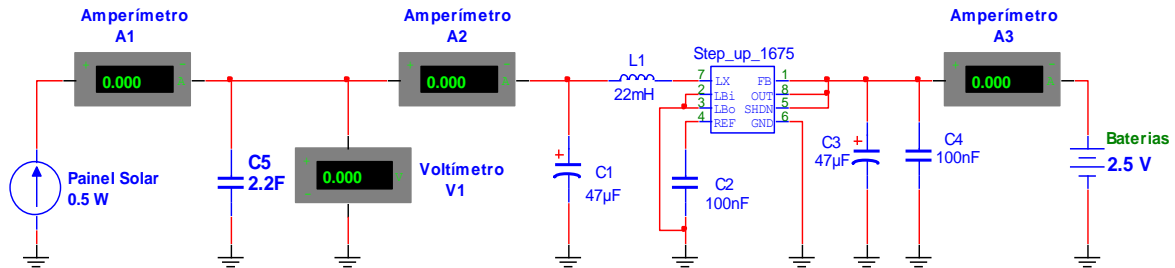


Figura 2.9- Esquema eléctrico do modelo com condensador.

Este modelo fez uso de um conversor elevador de modo a elevar a tensão a ser aplicada nos terminais das baterias. Devido ao facto do condensador não estar sempre no seu máximo de carga (3 V), o conversor elevador tenta compensar o nível de tensão aos terminais das baterias, esperando desta forma que haja passagem de corrente para os respectivos *buffers* (baterias).

2.2.3 Modelo para máxima transferência de potência

O modelo que permite a máxima transferência de potência foi o que apresentou mais complexidade na sua arquitectura e construção, tendo em conta que já apresenta um controlo de carga de modo a aproveitar ao máximo a potência disponibilizada pelo sistema. Este foi construído com recurso a um conversor tipo redutor, uma vez que o ponto de máxima transferência do painel ocorre entre os 3 V e 3,1 V. Este valor está acima da tensão das baterias. Assim, foi necessário criar um circuito que transferisse esse ponto para a tensão máxima admitida nas baterias, que é cerca de 2,8 V. Desta forma, construiu-se um circuito que baixasse a tensão e elevasse a corrente, tentando desta forma ajustar o ponto de máxima potência.

Recorrendo ao que foi exposto no ponto 1.1.6.1, foi projectado um circuito conversor do tipo *buck*.

- **Dimensionamento do Conversor Redutor para aplicação**

Desenhou-se um conversor elevador (*buck*) com as seguintes características: $V_I = (3,85 \pm 0,75)$ V, $V_O = 2,8$ V, $I_{Min} = 10$ mA, $I_{Max} = 200$ mA, $V_r/V_O \leq 0,1\%$. O valor mínimo e máximo da tensão de entrada são $V_{I_{Min}} = 3,1$ V e $V_{I_{Max}} = 4,6$ V.

O mínimo para a potência DC de saída é:

$$P_{oMin} = V_o I_{oMin} = 2,8 \times 10 = 2,8 \text{ mW} \quad (2.1)$$

e a máxima potência que deve ser admitida é:

$$P_{oMax} = V_o I_{oMax} = 2,8 \times 200 = 560 \text{ mW} \quad (2.2)$$

A resistência de carga deve encontrar-se na seguinte gama de valores:

$$R_{LMin} = \frac{V_o}{I_{oMax}} = \frac{2,8}{200} = 14 \Omega \quad (2.3)$$

$$R_{LMax} = \frac{V_o}{I_{oMin}} = \frac{2,8}{10} = 280 \Omega \quad (2.4)$$

Desta forma, a função transferência no que respeita à tensão DC é:

$$M_{VDCMin} = \frac{V_o}{V_{iMax}} = \frac{2,8}{4,6} = 0,609 \quad (2.5)$$

$$M_{VDCMax} = \frac{V_o}{V_{iMin}} = \frac{2,8}{3,1} = 0,9 \quad (2.6)$$

Admitindo que a eficiência de um conversor deve rondar os 90%, o *duty cycle* pode assumir os seguintes valores.

$$D_{Min} = \frac{M_{VDCMin}}{\eta} = \frac{0,609}{0,9} = 0,676 \quad (2.7)$$

$$D_{Max} = \frac{M_{VDCMax}}{\eta} = \frac{0,9}{0,9} = 1 \quad (2.8)$$

Admitindo que a frequência de comutação do *Mosfet* é $f_s = 50 \text{ KHz}$, o valor mínimo para a bobina requerida pelo sistema, de forma a manter o conversor a operar em CCM é:

$$L_{Min} = \frac{R_{LMax} (1 - D_{Min})}{2f_s} = \frac{280 (1 - 0,676)}{2 \times 50 \times 10^3} = 907 \mu\text{H} \quad (2.9)$$

Optou-se por utilizar uma bobina de 1 mH.

O valor máximo do *ripple* para a corrente na bobina é:

$$\Delta i_{LMax} = \frac{V_o (1 - D_{Min})}{f_s L} = \frac{2,8 (1 - 0,676)}{50 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-3}} = 18 \text{ mA} \quad (2.10)$$

O valor máximo do *ripple* para a tensão tendo em conta a relação $\frac{V_R}{V_o} \leq 0,1\%$ (V_R) é:

$$V_R = \frac{V_o}{1000} = \frac{2,8}{1000} = 2,8 \text{ mV} \quad (2.11)$$

Se o condensador possuir uma capacidade que verifique $V_R = r_{CMax} \Delta i_{LMax}$, então a resistência equivalente em série é:

$$R_{Max} = \frac{V_R}{\Delta i_{LMax}} = \frac{2,8}{18} = 0,155 \Omega \quad (2.12)$$

O valor mínimo para a capacidade do condensador de filtragem, para o qual o *ripple* de tensão é determinado pelo *ripple* é:

$$\begin{aligned} C_{Min} &= \left\{ \frac{D_{Max}}{2f_s R_C}, \frac{1 - D_{Min}}{2f_s R_C} \right\} = \frac{D_{Max}}{2f_s R_C} = \\ &= \frac{1}{(2 \times 50 \times 10^3) \times (80 \times 10^{-3})} = 125 \mu F \end{aligned} \quad (2.13)$$

O condensador escolhido foi de 330 μF . Desta forma, a frequência de corte para o filtro passa baixo de saída é dada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{(1 \times 10^{-3} \times 330 \times 10^{-6})}} = 277,1 \text{ Hz} \quad (2.14)$$

Assim,

$$\frac{f_s}{f_o} = \frac{50 \times 10^3}{277,1} = 180,44 \text{ Hz} \quad (2.15)$$

O *mosfet* e o diodo admitem em termos de tensão e corrente os seguintes valores:

$$V_{SMax} = V_{DMax} = V_{IMax} = 4,6 \text{ V} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} I_{SMax} = I_{DMax} &= I_{OMax} + \frac{\Delta i_{LMax}}{2} = (200 \times 10^{-3}) + \frac{(18 \times 10^{-3})}{2} \\ &= 209 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.17)$$

A Figura 2.10 mostra o circuito apresentado antes de construir a placa de circuito impresso, para verificar o correcto funcionamento do conversor redutor projectado.

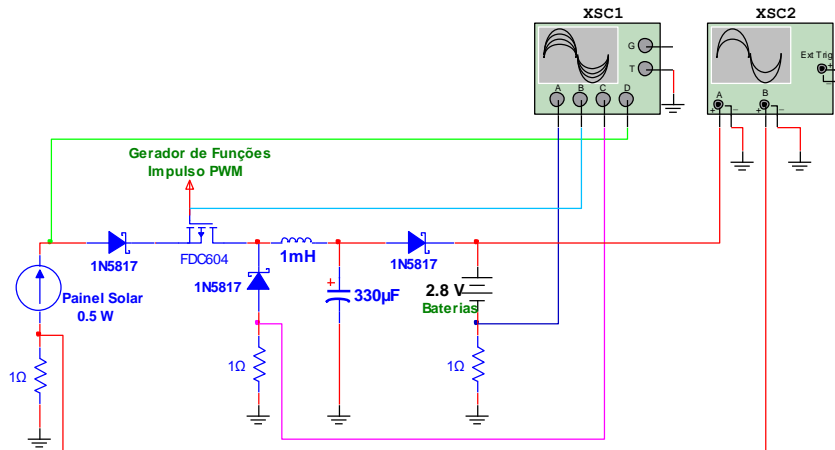


Figura 2.10 - Configuração eléctrica para teste do conversor redutor.

Utilizou-se uma fonte de sinal em modo de corrente com uma gama de entrada entre 3,1 V e 4,2 V, um gerador de funções para gerar o sinal PWM a uma frequência de 50 KHz e uma amplitude 3,3 V, que foi aplicada na *gate* do *Mosfet*. As resistências de 1 Ω foram o meio mais indicado para determinar a corrente que passava por cada ramo. Desta feita, os resultados finais do funcionamento do conversor são apresentados na Figura 2.11.

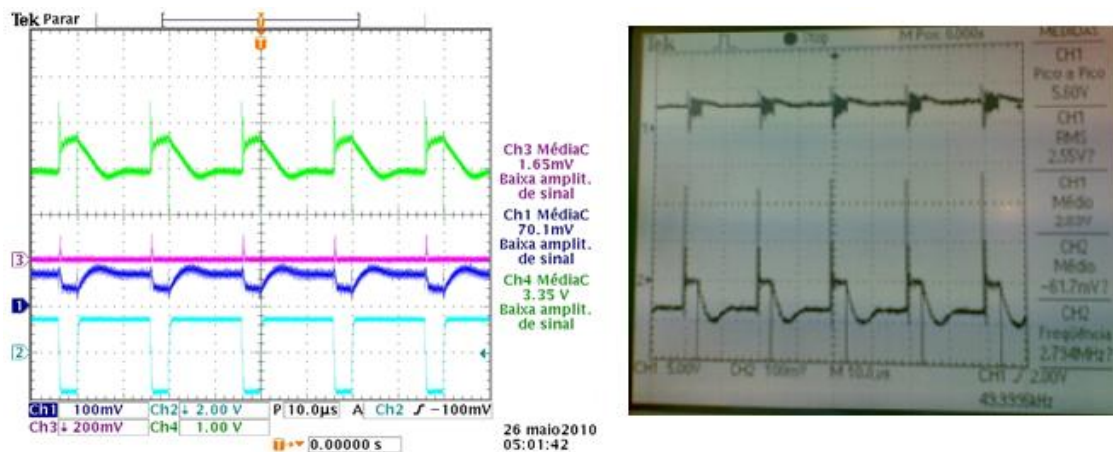


Figura 2.11- Resultados experimentais do conversor redutor.

A Figura 2.11 apresenta seis canais. Para o primeiro osciloscópio (de quatro canais), o canal 1 fornece informação sobre a corrente à saída do conversor, isto é, a corrente fornecida às baterias. O canal 2 mostra o sinal PWM gerado pelo gerador de funções *Philips PM 5138*. O canal 3 apresenta a corrente média que percorre o diodo constituinte do conversor. Finalmente, o canal 4 mediu a tensão à entrada do conversor. Em relação à Figura 2.11 (b) (segundo osciloscópio), esta apresenta no canal 1 a tensão média de saída e o canal 2 a corrente média de entrada (corrente fornecida ao sistema pela fonte).

Através da análise gráfica apresentada verifica-se que o sistema está a funcionar correctamente, tendo em conta que a tensão à saída do conversor diminui (passa dos 3,35 V iniciais par 2,83 V à saída). Em contrapartida a corrente à saída do sistema aumenta de 63,7 mA para 70,1 mA.

Analisando a eficiência do conversor, que é dada pela razão entre a potência de entrada pela potência de saída, verifica-se:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{2,81 \times 70,1 \times 10^{-3}}{3,35 \times 63,7 \times 10^{-3}} = 92\% \quad (2.18)$$

- **Geração do impulso PWM**

O impulso com modulação foi gerado pelo microcontrolador através do pino PB1 (Anexo D), que é a porta dedicada para a realização de impulsos modulados a uma frequência diferente da frequência interna do microcontrolador. Criou-se um pequeno código em C de modo a gerar uma onda rectangular à frequência desejada de 50 KHz.

```
/* configPWM - Configura o timer 1 para gerar PWM 50kHz */
void configPWM(void) {
    TCCR1A = 0; // disable all PWM on Timer1 whilst we set it up
    ICR1 = 160; // frequency is every 20ms
    // Configura o timer 1 no modo de Fast PWM via ICR1
    TCCR1A = (1<<WGM11);
    TCCR1B = (1 << WGM13) | (1<<WGM12) | (1 << CS10);
    DDRB |= _BV(1); // configura a porta B1 para pino de saída
    TCCR1A |= 2 << 6; // aciona PWM através da porta B1 para utilizar o modo
    não inversor - mode2
    OCR1A = ICR1 * 2 / 20;
    TIMSK |= _BV(OCIE1A); // Ajusta para interrupção por Overflow do Timer 1
}
```

- **Configuração do Algoritmo de MPPT**

O algoritmo para realização do ponto máximo transferência de potência utilizado foi o algoritmo perturbação e observação apresentado no ponto 1.1.5. Foi configurado da seguinte forma.

```
ISR (TIMER1_COMPA_vect)
    // Determina o novo valor do PWM
    switch (direction) { // Verifica a direcção
    case DOWN: // Se UP..
        if (PWMCOUNT < 158) { // Incrementa e verifica se chegou ao máx.
            PWMCOUNT += PASSO; // Se chegou ao máximo, muda a direcção
        }
        break;
    case UP: // Se DOWN..
        if (PWMCOUNT > 2) { // Decrementa e verifica se chegou a zero
            PWMCOUNT -= PASSO; // Se chegou ao mínimo, muda a direcção
        }
        break;
    }
    direction = PAUSE;
```

Esta configuração teve por base o fluxograma do algoritmo P&O apresentado no anexo A.1. Após a realização dos pontos anteriores, desenhou-se o circuito final, estando

este apto a fazer as leituras dos parâmetros mais importantes e relevantes para a estimativa da viabilidade do sistema.

O esquema eléctrico apresentado na Figura 2.12 ilustra, a configuração final para este modelo.

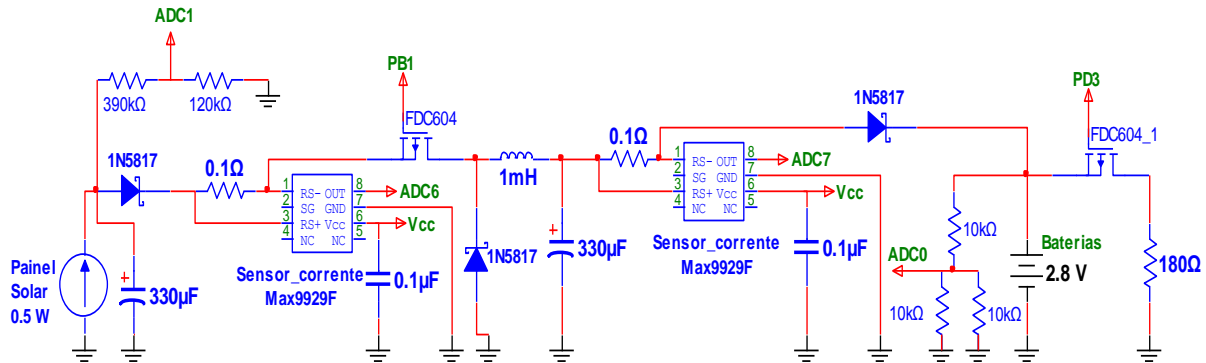


Figura 2.12 - Esquema eléctrico final do modelo com máxima transferência de potência.

Este modelo faz uso de dois sensores de corrente. O primeiro dá informação acerca da corrente que está a ser fornecida pelo painel solar à entrada do conversor tipo *buck*. No que respeita ao segundo, este realiza a leitura da corrente que está a ser fornecida às baterias e à respectiva carga (180 Ω tendo em conta, que a potência consumida pelo divisor resistivo face à potência dissipada na resistência de 180 Ω pode, ser considerada muito baixa, logo desprezada). Em relação aos divisores resistivos (ADC0 e ADC1), estes têm como função limitar a tensão de forma a ser possível a leitura das tensões tanto impostas pelo painel como pelas baterias, por parte do microcontrolador.

2.3 Sistema para Testes

Os testes finais recaíram sobre dois protótipos, o modelo ON-OFF e o modelo com MPPT. Para isso foi necessária a implementação dos circuitos expostos na Figura 2.7 e Figura 2.12 em placas de circuito impresso. Primeiramente, recorreu-se à ferramenta de desenho *Ultiboard 11* para realizar a projecção dos componentes nas respectivas placas de duas faces (Anexo B.1 e B.2).

Para a impressão do desenho dos circuitos, foram utilizadas folhas de acetato. Foi necessário ter em conta a separação entre as duas faces. A face superior tem de ser impressa com a opção de reflexão activa para que entre em contacto directo com a placa, tendo em conta que, desta forma, evitam-se possíveis imperfeições aquando da sua submissão à fotosensibilização, como mostra a Figura 2.13, refere-se ao modelo ON-OFF, tendo sido aplicado o mesmo processo ao modelo com MPPT. A reflexão pode ser evidenciada através da visualização das letras referentes à face superior do projecto (Figura 2.13- (a)).

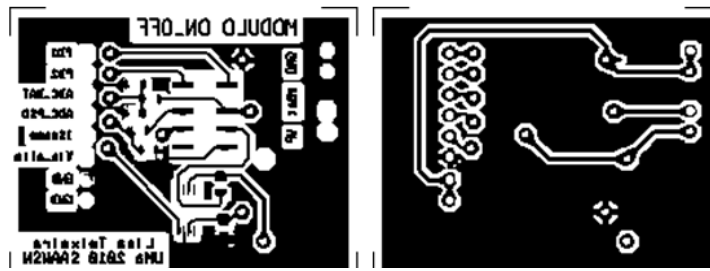


Figura 2.13- Projecto do modelo On-Off impresso em papel de acetato. (a) Face Superior; (b) Face Inferior.

Após todo o processo de preparação das placas (incluiu, processo é fotosensibilização por ultravioletas, revelação numa solução corrosiva de soda caustica com água e corrosão da parte do cobre que não sofreu fotosensibilização com solução de percloro de ferro) foram verificadas (com recurso a multímetro) todas as pistas da placa de forma a evitar eventuais curto-circuitos. Passou-se à fase da perfuração e soldadura dos componentes. Mais uma vez foram analisadas todas as ligações entre componentes, com o intuito de garantir o bom funcionamento dos circuitos. Seguidamente são apresentadas as placas de circuito impresso referente a cada modelo (Figura 2.14).

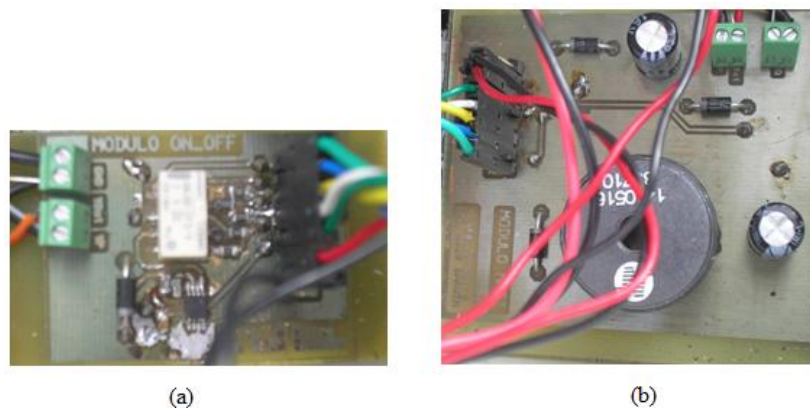


Figura 2.14 - Protótipos finais para testes. (a) Modelo On_Off; (b) Modelo MPPT.

Na Figura 2.14, são apresentados os dois modelos finais para testes. A Figura 2.14 (a) contém todos os componentes necessários na face superior. Este modelo não é muito exigente a nível de controlo por parte do microcontrolador. Em relação ao modelo MPPT (Figura 2.14 (b)) este já exige um pouco mais de controlo devido ao circuito de controlo de carga. Estes circuitos foram colocados dentro de uma caixa estanque (IP65), de forma a proteger ao máximo das condições meteorológicas adversas. A alimentação dos circuitos de monitorização (sensor de corrente) e transmissão de dados (*XBee* e microcontrolador) proveio de uma bateria de 12 V presente no terraço, de modo a não interferir com os consumos dos sistemas de teste. Como os circuitos em questão necessitaram de 3,3 V para serem alimentados, foi necessária a utilização de um conversor tipo redutor, para alcançar a tensão pretendida para esse efeito.

3 Sistema Eólico e Sistema Hídrico

Neste capítulo são abordados o estudo, a construção e a análise do sistema eólico que foi desenvolvido para implementar um protótipo viável à alimentação de sensores sem fios. Primeiramente começa-se por fazer uma abordagem teórica acerca de geradores trifásicos e posteriormente faz-se a escolha do tipo de pás a utilizar. Na fase seguinte são apresentados os sistemas desenvolvidos para a aplicação em causa. Todo o processo de controlo e leituras de tensão e corrente dos sistemas foram realizados pelo microcontrolador ATmega168.

3.1 Geradores trifásicos

O sistema trifásico é composto basicamente por três ondas sinusoidais balanceadas, as quais devem apresentar um defasamento de 120° entre si. Este sistema apresenta maior eficiência do que o sistema monofásico (só com uma fase). Desta feita é o sistema, mais usual para a geração de energia eléctrica [47]. Assim, um sistema trifásico é definido por grandezas periódicas, isto é, um conjunto de 3 funções variáveis no tempo $f_3(t)$ que são obtidas através de uma função $f(t)$ apenas por translações de dimensão $T/3$ no tempo, sendo T o período da função [48].

$$f_3(t) = f \left[t - (K - 1) \frac{T}{3} \right], \quad \text{com } K = 1,2,3 \quad (3.1)$$

Para gerar uma onda sinusoidal basta fazer girar com uma velocidade angular constante, ω , uma espira (bobina) de secção S no seio de um campo magnético B dando origem a um fluxo magnético traduzido por [47]:

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (3.2)$$

Considerando que o fluxo magnético pode ser expressado por:

$$\phi = BS \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

A força electromotriz induzida na espira é:

$$e(t) = - \frac{d\phi}{dt} = \omega B S \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

sendo a tensão dada por:

$$v(t) = \omega B S \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

As ondas desfasadas de 120° apresentam a mesma amplitude, podendo serem representadas pelas seguintes expressões [47]:

$$v_1(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \emptyset) \quad (3.6)$$

$$v_2(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t - 120^\circ + \emptyset) \quad (3.7)$$

$$v_3(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t - 240^\circ + \emptyset) \quad (3.8)$$

A Figura 3.1 apresenta a distribuição das sinusóides ao longo do tempo.

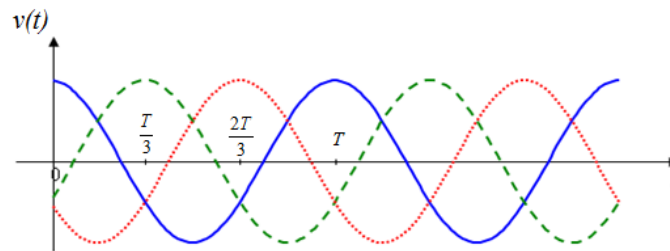


Figura 3.1- Ondas sinusoidais geradas por um sistema trifásico[47].

É possível ter um campo magnético bem razoável no interior do bobina quando percorrido por uma corrente. Isto só é possível desde que as espiras estejam suficientemente próximas. O campo magnético caracterizado por:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 \frac{N}{2\pi r} I \quad (3.9)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A, N o número de espiras, r o diâmetro central da bobina e I a corrente que a percorre. Uma montagem trifásica sinusoidal pode ser compreendida como um conjunto de três fontes monofásicas alternadas. A ligação das bobinas pode ser efectuada de duas formas diferentes, em estrela ou em triângulo (delta). A Figura 3.2 mostra a ligação em triângulo e que foi a utilizada na construção do gerador. As ligações dos enrolamentos são realizadas de forma a reduzir o número de linhas que são utilizadas para ligar as bobinas à carga [47].

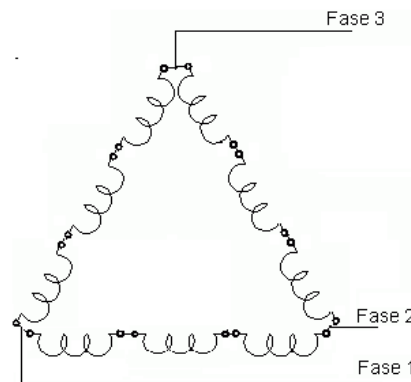


Figura 3.2- Associação das bobinas em triângulo ou delta.

Posto isto há necessidade, de fazer a rectificação para se obter uma tensão contínua. Para esse efeito, usualmente são utilizados rectificadores trifásicos de onda completa. Este rectificadores são basicamente compostos por uma ponte de seis díodos (sem ligação de neutro), como é ilustrado na Figura 3.3 [49]. O segundo gráfico da Figura 3.3 apresenta as ondas à saída do gerador e a onda de saída após rectificação.

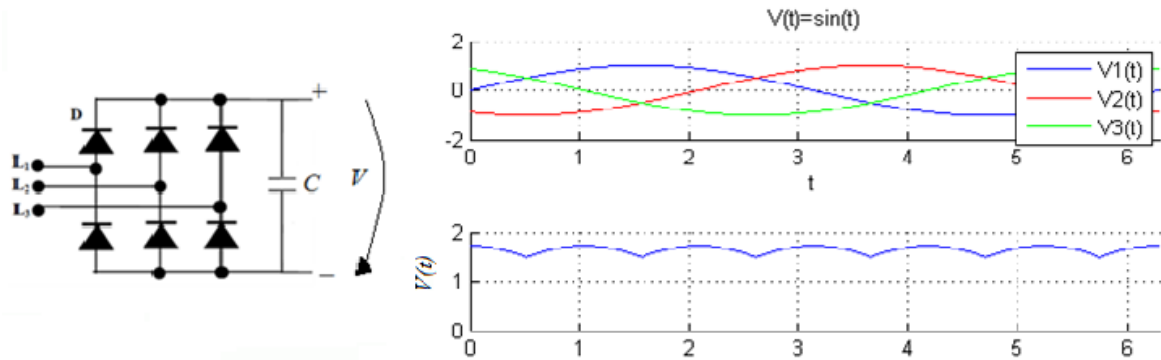


Figura 3.3- Rectificador trifásico com ponte de díodos (ondas completas) [49].

A onda após rectificação, apresenta um comportamento quase constante. Um condensador colocado em paralelo com a carga permite diminuir o *ripple* de saída.

1.1 Construção dos geradores trifásicos

Foram construídos dois geradores com ímanes permanente de *Neodymium*, um para o gerador eólico e outro para o gerador hídrico.

Para o sistema eólico, começou-se por construir quinze enrolamentos de 100 espiras, com um diâmetro médio de 2,5 cm sendo posteriormente, revestido com resina de forma a fixar os parafusos necessários para a prender as bobinas na parede de um tubo de PVC. Para o sistema hídrico foram utilizadas enrolamentos de 80 espiras. Os enrolamentos utilizaram fio de cobre de 0,4 mm. A Figura 3.4 ilustra os passos essenciais da construção do estator.

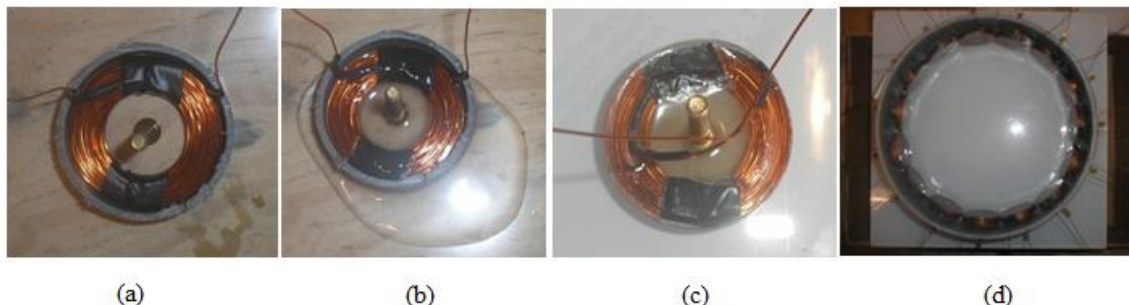


Figura 3.4- Construção das espiras e construção do estator: (a) e (b) - processo de fixação dos parafusos nas espiras; (c) espira pronta a ser fixada; e (d) colocação das espiras nas paredes do estator.

A Figura 3.4 (d) ilustra como foram fixadas as bobinas em torno do interior dos tubos de PVC. As bobinas foram distribuídas uniformemente ao longo do tubo de de 19 cm de diâmetro para o sistema eólico e 16 cm de diâmetro para o sistema hídrico. É de

salientar que estas foram ajustadas através dos parafusos, a fim de ficarem o mais próximo possível dos ímanes presentes no rotor do gerador. As ligações entre as bobinas seguiram o esquema de associação delta apresentado na Figura 3.5.

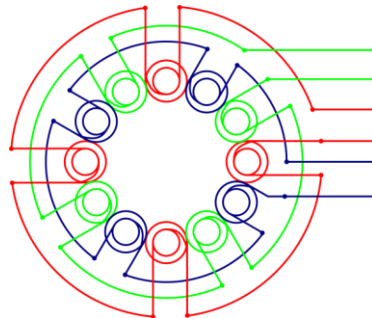


Figura 3.5- Esquema de ligação de bobinas.

O passo posterior foi a construção do **rotor**. Tendo em conta que este é que vai conter a fonte magnética do sistema, fixaram-se vinte ímanes, numa estrutura de ferro, como mostra a Figura 3.6 para o gerador do sistema eólico. Para o sistema hídrico foram utilizados quinze ímanes.

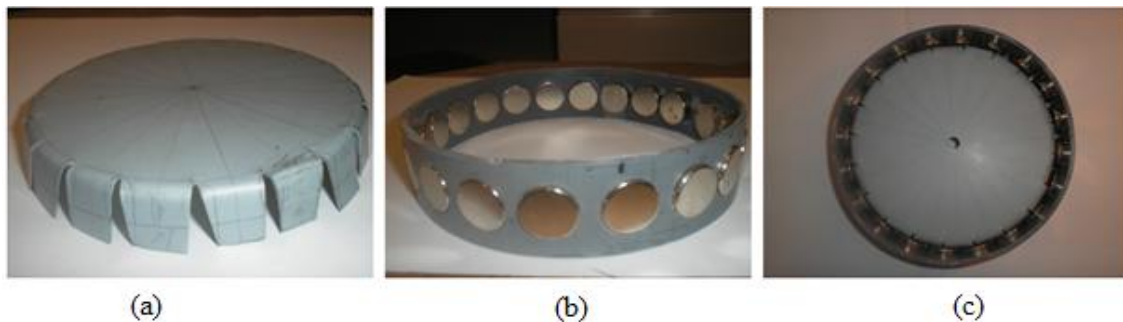


Figura 3.6- Esquema de montagem do rotor.

Posto isto, inseriu-se o **rotor** no **estator**, e girou-se o rotor a uma velocidade constante, de forma a verificar as ondas produzidas pelo gerador como mostra a Figura 3.7.

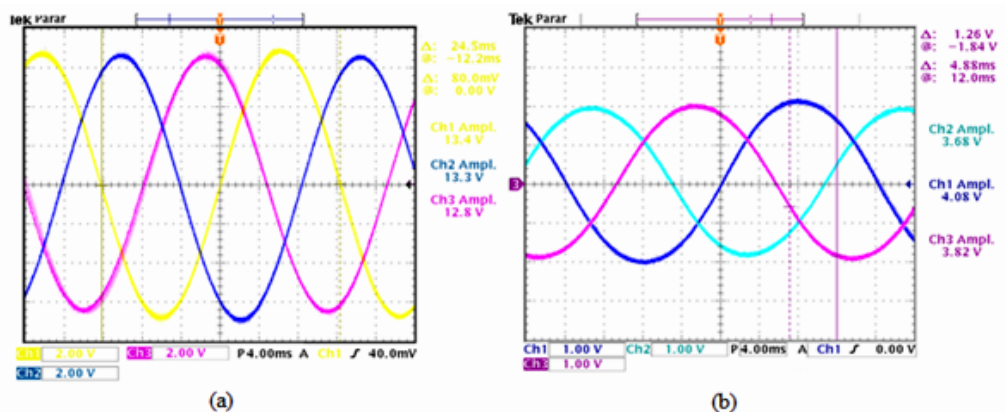


Figura 3.7- Ondas produzidas pelo gerador trifásico, desfasadas de 120° - (a) gerador para sistema eólico; (b) gerador para sistema hídrico.

Fazendo a análise gráfica, verifica-se um desfasamento de aproximadamente 120° entre as diferentes ondas, referentes a cada grupo de associação de bobinas, como era de esperar.

O passo seguinte consistiu em rectificar as ondas geradas pelo sistema trifásico. A ponte rectificadora utiliza seis diodos *Schottky* (MBRA210LT3G), que admite uma corrente máxima de 2 A e apresenta uma queda de tensão de polarização de 0,325 V a 1 A. O condensador utilizado para o efeito de filtragem tem uma capacidade de 1000 F. O circuito de rectificação construído é ilustrado na Figura 3.8, cuja construção seguiu o processo descrito no ponto 2.3.

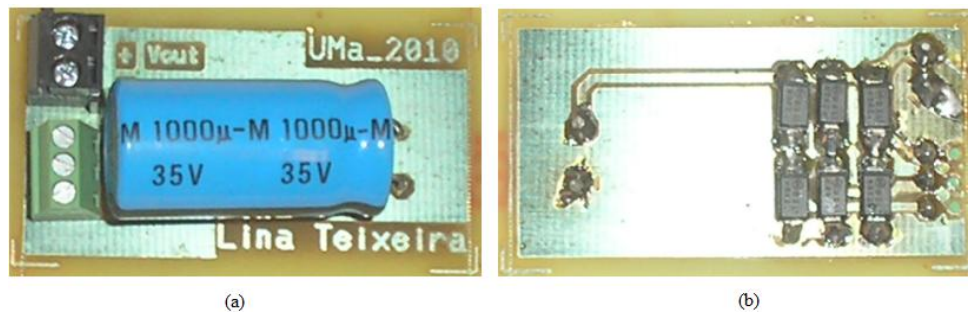


Figura 3.8 - Placa do circuito de rectificação. (a) Face superior; (b) Face inferior.

Os resultados do circuito de rectificação são apresentados na Figura 3.9, onde se pode verificar uma tensão praticamente constante na saída.

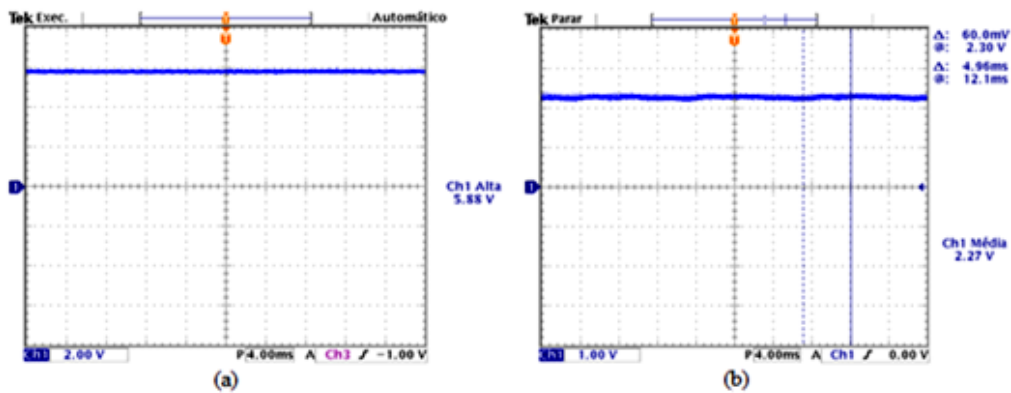


Figura 3.9- Onda após rectificação trifásica - (a) Gerador eólico; (b) Gerador hídrico.

3.2 Sistema Eólico

A energia eólica foi uma das primeiras energias limpas a ser utilizada pelas civilizações humanas, de forma a aproveitar a energia do vento e através deste realizar trabalho mecânico.

3.2.1 Turbinas eólicas

Uma estrutura fundamental do sistema eólico é o rotor, responsável pela captação da energia cinética do vento e a sua transformação em energia mecânica de rotação. Existem

duas classificações possíveis para esta estrutura, a turbina de eixo vertical e turbina de eixo horizontal, classificações baseadas na orientação do eixo central sobre o qual a turbina gira [25] [50].

As turbinas de eixo horizontal (*HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine*) predominam face às turbinas de eixo vertical (*VAWT – Vertical Axis Wind Turbine*). Os rotores de eixo horizontal são normalmente empregues em sistemas de grandes dimensões. Estes sistemas caracterizam-se pelas grandes potências que podem debitar, geralmente entre 100 W a 5 MW [25][50-51], e utilizam, em geral, 3 pás devido à fraca resistência ao ar que estas apresentam, favorecendo a estabilidade do sistema e aumentando, assim, a eficácia do mesmo [25].

No que concerne às turbinas com rotor vertical, estas são caracterizadas pelo elevado aproveitamento do vento. Isto significa que são muito eficazes em captar vento provindo de qualquer direcção sem ter de ser necessário o reajustamento da posição do rotor, mas menos eficientes na produção de energia em relação aos sistemas anteriores.

No anexo G apresentam-se os tipos mais comuns de turbinas utilizadas em sistemas eólicos. No intuito da utilização da produção eólica para carregamento de baterias para sistemas de baixa potência, são usualmente utilizadas pás de eixo horizontal.

3.2.2 Construção do aerogerador

As pás do aerogerador seguiram o modelo designado por *Savonius*. Este modelo é caracterizado por ser uma turbina de eixo vertical desenvolvida em 1920, por um engenheiro finlandês Capitão *S.I. Savonius* [52-53]. Esta turbina é de fácil construção e pode ser realizada com materiais simples e com ferramentas comuns.

O rotor gira em torno do eixo vertical e é composto por dois, ou mais, semicilindros ocios, como mostra a Figura 3.10.

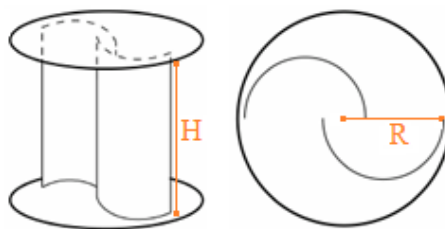


Figura 3.10 - Projecção do rotor de *Savonius*, em vista lateral e de topo [52].

Através da Figura 3.10 observa-se que quando existe uma meia metade da turbina exposta ao vento a outra meia metade está em oposição. Assim, o movimento inicia-se quando é aplicada uma diferença de pressão entre a superfície côncava e convexa da meia metade das pás que estão expostas ao vento, e consequentemente há a recirculação do vento impingido na metade que não se encontra exposta a este [54].

A área efectivamente varrida pelo vento é dada pela expressão[53] [55]:

$$A = 2 \times R \times H \quad (3.10)$$

onde R (m) é o raio da área exposta ao vento e H (m) a altura das respectivas pás.

A Figura 3.11 mostra o desempenho de vários tipos de turbinas convencionais em função do coeficiente de velocidade, λ .

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3.11)$$

onde ω , é a velocidade angular das pás e R o raio envolvente da turbina.

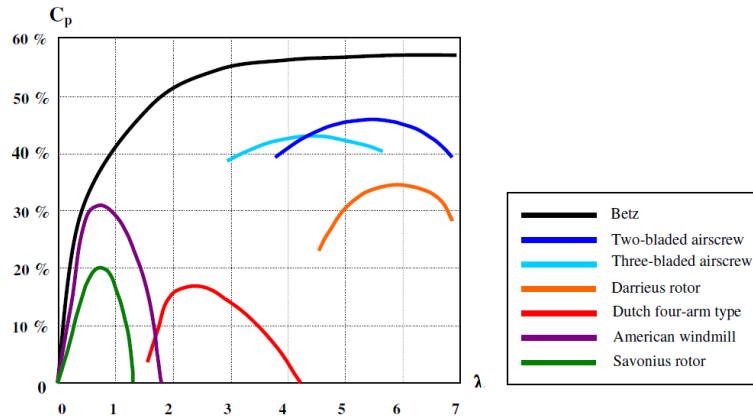


Figura 3.11 - Comparação de desempenho para turbinas eólicas convencionais [53].

A turbina que apresenta o melhor desempenho, na extracção de potência do vento, é a turbina de *Betz*, que atinge o máximo teórico de 59,26 % de eficiência. Em relação às turbinas de *Savonius*, apresentam um desempenho de cerca de 20 % [53].

O material utilizado para a construção das pás foi o alumínio. As pás utilizadas na construção deste sistema são uma adaptação do esquema da Figura 3.10. Apresentam uma forma helicoidal de modo a possibilitar uma melhor arranque em relação à direcção do vento. Estas pás foram acopladas ao rotor. A Figura 3.12 ilustra a estrutura final do sistema aerogerador.



Figura 3.12 - Sistema final do aerogerador.

O sistema possui duas pás com altura de 45 cm e raio 12 cm e o diâmetro do gerador é de 20 cm.

Após a conclusão da montagem do sistema realizaram-se testes, de forma a avaliar o comportamento do aerogerador. O primeiro teste recaiu em determinar as curvas características para o sistema, a diferentes velocidades do vento, de modo a determinar o ponto de máxima potência. Para esse efeito realizou-se o esquema de montagem apresentado na Figura 3.13.

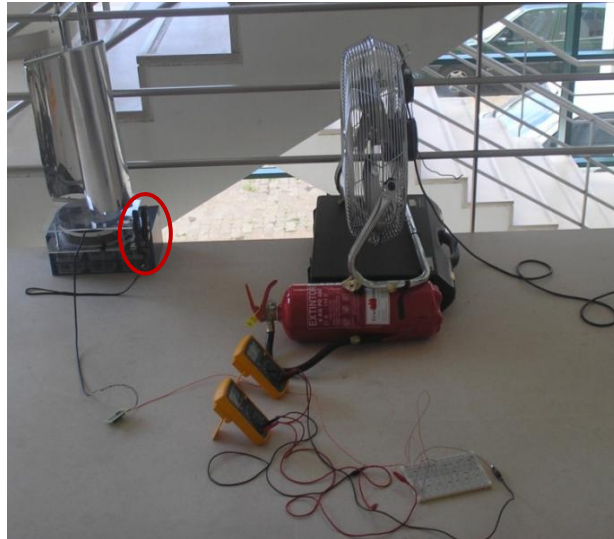


Figura 3.13 - Esquema de montagem para averiguar o ponto de máxima potência para o sistema eólico.

Para simular o fluxo de vento foi utilizada uma ventoinha, e a velocidade do vento foi medida com recurso a um anemómetro (*SILVA PRO ADC*) portátil (assinalado com um círculo vermelho).

Foram utilizadas cerca de 9 resistências entre 10 e 200 Ω e simulou-se cinco velocidades de vento (2,5; 3,5; 4,5; 5,5 e 6,5 m/s). Para diferentes velocidades do ventilador, foram medidas as quedas de tensão aos terminais de cada resistência e o respectivo fluxo de vento.

Tendo em conta que não se conseguia obter um valor constante de velocidade de vento, para se obter um melhor resultado e para cada resistência a um determinado fluxo de vento, foram recolhidas cerca de 20 amostras de tensão e de fluxo de vento.

A melhor forma de realizar os respectivos testes para este efeito seria utilizar um túnel de vento, evitando-se, desta forma, as grandes variações nas medições.

Os dados recolhidos foram tratados e analisaram-se os resultados, tendo-se obtido os gráficos apresentados na Figura 3.14.

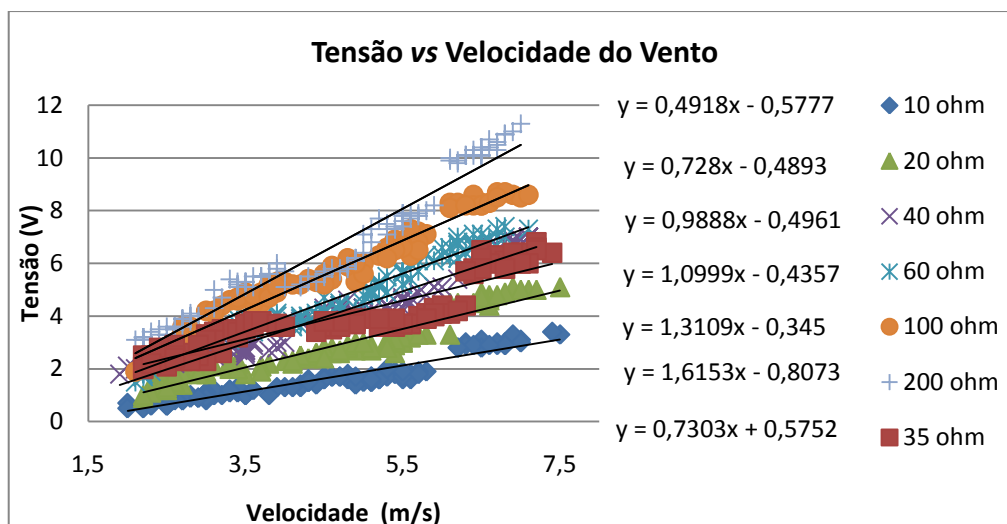


Figura 3.14 - Resultados da tensão face à velocidade do vento.

Analisando a Figura 3.14, aferiu-se que a tensão é proporcional à velocidade do vento, para os diferentes valores de resistência, e que para uma melhor percepção deste comportamento, justificou-se adicionar uma linha de tendência linear. Por meio desta análise, verifica-se que o aerogerador comporta-se como uma fonte de tensão.

Para aferir qual a impedância, à qual dá-se o ponto de máxima potência, analisou-se o gráfico ilustrativo da Figura 3.15.

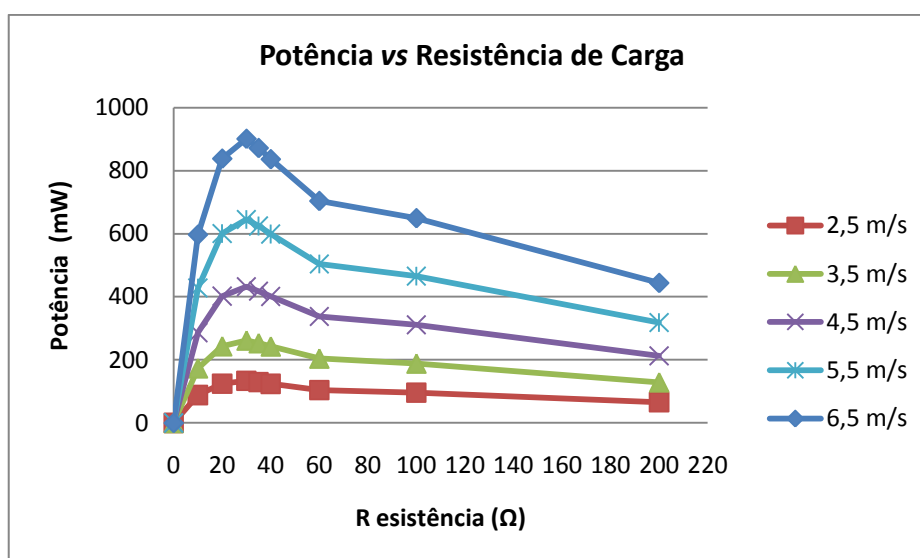


Figura 3.15 - Resultados para a resistência mais adequada ao ponto de máxima potência.

No que concerne à impedância mais adequada à máxima transferência de potência, aferiu-se que esta está em torno dos 30 Ω. Desta forma, conclui-se que a carga ideal para o sistema deve rondar a resistência de máxima potência

Para o caso do gráfico que relaciona a corrente disponibilizada pelo aerogerador em função da tensão, obtiveram-se os seguintes resultados exibidos na Figura 3.16. Por meio desta análise, verifica-se que o aerogerador comporta-se como uma fonte de tensão.

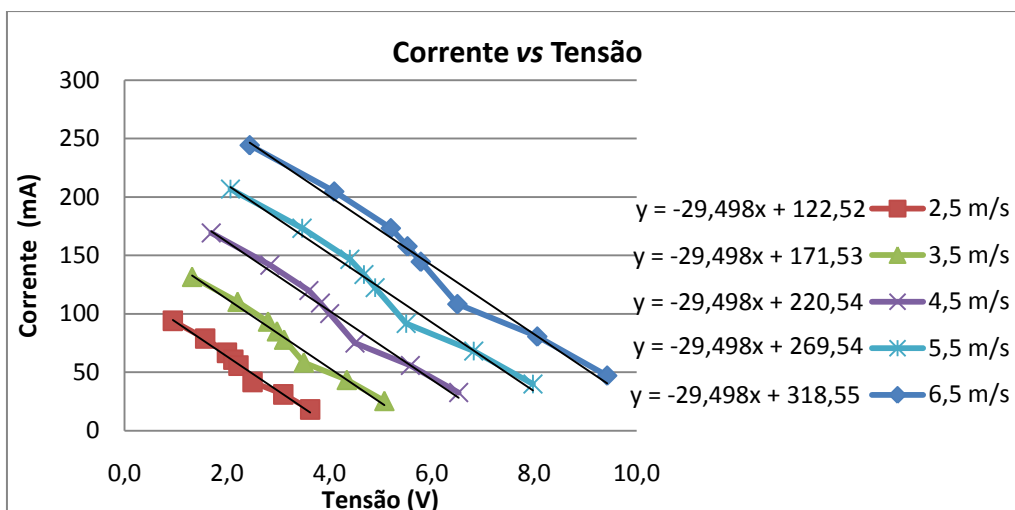


Figura 3.16 - Resultados do aerogerador para corrente em função da tensão.

Neste caso, era de esperar um comportamento linear com declive negativo. Tendo em conta as condições de teste e analisando os respectivos valores, pode-se ver que estes estão razoáveis, o que já seria de esperar. Considerando a lei de Ohm, quando a tensão aumenta a corrente diminui para os vários valores de resistências. Neste caso a corrente máxima gerada é cerca de 265 mA a um fluxo de ar de 6,5 m/s.

Para o caso do gráfico que relaciona a potência disponibilizada pelo aerogerador em função da tensão os resultados visíveis na Figura 3.17.

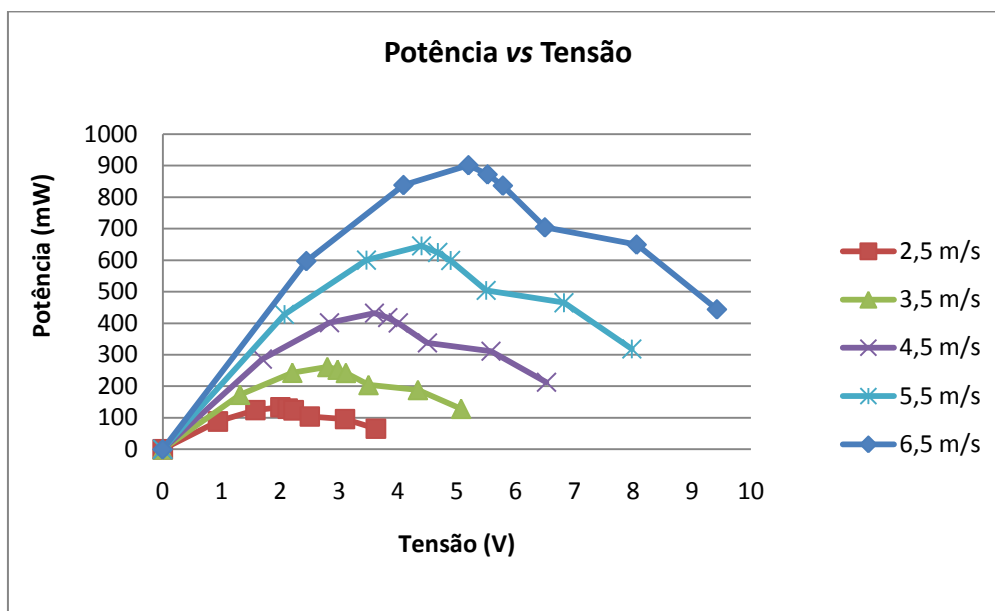


Figura 3.17 - Resultados da potência em função da tensão, para o respectivo aerogerador.

O gráfico mostra o ponto de máxima transferência de potência para as diferentes velocidades do vento, e que este ponto desloca-se consoante o aumento da velocidade do vento. A potência máxima gerada para cada uma das velocidades é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Comparação do ponto de máxima potência para os diferentes valores de velocidade de vento.

Velocidade (m/s- Km/h)	Tensão (V)	Potência (mW)
2,5≈9	2	133
3,5≈12,6	2,8	261
4,5≈16,2	3,6	432
5,5≈19,8	4,4	645
6,5≈23,4	5,2	901

Fazendo uma análise de resultados, verifica-se, que o ponto de máxima potência ocorre em diferentes valores de tensão para a gama de velocidade de vento. De salientar que a potência máxima disponibilizada pelo aerogerador chega a atingir, aproximadamente, 1,4 W.

Para determinar o coeficiente de desempenho do sistema foram utilizadas as equações (1.3) e (1.4). Tendo em conta que a potência fornecida pelo sistema é dada por $P = \eta P_T$, sendo a η eficiência do gerador, retira-se que:

$$\eta C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (3.12)$$

Assumindo a densidade do ar, ρ , com o seu valor típico de 1,25 kg/m³ e A é a área das pás varrida pelo vento, os valores do coeficiente de desempenho para as suas diferentes velocidades de vento são apresentados na tabela seguinte. A Tabela 3.2 apresenta as eficiências para as várias velocidades do vento. A segunda coluna representa a potência total disponível ($=0,5 \rho A v^3$). A terceira coluna apresenta a potência à saída do rectificador e a quarta coluna apresenta a eficiência do sistema de geração.

Tabela 3.2 - Valores do coeficiente de desempenho para as potências máximas correspondentes

v (m/s)	P_T/C_p (W)	P (mW)	ηC_p
2,5	1,05	133	12,6%
3,5	2,89	261	9%
4,5	6,15	432	7%
5,5	11,23	645	5,7%
6,5	18,54	901	4,8%

De salientar que, a eficiência apresentada é considerada após rectificação. A velocidade de arranque do aerogerador é de 1 m/s.

3.2.3 Modelo do controlador de carga para o sistema eólico

Analisando a Figura 3.17 verifica-se que o ponto de máxima transferência de potência não ocorre sempre ao mesmo nível de tensão. Devido a esta constatação, e ao facto de se tentar aproveitar a maior a quantidade de energia disponível, foi construído um

conversor redutor-elevador, com o intuito de deslocar o ponto de máxima transferência de potência para a tensão das baterias (2,8 V).

O conversor redutor-elevador teve como características:

- Tensão de saída: 2,8 V;
- Corrente máxima à saída: 10 mA a 225 mA;
- Gama de tensões de entrada: 2,1 V a 5,5 V;
- Frequência de operação: 50 KHz.

O conversor foi projectado segundo o que foi exposto no Capítulo 1, no ponto 1.10. Assim, a resistência de carga pode assumir valores entre 12,4 e 280 Ω . O valor da bobina dimensionada para o sistema foi de 100 μ H. Foram ainda utilizados um *Mosfet* de canal P, e um díodo de *Schottky*. Primeiramente, foi realizada a construção e o desenvolvimento do conversor numa *protoboard*, para ver a viabilidade do circuito. A Figura 3.18 ilustra a montagem do conversor em laboratório.

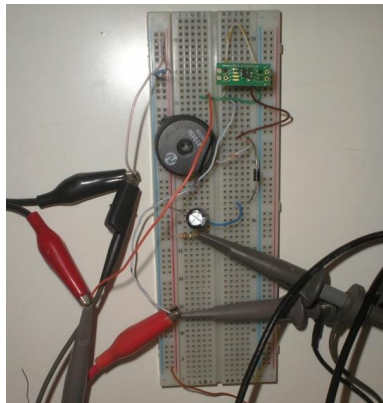


Figura 3.18 - Conversor DC-DC, tipo elevador-redutor.

Ligou-se o gerador, da Figura 3.12, ao conversor implementado na (Figura 3.18) com as baterias ligadas à saída do conversor. Testou-se o circuito e registaram-se os resultados, que são apresentados na Tabela 3.3.

A tensão em circuito aberto foi de 2,4 V, a uma velocidade de vento de 2,4 m/s.

Tabela 3.3 - Resultados para eficiência do sistema de conversor redutor-elevador projectado.

Tensão de entrada (V)	Corrente de entrada (mA)	Potência de entrada (mW)	Tensão de saída (V)	Corrente de saída (mA)	Potência de saída (mW)	Eficiência η (%)
1,5	15	22,5	2,81	4	11,24	49,9%
1,59	20	31,8	2,9	4,1	11,89	37,3%

Através da análise dos valores expostos pela Tabela 3.3, aferiu-se que o conversor implementado não apresenta uma eficiência elevada. Note-se que, aquando da ligação do gerador ao conversor supracitado, houve uma diminuição considerável na velocidade de rotação das pás do gerador. Verificou-se, também, que à medida que a tensão aumentava a eficiência do sistema diminuía. Este acontecimento pode dever-se ao facto do gerador não

apresentar um torque suficientemente elevado, para compensar a presença da carga no conversor.

Como o “sistema global” não apresentou uma eficiência considerável, para poder ser empregue na aplicação da alimentação de nós sensores, analisou-se o comportamento para diferentes correntes.

Para velocidades mais baixas, que gerassem até cerca de 140 mA, optou-se por utilizar um condensador que carregasse as baterias através de um conversor redutor-elevador (*MAX 1957*) projectado para os 3,3 V de saída. Foi tido em conta o limitador de corrente presente neste componente, que condiciona a corrente para o valor de 100 mA. Após os testes deste circuito, verificou-se que a eficiência deste sistema variou entre 64 e 75 %. Para velocidades que gerassem gamas de corrente entre 140 mA e 225 mA, optou-se por realizar a ligação directa às baterias. Este circuito depois de testado apresentou uma eficiência de 59 e 72 %, quando comparado com a potência máxima sugerida pela resistência de máxima transferência de potência. Para o último circuito, optou-se pela utilização de um limitador de corrente com um valor máximo de 225 mA à saída, ligado posteriormente a um *pack* de baterias. De referir que existe um grande desperdício da energia disponibilizada pela fonte, por parte deste último circuito, mas tendo em conta que as baterias devem ser carregadas a 10% da sua carga total, o ideal seria um *buffer* que armazenasse a energia que está a ser desperdiçada. A Figura 3.19 ilustra a sequência de processos no projecto do controlador de carga, para o sistema referido.

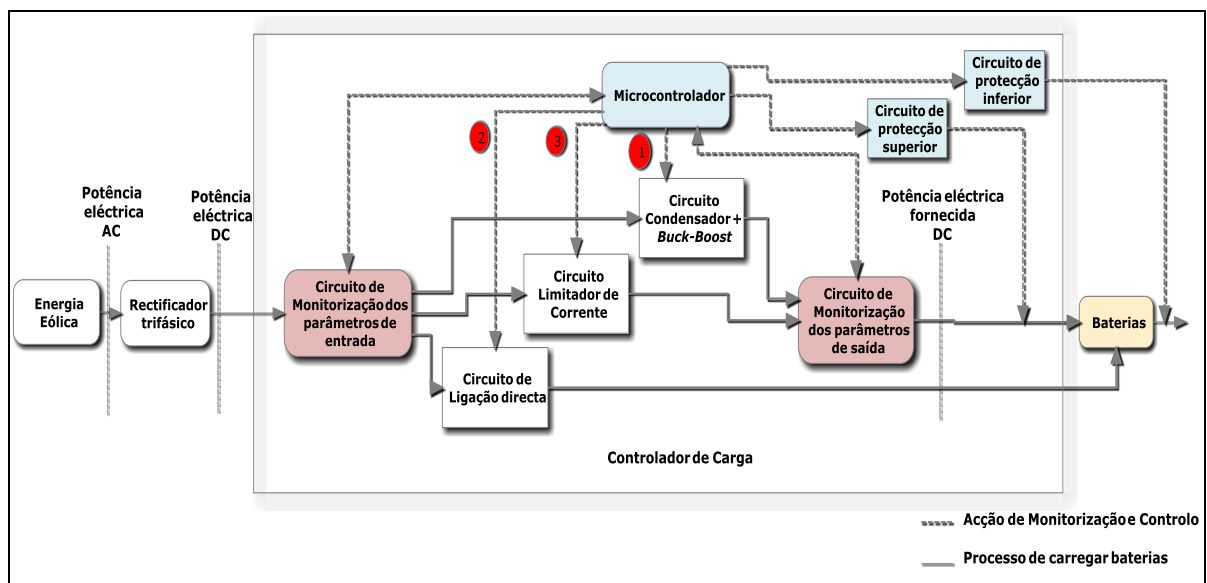


Figura 3.19 - Diagrama de blocos do sistema eólico.

Os três circuitos referentes ao processo de carregamento de baterias são activados através do microcontrolador. A decisão de activação de um dos respectivos circuitos é tomada aquando da leitura dos parâmetros de entrada, por parte do microcontrolador. Este avalia a corrente e só depois decide qual dos circuitos será accionado. O bloco referente ao circuito de protecção tem por objectivo proteger as baterias da sobrecarga (acima de 2,8 V) e da descarga completa (2,2 V).

A Figura 3.19 explicita os três estados que foram definidos. O nº 1 ilustra o circuito referente ao carregar das baterias através do circuito de redutor-elevador + condensador. Este circuito opera até um corrente limite de entrada de 140 mA. Em relação ao nº 2, este indica que a bateria está a ser carregada directamente pelo sistema de geração, circuito que opera entre os 140 mA e 225 mA. Por último, o circuito nº 3 apresenta um limitador de corrente devido à corrente máxima aconselhável para o carregar das baterias, visto que a fonte pode disponibilizar valores de correntes superiores a 225 mA.

Note-se que esta solução não é a ideal para o sistema, mas permite uma implementação adequada para o controlo de carga do aerogerador utilizado dentro das restrições de tempo do projecto. Uma melhor solução pode passar por utilizar um conversor tipo redutor-elevador, mas com controlo de corrente de saída e não com controlo de tensão de saída, visto que as baterias são carregadas através de corrente e não de tensão.

Posto isto, construiu-se o esquema eléctrico do modelo, aferindo todas as ligações necessárias ao bom funcionamento do circuito. O esquema eléctrico da Figura 3.20 ilustra todos os componentes e as suas interligações, projectado para garantir as condições acima referidas.

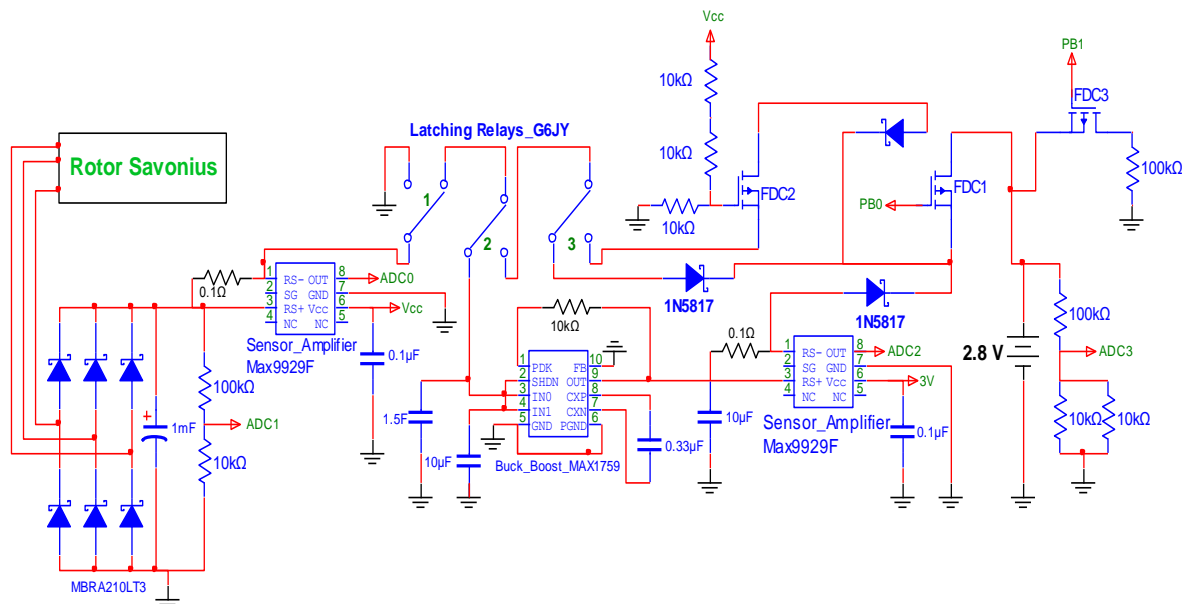


Figura 3.20 - Esquema eléctrico para o controlador de carga do sistema eólico.

Para controlo geral do circuito da Figura 3.20, foram utilizados três relés (*Latching relay G6JY*). Estes permitiram a comutação entre circuitos. Esta escolha deveu-se à elevada gama de tensão de entrada. Este facto levantou algumas questões acerca da utilização dos *mosfet's* para a realização da transição de circuitos, mas chegou-se à conclusão que haveriam gamas de tensão de entrada em que os *mosfet's* (disponíveis em laboratório) não conseguiriam desempenhar o papel de interruptor, isto é, a condição de condução falharia ($V_{GS} < V_T$, para *mosfet's* de canal p; $V_{GS} > V_T$, para *mosfet's* de canal n). Para cada relé foram utilizados dois pinos digitais do microcontrolador, Atmega_168, para ser possível a comutação de estado. Estes impulsos gerados têm de possuir no mínimo uma amplitude de 3 V.

Mais uma vez, as leituras das correntes presentes no circuito foram realizadas pelo sensor de corrente Max9929F. O ADC0 do microcontrolador efectua a leitura da corrente de entrada e o ADC2 realiza a leitura da corrente de saída. As leituras das respectivas tensões foram baseadas em divisores resistivos, tanto para a leitura da tensão do aerogerador (ADC1), como para a tensão proveniente das baterias (ADC3).

Os circuitos de protecção da bateria tiveram, por base o *mosfet FDC604P*. Assim, sempre que a tensão na bateria seja superior a 2.8 V, o *mosfet* comuta de modo de operação através de um impulso de 3 V (através do microcontrolador) aplicado à porta, fazendo com que este opere em modo de corte, o que implica que o circuito controlador de carga fica desligado das baterias. O mesmo passa-se para o limite inferior, estipulado a 2,2V na bateria. Este circuito desactiva a carga do sistema, deixando de haver consumo da corrente armazenada nas baterias.

A Figura 3.20 ilustra o circuito no estado em que todos os relés estão ON. Este circuito é o contrário do estado inicial, imposto pelo programa desenvolvido em C. Desta forma, o estado deste modelo é o 1, o que significa que o circuito a operar é o elevador-reductor + Condensador. Para este circuito os relés nº 1º e nº 2º estão no modo ON, e a posição do nº 3º não é relevante para o bom funcionamento do circuito. A projecção do limitador de corrente foi realizada através da utilização de um *mosfet* onde foi aplicado um divisor resistivo na porta de forma a limitar a corrente para 225 mA.

3.3 Sistema para Testes

Implementou-se o circuito da Figura 3.20 em placa de circuito impresso. Este processo seguiu o procedimento apresentado no ponto 2.3 do capítulo 2. Após a sua conclusão, o resultado final é apresentado na Figura 3.21.



Figura 3.21 - Protótipo de testes para o sistema eólico.

No circuito de controlo de carga do sistema eólico são identificados os principais componentes para o controlo (relés) de funcionamento dos três circuitos em questão. O microcontrolador *ATmega_168* foi utilizado para fazer o controlo e medição de dados que foram posteriormente transmitidos pelo nó *XBee*. A alimentação dos circuitos de controlo foi efectuada por uma bateria externa ao sistema (a mesma bateria que foi utilizada no sistema solar) de modo a não interferir nos consumos do circuito.

3.4 Sistema Hídrico

A base deste tipo de captação de energia é o ciclo da água, sabendo que este ciclo é fechado, isto é, aquando da precipitação ocorre em zonas de mais elevada altitude origina cursos de água à superfície terrestre.

Tal como os outros tipos de energias já apresentadas, nomeadamente solar e eólica, este tipo de energia não é “esgotável”. É uma fonte de energia renovável, utilizada em todo o mundo desde há bastantes séculos, usada inicialmente para a moagem de cereais. Depois da invenção do gerador eléctrico e das turbinas, nos séculos XIX e XX, iniciou-se a produção de energia eléctrica através da água [50].

Desta forma, a energia hídrica traduz-se num aproveitamento da energia que se obtém da queda da água de uma determinada altura até um nível inferior, o que provoca o movimento das pás hidráulicas ou turbinas, presentes no gerador. É sempre possível a geração de energia proveniente de um sistema hídrico, desde que existam zonas em que a quantidade de água seja abundante [56].

As centrais mini-hídricas podem ser classificadas consoante a potência que geram. A Tabela 3.4 apresenta as categorias de centrais mini-hídricas.

Tabela 3.4 - Classificação das centrais mini-hídricas [57].

Classificação das centrais	Potências Geradas
Pico-hídricas	<50 kW
micro-hídricas	<500 kW
Mini-hídricas	<2 MW
Pequena-hídricas	<10 MW

Segundo a classificação apresentada na Tabela 3.4, pode-se verificar que a classificação não é adequada à produção de energia de muito baixa potência. Segundo a tabela, o sistema construído seria considerado um sistema pico-hídrico, tendo em conta que a potência máxima pretendida pelo sistema é de 180 mW. A principal característica da energia hídrica é a queda efectiva da água, ou seja, a altura (H em metros) da queda de água e o caudal (Q) em litros por segundo. O máximo potência disponibilizada pelo sistema hídrico é aproximadamente dada por [50] [71]:

$$P_{in}(W) = g \times H \times Q \quad (3.13)$$

onde g é o valor da força gravítica ($9,8 \text{ m/s}^2$). A eficiência do sistema pode ser calculada por:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3.14)$$

3.4.1 Turbinas Hídricas

Existem quatro classificações principais para as turbinas hídricas para pequenos aproveitamentos hidroelétricos. A escolha do tipo de turbina interliga os três parâmetros fundamentais do sistema que são: o caudal, a altura da queda de água e a potência gerada [58]. A Figura 3.22 ilustra a relação entre os três parâmetros.

Para a elaboração do protótipo, foi utilizada uma turbina segundo o modelo de *Pelton*. Estas turbinas são caracterizadas por serem turbinas de acção, ou seja, o movimento de rotação deve-se à velocidade do fluxo de água que é injectada no centro das pás da turbina. A turbina é composta por um conjunto de pás, que possuem uma topologia em copo ou em concha.

Estas estão distribuídas uniformemente numa roda circular. A água é injectada através de um jacto com um determinado caudal, atingindo o conjunto das pás. Este tipo de turbina é regularmente utilizado em sistemas de aproveitamento com baixo caudal e alta queda.

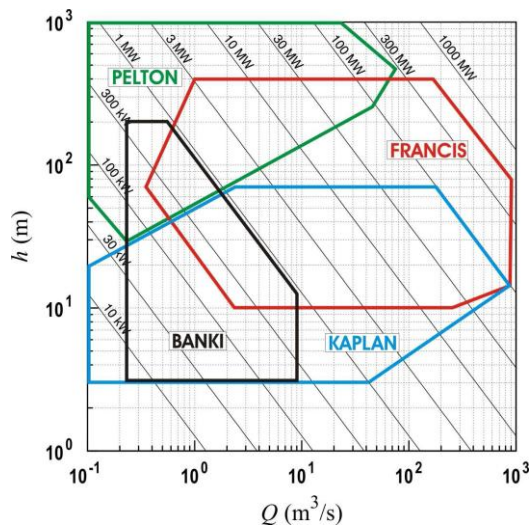


Figura 3.22 – Tabela gráfica para selecção de turbinas para centrais mini-hídricas [58].

3.4.2 Construção do gerador hídrico

Como já foi mencionado na secção 3.2, foi utilizado um gerador trifásico constituído por 9 bobinas e 12 ímanes. Posteriormente construiu-se turbina segundo o modelo de *Pelton*. Foram construídas 12 pás de alumínio como mostra a Figura 3.23. Para adquirirem o formato final, foi realizada uma moldagem manual, que consistiu, em moldar a placa de alumínio num tubo oco com a utilização de um martelo de cabeça redonda. A turbina possui um diâmetro de 14 cm, o estator 14 cm e o rotor apresenta um diâmetro 11 cm.



Figura 3.23 – Turbina construída para o sistema pico-hídrico.

Após a conclusão da parte mecânica da turbina, acoplou-se esta ao gerador, finalizando a parte mecânica do sistema hídrico, a Figura 3.23 mostra o resultado.

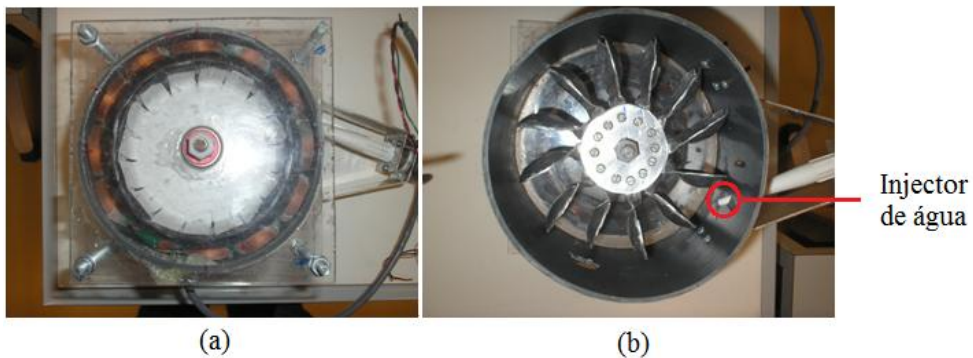


Figura 3.24 - Gerador hídrico. (a) Vista superior; (b) Vista inferior.

O passo seguinte consistiu em determinar as curvas características do sistema. Para tal foi realizado o esquema de montagem apresentado na Figura 3.25.



Figura 3.25 – Esquema de montagem para obtenção das curvas características do sistema hídrico.

O reservatório de água foi colocado a uma altura de 4 metros face ao gerador hídrico, com um caudal médio de 0,03625 l/s. Para a realização deste teste foi necessário efectuar medições de corrente e de tensão, para as várias resistências de carga. A Tabela 3.5 apresenta os resultados deste teste.

Tabela 3.5 – Resultados obtidos para a potência face ao valor da resistência de carga.

Resistências (Ω)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
10	1,14	117	133,38
20	1,85	94	173,9
25	2,09	85	177,65
30	2,28	79	180,12
35	2,44	72	175,68
40	2,58	68	175,44
50	2,86	61	174,46
80	3,35	45	150,75
100	3,55	38	134,9

O ponto de máxima potência foi obtido em torno de 180 mW, para uma carga de 30 Ω . O resultado deste teste é ilustrado na Figura 3.26.

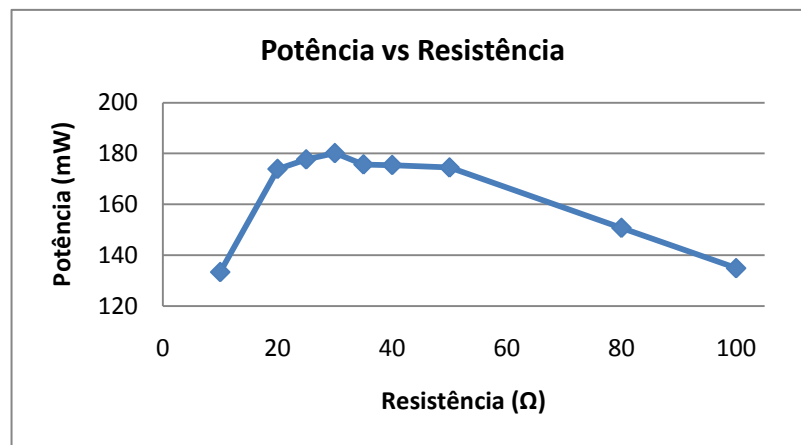


Figura 3.26 – Potência em função da resistência de carga.

A partir de (3.15) e (3.16), calculou-se a eficiência para o sistema, apresentando uma eficiência de 12,68 %.

3.5 Sistema para Testes

Para o sistema hídrico não foi construído qualquer sistema de controlo de carga, visto que este sistema apresentou um funcionamento estável, isto é, para qualquer uma das cargas não existiram grandes variações na tensão e na corrente. Desta forma, não existe necessidade de existir um bloco de armazenamento de energia, mas apenas um condensador de 4700 μ F para filtrar pequenas flutuações na tensão de saída.

O nó sensor utilizado para testar o sistema necessita de uma tensão de 3,3 V e uma corrente média de 45 mA, o que perfaz uma potência de média de 148 mW. Então o objectivo foi conseguir pôr o gerador hídrico a operar nestas condições. Foi necessário ajustar a altura do reservatório para gerar a potência necessária à alimentação directa do nó.

Para fazer a monitorização da tensão e da corrente fornecidas ao nó, foram utilizados um sensor de corrente (Max9929F) e um sensor de tensão (divisor resistivo). As medições obtidas foram efectuadas pelas portas ADC'S do microcontrolador do nó sensor a alimentar, e a transmissão dos dados foi realizada pelo nó *XBee*. O diagrama de blocos apresentado na Figura 3.27 ilustra a sequência de acontecimentos para este sistema.

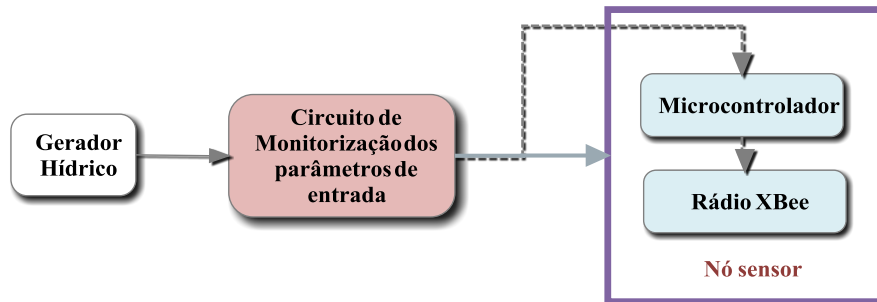


Figura 3.27 – Diagrama de blocos para o protótipo de testes para o sistema hídrico.

De referir que o sensor de corrente também foi alimentado directamente a partir do gerador hídrico, tendo em conta que este possui a mesma gama de alimentação que o nó sensor. A Figura 3.28 apresenta o esquema eléctrico do sistema.

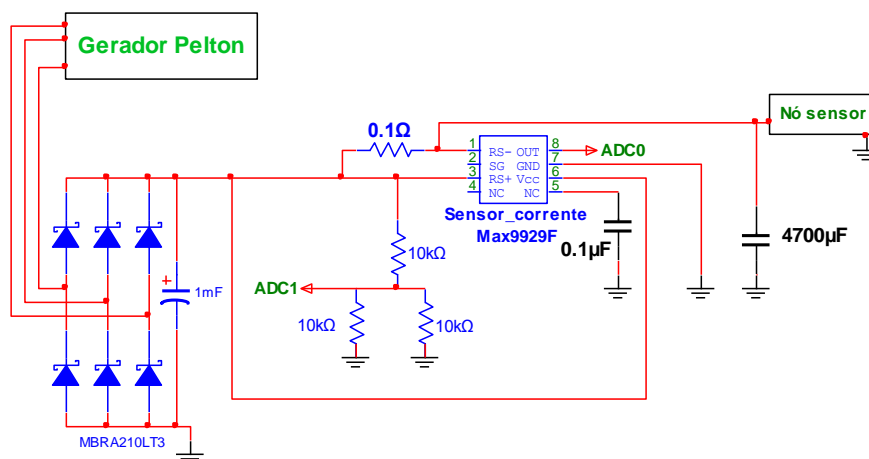


Figura 3.28 – Esquema eléctrico para o sistema hídrico.

4 Sistema de Medição, Controlo e Comunicação

Neste capítulo são apresentados os componentes principais do sistema de controlo, medição e comunicação de dados que foram utilizados nos diferentes protótipos. Primeiramente, é realizada a exposição teórica dos componentes mais utilizados em sistemas de medição. É relevante descrever como foram efectuadas as medições das várias correntes dos diferentes módulos e luminosidade.

Posteriormente é apresentado o sistema de controlo, composto pelo microcontrolador e o sistema de comunicação, em que é abordado o nó *XBee* e as suas características. Por fim, é apresentada a rede utilizada para a comunicação de dados.

4.1 Sistemas de medição

Nesta secção é apresentado o sistema de medição para as diferentes correntes que foram necessárias no decorrer deste projecto. Assim como também, o sensor de luminosidade que foi utilizado no sistema solar.

4.1.1 Sensor de Corrente

Para realizar a leitura das várias correntes recorreu-se a um sensor de corrente *MAX9929F* desenvolvido pela empresa *MAXIM*. O circuito de medição implementado é o apresentado na Figura 4.1.

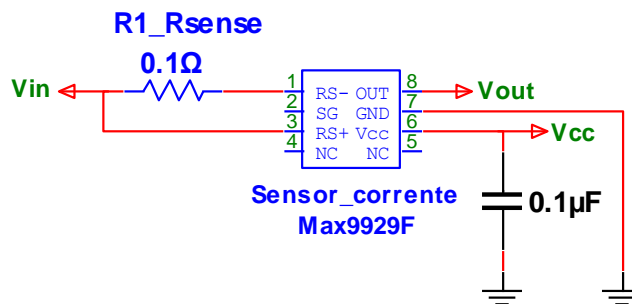


Figura 4.1-Esquema eléctrico do sensor de corrente.

Este circuito foi escolhido tendo em conta que a sua introdução no sistema não poderia introduzir mais consumo, o que implica que a resistência ($R1$) a ser utilizada tivesse um valor muito baixo. Outra das preocupações foi na escolha do amplificador, residindo no facto deste não poder ser alimentado por tensões negativas, nem superiores a 3,3 V. O sensor de corrente escolhido tem as seguintes características:

- tensão de alimentação de 2,5 a 5 V;
- tensão de entrada (V_{in}) entre -0,1 V a 28 V;

- ganho de 50 V/V sem presença de resistência no andar de ganho.

A tensão à saída é dada por

$$V_{out} = (R_{sense} \times I_{sense}) \times (A_V) \quad (4.1)$$

Tendo em conta que o limite máximo de tensão admitida pelas portas ADC's do microcontrolador é de 1,1 V e assumindo que o painel solar não produz uma corrente acima dos 160 mA, o V_{out} assumirá no máximo 0,8 V.

Este circuito foi utilizado em todas as medições referentes a correntes.

Para a resistência de 0,1 Ω consideraram-se três opções: 10 resistências de 1 Ω em paralelo; um enrolamento com o valor desejado de resistência; uma resistência SMD (*Surface Mount Device*) de 0,1 Ω . Para testar o valor da resistência foi utilizada a derivação curta ou montagem de voltímetro/amperímetro, que é a mais aconselhada para medição de resistências de baixo valor. Cada solução foi testada para diferentes valores de temperatura.

A utilização deste método requereu informação acerca da resistência interna do voltímetro. O multímetro utilizado foi 34xR-A, que opera na função de voltímetro com uma resistência interna de 100 M Ω .

Os resultados para os diferentes tipos de teste são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Resultados experimentais para os diferentes tipos de resistências.

Temperatura	10 Resistências paralelo	Resistência de fio de cobre	Resistência SMD
23 °C	0,2137 $\Omega \pm 1\%$	0,1065 $\Omega \pm 1\%$	0,108 $\Omega \pm 1\%$
42,3 °C	0,222 $\Omega \pm 1\%$	0,112 $\Omega \pm 1\%$	0,118 $\Omega \pm 1\%$
46 °C	-----	0,112 $\Omega \pm 1\%$	-----

A Tabela 4.1 mostra que o aumento da temperatura afecta directamente a resistividade do material, o que se traduz num aumento da resistência [59].

Comparando as três situações estudadas e analisadas, é fácil constatar que a melhor resistência a utilizar seria a construída por o fio de cobre. Mas a resistência SMD de 0,1 Ω , também apresenta resultados muito bons, portanto será a melhor opção visto já estar adaptada para implementação prática numa placa de circuito impresso. A opção referente às 10 resistências em montagem paralela, foi a que apresentou pior desempenho.

4.1.2 Sensor de Luminosidade

Para a medição da intensidade luminosa foi utilizado o fotodíodo S1087 da empresa *Hamamatsu*. Para haver uma resposta linear é necessário montar o fotodíodo num circuito de transimpedância. Este apresenta uma resposta espectral de 320 nm a 730 nm e uma corrente de curto-circuito a 100 lux de 0,16 μ A (Anexo C).

O circuito de transimpedância é apresentado na Figura 4.2.

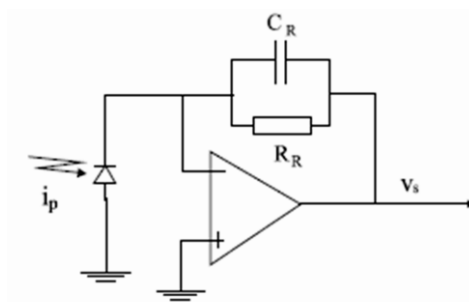


Figura 4.2 – Circuito de transimpedância utilizado no sensor de luminosidade[60].

A saída V_S deste circuito é dada por

$$V_S = R_R \times i_p \quad (4.2)$$

Através de (5.2) conclui-se que a tensão à saída do amplificador é directamente proporcional à corrente incidente no fotodíodo.

4.2 Módulo de controlo e transmissão de dados

Para a medição, controlo e transmissão dos dados referentes aos diferentes sistemas, foi utilizado um protótipo desenvolvido no âmbito do projecto de mestrado do colega Tiago Braga [61]. O protótipo em questão é composto basicamente por dois sistemas, o de controlo e o de comunicação/transmissão de dados.

4.2.1 Sistema de controlo

O sistema de controlo baseia-se essencialmente na utilização do microcontrolador *ATmega 168* de 8 bits (Figura 4.3). Como principais vantagens este microcontrolador apresenta um baixo custo e um baixo consumo energético [59].



Figura 4.3 – Microcontrolador *ATmega168*[62].

Este microcontrolador utiliza uma tecnologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) e possui uma arquitectura RISC (*Redution Instrution Set Computer*), operando numa gama de alimentação entre 2,7 V e 5,5 V, com uma tensão típica de 3,3 V. É composto por 32 pinos, dos quais 8 são referentes a conversores A/D (Analógico/Digital) de 10 bits, 6 pinos são referentes a V_{CC} e GND , 2 para utilização de uma interrupção

externa por meio de um cristal, 4 para transferência de dados, sincronização e *Reset* com o programador *AVR-ISO500*, 2 para comunicação série com o módulo *XBee* (*RX* e *TX*) e os restantes a operar como portas digitais [59].

Os conversores *A/D* servem para realizar leituras provenientes de fontes analógicas. Estes conversores necessitam de uma tensão de referência, que pode ser interna, ou seja, originária do próprio microcontrolador (1,1 V), ou externa utilizando a tensão de alimentação do componente. É preferível utilizar a tensão de referência interna face à externa, porque esta apresenta um nível de sinal contínuo mais estável. De modo a garantir que o sinal amostrado não ultrapasse a tensão de referência é necessário realizar o condicionamento do sinal. Este tem de verificar a expressão apresentada pelo fabricante [59],

$$ADC = \frac{V_{in} \times 1024}{V_{Ref}} \quad (4.3)$$

A precisão absoluta, resultante da não linearidade, erro de ganho, erro diferencial, *offset* e erro de quantização, é de $\pm 2\text{LSB}$ (*Last Significant Bit*), o que significa que para tensão de referência 1,1 V o erro de leitura é de $\pm 2,2$ mV [59].

Este microcontrolador incorpora-se na família AVR, o que permite utilizar o *software AVR Studio* juntamente com o compilador AVR, para efectuar a programação em linguagem C.

Como foram desenvolvidos três protótipos, foi necessário recorrer à programação de três microcontroladores separadamente. De uma forma mais intuitiva serão apresentados os fluxogramas referentes às programações presentes em cada um dos sistemas desenvolvidos. Note-se que o início de cada fluxograma é igual para todos os sistemas.

4.2.2 Sistema de comunicação

Para o sistema de comunicação foi utilizado um nó sensor *XBee*, que emprega o protocolo ZigBee para transmissão de dados.

4.2.2.1 Rádio *XBee*

Este rádio é produzido pela empresa *Digi International* [63], que disponibiliza quatro tipos de módulos, como mostra a Figura 4.4.

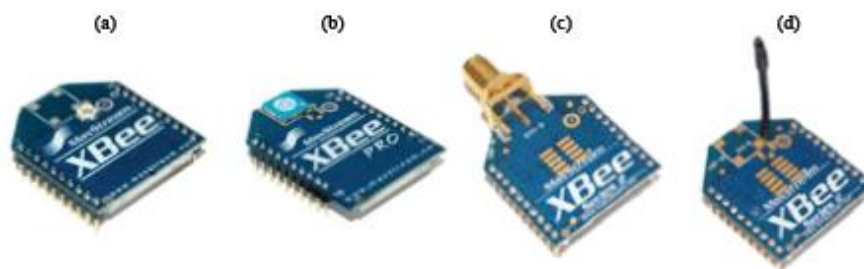


Figura 4.4-Módulos XBee e antenas disponíveis. (a) conector UFL; (b) antena chip; (c) conector RPSMA; (d) antena whip

As principais características dos módulos, são[63]:

- taxa de transferência de dados até 250 Kbp;
- gama de alimentação entre 2,1 V a 3,7 V
- potência de transmissão de saída baixa;
- frequência de operação de 2,4 GHz;
- sensibilidade do receptor: -96 dBm;
- baixo custo;
- pequenas dimensões;
- variedade de antenas e conectores;

Neste projecto foi utilizado o XBee o qual é fornecido com *firmware* ZNet 2.5, que possui vinte pinos (Anexo C). Foram utilizados os pinos: 1(V_{CC}), 2(Tx), 3(Rx) e 10(GND). O pino 1 foi utilizado para alimentar o módulo a 3,3 V. Os pinos 2 e 3 foram utilizados para realizar a comunicação ente o XBee e o microcontrolador através de uma interface UART.O pino 10 é a ligação à massa do sistema.

Estes módulos podem operar de duas formas diferentes na rede: o **modo transparente** (AT) e **modo API** (*Application Programming Interface*).

No **modo transparente** os dados recebidos na UART pelo pino *RX* são colocados numa fila para serem transmitidos por rádio frequência, enquanto os dados recebidos do canal de rádio frequência serão transmitidos através do pino *TX*. Neste modo, a forma de recepção e transmissão de informação é a mesma que numa comunicação série padrão RS232. Estes módulos possuem *buffers* para a transmissão e recepção, para garantir um melhor desempenho na comunicação [63].

Em relação ao **modo API**, a informação (recebida e transmitida) é inserida em tramas (Figura 4.5). Estas podem descrever operações dentro do módulo. Este modo permite configurar a identificação da fonte e a identificação do destino. Por este motivo, foi escolhido este tipo de operação para os nós desenvolvidos neste trabalho.

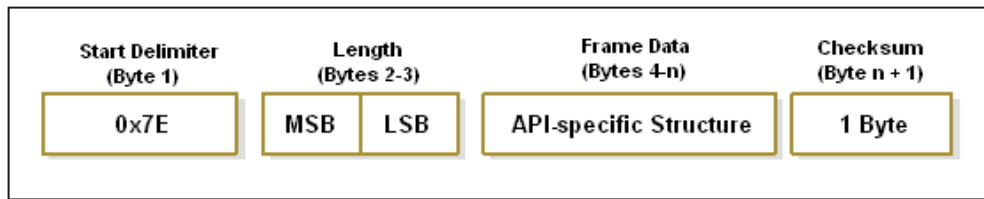


Figura 4.5 – Estrutura da frame em modo de operação API [63].

A Figura 4.5, mostra os campos constituintes de uma trama (*frame*) em modo API. O primeiro campo *Start Delimiter* define o início da mensagem. Em relação ao campo *Length*, especifica o comprimento da mensagem, através do *bit* mais significativo (MSB) e o *bit* menos significativo (LSB). O *Frame Data* é composto por um *API Identifier* e o *Identifier Especific Data*. O primeiro indica o tipo de mensagem que é apresentada no campo *Identifier Especific Data*. O *Checksum* é o *byte* responsável pela verificação da integridade da mensagem [63]. Neste trabalho o campo *API Identifier* foi colocado com o valor de identificação 10, que corresponde apenas ao envio de mensagem para a rede, podendo ser enviados 72 *bytes* por pacote.

4.2.2.2 Protocolo ZigBee

Este protocolo foi desenvolvido pela *ZigBee™ Alliance*, no ano de 2002. Como se trata de uma tecnologia recente, a sua apresentação ao público foi feita em 27 de Julho de 2005. A empresa responsável por este protocolo é constituída por 200 empresas providas de mais de 20 países diferentes, em conjunto com membros da IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*) [64].

Este protocolo foi essencialmente desenvolvido para realizar a transmissão de dados, possuindo as seguintes características [64]:

- baixo consumo energético;
- suporte de diferentes topologias de rede: estrela (*star*), malha (*mesh*) ou árvore (*cluster tree*);
- espalhamento espectral por sequência directa;
- capacidade de suportar um elevado número de nós por rede (cada rede pode suportar até 65535 nós);
- tempo de ligação à rede, menor que nos outros protocolos, diminuindo a taxa de latência;
- dois estados de operação: *active* para envio e recepção de dados e *sleep* para as restantes funções;
- dois modos de operação na rede: *Beacon* e *non-beacon*;
- suporte de três dispositivos lógicos: *coordinator* (coordenador), *router* e *end-device*;
- elevada fiabilidade;

Os protocolos da camada física e da camada de controlo de acesso da IEEE 802.15.4 foram a base do padrão do protocolo *ZigBee*.

Frequências de operação do ZigBee

O referido protocolo opera segundo as bandas atribuídas ao ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Estas três bandas não requerem licenciamento. As bandas são[64]:

- 2400 – 2483,5 MHz (banda dos 2,4 GHz).
- 902 – 928 MHz (banda dos 915 MHz);
- 868 – 868,6 MHz (banda dos 868 MHz);

As duas primeiras gamas de frequências são utilizadas nos Estados Unidos e, enquanto a última é utilizada no continente Europeu. As especificações de cada banda são apresentadas na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Comparação entre as bandas de frequências utilizadas no protocolo ZigBee.

Bandas de Comunicação	Taxa de transmissão	Nº de canais disponíveis	Tipo de modulação
868 – 868,8 MHz	20 Kbps	1	BPSK
902 – 928 MHz	40 Kbps	10	BPSK
2,400-2,4835 GHz	Máx: 250 Kbps Utilizada: 125 Kbps	16	O-QPSK

Pode-se ver que para uma maior frequência de operação, maior é a taxa de transmissão e o número de canais disponíveis.

Tipos de dispositivos

Para uma rede de sensores sem fios segundo o padrão IEEE 802.15.4 são atribuídos dois tipos de dispositivos: *Full Function Divices* (FFDs) e *Reduced Function Divices* (RFDs). Um dispositivo FFD aceita e executa qualquer função do protocolo IEEE 802.15.4. Um RFD possui funções limitadas, isto é, só pode comunicar um dispositivo FFD [64].

O coordenador (FFD) é responsável pela formação da rede *ZigBee*, sendo um dispositivo fundamental em todas as redes, tem por função estabelecer um canal de operação e um número lógico para o desenvolvimento da rede. Após a rede formada, este componente permite a integração dos restantes elementos da rede, passando posteriormente a *router* [64].

O *router* (FFD) é um nó responsável pela criação ou manutenção das informações sobre a rede. Desta forma, tem a função de encaminhar os dados pela melhor trajectória. Permitem a integração dos *end-devices* na rede [64].

Um *end-device* só pode interagir com o *router* ou coordenador na rede. Só transmite e recebe dados, não possuindo capacidade para redireccionar informação [64].

Topologia da Rede

A Figura 4.6 apresenta as diferentes topologias de rede suportadas pela rede *ZigBee*.

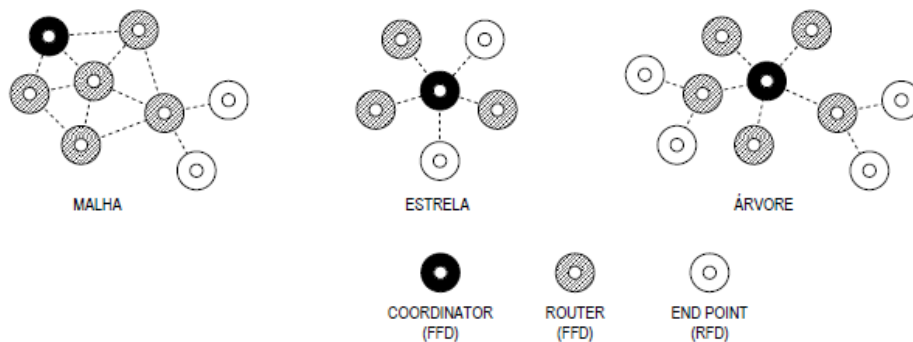


Figura 4.6- Topologias de uma rede ZigBee [65].

Na topologia em malha, o coordenador e o *router* podem comunicar entre si, mas só os *routers* podem comunicar com os *end-device*. Assim, permite um maior alcance da rede. O coordenador gere e regista a entrada e saída de elementos na rede .

Na topologia em estrela é o coordenador que gere a rede, sendo o elemento central da comunicação, isto é, ele comunica com todos os dispositivos. Todos os pacotes de dados na rede têm de passar por ele obrigatoriamente [66].

No que diz respeito à topologia em árvore, esta assume uma distribuição de dados hierárquica, não existindo comunicação entre *routers* [66].

Modos de operação

Como já foi apresentado o *ZigBee* pode operar em dois modos: *beacon* e *non-beacon*.

O modo *beacon* sugere uma organização da rede, isto é, os dispositivos sabem quando comunicar uns com os outros. O coordenador é responsável pelo envio de uma mensagem de sinalização (*beacon*) para os restantes dispositivos da rede. Esta mensagem, vai desencadear o “acordar” dos dispositivos da rede, que verificam se têm alguma mensagem a receber. Em caso negativo, o dispositivo volta a “adormecer” [67].

No modo *non-beacon* não existe uma coordenação de rede. Cada elemento da rede pode estabelecer comunicação com o coordenador, quando assim desejar. Este modo de operação implica um maior consumo da rede, tendo em conta que o coordenador tem de estar sempre no estado activo [67].

4.2.3 Modelo final do sistema de controlo e comunicação

O circuito desenvolvido em placa de circuito impresso para o sistema de controlo e comunicação de dados é apresentado na Figura 4.7.



Figura 4.7- Módulo de controlo e comunicação de dados. (a) Face superior da placa; (b) Face inferior.

A face superior da placa é composta pelo rádio *XBee*, visível em (a), enquanto a parte inferior exhibe o microcontrolador *ATmega168*. Como antena foi utilizado um monopolo de ganho 1,1 dB_i.

4.3 Sistema de comunicação de dados

Foi utilizada uma rede sem fios para a comunicação dos dados referentes aos testes realizados por cada protótipo desenvolvido. A rede utilizada foi criada de raiz pelo colega Tiago Braga, no âmbito do seu projecto. Os nós referentes aos sistemas desenvolvidos no presente projecto foram adicionados à referida rede. A Figura 4.8 mostra a arquitectura da rede referente aos sistemas desenvolvidos neste trabalho.

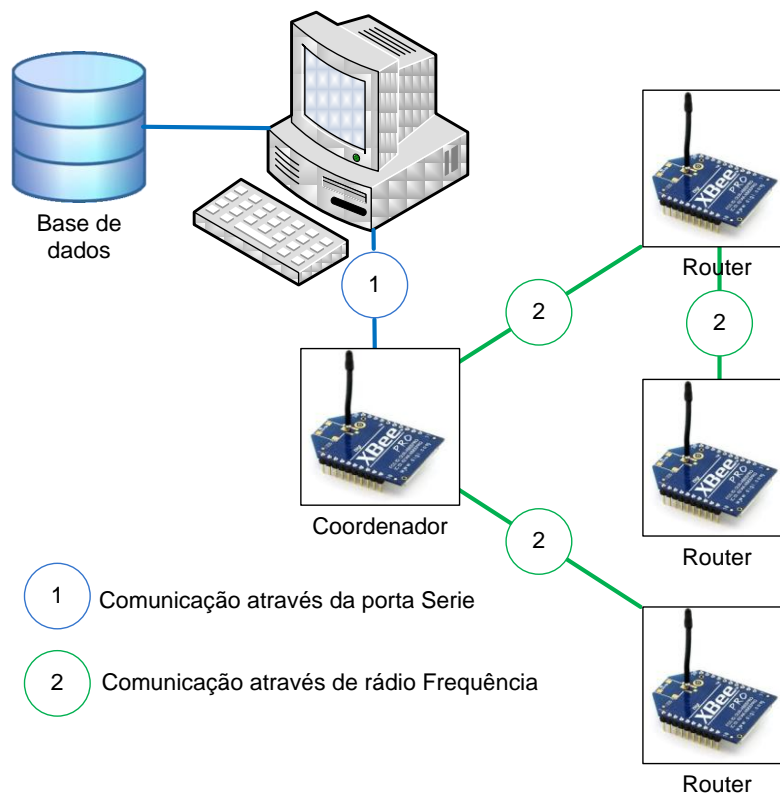


Figura 4.8 – Esquema da rede implementada.

A rede é composta por três *routers*, que fazem a monitorização dos sistemas desenvolvidos, estes comunicam com o coordenador através de uma ligação por rádio frequência. O coordenador envia a informação para a estação central pela UART, a qual é tratada e posteriormente armazenada numa base de dados.

Os dados obtidos são mostrados numa interface gráfica através de uma página da *Internet*.

4.3.1 Configuração dos nós

A configuração dos nós *XBee* foi efectuada com recurso ao *software* X-CTU. Primeiramente ligou-se a placa de aquisição de dados para o *XBee* ao computador. Esta ligação é efectuada através de um cabo USB (*Universal Serial Bus*). A janela principal do programa é apresentada na Figura 4.9.

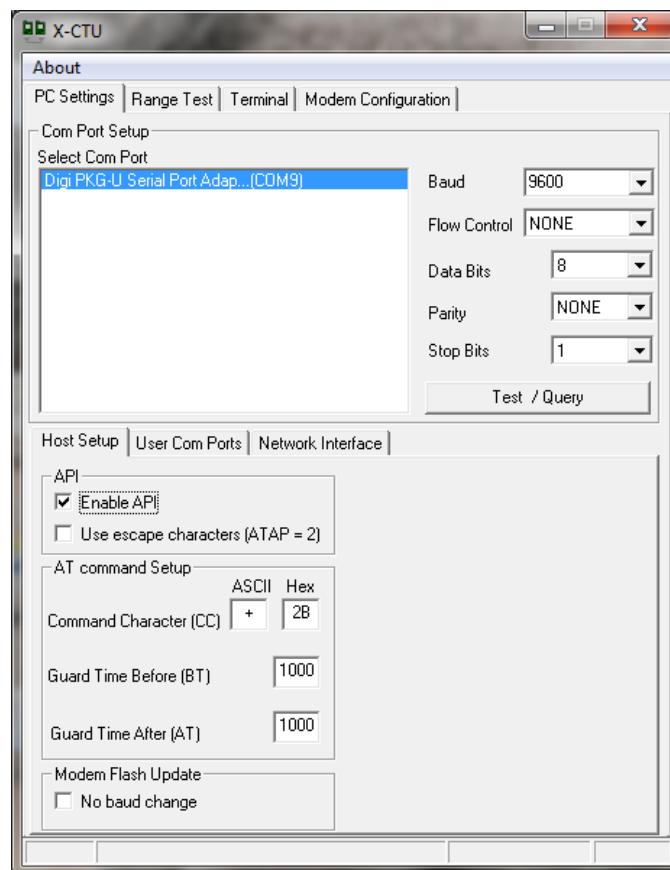


Figura 4.9 – Janela principal do programa X-CTU.

Primeiramente foi seleccionado o separador *PC Settings*, activou-se o modo API (*Enable API*). Seguiu-se a selecção do separador *Modem Configuration-Read*, como mostra a Figura 4.10.

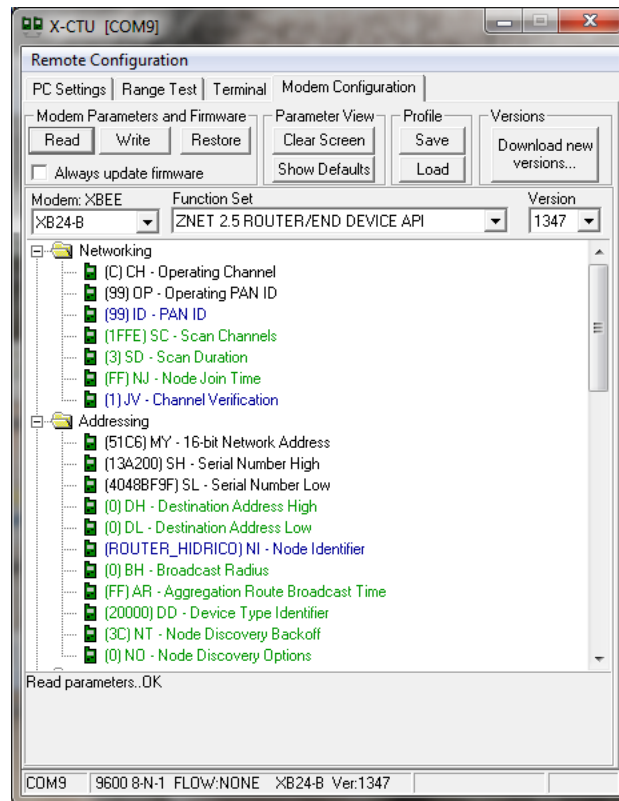


Figura 4.10 – Configuração do Modem Configuration.

Aqui foi escolhido o tipo de modem *XBee*: *XB24-B*, com a função de *ZNET 2.5 ROUTER/END DEVICE API*, a qual vai de encontro ao *firmware* utilizado pelo *XBee*. Definiu-se na pasta *Networking* a *PAN ID*, que identifica o *ID* da rede em que o nó vai ser inserido. A *PAN ID* a utilizar foi 99, definida na rede já implementada. Na pasta referente ao *Addressing* no campo *Node Identifier* foi introduzida a designação do nó inserido. Os restantes parâmetros não foram alterados, mantendo-se as configurações predefinidas. As configurações foram guardadas nos *XBee*, através da opção *Write*. Para verificar a presença dos nós na rede seleccionou o *Remote Configuration*, seguido da opção *Open Port* e por fim a escolha do separador *Discover*. O resultado é mostrado na Figura 4.11.

Address	Node Identifier	Type	Short Address	Profile
13A200402C91CB	ROUTER_CANTO	Router	7E5A	
13A2004048BF9F	ROUTER_HIDRICO	Router	51C6	
13A2004052ABD4	ROUTER_SOLAR	Router	4995	
13A200402D2533	ROUTER_ENERG...	Router	6FDE	
13A20040314ADF	ROUTER_EOLICO	Router	5256	

Figura 4.11 – Nós presentes na rede.

Pode-se verificar que os três nós referentes aos três sistemas desenvolvidos encontram-se integrados na rede. Estes possuem a identificação de *Router_HIDRICO*, *Router_SOLAR* e *Router_EOLICO*. Aparecem, ainda, outros nós que fazem parte da mesma rede.

4.3.2 Fluxograma

Neste sub-capítulo são apresentados os fluxogramas referentes ao código que foi instalado no microcontrolador, para cada sistema.

4.3.2.1 Sistema Solar

O fluxograma do sistema solar é mostrado Figura 4.12. O código é apresentado no anexo E.

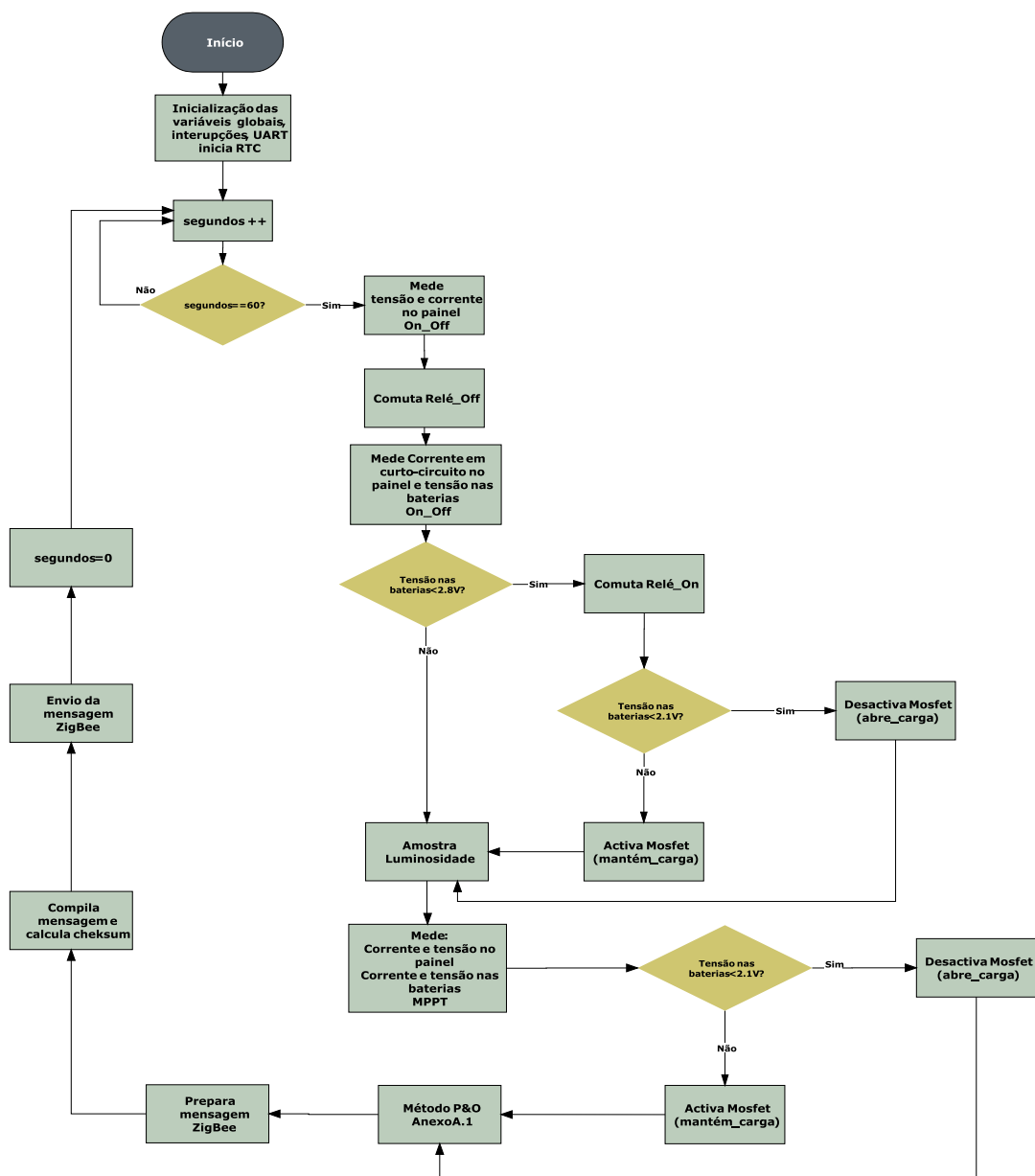


Figura 4.12 – Fluxograma do sistema solar desenvolvido.

Primeiramente é realizada a inicialização das variáveis globais seguida da incrementação temporal. Quando a variável “segundos” for igual a 60 é executado um

ciclo. Inicialmente são efectuadas as medições de tensão e corrente no módulo ON-OFF, posteriormente o módulo é posto em curto-circuito, para ser possível a leitura da corrente em curto-circuito do painel solar, e a tensão efectiva nas baterias do referido módulo. Se a tensão das baterias for superior ao seu valor máximo admitido, o sistema fica em curto-circuito, até este nível diminuir. É verificado, também, o nível inferior das baterias. Caso estas atinjam o valor limite inferior, a carga é desligada do circuito. De seguida, é realizada a leitura da luminosidade e o programa entra no módulo de MPPT, onde são realizadas as leituras dos parâmetros de entrada e saída do sistema e feita a verificação do nível inferior das baterias. Se as baterias estiverem no limite inferior, a carga é desligada do circuito. Feito isto, é realizado o método de perturbação e observação. E por último, é executada a preparação e compilação da mensagem *ZigBee*, que finalmente é enviada para a rede, e o contador “segundos” é reiniciado. O código é apresentado no anexo E.

4.3.2.2 Fluxograma para o Sistema Eólico

A configuração atribuída ao sistema eólico segue o fluxograma apresentado na Figura 4.13. É de referir que o código é apresentado no anexo F.

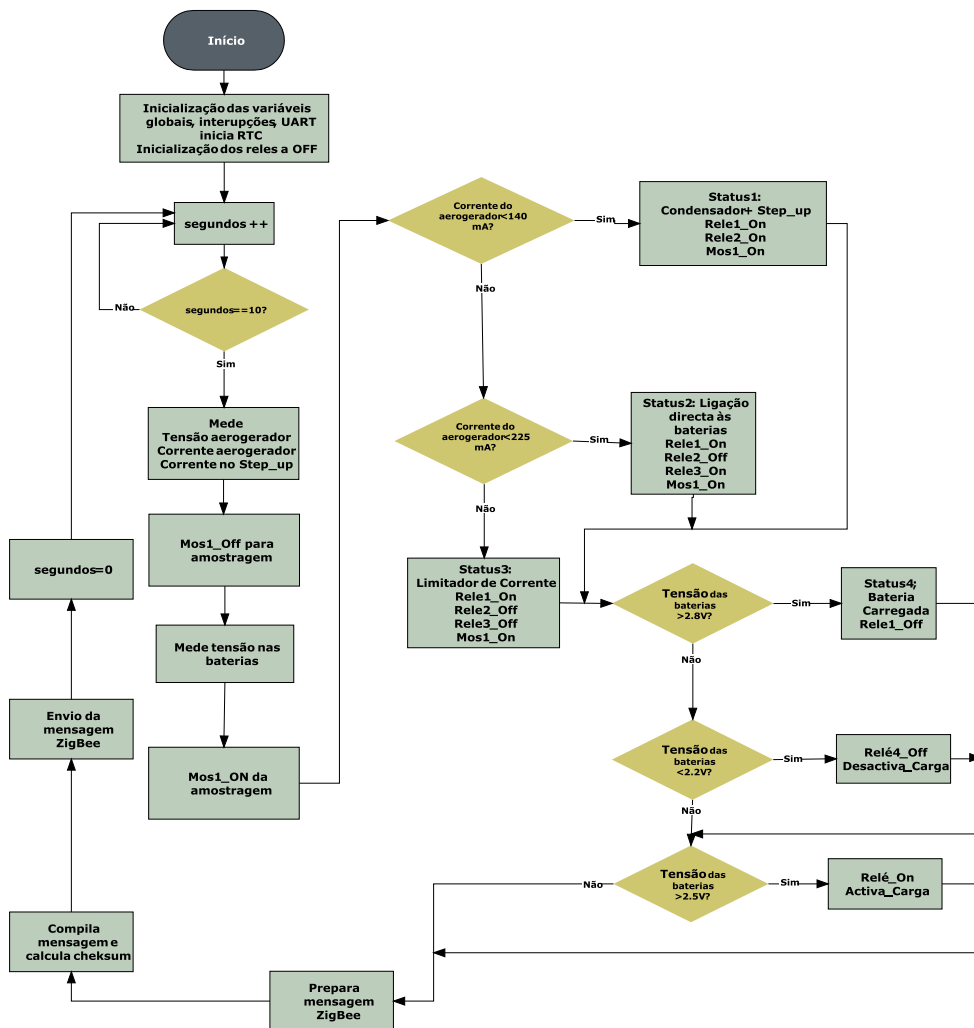


Figura 4.13 – Fluxograma configurado para o sistema eólico.

No início do programa são efectuadas as definições das variáveis globais do sistema. É feita a verificação da variável “segundos” e quando esta for igual a 10 são realizadas as medições de tensão e corrente do aerogerador e a corrente à saída do *step-up*. O *mosfet* é posto ao corte para ser efectuada a leitura da tensão das baterias, voltando posteriormente ao estado de activo. Depois é efectuada a comparação do valor da corrente no aerogerador. Se esta apresentar um valor inferior a 140 mA, o circuito entra no *status1* (condensador+*step-up*), caso contrário é feita nova verificação da corrente. O nível de comparação é de 225 mA, em caso afirmativo o circuito operará no *status2* (ligação directa com as baterias), senão operará no *status3*. Posteriormente é verificado o limite superior das baterias, se este limite se verificar o sistema passa a operar no *status4* (curto-circuito), caso contrário é feita a análise ao valor inferior da tensão nas baterias. Se estas estiverem no limite inferior é desactivada a carga do circuito, voltando novamente a ser ligada ao circuito quando as baterias apresentarem um valor de tensão superior a 2,5 V. A mensagem é preparada, compilada e enviada para a rede. O contador é reinicializado para a execução de um novo ciclo.

4.3.2.3 Fluxograma para o Sistema Hídrico

O programa desenvolvido para medição, controlo e comunicação dos dados é apresentado através do fluxograma da Figura 4.14 e o seu respectivo código encontra-se no anexo G.

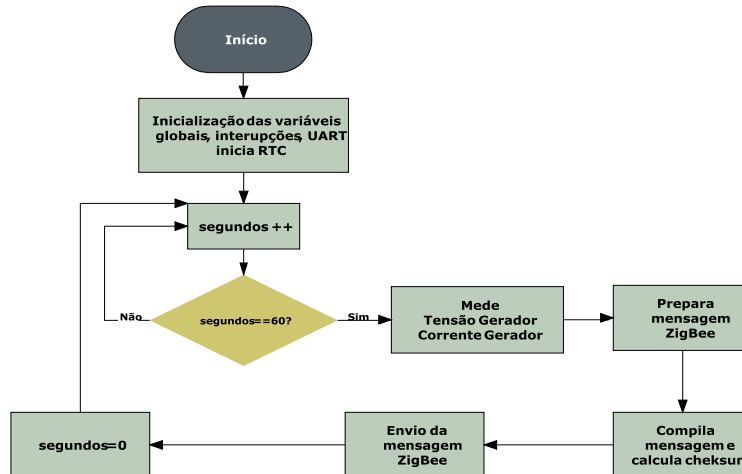


Figura 4.14 – Fluxograma referente ao sistema hídrico.

O ciclo é iniciado e são definidas as variáveis globais. O contador incrementa a variável “segundos” e quando esta for igual a 60 são medidos os valores da tensão e da corrente no gerador hídrico. A mensagem é preparada e compilada e posteriormente dá-se o envio mensagem para a rede e a variável “segundos” é posta a zero com o intuito de inicializar um novo ciclo.

4.4 Tratamento e armazenamento de dados

Para a apresentação dos dados na interface X-CTU, é necessário o encaminhamento da mensagem desde o nó até o coordenador, que por sua vez a envia pela porta UART até ao computador. Para o tratamento e armazenamento dos dados utilizou-se o programa *NetBeans IDE 6.7*, este é desenvolvido em linguagem java e permite a construção de aplicações. Para desenvolver a aplicação foi essencial implementar as classes necessárias desempenhar determinadas funções, como por exemplo: comunicação com a porta série, identificadores do modo de operação do módulo (tipo API) entre outros. Para a implementação da base de dados foi utilizado o *MySQL*. Para um melhor entendimento, da estruturação da base de dados construiu-se o diagrama entidade relação, visível na Figura 4.15.

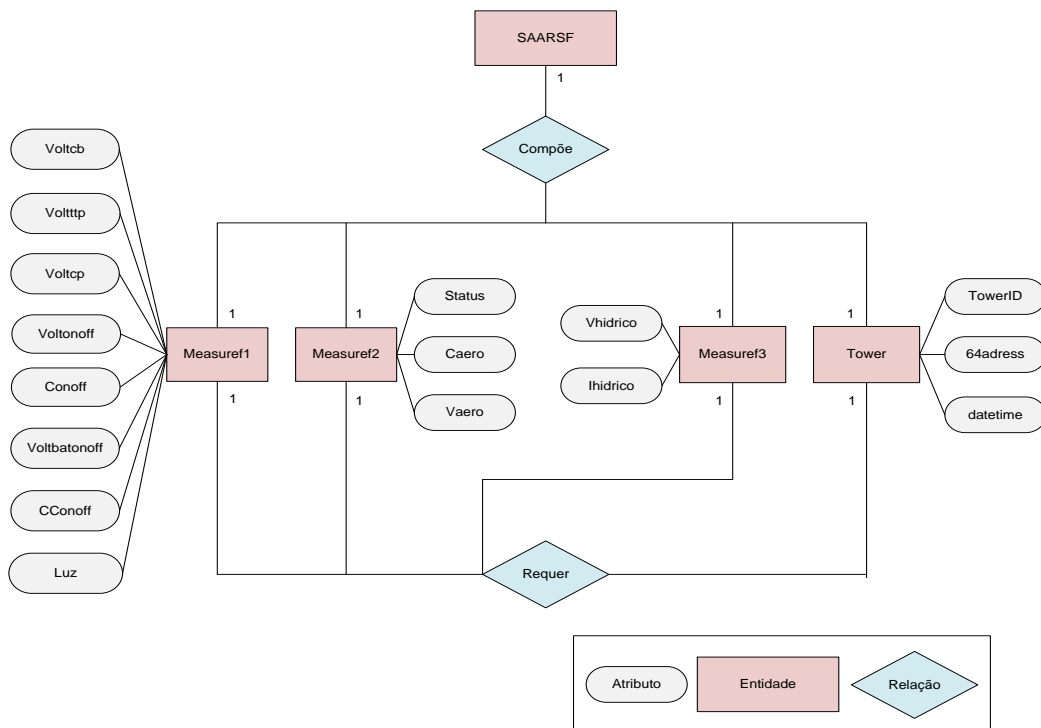


Figura 4.15 – Diagrama de entidade relação na base de dados.

A base de dados é composta por quatro tabelas: *Measuref1*, *Measuref2*, *Measuref3* e *Tower*, as três primeiras referem-se a cada um dos sistemas implementados, onde são guardados os valores das respectivas amostras. Em relação à tabela *Tower* esta armazena a identificação do nó através do atributo *64address*, proveniente do *XBee*, este é sintetizado e guardado no *TowerID*.

O funcionamento da aplicação da página da *Internet* é ilustrado conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.16. É de referir que este é o mesmo para todos os sistemas desenvolvidos.

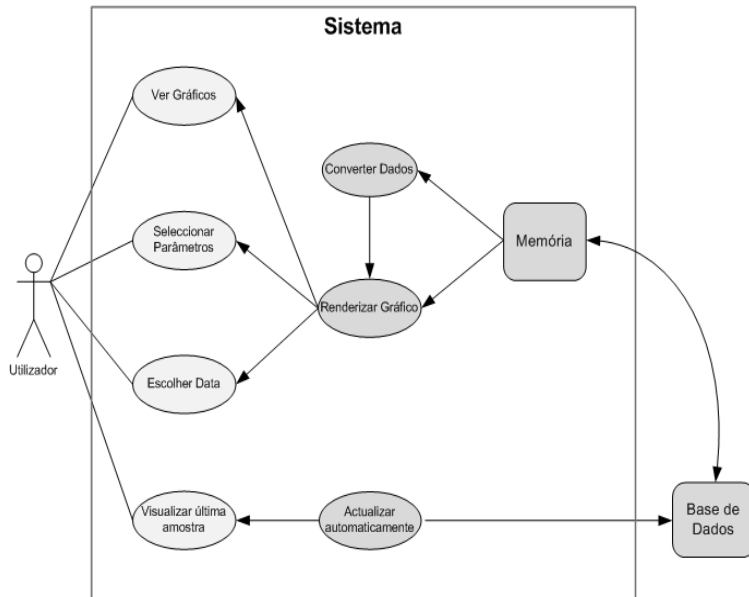


Figura 4.16 – Diagrama de fluxo de dados da página da Internet.

Os dados referentes a cada sistema estão guardados na base de dados em diferentes tabelas. O utilizador, ao aceder à página em questão, pode visualizar gráficos em determinada data. Este poderá seleccionar também os parâmetros (tensão nas baterias, corrente requerida pelas baterias, corrente em curto circuito, entre outros) pretendidos. Para a visualização dos gráficos. O sistema tem como responsabilidade de carregar, converter e mostrar os dados da base de dados referentes ao pedido imposto pelo utilizador. O sistema também informa o utilizador dos últimos valores recebidos.

Para visualização gráfica dos dados foi reutilizada uma página já desenvolvida em PHP. Foram feitas as configurações necessárias à visualização dos respectivos parâmetros. A interface da página é apresentada em Figura 4.17, onde o utilizador pode consultar os resultados de cada sistema.

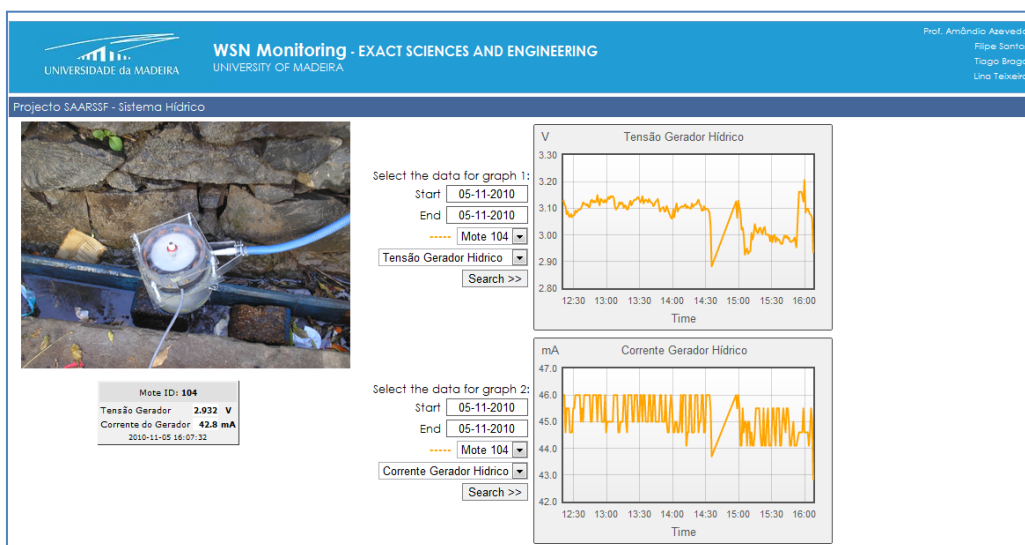


Figura 4.17 – Página de Internet.

5 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelos testes, referentes aos vários sistemas a funcionarem em ambiente real. Os sistemas foram mantidos em testes durante vários dias ou meses. São apresentados os resultados de dois protótipos de controlo de carga de baterias para energia solar, um para energia eólica, e por fim, são apresentados os resultados do último sistema desenvolvido com recurso à energia hídrica.

5.1 Localização dos sistemas

Para o período de testes, os sistemas desenvolvidos foram implementados em ambiente real. O protótipo desenvolvido para o sistema solar foi colocado no terraço da Universidade, de forma a conseguir captar a maior quantidade de sol disponível durante o dia. O sistema eólico também foi colocado no terraço de forma a captar a maior quantidade de vento. No que concerne ao sistema hídrico, este foi colocado ao lado da cantina, mais precisamente junto do tanque de rega dos jardins da Universidade. A Figura 5.1 revela a posição geográfica dos nós.



- Transmissão de dados do gerador hídrico para o coordenador
- Transmissão de dados do sistema solar para o coordenador
- Transmissão de dados do sistema eólico para o coordenador

Figura 5.1 – Localização geográfica dos sistemas desenvolvidos.

Para a transmissão de dados do sistema hídrico é realizada a comunicação directa entre o módulo de comunicação do sistema com o coordenador (linha vermelha). O mesmo é efectuado para o sistema solar (linha laranja). No que concerne ao sistema eólico os dados são primeiramente transmitidos para o *router* do sistema solar e só posteriormente é que são encaminhados para o coordenador (linha rosa e linha laranja). O *router* de canto e o nó sensor são referentes aos nós constituintes da rede em que os sistemas estão inseridos. Posteriormente é realizado todo o tratamento de dados e disponibilizado na página desenvolvida.

5.2 Sistema Solar

Para a fonte de energia renovável solar, foram testados 3 meios de carregar baterias, como apresentado no Capítulo 2. Destes foram implementados protótipos do modelo ON-OFF e MPPT em ambiente real durante o período de um mês. De seguida apresenta-se a análise dos resultados dos vários testes.

O sistema implementado é constituído pelos dois modelos desenvolvidos: ON-OFF e MPPT. Colocado no topo da universidade (terraço) de forma a estar em linha de vista com o coordenador. Os dois modelos partiram com a mesma tensão nas baterias (2,6 V), e com uma carga que exige à bateria cerca 14,4 mA. Os dois sistemas possuem protecção para o carregamento e descarregamento de baterias. A Figura 5.2 apresenta os dois modelos do sistema solar implementados para testes.

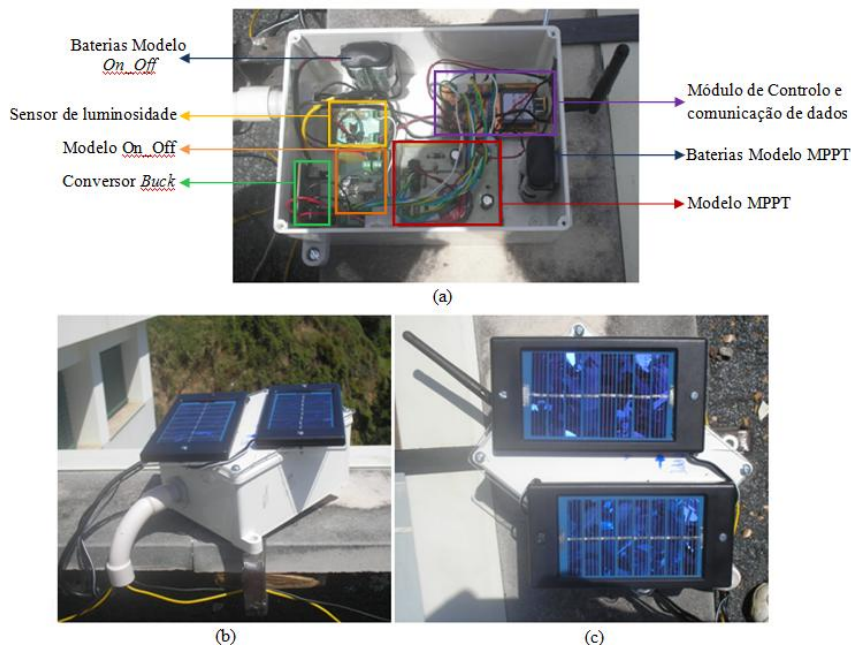


Figura 5.2 - Protótipos para teste do sistema solar. (a) Circuito preparado para fixação, com todas as ligações necessárias para funcionamento; (c) Sistema solar pronto para testes.

No que respeita à Figura 5.2 (a), esta mostra como foram colocados os dois sistemas dentro da mesma caixa. De referir que o sistema foi complementado, com a utilização de um sensor de luminosidade de modo a aferir a potência máxima disponibilizada por cada

painel solar. As restantes figuras ilustram a fixação da referida caixa. Os dados são transmitidos por rádio frequência para o coordenador onde é realizado o tratamento de dados e mostrados na página de *Internet*, como mostra a Figura 5.3.

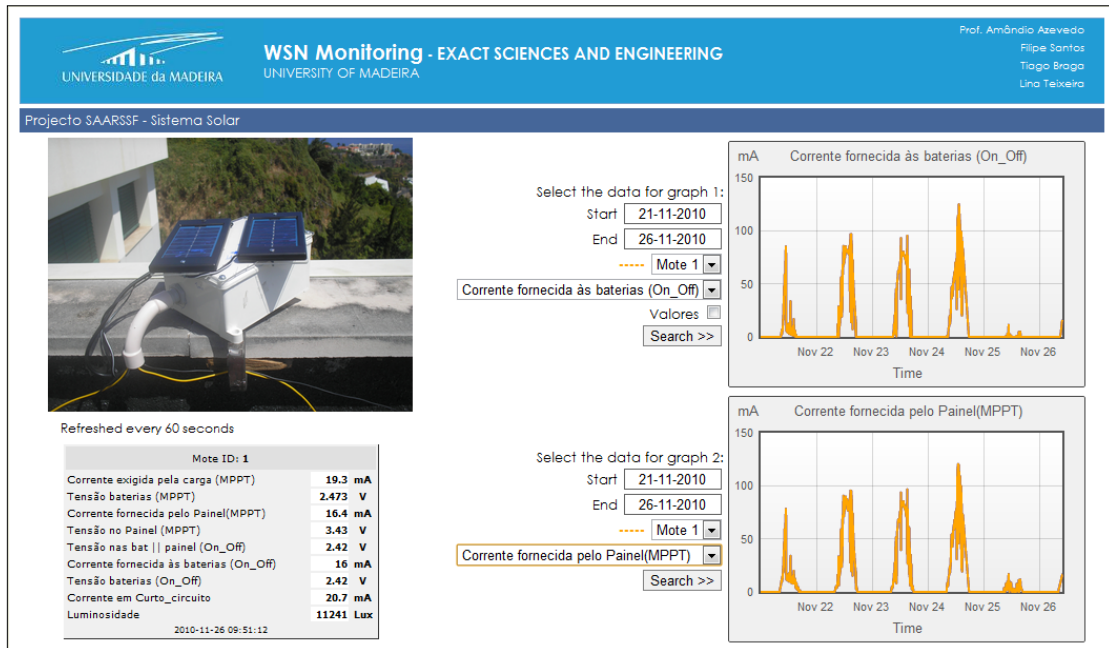


Figura 5.3 – Visualização dos resultados para o sistema solar.

Na página apresentada podem ser consultados os dados referentes ao modelo ON-OFF e MPPT.

5.2.1 Painel solar em ambiente real

Durante o período de testes dos protótipos registou-se, o comportamento da característica da corrente de curto circuito face à intensidade luminosa num ambiente real. Na Figura 5.4 (a) são apresentados os valores obtidos para a luminosidade um período de 12 dias do Outono de 2010 e a Figura 5.4 (b) apresenta os valores da corrente em curto-circuito para o mesmo período.

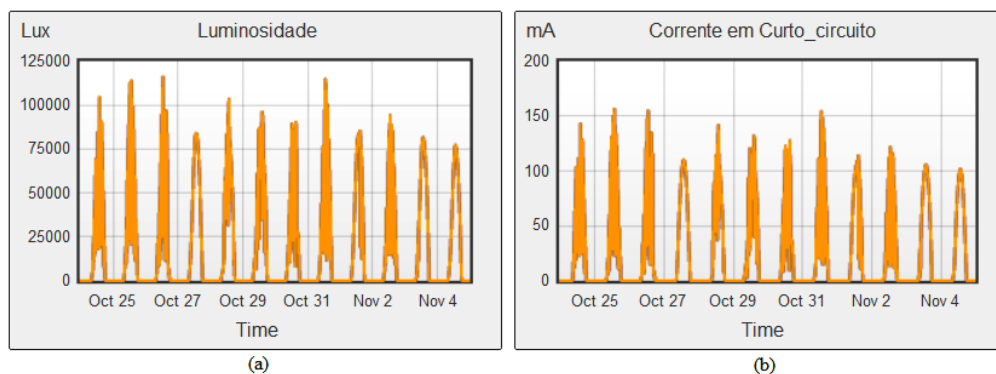


Figura 5.4 – Resultados do sistema solar. (a) Luminosidade; (b) Corrente de curto-circuito.

Constata-se que a corrente de curto-circuito é proporcional à intensidade luminosa incidente no painel solar. Verifica-se, ainda, os valores típicos de luminosidade obtidos no período indicado e os valores esperados de corrente. A Figura 5.5 mostra em paralelo o comportamento das duas variáveis, para um período de 3 dias (25 a 27 de Outubro de 2010).

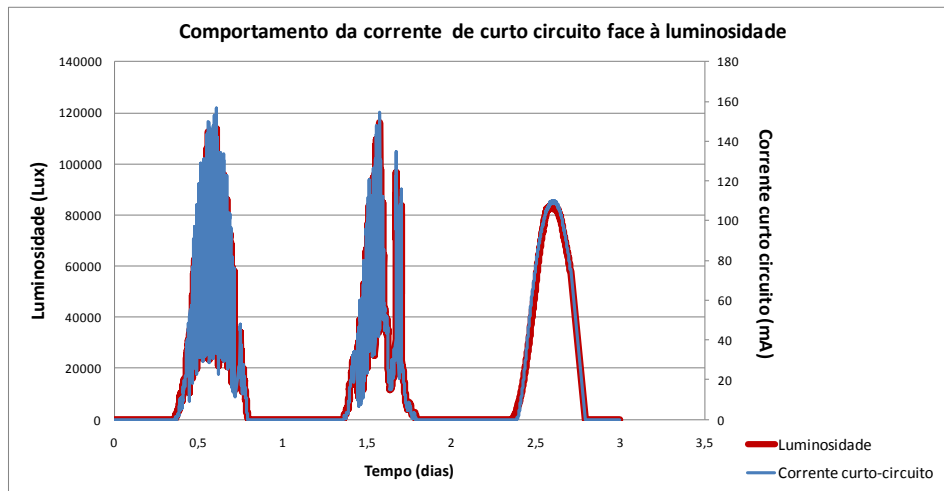


Figura 5.5 – Comportamento da luminosidade e da corrente durante um período de três dias.

Durante os dois primeiros dias houve uma variação da luminosidade, fazendo com que a corrente no painel seguisse o mesmo comportamento, face ao terceiro dia onde se pode observar que a luminosidade e a corrente não apresentam grandes variações. Com uma produção média do painel solar, no primeiro dia de 50 mA, no segundo dia de 37,9 mA e no último dia de 75,8 mA.

5.2.2 Modelo de Painel e condensador.

Para o estado de meia carga das baterias (tensão de 2,5 V), foi necessário colocar o painel a fornecer no mínimo 55 mA, para o sistema poder entrar em funcionamento.

Para baixas correntes, o conversor elevador funcionava por breves instantes e desliga-se até o condensador voltar a estar carregado com a tensão de arranque do referido conversor. Assim, analisou-se o comportamento do sistema apresentado na Tabela 5.1 ao longo de 40 minutos, para a situação que dispunha de uma corrente proveniente do painel de 55 mA.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.1. A primeira coluna é referente ao tempo em que foram recolhidos dados. As três colunas seguintes, apresentam os valores das correntes recolhidas, corrente fornecida pelo painel solar, corrente à entrada do *step-up* e corrente fornecida às baterias, respectivamente. A quinta coluna apresenta o valor da tensão aos terminais do condensador. A coluna seguinte apresenta a tensão das baterias.

A eficiência foi calculada, através da razão entre a potência de saída (produto entre a corrente e tensão fornecida às baterias) do *step-up* e a potência à entrada (produto entre a corrente do *step-up* e a tensão no condensador) deste.

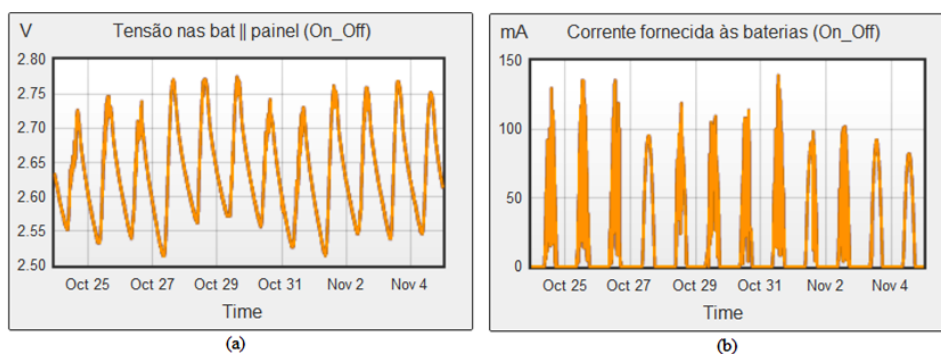
Tabela 5.1 – Tabela de resultados para 55 mA.

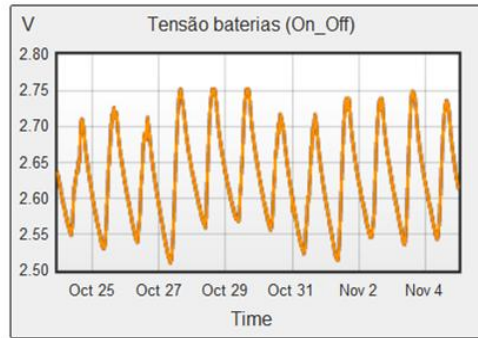
Tempo (min)	Corrente painel (A)	Corrente step_up (A)	Corrente baterias (A)	Tensão condensador (V)	Tensão baterias (V)	η (%)
1	5,36E-02	1,92E-02	6,40E-04	1,15E-01	2,70E+00	28,03
2	5,37E-02	2,27E-02	1,20E-03	2,00E-01	2,70E+00	30,17
3	5,37E-02	2,61E-02	1,83E-03	2,82E-01	2,70E+00	32,63
4	5,34E-02	2,94E-02	2,46E-03	3,50E-01	2,70E+00	35,54
5	5,23E-02	3,25E-02	3,01E-03	4,08E-01	2,70E+00	38,09
6	5,25E-02	3,58E-02	3,79E-03	4,55E-01	2,70E+00	42,84
7	5,20E-02	3,79E-02	4,29E-03	4,95E-01	2,70E+00	45,00
8	5,22E-02	3,98E-02	4,73E-03	5,28E-01	2,70E+00	46,34
9	5,20E-02	4,12E-02	5,10E-03	5,57E-01	2,70E+00	47,54
10	5,18E-02	4,21E-02	5,45E-03	5,83E-01	2,70E+00	48,73
11	5,15E-02	4,29E-02	5,72E-03	6,00E-01	2,70E+00	49,98
15	5,12E-02	4,71E-02	7,49E-03	7,00E-01	2,70E+00	56,43
20	5,13E-02	4,80E-02	7,97E-03	7,60E-01	2,70E+00	55,19
39	5,19E-02	5,08E-02	9,42E-03	8,70E-01	2,71E+00	56,54

No início de carga do condensador a eficiência apresentou um valor de 28 %, e ao fim de 39 minutos o valor da eficiência tendeu para o de 57 % correspondendo ao aumento da tensão no condensador. Verifica-se que, neste caso, o elevador de tensão na prática apresenta uma baixa eficiência na transferência de carga do condensador para a bateria devido as baixos valores de tensão obtidos aos terminais do condensador. O sistema apresenta uma eficiência de 16,6 % face ao ponto de máxima transferência de potência para a corrente de 55 mA. Desta forma, para uma maior eficiência do sistema, o condensador não deverá ser totalmente descarregado. A partir de 0,7 V, o sistema já começa a apresentar uma eficiência superior a 50 %.

5.2.3 Modelo ON-OFF

O primeiro protótipo desenvolvido, designado por modelo ON-OFF, onde o painel solar é ligado directamente às baterias, foi colocado em testes durante 1 mês. A Figura 5.6 apresenta o registo dos parâmetros para um período de 12 dias.



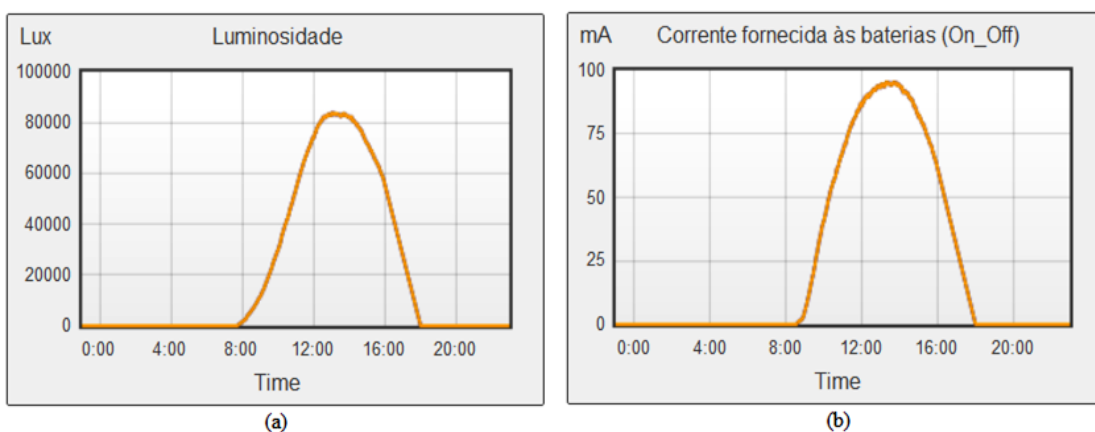


(c)

Figura 5.6 – Resultados para o Modelo ON-OFF. (a) Tensão no painel solar quando ligado às baterias; (b) Corrente fornecida às baterias; (c) Tensão efectiva nas baterias.

A Figura 5.6 (a) apresenta a tensão das baterias quando ligadas directamente ao painel solar. A Figura 5.6 (b) mostra a corrente fornecida às baterias e a Figura 5.6 (c) apresenta o valor da tensão efectiva nas baterias. Neste modelo registaram-se três parâmetros de avaliação de desempenho, a tensão das baterias quando ligadas em paralelo ao painel solar, a corrente fornecida às baterias e a tensão efectiva nas baterias, ou seja, em circuito aberto. Observam-se que a tensão na bateria, quando esta está a carregar, é superior à tensão efectiva da bateria por um valor entre 0 e 25 mV, sendo tanto maior quanto for a corrente fornecida pelo painel solar. Verifica-se ainda, que nos dias em que se atinge pico mais elevados de corrente fornecida pelo painel solar isso não se reflecte numa maior carga da bateria. Isto porque nesse período houve grandes oscilações na intensidade solar. A tensão do painel solar desce para o valor da tensão das baterias quando ligados em paralelo.

Na Figura 5.8 analisa-se em maior pormenor este processo durante um dia (27 de Outubro), em que as condições climáticas permitiram uma variação da intensidade solar sem grandes oscilações.



(a)

(b)

Figura 5.7- Desempenho do modelo ON-OFF para um dia. (a) Luminosidade; (b) Corrente fornecida às baterias.

Através da análise gráfica da luminosidade Figura 5.7 (a)) verifica-se que o período diurno começa um pouco antes das oito da manhã, mas o painel solar só é capaz de fornecer corrente mensurável a partir 9 h 30 m, isto quando a luminosidade apresenta um

valor em torno dos 5000 lux. Através da Figura 5.8 afere-se, que a carga nas baterias aumenta ao longo do dia devido, à disponibilidade estável de energia solar eléctrica.

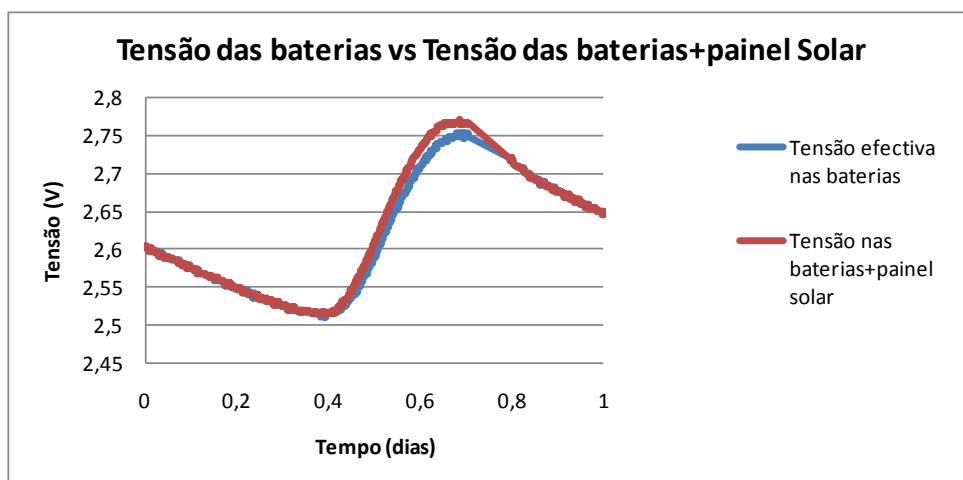


Figura 5.8 – Comportamento das baterias quando ligadas ao painel solar e tensão efectiva nas baterias.

Observa-se que a energia solar eléctrica fornecida pelo painel solar atinge o seu ponto máximo às 14 horas e 40 minutos, ponto em que a intensidade solar começa a diminuir, deixando de ser suficiente para alimentar a carga e carregar a bateria pelas 16 horas e 50 minutos, isto quando a luminosidade desce abaixo dos 60.000 lux. Os resultados referentes a um dia chuvoso (21 de Outubro) são apresentados na Figura 5.9.

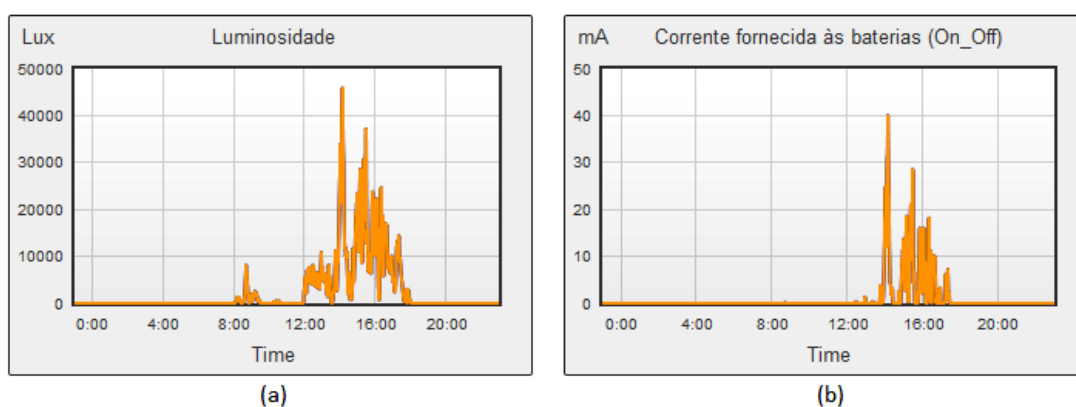


Figura 5.9- Parâmetros referentes a um dia chuvoso. (a) Luminosidade; (b) Corrente fornecida às baterias

Mais uma vez é verificado que a corrente fornecida às baterias segue um comportamento semelhante ao da luminosidade. Quando comparados com um dia 27 de Outubro, apresenta mais variações na luminosidade e isso é reflectido na corrente entre às baterias que, pelas 16 horas, a corrente entregue à bateria é de 55 mA, e para um dia chuvoso apresenta um valor em torno dos 17 mA. Em relação à carga das baterias neste dia, o resultado é apresentado na Figura 5.10.

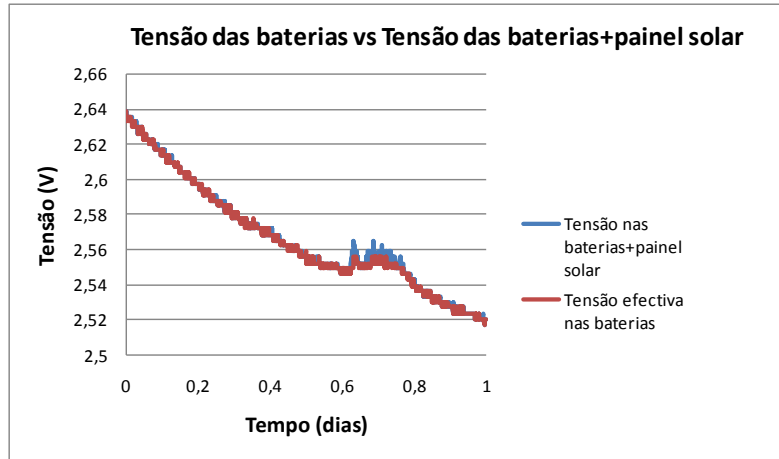


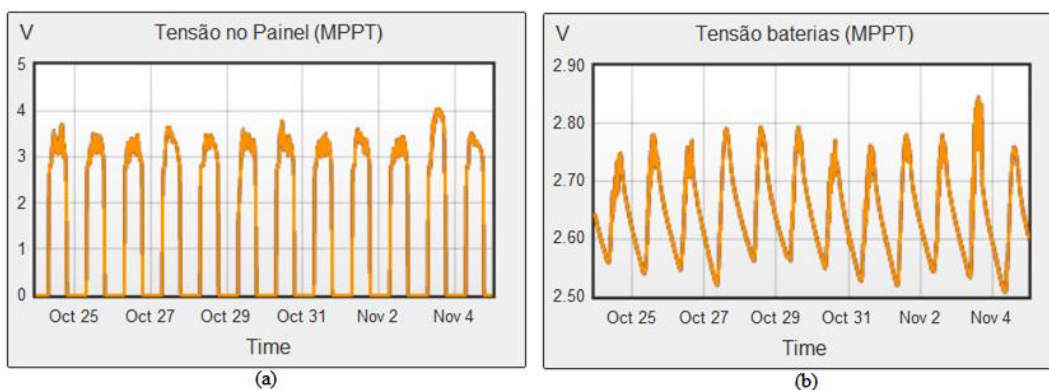
Figura 5.10 – Comportamento das baterias.

Analisando a Figura 5.10, verifica-se que a tensão nas baterias quando ligadas directamente ao painel solar apresenta um valor superior em relação à tensão efectiva nas baterias. Observa-se que, quando não existe luminosidade a produção de energia por parte do painel solar, não é suficiente para compensar a alimentação da carga e efectuar o carregamento das baterias. Comparando a tensão de funcionamento das baterias com a curva característica de carga e descarga das baterias (Figura 1.23), verifica-se que estas estão operando na zona de maior tensão (carregadas), apresentando uma maior descarrega antes atingirem a zona de operação estável. Isto justifica o rápido descarregamento das baterias.

Este modelo foi aplicado para alimentar uma dezena de nós da rede de sensores sem fios do projecto do aluno Tiago Braga, que decorreu em paralelo com este projecto. Os referidos nós sensores apresentam um período de funcionamento de oito dias para um par de baterias AA de 2500 mAh. Regista-se até a data deste relatório, com este modelo aplicado e uma adequada orientação do painel solar, o funcionamento autónomo dos nós por um período já superior a três meses.

5.3 Modelo MPPT

Para o sistema com MPPT apresenta-se na Figura 5.11 o mesmo período de teste que o modelo do ON-OFF. Os resultados deste teste são apresentados na Figura 5.11.



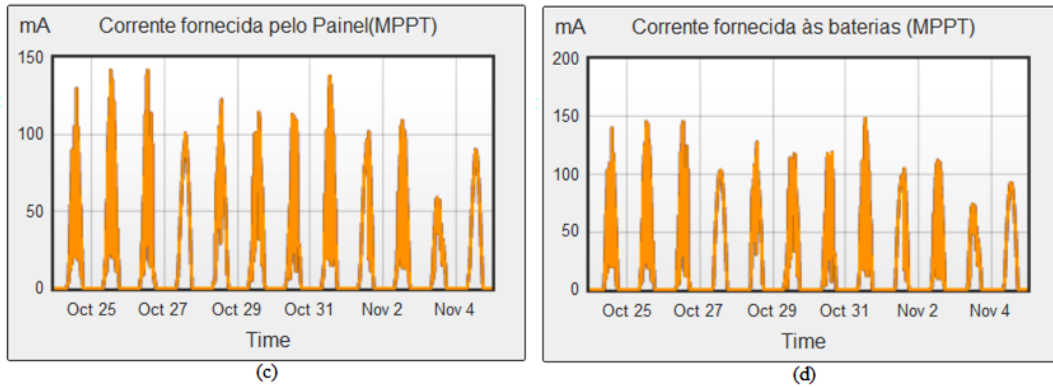


Figura 5.11 – Resultados do modelo MPPT. (a) Tensão fornecida pelo painel solar; (b) Tensão nas baterias; (c) Corrente fornecida pelo painel solar; (d) Corrente exigida pelas baterias.

Neste modelo são estudados os seguintes parâmetros: a tensão e a corrente gerada pelo painel ao circuito de MPPT; e a tensão e corrente fornecida às baterias pelo circuito de MPPT. Analisando os resultados, afere-se que existe um aumento da corrente fornecida às baterias face à corrente de entrada, com a devida diminuição da tensão aos terminais das baterias. Este comportamento demonstra o correcto funcionamento do conversor redutor, bem como o algoritmo de MPPT. Com o decorrer dos testes verificou-se que a corrente à saída só apresentava um valor superior face à corrente de entrada, quando aos terminais do painel a tensão era superior a 3,1 V. Verifica-se que as duas correntes têm o mesmo comportamento. Neste modelo comprova-se que a tensão do painel solar não fica limitada à tensão das baterias, ao contrário do que acontece no modelo anterior. A Figura 5.12, permite uma análise mais detalhada do modelo em questão durante o dia 27 de Outubro, através do qual pode-se calcular a eficiência do conversor redutor implementado.

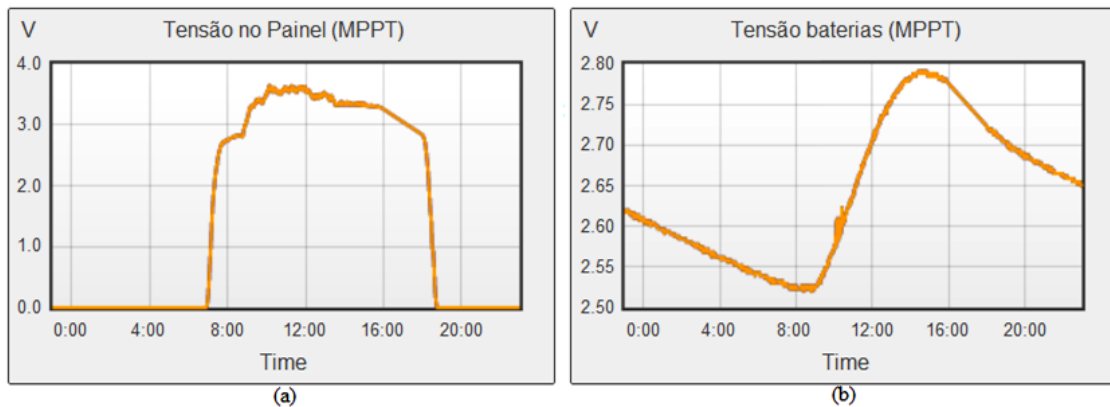


Figura 5.12 - Desempenho do modelo MPPT para um dia. (a) Tensão no painel solar; (b) Tensão nas baterias.

Observando os gráficos apresentados na Figura 5.12, afere-se que a tensão máxima nas baterias é atingida às 15 horas e 30 minutos.

Verifica-se que no circuito de MPPT a tensão do painel não é imposta pelas baterias.

A Figura 5.13 ilustra a comparação entre a corrente fornecida pelo painel solar e a corrente fornecida às baterias

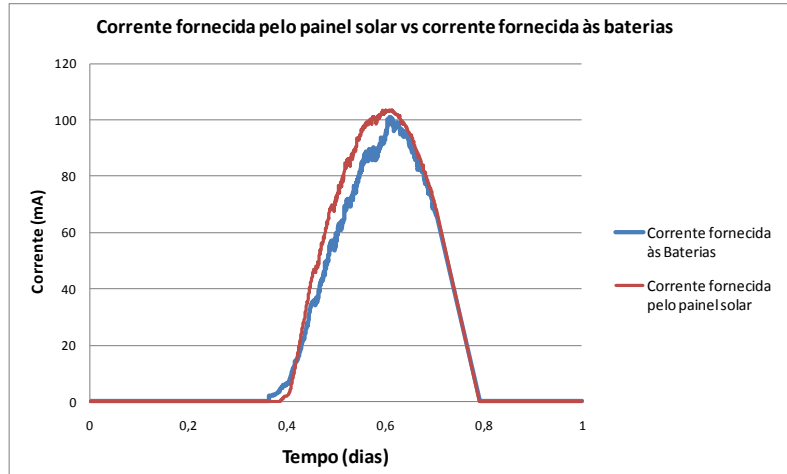


Figura 5.13 – Comparação entre a corrente fornecida pelo painel solar face à corrente fornecida às baterias.

Neste modelo, a corrente fornecida pelo painel já é mensurável a partir das 9 horas ocorrendo, aproximadamente, 30 minutos antes em relação ao modelo anterior. Esta situação ocorre para uma intensidade luminosa de 1700 lux.

A corrente fornecida para as baterias atinge o seu ponto máximo às 14 horas e 17 minutos (103 mA), e a tensão máxima nas baterias ocorre às 15 horas e 28 minutos (2,79 V). Apesar da intensidade luminosa (83500 lux) começar a diminuir a partir das 14 horas, a corrente fornecida pelo conversor redutor, ainda é suficiente para carregar as baterias e alimentar a carga. No momento (14 horas e 17 minutos) em que a corrente fornecida às baterias é máxima o conversor apresenta uma eficiência de 86,6 %. Esta foi calculada através da expressão:

$$\eta = \frac{T_b \times I_b}{T_p \times I_p} \quad (5.1)$$

onde T_b é tensão nas baterias (2,66 V), I_b é a corrente à saída do conversor redutor (78,9 mA), T_p é a tensão no painel solar (3,66 V) e I_p é a corrente fornecida pelo painel solar (66,2 mA).

Analisando os dois modelos para o dia 27 de Outubro, às 10 horas, ambos apresentam a mesma tensão de baterias (2,52 V). No entanto, 6 horas depois o modelo ON-OFF apresenta um valor de 2,75 V e o modelo MPPT um valor de 2,79 V, observando-se assim um aumento de 23 mV e 27 mV, respectivamente. Este facto traduz que o modelo MPPT apresenta um aumento de tensão de 17% face ao modelo ON-OFF, ou seja, uma maior eficiência por parte do modelo MPPT. É de referir que este resultado foi verificado ao longo de todo o período de testes.

É de salientar que ambos os modelos possuem o painel solar com características idênticas, baterias de igual capacidade e fabricante, e cargas idênticas. Embora o modelo MPPT tenha um maior aproveitamento da energia solar eléctrica disponível, apresenta um custo mais elevado face ao modelo ON-OFF.

5.4 Sistema Eólico

Colocou-se o circuito do sistema eólico dentro de uma caixa estanque IP65, com intuito de proteger o circuito das chuvas, tendo em conta que, o sistema foi testado no terraço da universidade, como mostra a Figura 5.14.

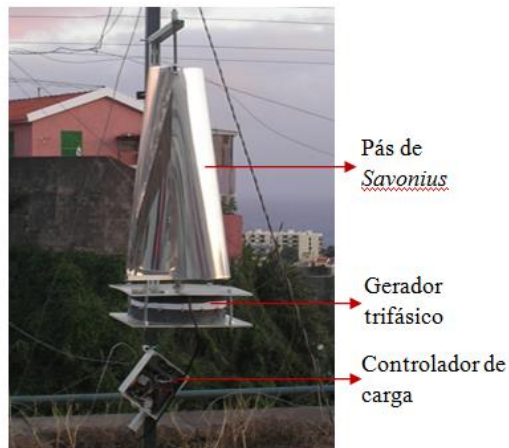


Figura 5.14 - Fixação do gerador eólico.

A circulação de ar existente no terraço da universidade, foi um factor determinante na escolha deste local para fixar o sistema, visto que as condições apresentadas favorecem o funcionamento do sistema. As condições iniciais impostas pelo circuito foram: tensão das baterias 2,66 V, corrente de 10 mA, pedida às baterias pela carga, imposição de um limite superior e inferior para as baterias. Os dados foram transmitidos através do rádio XBee por rádio frequência, e disponibilizados na referida página (Figura 5.15).

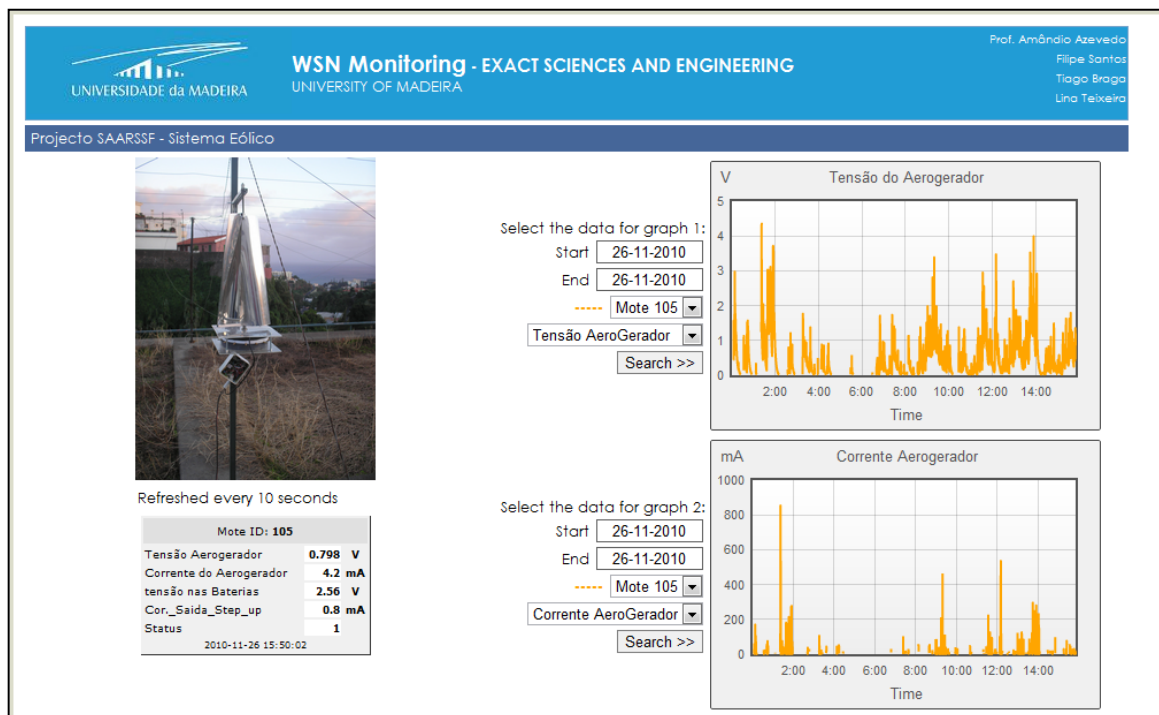
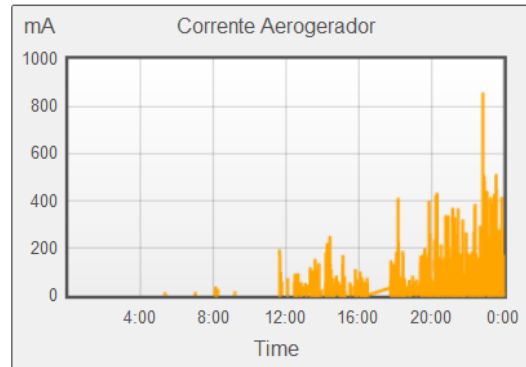
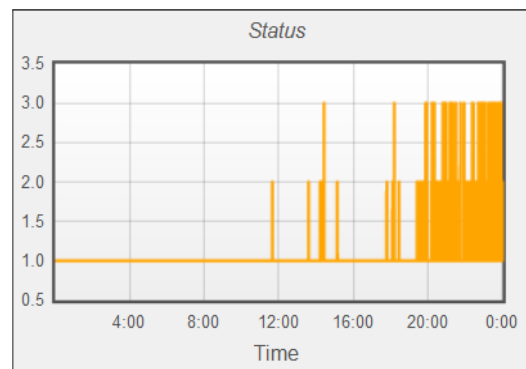


Figura 5.15 - Visualização dos resultados para o sistema eólico.

Como já foi apresentado, o controlo de carga foi realizado por três circuitos, dependendo da corrente de entrada. Na Figura 5.16 (a) apresenta-se o registo do funcionamento temporal da corrente disponibilizada pelo aerogerador para um dia de funcionamento e a Figura 5.16 (b) apresenta qual o estado o controlador está a operar.



(a)



(b)

Figura 5.16 – Identificação dos estados face à corrente produzida pelo aerogerador. (a) Corrente no aerogerador; (b) Identificação do estado de funcionamento.

Analisando a Figura 5.16, constata-se que, quando a corrente disponibilizada pelo aerogerador apresenta um valor inferior a 140 mA, o *status* apresenta o valor de 1, identificando que o sistema opera no circuito de condensador+*step_up*. Quando o *status* apresentado é o 2, é inferido ao sistema a ligação directa às baterias, visto que a corrente produzida pelo aerogerador encontra-se na gama de 140 mA a 225 mA. Quando geradas correntes superior a 225 mA, observa-se que o sistema está funcionando no *status* 3. Este exemplo traduz a escolha correcta do circuito consoante a corrente gerada pelo aerogerador.

A Figura 5.17 ilustra os resultados do sistema eólico durante um período de 10 dias, relativamente à tensão e corrente no aerogerador e a tensão da bateria. A Figura 5.17 (a) (b) (c) apresenta, a tensão produzida pelo aerogerador, corrente produzida pelo aerogerador e a tensão nas baterias, respectivamente.

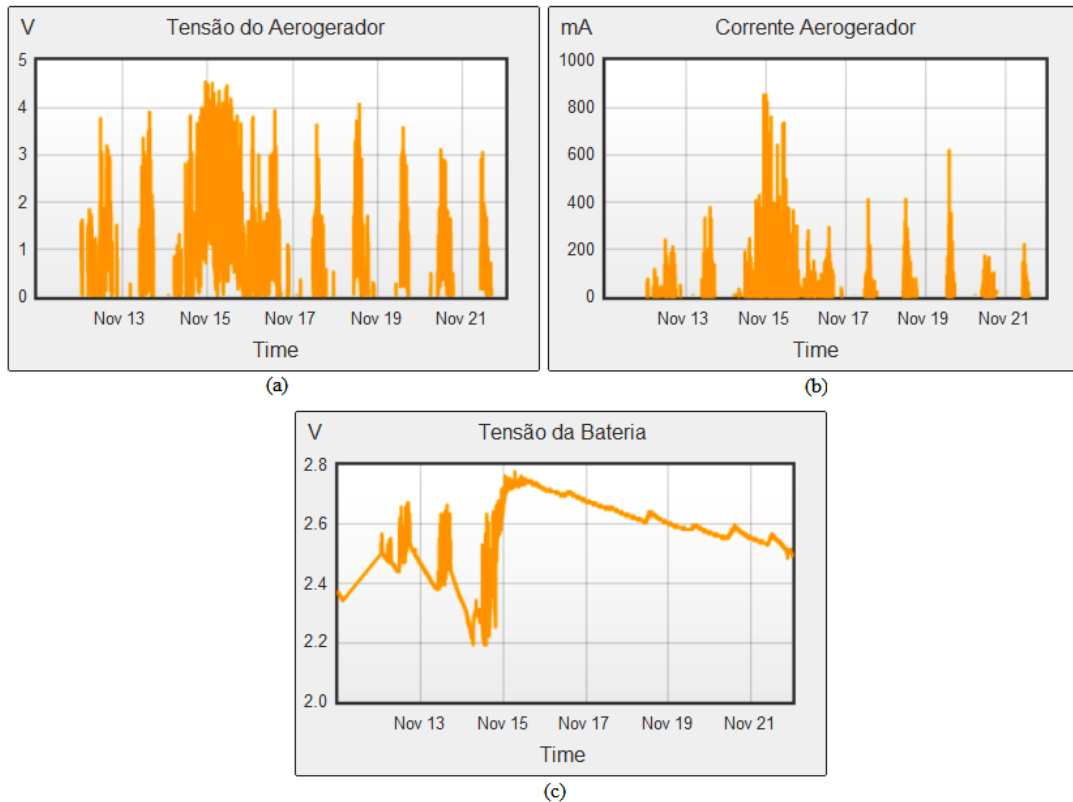


Figura 5.17 – Resultados obtidos para o sistema eólico. (a) Tensão gerada; (b) Corrente disponibilizada pelo aerogerador; (c) Tensão efectiva nas baterias.

Ao analisar a Figura 5.17 (a) e (b), pode verificar-se que à medida que a tensão produzida pelo aerogerador aumenta, a corrente fornecida por este, segue o mesmo comportamento.

Quando ocorre uma produção de energia praticamente constante durante um dia e com um valor de corrente superior a 225 mA, tal como sucedeu entre os dias 14 e 15 de Novembro, verifica-se que a produção de energia é suficiente para a realização de um ciclo de carga completo das baterias.

Tal como pode observar-se, este facto ocorre poucas vezes, assim sendo, a produção média da energia eólica pode não ser suficiente para realizar o carregamento das baterias e alimentação da respectiva carga.

Um circuito secundário de armazenamento de energia é uma alternativa ao aproveitamento da energia que este controlador desperdiça. Este aerogerador possui um tamanho adequado desde que seja colocado numa zona de maior altitude, embora o exista o factor de impacto visual, que é uma desvantagem.

5.5 Sistema Hídrico

Fez-se a instalação do sistema hídrico em ambiente real. Foi utilizado o tanque junto à cantina da universidade, para funcionar como fonte de fornecimento de água ao reservatório do sistema. Desta forma, a Figura 5.18, sugere o esquema de montagem final em ambiente real.

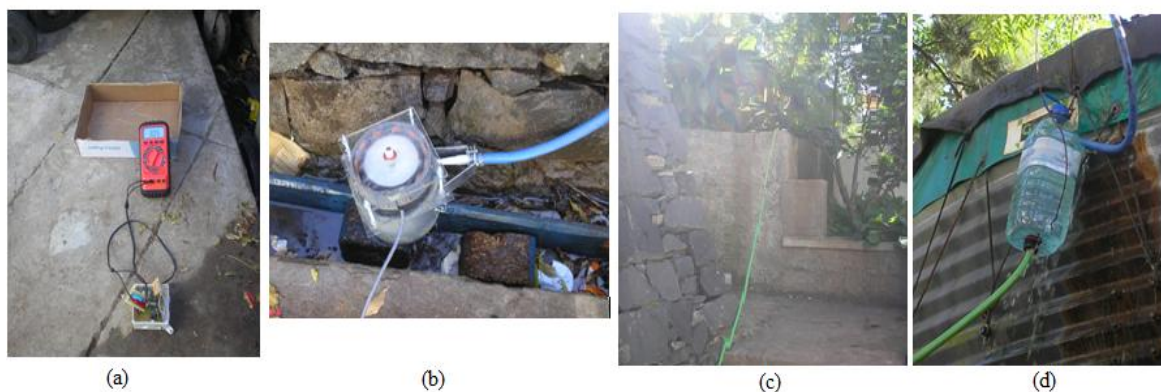


Figura 5.18- Esquema de montagem para realização dos testes finais.

Na Figura 5.18 (a) apresenta o nó sensor que deverá ser alimentado directamente pelo o gerador presente na Figura 5.18 (b). Este por sua vez encontra-se ligado ao reservatório (Figura 5.18 (d)) por uma mangueira de 8,5 m, como mostra a Figura 5.18 (c). Esse nó sensor transmite os dados directamente para o coordenador, tendo em conta que o *router* estava em linha de vista e com uma distância aproximadamente de 20 metros. Os dados transmitidos foram apresentados na página desenvolvida (Figura 5.19).

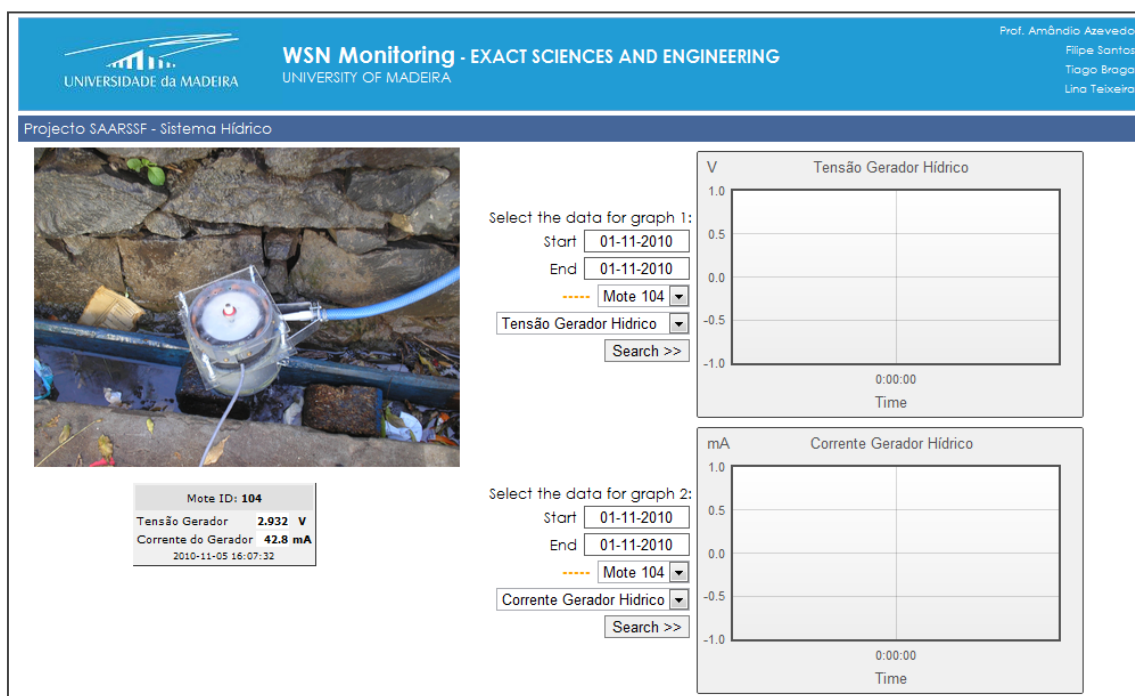


Figura 5.19 - Visualização dos resultados para o sistema hídrico.

Testou-se primeiramente o sistema para uma carga constante de forma a averiguar as variações dos parâmetros tensão e corrente, determinando o comportamento do sistema. O resultado deste teste intermédio é apresentado na Figura 5.20, para uma carga de 21 Ω .

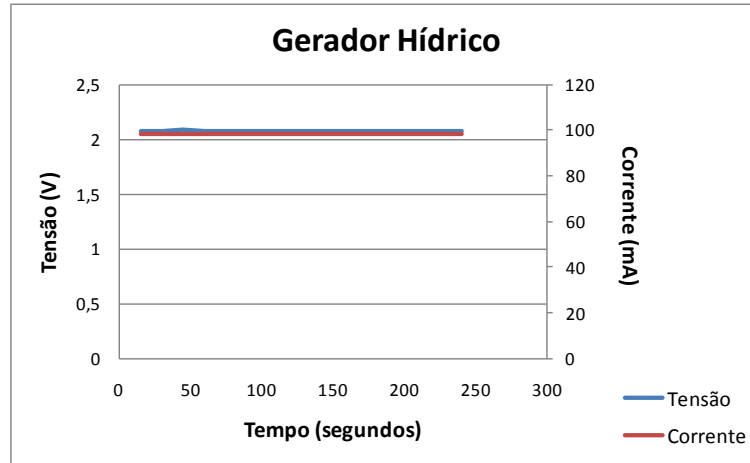


Figura 5.20 – Comportamento do gerador hídrico para uma carga constante.

O teste realizado para este sistema consistiu na alimentação directa de um nó, devido à estabilidade do sistema. Assim, sabendo que a potência requerida pelo nó é cerca de 148,5 mW, foi necessário fazer o ajuste da altura do reservatório, até que o gerador produzisse a energia exigida pelo nó e este entrasse em funcionamento. O reservatório ficou ajustado a uma altura de 3,17 m do gerador hídrico. O valor de potência indicado corresponde a uma corrente de cerca 45 mA a 3,3 V.

O teste efectuado teve a duração de 4 horas, tendo em conta as limitações impostas pelo meio. O resultado deste teste é o apresentado na Figura 5.21.

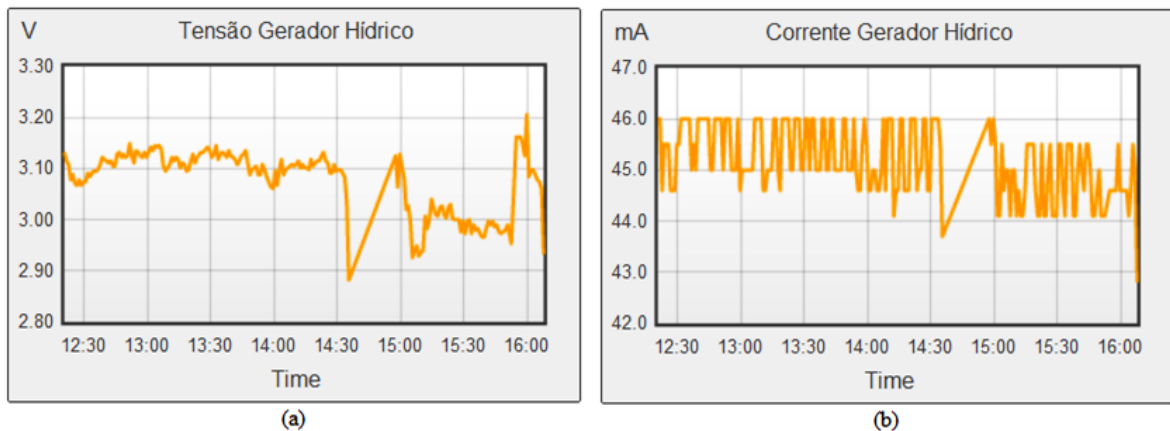


Figura 5.21 – Resultado dos testes para o sistema hídrico. (a) Tensão do aos terminais à entrada do nó sensor; (b) Corrente fornecida ao nó sensor.

Ao analisar a Figura 5.21 (a), constata-se que durante as duas primeiras horas o nó sensor operou correctamente, ou seja, a produção de tensão e corrente por parte do gerador hídrico foi em média de 3,15 V e 45,5 mA, respectivamente, sendo o suficiente para a alimentação do nó. No intervalo entre as 14 horas e 30 minutos e as 14 horas e 57 minutos, o sistema deixou de operar devido à falta de água no reservatório, razão pela qual foi necessário repor o caudal. Embora tenham sido repostas novamente as condições necessárias para o correcto funcionamento do sistema, entre as 15 horas e as 15 horas e 50 minutos notou-se que alguns detritos acumulados na ponta do jacto fizeram diminuir o caudal, apesar da existência de um filtro à entrada do reservatório. No entanto, o sistema

continuou a operar, embora numa gama inferior de tensão, devido às gamas de operação dos componentes. Numa implementação permanente há que ter em atenção os vários aspectos de modo a não comprometer o funcionamento do sistema

Verifica-se que ao longo do tempo a tensão exigida pelo nó varia em cerca de 70 mV e a corrente varia entre os 44,60 mA e 46 mA. Esta variação implica que a potência também varie entre 137,37 mW e 144,90 mW. Esta oscilação deve-se à presença de componente activo na constituição do nó sensor, fazendo com que a corrente exigida por este não seja constante.

De modo a obter-se a eficiência do sistema, foi necessário aferir qual a máxima potência disponibilizada pelo gerador, a uma altura de 3,17 m. Assim, foi alcançado o valor de 164,28 mW para uma resistência de carga de 30 Ω . Desta forma, a eficiência do sistema varia entre 83,6 % e 88,2%. Verifica-se que este sistema é eficiente na alimentação de nós sensores, resolvendo o problema do tempo de vida dos sistemas de armazenamento. Para isso só é necessário num caudal mínimo de água e uma queda adequada.

6 Conclusões e trabalho futuros

Neste capítulo são abordadas as conclusões retidas com o culminar do trabalho. É feita também uma referência aos trabalhos futuros para aperfeiçoar os sistemas desenvolvidos e ultrapassar algumas limitações impostas pelos modelos desenvolvidos.

6.1 Conclusões

A execução deste trabalho, permitiu a integração numa área em desenvolvimento que são as energias renováveis.

Este trabalho proporcionou o conhecimento dos principais parâmetros que são tidos em conta para o desenvolvimento de controladores de carga, independente da fonte de energia que está a ser utilizada.

Com a realização do primeiro estudo conclui-se que existem vários tipos de energia que podem ser, efectivamente, utilizados para a alimentação das baterias dos nós sensores. Devido às condições climatéricas apresentadas na Ilha da Madeira optou-se pela captação da energia provinda do Sol, do vento e da água.

No sistema solar foi fundamental conhecer as características do painel utilizado, tendo em conta, que este fornece uma potência máxima dependente da carga empregue.

Para este sistema foi essencial realizar um estudo dos conversores DC – DC, que podem ser utilizados para colocar o sistema a operar no ponto de máxima transferência de potência. Devido às características do painel e à tensão máxima suportada pelas baterias optou-se pela construção de um conversor DC-DC redutor, que transfere o máximo de energia quando a tensão de operação do painel é superior à tensão de máxima potência. Verificou-se que para valores inferiores a 3,1 V gerados pelo painel, a transferência de potência não é máxima, sendo fornecida às baterias a corrente gerada pelo painel.

Conclui-se que os dois sistemas construídos, o modelo ON-OFF e o modelo MPPT, conseguem efectuar o carregamento das baterias. No entanto, este último apresenta uma eficiência de 17% superior à do modelo ON-OFF.

Para o aproveitamento da energia eólica foi necessário desenvolver um gerador trifásico que conseguisse gerar a tensão imposta pelo nó sensor. A escolha do tipo de pás foi relevante, para a captação de vento a baixa velocidade. No que concerne ao controlador de carga conclui-se que o circuito desenvolvido não é o ideal, visto não efectuar a transferência de máxima potência. Este problema seria resolvido com a construção do conversor DC – DC redutor – elevador com a saída em tensão e o controlo em corrente, tendo em conta que as baterias são carregadas em corrente.

Optou-se por apresentar outro procedimento para aproveitamento da energia gerada pelo aerogerador. Dos resultados, conclui-se que o sistema operava correctamente segundo as gamas de correntes estipuladas para o algoritmo de carregamento de baterias.

Pode-se aferir que para o circuito condensador + *step-up* existe um grande de consumo de potência por parte do conversor. Relativamente à alimentação directa, onde a corrente é fornecida às baterias por impulsos, concluindo-se que este modo de alimentação pode fazer diminuir o tempo de vida das baterias. Em relação ao limitador de corrente, este apresenta um desperdício de potência, visto existir uma limitação de corrente para 225 mA, situação que ocorre para qualquer controlador de carga e que só se resolve com outro reservatório de energia.

Para o sistema hídrico corroborou-se que este sistema não necessita de controlo de carga, nem de componentes de armazenamento de energia, desde que existam recursos hídricos disponíveis e queda. Este mostrou ser capaz de efectuar a alimentação directa do nó com uma eficiência entre 84 % e 88 %.

Ao fazer a comparação entre os sistemas implementados, pode concluir-se que tanto os modelo ON-OFF, MPPT e sistema hídrico conseguem alimentar um nó sensor com uma determinada exigência de potência. Face ao sistema eólico este apresenta uma limitação na produção de energia, estando muito dependente do estado do vento.

Conclui-se que a rede de sensores sem fios foi importante, tendo em conta, que permitiu a monitorização dos parâmetros de interesse em tempo real, o que significa, que se pode ter a informação da produção de energia por parte dos sistemas num dado instante.

Foi desenvolvida uma página Web para tratar e visualizar os dados dos três sistemas desenvolvidos. Nesta, é possível ter acesso ao estado dos sistemas eólico e solar em tempo real. No entanto, para o sistema hídrico devido à ausência de um local apropriado para testes contínuos só é possível consultar os dados referentes ao período de teste.

6.2 Trabalhos Futuros

É proposto aplicar o ponto de máxima transferência de potência ao sistema eólico, e procurar otimizar as dimensões do gerador

Comparar o algoritmo de MPPT implementado com MP&O, *IncCond*.

Explorar outro tipo de energia, como por exemplo, o aproveitamento da oscilação dos ramos das árvores, para alimentar os nós sensores em situações de monitorização florestal.

Desenvolver um sistema de controlo que permitida a utilização dos três sistemas (solar, eólico e hídrico) em paralelo, para alimentação do nó sensor.

Referências

- [1] P. Woias, Manoli Y., and Nann Stetten, "Energy Harvesting for Autonomous Microsystems," , 2005, pp. 42-45.
- [2] Marco Ferrari, Ferrari Vittorio, Marioli Daniele, and Taroni Andrea, "Modeling, Fabrication and Performance Measurements of a Piezoelectric Energy Converter for Power Harvesting in Autonomous Microsystems," vol. 55, December 2006.
- [3] Kulkarni Purushottam Sudevalayam Sujesha, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Applications," December 2008.
- [4] R. J. Ang, Y. K. Tan, and S. K. Panda, "Energy harvesting for autonomous wind sensor in remote area," in *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taipei, Taiwan, 2007.
- [5] Hsu Jason, Kansal Aman, Sadaf Zahedi, and Mani B. Srivastava, "Power Management in Energy Harvesting," vol. 6, p. 38, Setembro 2007.
- [6] Kansal Aman and Mani B. Srivastava, "An Environmental Energy Harvesting Framework for Sensor Networks," , University of California, Los Angeles, 2003.
- [7] Shadrach Joseph Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," University of California, Berkeley, 2000.
- [8] Jean-Paul da Conceição, "A Hybrid Power Harvesting Module for use in a Typical Industrial Environment," October 2008.
- [9] Joaquim Amândio Azevedo, "Sistemas de Última Generación para la Observación, Predicción y Vigilancia Activa de Espacios Naturales Forestales en la Macaronesia," December 2008.
- [10] Sravanthi Chalasani and James M. Conrad, "A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems".
- [11] Vijay Raghunathan, Aman Kansal, Jason Hsu, Jonathan Friedman, and Mani Srivastava, "Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems," University of California, Los Angeles,.
- [12] "Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos," Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente, 2001.
- [13] EDP. Disponível em:
<<http://www.edp.pt/pt/particulares/faqs/Pages/Microprodu%C3%A7%C3%A3o.aspx>>. Consultado em: 21 Abril 2010.
- [14] Sérgio Salvo Brito, "Energia Solar Princípios e Aplicações," Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2003.
- [15] Pedro Horta. Conversão Fotovoltaica da Energia Solar, 2005. Disponível em:
<<http://www.cienciaviva.pt/rede/energia/himalaya2005/home/guia4.pdf>>.
Consultado em: 5 Abril 2010.

- [16] Efeito Fotovoltaico. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee97234/efeito_fotovoltaico1.htm>. Consultado em: 7 Novembro 2010.
- [17] Jaemin Jeong, Xiaofan Jiang, and David Culler, "Design and Analysis of Micro-Solar Power Systems for Wireless Sensor Networks," Computer Science Division, UC Berkeley,.
- [18] Adedamola Omole, "Analysis, Modeling and Simulation of Optimal Power Tracking of Multiple-Modules of Paralleled Solar Cell Systems," College of Engineering, The Florida State University, Master of Science 2006.
- [19] Power Sources for Wireless Sensor Network., 2003. Disponível em: <<http://www.eureka.gme.usherb.ca/memslab/docs/PowerReview-2.pdf>>. Consultado em: Novembro 2009.
- [20] Farnell. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/54658.pdf>>. Consultado em: Janeiro/Fevereiro 2010.
- [21] Dunny Potter, and Mani B. Srivastava Aman Kansal, "Performance Aware Tasking for Environmentally Powered Sensor Networks," University of California, Los Angeles,.
- [22] Kris Lin et al., "Demo Abstract: Heliomote: Enabling Long-Lived Sensor Networks Through Solar Energy Harvesting," San Diego, California, USA, November 2005.
- [23] Farhan Simjee and Pai H. Chou, "Everlast: Long-life, Supercapacitor-operated Wireless Sensor Node," Tegernsee, Germany, October 2006.
- [24] Michael A. Weimer, Thurein S. Paing, and Regan A. Zane, "Remote Area Wind Energy Harvesting for Low-power Autonomous Sensors," Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado at Boulder, United States,.
- [25] André Reis, Ricardo Saiote, and José Pó, "Conversão de uma Girândola num aerogerador de eixo vertical," Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Tese de Mestrado 2010.
- [26] Chulsung Park and Pai H Chou, "AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes," Center for Embedded Computer Systems, University of California,.
- [27] Costis Kompis and Simon Aliwell, Eds., *Energy Harvesting Technologies to Enable Remote and Wireless Sensin.*, 2008.
- [28] Aurélio Campilho, *Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição*, 1st ed.: Feup, 2000.
- [29] Ph.D. Anurag Kasyap, "Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Node and Asset Tracking Solutions in Random Vibration Environments," Abril 2009.
- [30] Jancarle L. Santos, Fernando Antunes, Anis Chehab, and Cícero Cruz, "A Maximum power point tracker for PV systems Using a high performance boost

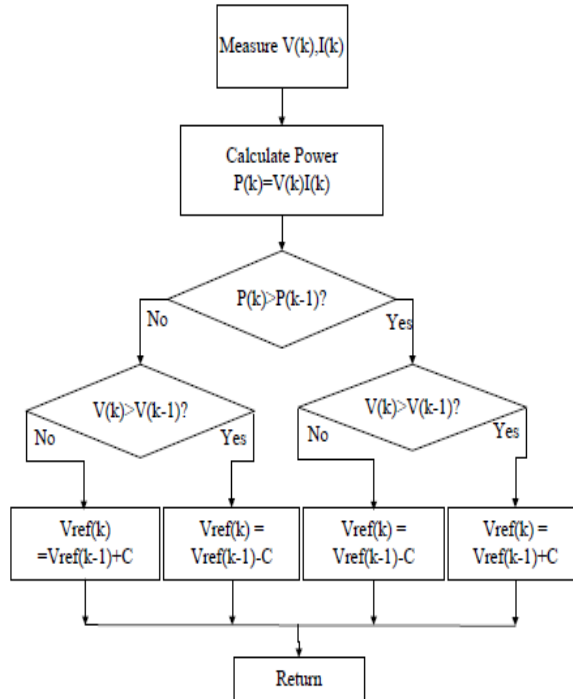
- converter," Electrical Engineering Department, Federal University of Ceará, 2005.
- [31] Pai H. Chou and Sehwan Kim, "Techniques for Maximizing Efficiency of Solar Energy Harvesting Systems," Department of EECS, University of California, Department of CS, National Tsing Hua University, Hsinchu, Irvine, Taiwan,.
- [32] Trishan Eswam and Patrick Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," University of Illinois, Urbana-Champaign, 2005.
- [33] C. Liu, B. Wu, and R. Cheung, "Advanced Algorithm for MPPT Control of Photovoltaic Systems," in *Canadian Solar Buildings Conference*, Montreal, August 2004.
- [34] A. Yafaoui, B. Wu, and R. Cheung, "Implementation of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Residential Photovoltaic Systems," in *Second Canadian Solar Buildings Conference*, Calgary, June-2007.
- [35] Abu Tariq and M. S. Asghar, "Development of an Analog Maximum Power Point Tracker For Photovoltaic Panel," Department of Electrical Engineering Aligarh Muslim University, India, 2005.
- [36] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, and A. Lázaro, "Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems," Departamento de Tecnología Electrónica/grupo de Sistemas Electrónicos de Potência, Universidad Carlos III de Madrid, Spain, October- 2005.
- [37] Nicole Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, pp. 963-973, July 2005.
- [38] Neil S. D'Souza, Luiz A. C. Lopes, and XueJun Liu, "An Intelligent Maximum Power Point Tracker Using Peak Current Control," pp. 172-177, 2005.
- [39] P. C. M. Bernardo, Z. M. A. Peixoto, and L. V. B. Machado Neto, "A High Efficient Micro-Controlled Buck Converter With Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Valencia (Spain), April 2009.
- [40] L. MacIsaac and A. Knox, "Improved Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Granada (Spain), March 2010.
- [41] Marian K. Kazimierczuk, *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters.*: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [42] Disponível em: <<http://profesores.sanvalero.net/~w0320/TEMA%204.pdf>>. Consultado em: Novembro 2010.
- [43] Condensadores. Disponível em: <<http://w3.ualg.pt/~arodrig/Documentos/F%C3%ADsica%20II/FG2Cap8a.pdf>>. Consultado em: Novembro 2010.

- [44] John J.C. Kopera, "Inside the Nickel Metal Hydride Battery," *Cobasys*, 25 June 2004.
- [45] <http://audiolist.org/forum/kb.php?mode=article&k=134>. Consultado em: 7 Novembro 2010.
- [46] Farnell. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/77437.pdf>>. Consultado em: 2010.
- [47] Luís Armando de Aguiar Oliveira Gomes, "Análise de Circuitos, Sistemas Trifásicos," Universidade da Madeira, Dezembro de 2009.
- [48] Maria José Resende, "Circuitos Eléctricos, Sistemas Trifásicos," Instituto Superior Técnico, 24 Julho 2005.
- [49] J. Guerreiro Gonçalves, C. Pereira Cabrita, Maria R. Calado, L. Mesquita Nunes, and Davide B. Fonseca, "Estudo de Algumas Harmónicas em Circuitos de Rectificação para Cargas Resistivas," Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Portugal,.
- [50] Oxford in association with The Open University, Milton Keynes Oxford University Press, *Renewable Energy, Power for a sustainable future*, 2nd ed., Boyle Godfrey, Ed. United Kingdom: The Open University, 2004.
- [51] Alison Santos, Daniel Ramos, Nilson Santos, and Pedro Oliveira, "Projecto de Geração de Energia Eólica," Universidade de Santa Cecília, Santos, Projecto de graduação do curso de Engenharia Industrial Mecânica 2006.
- [52] Aron Zingman, "Optimization of a Savonius Rotor Vertical-Axis Wind Turbine for use in Water Pumping Systems in Rural Honduras," Massachusetts Institute of Technology, Barchetato June 2007.
- [53] Menet Jean-Luc and Nachida Bourabaa, "Increase in the Savonius Rotors Efficiency Via A Parametric Investigation," Université de Valenciennes, Le Mont Houy,.
- [54] Robert E. Wilson and Peter B. S. Lissamen, "Applied Aerodynamics os Wind Power Machines," Oregon University, Passadena, Califórnia, 1974.
- [55] Cícero Urbanetto Nogueira, "Utilização de Sistemas Solar e Eólico no Bombeamento de Água para uso na Irrigação," Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Tecnologia, Santa Maria Brasil, Dissertação de Mestrado 2009.
- [56] Biotechenergia. Disponível em: <<http://www.biotechenergia.com/hidraulica.pdf>>. Consultado em: 9 Novembro 2010.
- [57] J. A. Peças Lopes, "Produção Distribuída e Energias Renováveis - Centrais Mini-hídricas," Universidade do Porto-Faculdade de Engenharias, 2004/2005.
- [58] Luís Filipe Vaz Morais, "Consumos Energéticos no Sector Residencial," Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Outubro de 2009.
- [59] ATmega168. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/65541.pdf>>. Consultado em: Novembro 2010.

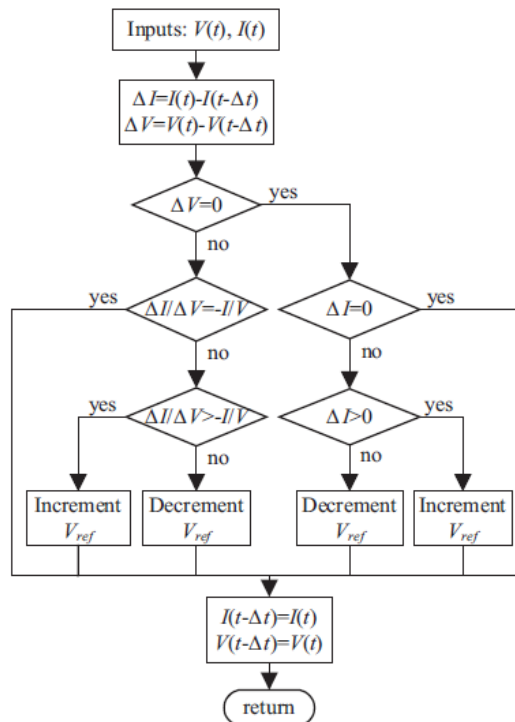
- [60] J. C. J. de Almeida, E. C. Ferreira¹, O. V. A Filho, A. L.P. Mattei A. R. Z. Nascimento, "Circuitos Amplificadores de Transimpedância Integrados a Fotodiodos," *Telecomunicações*, Setembro 1999.
- [61] Tiago Couto Braga, "Monitorização Ambiental em Espaços Florestais com Redes de Sensores Sem Fios," Universidade da Madeira, Madeira, Mestrado 2010.
- [62] Disponível em:
<<http://chinainportexport.wikispaces.com/Wholesale+Chip+Microcontroller+MCU+%E5%8D%95%E7%89%87%E6%9C%BA+Manufacturer+exporting+direct+from+China>>. Consultado em: Novembro 2010.
- [63] Digi International. Disponível em: <www.digi.com>. Consultado em: Novembro 2010.
- [64] IEEE 802.15.4. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>>.
- [65] Hugo Malafaya, Luís Tomás, and João Paulo Sousa, "Sensorização sem fios de uma rede ZigBee e IEEE 802.15.4," Faculdade de Engenharia do Porto,.
- [66] Teoria ZigBee. Disponível em:
http://paginas.fe.up.pt/~ee02055/Relatorio_ZigBee_Hardware.pdf. Disponível em:
<http://paginas.fe.up.pt/~ee02055/Relatorio_ZigBee_Hardware.pdf>. Consultado em: Novembro 2010.
- [67] How ZigBee Works. Disponível em:
<<http://homepage.uab.edu/cdiamond/How%20Zigbee%20Works.htm>>.
Consultado em: Novembro 2010.
- [68] datasheetS1087. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/8746.pdf>>.
Consultado em: Janeiro 2010.
- [69] Sentilla. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/6023990/Sentilla-Energy-Harvesting>>. Consultado em: Novembro 2010.
- [70] Anselmo Baptista and Bruno Baptista, "Produção e Planeamento de Energia-Armazenamento de Energia," Faculdade de Ciências e Tecnologias de Coimbra,.
- [71] H. Zainuddin et al., "Investigation on the Performance of Pico-hydro Generation System Using Consuming Water Distributed to Houses," Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Melaka, Malaysia, 2009.

Anexos

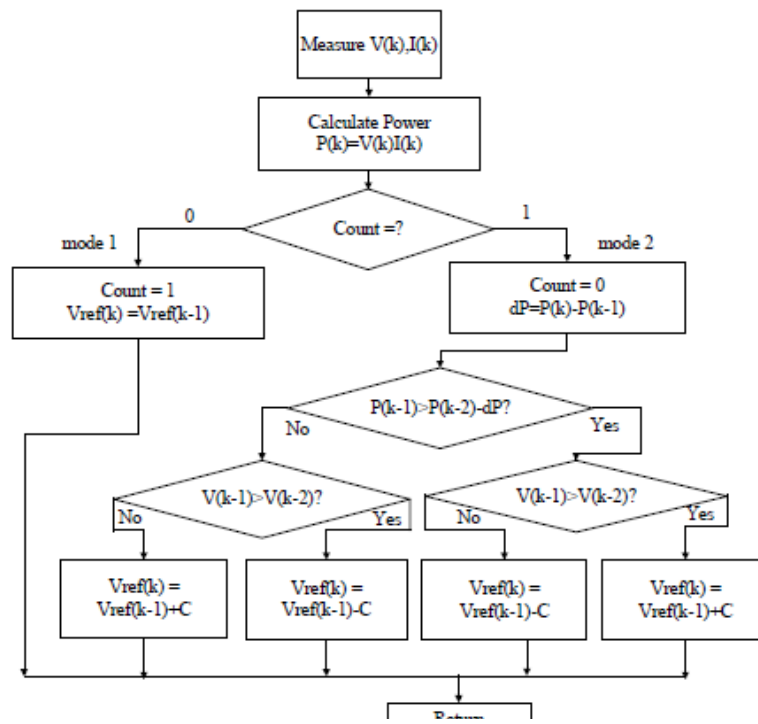
Anexo A – Algoritmos de Máxima transferência de Potência



Anexo A.1 – Fluxograma do algoritmo de Perturbação e observação.

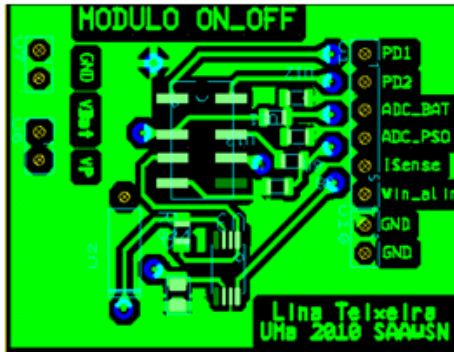


Anexo A.2 - Fluxograma do algoritmo de IncCon Method

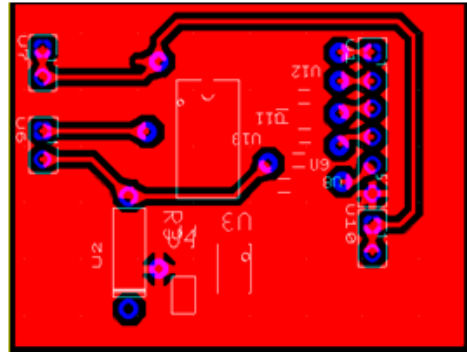


Anexo A.3 - Fluxograma do algoritmo de MP&O

Anexo B – Desenhos das placas no *Ultiboard*

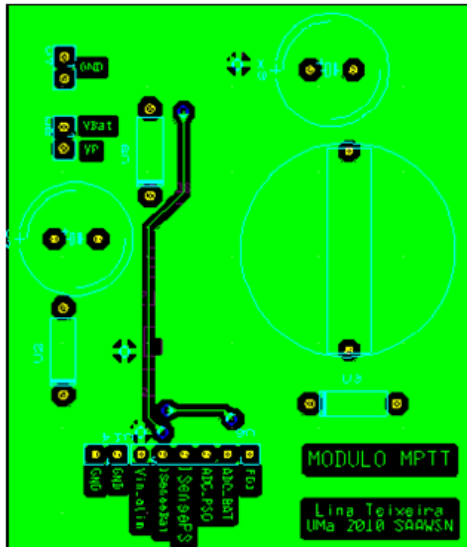


(a)

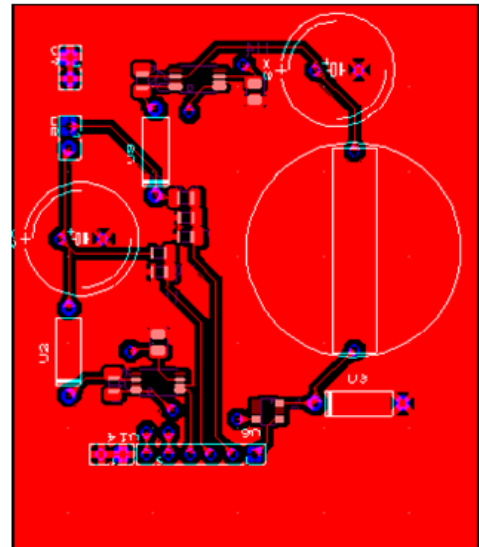


(b)

Anexo C.1 – Desenho do modelo ON-OFF. (a) Face superior; (b) Face inferior.



(a)

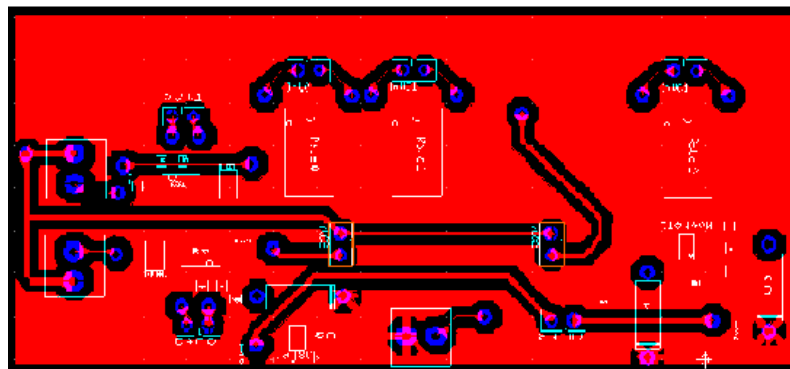


(b)

Anexo C.2 – Desenho do modelo MPPT. (a) Face superior; (b) Face Inferior.

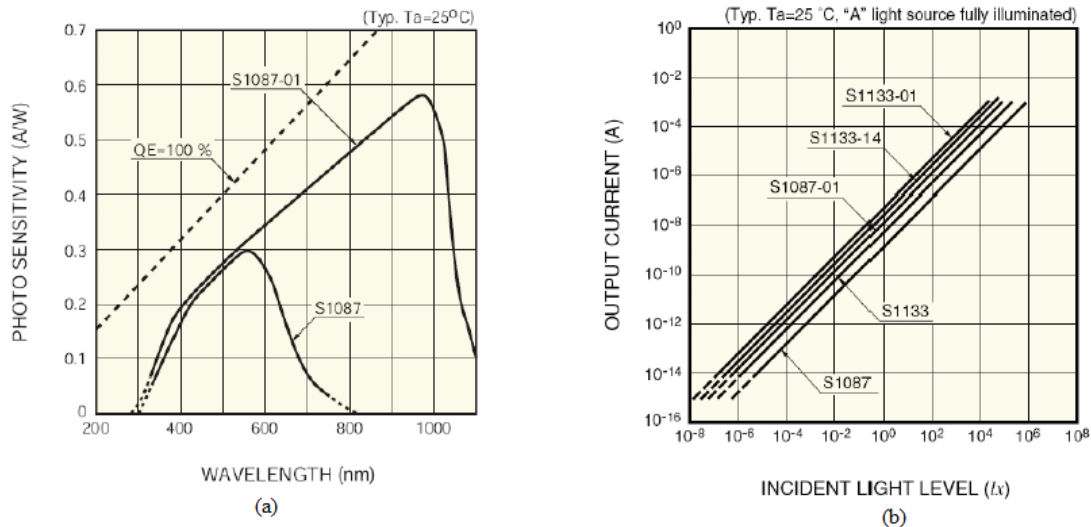


(a)



Anexo C.3 – Desenho do controlador de carga para o sistema eólico

Anexo C – Características do sensor de luminosidade



Anexo C.1 – Característicos dos fotodíodos S1087/S1133 series [68]. (a) Sensibilidade do fotodíodo face ao comprimento de onda da luz; (b) Corrente de saída em função da intensidade luminosa incidente.

Anexo D- Identificação dos pinos do módulo XBee

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DIO12	Either	Digital I/O 12
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Either	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	PWM / DIO11	Either	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DIO8	Either	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	Ground
11	DIO4	Either	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP / DIO9	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	[reserved]	-	Do not connect
15	Associate / DIO5	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	Either	Analog Input 0, Digital IO 0, or Commissioning Button

Anexo E – Programação em Linguagem C Para o Sistema Solar

```

/*****
* File Name      : mppt.c
* Author        : Lina Teixeira, Tiago Braga, Filipe Santos
*****/

#define F_CPU 8000000UL

/***** LIVRARIAS *****/
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/sfr_defs.h>
#include <avr/power.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <util/delay.h>
#include <compat/iocompat.h>

/***** NOMENCLATURA E CONSTANTES *****/
#define LED          PB2    // Led de informação
#define PORTLED      PORTB  // Porta para o Led de informação

#define LIGCARGAONOFF PD2    // Mosfet para ligar/desligar a carga das baterias
#define LIGCARGAMPPT PD3    // Mosfet para ligar/desligar a carga das baterias

#define VOLTC1       7      // para medição da corrente media na bateria
#define VOLTT1       0      // para medição da tensão na bateria
#define VOLTCP       6      // para medição da corrente media no painel
#define VOLTTP       1      // para medição da tensão no painel

#define VOLTONOFF    3      // para medição da tensão nas baterias e painel solar
#define CONOFF       5      // para medição da corrente para as baterias e corrente em
curto circuito

#define LIGHT        2

#define PASSO        1      // 3 +/-1,8%

#define RELPIN1      PB0
#define RELPIN2      PD7

/***** FUNÇÕES AUXILIARES *****/
#define HI(x) (x>>8)      // Utilizado para obter o MSB de número de 16 bit
#define LO(x) (x&0xff)    //
#define BSET(p,b) ((p) |= (1<<b)) // Set bit
#define BCLR(p,b) ((p) &= ~(1<<b)) // Clear bit

enum{UP,DOWN,PAUSE};

/***** VARIÁVEIS GLOBAIS *****/
volatile int segundos = 0; // Variável de tempo
volatile int Vt=0,Vt_1=0,It=0,It_1=0,D=0, voltcb = 0, volttb = 0,voltcp = 0, volttp =
0,voltbatonoff=0, voltonoff=0, conoff=0, cconoff=0,light = 0;
volatile uint32_t Pt=0,Pt_1=0;
volatile uint8_t direction = PAUSE, directionaux=PAUSE; // Direção da contagem
volatile uint16_t PWMCOUNT=1; // Valor corrente do PWM de 10 bits

/***** APONTADORES DAS FUNÇÕES *****/
void USART_Init( unsigned int baud );
void USART_Transmit( unsigned char data );
unsigned char USART_Receive( void );
int measureADC(char adcN);
void Send();
void configRTC(void);

```

```

unsigned char checksumCalc (unsigned char * data_in,unsigned short
number_of_bytes_to_read, short array_index_counter);
void metodoPeO(void);
void configPWM(void);

/***** PROGRAMA PRINCIPAL *****/
int main() {

    BSET(DDRB,LED);          // Coloca o pino LED como output
    BCLR(PORTB,LED);        // Liga LED

    BSET(DDRD,LIGCARGAONOFF); // Coloca o pino LIGCARGAONOFF como output
    BCLR(PORTD,LIGCARGAONOFF); // activa mosfet
    BSET(DDRD,LIGCARGAMPPT); // Coloca o pino LIGCARGAMPPT como output
    BCLR(PORTD,LIGCARGAMPPT); // activa mosfet
    clock_prescale_set(0); // Define prescaler do relógio a 1 => uC a 8MHz
    // Inicializacao do pinos que controlam o rele
    BSET(DDRB,RELPIN1);     // Coloca o pino RELPIN1 como output
    BCLR(PORTB,RELPIN1);   // // 0
    BSET(DDRD,RELPIN2);     // Coloca o pino RELPIN1 como output
    BCLR(PORTD,RELPIN2);   // // 0
    // Coloca rele na posição por defeito
    BCLR(PORTB,RELPIN1);   // Activa bobine para colocar rele na posicao pretendida
    BSET(PORTD,RELPIN2);
    _delay_ms(10);
    BCLR(PORTB,RELPIN1);   // DESLIGA bobine do rele
    BCLR(PORTD,RELPIN2);

    ADMUX = 0xC0;          // Configura conversor ADC
    ADCSRA = 0x86;        //
    DIDR0 = 0xFF;         // Poupança de energia

    USART_Init(51);       // 9600 8bit + 1 stopbit XBEE

    configRTC();          // Configura RTC
    _delay_ms(1000);     // Espera que cristal estabilize

    configPWM();
    BSET(PORTB,LED);     // Acabou inicialização, desliga LED
    sei();               // Activa interrupções
    for(;;){

        if(segundos == 60){ //configuracao do tempo de amostragem
            BCLR(PORTB,LED); // Liga LED

            // Monitoriza Painei => bateria
            voltonoff = measureADC(VOLTONOFF);
            conoff = measureADC(CONOFF);
            // muda rele para CC do painel
            BSET(PORTB,RELPIN1); // Activa bobine para colocar rele na posicao
pretendida

            BCLR(PORTD,RELPIN2);
            _delay_ms(25);
            BCLR(PORTB,RELPIN1);
            BCLR(PORTD,RELPIN2);
            _delay_ms(2);
            cconoff = measureADC(CONOFF);
            _delay_ms(2);
            voltbatonoff = measureADC(VOLTONOFF);
            // muda rele para cfechado
            if(voltbatonoff < 865){ // Se bateria menor que 2,8 volta a
carregar se não

                BCLR(PORTB,RELPIN1); // Activa bobine para colocar rele na
posicao pretendida

                BSET(PORTD,RELPIN2);
                _delay_ms(25);
                BCLR(PORTB,RELPIN1);
                BCLR(PORTD,RELPIN2);
            }
            // Abre carga se bateria inferior a 2.1V
            if(voltbatonoff < 648){ // Se bateria menor que 2,1 abre carga
                BSET(PORTD,LIGCARGAONOFF); // desactiva mosfet
            }else{
                BCLR(PORTD,LIGCARGAONOFF); // activa mosfet
            }
        }
    }
}

```

```

        // Fim monitoriza painel => bateria

        light = measureADC(LIGHT);
        metodoPeO();
        Send();
        // Constrói msg API XBee e envia para o XBee
        segundos = 0;

        BSET(PORTB,LED);
    }
}

void metodoPeO(void){
    // MEDICAO Vk, Ik
    volttb = Vt = measureADC(VOLTT1); // Amostra tensão de baterias
    voltcb = It = measureADC(VOLTC1); // Amostra corrente nas baterias

    voltcp = measureADC(VOLTCP); // Amostra corrente do painel
    volttp = measureADC(VOLTTP); //Amostra tensão painel

    // Abre carga se bateria inferior a 2.1V
    if(volttb < 648){ // Se bateria menor que 2,1 abre carga
        BSET(PORTD,LIGCARGAMPPT); // desactiva mosfet
    }else{
        BCLR(PORTD,LIGCARGAMPPT); // activa mosfet
    }

    // CALCULO DE POTENCIA
    Pt = (Vt)*It;

    // Compara Pk > Pk_1 ?
    if(Pt > Pt_1){
        // Sim
        if(Vt > Vt_1){
            // Sim
            direction = UP;
            directionaux = UP;
            //D = D + PASSO;

        }else{
            // Nao
            direction = DOWN;
            directionaux = DOWN;
            //D = D - PASSO;
        }
    }else{
        // Nao
        if(Vt > Vt_1){
            // Sim
            direction = DOWN;
            directionaux = DOWN;
            //D = D - PASSO;
        }else{
            // Nao
            direction = UP;
            directionaux = UP;
            //D = D + PASSO;
        }
    }

    // Fim
    // Regista valores como antigos
    Vt_1 = Vt;
    It_1 = It;
    Pt_1 = Pt;
}

void Send(){
    //unsigned checksum = 0;
    int j = 0;
    char msgAPIXBee[38]
    ={0x7E,0x00,0x22,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,0x00,0xF1
    ,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
    0x00,0x00};

    _delay_ms(13);
}

```

```

// Compila msg com dados
msgAPIXBee[18] = HI(voltcb);
msgAPIXBee[19] = LO(voltcb);
msgAPIXBee[20] = HI(volttb);
msgAPIXBee[21] = LO(volttb);
msgAPIXBee[22] = HI(voltcp);
msgAPIXBee[23] = LO(voltcp);
msgAPIXBee[24] = HI(volttp);
msgAPIXBee[25] = LO(volttp);
msgAPIXBee[26] = PWMCOUNT;
msgAPIXBee[27] = HI(voltonoff);
msgAPIXBee[28] = LO(voltonoff);
msgAPIXBee[29] = HI(conoff);
msgAPIXBee[30] = LO(conoff);
msgAPIXBee[31] = HI(voltbatonoff);
msgAPIXBee[32] = LO(voltbatonoff);
msgAPIXBee[33] = HI(cconoff);
msgAPIXBee[34] = LO(cconoff);
msgAPIXBee[35] = HI(light);
msgAPIXBee[36] = LO(light);
msgAPIXBee[37] = checksumCalc((unsigned char*) &msgAPIXBee,34,3);

for(j=0;j<38;j++){
    USART_Transmit(msgAPIXBee[j]);
}
_delay_ms(2); // Aguarda que a comunicação termine
}

/***** INTERRUPTOS *****/
// Interrupção do RTC
ISR(TIMER2_OVF_vect){
    segundos++;
}

/***** Comunicação USART *****/
void USART_Init( unsigned int ubrr ){
    UBRR0H = (unsigned char)(ubrr>>8); // Define velocidade comunicação
    UBRR0L = (unsigned char)ubrr; // Configura 8 bit + 1 de stop
    UCSR0B = ((1<<RXEN0)|(1<<TXEN0)); // Activa RX e TX
    UCSR0C = (3<<UCSZ00);
}

void USART_Transmit( unsigned char data ){
    while ( !(UCSR0A & (1<<UDRE0)) ); // Espera que o buffer de transmissão esvazie
    UDR0 = data; // Envia o byte
}

unsigned char USART_Receive( void ){
    while ( !(UCSR0A & (1<<RXC0)) ); // Espera que o byte tenha sido recebido
    return UDR0; // Devolve byte armazenado no buffer
}

/***** FUNÇÕES AUXILIARES *****/
int measureADC( char adcN ){
    int aux1=0,aux2=0,auxt = 0;
    int i;
    ADMUX=0xC0+adcN; // Seleciona o sensor a medir
    // _delay_us(40);
    for(i=0;i<16;i++){
        ADCSRA |= (1<<ADSC); // Inicia a conversão
        loop_until_bit_is_set(ADCSRA, ADIF); // Espera que a conversão termine
        aux1 = ADCL;
        aux2 = ADCH;
        aux1 = (aux1);
        aux2 = (aux2<<8);
        aux1 = aux2+aux1; // ADCL + ADCH = 10bit's
        aux2 = aux1+aux1;
    }
    aux1 = (aux1>>4); // Igual a / 16 sem arredondamento
    return aux1;
}

/*
 * checksumCalc - Calcula o checksum para a msg API do XBee
 * Calcula o resultado de 8 bits da soma dos vários bytes
 * da msg, excepção do 0x7E e comprimento (MSB e LSB).
 * Devolve a subtração do resultado anterior de 0xFF
 */

```

```

unsigned char checksumCalc (unsigned char * data_in,unsigned short
    number_of_bytes_to_read,short array_index_counter){
    unsigned char checksum;
    checksum = 0;
    number_of_bytes_to_read+=array_index_counter;
    while (array_index_counter != number_of_bytes_to_read){
        array_index_counter++;
        checksum += data_in[array_index_counter - 1];
    }
    checksum = 0xFF-checksum;
    return checksum;
}

/*
 *   configRTC - Configura o timer 2 de 8 bit para contar segundo um cristal externo
 *               Configura interrupção de overflow (1/32768 * 256 * 256 = 2)
 */
void configRTC(void){
    ASSR =0x20; // Activa modo assíncrono (recebe impulsos externos)
    TIMSK2=0x00; // Desactiva todas a interrupções para alteração correcta dos registos
    OCR2A =0x00; // Inicializa registo de comparacao
    OCR2B =0x00; // Inicializa registo de comparacao
    TCCR2A=0x00; // Configura modo normal
    TCCR2B=0x05; // Inicia o timer com prescaler 05 => 256 cristal 32768 Overflow 256 =>
T = 2s
    TIMSK2=0x01; // Activa interrupção de overflow
}

/*
 *   configPWM - Configura o timer 1 para gerar PWM 50kHz
 */
void configPWM(void){
    TCCR1A = 0; // disable all PWM on Timer1 whilst we set it up
    ICR1 = 160; // frequency is every 20ms
    // Configure timer 1 for Fast PWM mode via ICR1, with 8x prescaling
    TCCR1A = (1<<WGM11);
    TCCR1B = (1 << WGM13) | (1<<WGM12) | (1 << CS10);
    DDRB |= _BV(1); // make port B1 an output pin
    TCCR1A |= 2 << 6; // enable PWM on port B1 to use non-inverting mode - mode2
    OCR1A = ICR1 * 2 /20; // 2ms pulse to left motor on PB1
    TIMSK |= _BV(OCIE1A); // Ajusta para interrupção por Overflow do Timer 1
}
ISR (TIMER1_COMPA_vect)
{
    //
    // Determina o novo valor do PWM
    switch (direction) // Verifica a direção
    {
        case DOWN: // Se UP..
            if (PWMCCount < 158) // Incrementa e verifica se chegou ao máx.
            {
                PWMCCount += PASSO; // Se chegou ao máximo, muda a direção
            }
            break;

        case UP: // Se DOWN..
            if (PWMCCount > 2) // Decrementa e verifica se chegou a zero
            {
                PWMCCount -= PASSO; // Se chegou ao mínimo, muda a direção
            }
            break;
    }
    direction = PAUSE;

    OCR1A = PWMCCount; // Novo valor de 10 bits
}
/***** FIM DE PROGRAMA *****/

```

Anexo F – Programação em Linguagem C para o Sistema Eólico

```

/*****
* File Name      : Sistemadeólico.c
* Author        : Filipe Santos, Lina Teixeira
*****/

#define F_CPU 8000000UL

/***** LIVRARIAS *****/
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/sfr defs.h>
#include <avr/power.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <util/delay.h>

/***** NOMENCLATURA E CONSTANTES *****/
#define RELAYPORT PORTC // Porta dos pinos de controle dos relés
#define RELAYDDR DDRC
#define RELAY1A 2 //PC2
#define RELAY1B 3 //PC3
#define RELAY2A 4 //PC4
#define RELAY2B 5 //PC5
#define RELAY3A 6 //PC6
#define RELAY3B 7 //PC7
#define ADCC1 0
#define ADCC2 2
#define ADCV1 1
#define ADCV2 3
#define MOS1 0 //PB0 // Desliga (a HIGH 3,3v) quando bateria > 2,8v
#define DDRRELAY4 DDRA
#define PORTRELAY4 PORTA
#define RELAY4A 6 // PA6
#define RELAY4B 7 // PA7
#define LED PE0 // LED informacao antigo PB2
#define PORTLED PORTE
#define BATTFULL 372 // Cerca de 2,8 Volts para um AREF de 2,56V e ADC de 10 bit
#define BATEMPTY 293 // Cerca de 2,2 Volts para um AREF de 2,56V e ADC de 10 bit
#define BATTHIST 332 // Cerca de 2,5 Volts para um AREF de 2,56V e ADC de 10 bit
#define MAXCURRENTS1 167 // Cerca de 140 mA medido no CAERO
#define MAXCURRENTS2 270 // Cerca de 225 mA

/***** FUNÇÕES AUXILIARES *****/
#define HI(x) (x>>8) // Utilizado para obter o MSB de número de 16 bit
#define LO(x) (x&0xff) //
#define BSET(p,b) ((p) |= (1<<b)) // Set bit
#define BCLR(p,b) ((p) &= ~(1<<b)) // Clear bit

/***** VARIÁVEIS GLOBAIS *****/
volatile int segundos = 0; // Variável de tempo
volatile int vaero=0,caero=0,vbat=0,cstepup=0,status=0;

/***** APONTADORES DAS FUNÇÕES *****/
void USART_Init( unsigned int baud );
void USART_Transmit( unsigned char data );
unsigned char USART_Receive( void );

int measureADC(char adcN);
void Send();
void configRTC(void);
unsigned char checksumCalc (unsigned char * data_in,unsigned short
number_of_bytes_to_read, short array_index_counter);

void startSystem(void);

```

```

void measureSensors(void);
void chooseState(void);
void relay1ON(void);
void relay1OFF(void);
void relay2ON(void);
void relay2OFF(void);
void relay3ON(void);
void relay3OFF(void);
void relay4ON(void);
void relay4OFF(void);
void mos1ON(void);
void mos1OFF(void);
void defineState(int st);
void startSystem(void) {
    BSET(DDRB,MOS1);           // Coloca o pino MOS1 como output
    BSET(DDRRELAY4,RELAY4A);   // Coloca o pino RELAY4A como output
    BSET(DDRRELAY4,RELAY4B);
    // Estado inicial dos mosfets
    mos1ON();                  // Bateria ligada ao circuito
    relay4ON();                // Bateria ligada à carga

    // Inicializacao do pinos que controlam o rele

    BSET(RELAYDDR,RELAY1A);    // Coloca o pino RELAY1A como output
    BSET(RELAYDDR,RELAY1B);    // Coloca o pino RELAY1B como output
    BSET(RELAYDDR,RELAY2A);    // Coloca o pino RELAY2A como output
    BSET(RELAYDDR,RELAY2B);    // Coloca o pino RELAY2B como output
    BSET(RELAYDDR,RELAY3A);    // Coloca o pino RELAY3A como output
    BSET(RELAYDDR,RELAY3B);    // Coloca o pino RELAY3B como output
    // Estado inicial dos reles
    relay1OFF();
    relay2OFF();
    relay3OFF();
}

/***** PROGRAMA PRINCIPAL *****/
int main() {
    clock_prescale_set(0);     // Define prescaler do relógio a 1 => uC a 8MHz
    BSET(DDRE,LED);
    BSET(PORTLED,LED);
    ADMUX = 0xE0; //0x40;      // Configura conversor ADC
    ADCSRA = 0x86;           //
    DIDR0 = 0xFF;           // Poupança de energia

    USART_Init(51);          // 9600 8bit + 1 stopbit XBEE

    configRTC();              // Configura RTC
    _delay_ms(1000);         // Espera que cristal estabilize

    startSystem();
    BCLR(PORTLED,LED);

    sei();                    // Activa interrupções
    for(;;)
    {
        if(segundos == 10){ //configuracao do tempo de amostragem e decisão
            //BSET(PORTLED,LED);
            segundos = 0;
            measureSensors();
            chooseState();
            defineState(status);
            Send();           // Recolhe amostras da Tensão de Bateria
                             // Constrói msg API XBee e envia para o XBee
        }
    }
}

void chooseState() {
    if(caero < MAXCURRENTS1){
        // Buck boost
        status = 1;
    }else if(caero < MAXCURRENTS2){
        // Direct
        status = 2;
    }
}

```

```

    }else{
        // Current limiter
        status = 3;
    }
    // Verifica carga da bateria
    if(vbat > BATTFULL){
        status = 4; // Bateria cheia
    }else if(vbat < BATEMPTY){
        relay4OFF(); // Liberta carga - Protecção para não descarregar as baterias
por completo
    }
    if(vbat > BATTHIST){
        relay4ON(); // Religa a carga
    }
}

void defineState(int st){
    switch(st){
        case 1:
            relay1ON();
            relay2ON();
            //relay3ON();
            mos1ON();

            break;
        case 2:
            relay1ON();
            relay2OFF();
            relay3ON();
            mos1ON();

            break;
        case 3:
            relay1ON();
            relay2OFF();
            relay3OFF();
            mos1ON();

            break;
        case 4:
            relay1OFF();

            break;
    }
}

void measureSensors(){
// vaero=0,caero=0,vbat=0,cstepup=0
    vaero = measureADC(ADCV1);
    caero = measureADC(ADCC1);
    cstepup = measureADC(ADCC2);
    // Mede bateria em aberto
    mos1OFF();
    vbat = measureADC(ADCV2);
    mos1ON();
}

void Send(){
    //unsigned checksum = 0;
    int j = 0;
    char msgAPIXBee[28] =
{0x7E,0x00,0x18,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,
0x00,0xF2,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00};

    _delay_ms(13);
    // Compila msg com dados
    // vaero=0,caero=0,vbat=0,cstepup=0
    msgAPIXBee[18] = HI(vaero);
    msgAPIXBee[19] = LO(vaero);
    msgAPIXBee[20] = HI(caero);
    msgAPIXBee[21] = LO(caero);
    msgAPIXBee[22] = HI(vbat);
    msgAPIXBee[23] = LO(vbat);
    msgAPIXBee[24] = HI(cstepup);
    msgAPIXBee[25] = LO(cstepup);
    msgAPIXBee[26] = status;
    msgAPIXBee[27] = checksumCalc((unsigned char*) &msgAPIXBee,24,3);

    for(j=0;j<28;j++){
        USART_Transmit(msgAPIXBee[j]);
    }
}

```

```

    }
    _delay_ms(2);           // Aguarda que a comunicação termine
}

/***** INTERRUPTOS *****/
// Interrupção do RTC
ISR(TIMER2_OVF_vect){
    BSET(PORTLED,LED);
    _delay_ms(100);
    segundos++;
    BCLR(PORTLED,LED);
}
/***** Comunicação USART *****/

void USART_Init( unsigned int baud )
{
    /* Set baud rate */
    UBRR1H = (unsigned char)(baud>>8);
    UBRR1L = (unsigned char)baud;
    /* Enable receiver and transmitter */
    UCSR1B = (1<<RXEN1)|(1<<TXEN1); // (1<<RXCIF1)|
    /* Set frame format: 8data, 2stop bit */
    UCSR1C = (0<<USBS1)|(3<<UCSZ10);
}

void USART_Transmit( unsigned char data )
{
    /* Wait for empty transmit buffer */
    while ( !( UCSR1A & (1<<UDRE1)) )
    ;
    /* Put data into buffer, sends the data */
    UDR1 = data;
}

unsigned char USART_Receive( void )
{
    /* Wait for data to be received */
    while ( !(UCSR1A & (1<<RXIF1)) )
    ;
    /* Get and return received data from buffer */
    return UDR1;
}
/***** FIM Comunicação USART *****/

/***** FUNÇÕES AUXILIARES *****/
int measureADC( char adcN ){
    int aux1=0,aux2=0,auxt = 0;
    int i;
    ADMUX=0xE0+adcN; // Selecciona o sensor a medir
    _delay_us(1);
    for(i=0;i<16;i++){
        ADCSRA |= (1<<ADSC); // Inicia a conversão
        loop_until_bit_is_set(ADCSRA, ADIF); // Espera que a conversão termine
        aux1 = ADCL;
        aux2 = ADCH;
        aux1 = (aux1>>6);
        aux2 = (aux2<<2);
        aux1 = aux2+aux1; // ADCL + ADCH = 10bit's
        auxt = auxt+aux1;
    }
    auxt = (auxt>>4); // Igual a / 16 sem arredondamento
    return auxt;
}

/*
 * checksumCalc - Calcula o checksum para a msg API do XBee
 * Calcula o resultado de 8 bits da soma dos vários bytes
 * da msg, excepção do 0x7E e comprimento (MSB e LSB).
 * Devolve a subtração do resultado anterior de 0xFF
 */
unsigned char checksumCalc( unsigned char * data_in, unsigned short
    number_of_bytes_to_read, short array_index_counter){
    unsigned char checksum;
    checksum = 0;
}

```

```

    number_of_bytes_to_read+=array_index_counter;
    while (array_index_counter != number_of_bytes_to_read){
        array_index_counter++;
        checksum += data_in[array_index_counter - 1];
    }
    checksum = 0xFF-checksum;
    return checksum;
}

/*
 *   configRTC - Configura o timer 2 de 8 bit para contar segundo um cristal externo
 *               Configura interrupção de overflow (1/32768 * 256 * 256 = 2)
 */
void configRTC(void){
    ASSR =0x20; // Activa modo assíncrono (recebe impulsos externos)
    TIMSK2=0x00; // Desactiva todas a interrupções para alteração correcta dos registos
    OCR2A =0x00; // Inicializa registo de comparacao
    OCR2B =0x00; // Inicializa registo de comparacao
    TCCR2A=0x00; // Configura modo normal
    TCCR2B=0x05; // Inicia o timer com prescaler 05 => 128 cristal 32768 Overflow 128 =>
T = 1s
    TIMSK2=0x01; // Activa interrupção de overflow
}

/***** Funções auxiliares controle de reles e mosfet*****/

void relay1ON(void){
    BCLR(RELAYPORT,RELAY1A); // Activa bobina para colocar rele na posicao FINAL
    BSET(RELAYPORT,RELAY1B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(RELAYPORT,RELAY1A); // DESLIGA bobina do rele
    BCLR(RELAYPORT,RELAY1B);
}

void relay1OFF(void){
    BSET(RELAYPORT,RELAY1A); // Activa bobina para colocar rele na INICIAL
    BCLR(RELAYPORT,RELAY1B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(RELAYPORT,RELAY1A); // DESLIGA bobine do rele
    BCLR(RELAYPORT,RELAY1B);
}

void relay2ON(void){
    BCLR(RELAYPORT,RELAY2A); // Activa bobina para colocar rele na posicao FINAL
    BSET(RELAYPORT,RELAY2B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(RELAYPORT,RELAY2A); // DESLIGA bobina do rele
    BCLR(RELAYPORT,RELAY2B);
}

void relay2OFF(void){
    BSET(RELAYPORT,RELAY2A); // Activa bobina para colocar rele na INICIAL
    BCLR(RELAYPORT,RELAY2B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(RELAYPORT,RELAY2A); // DESLIGA bobina do rele
    BCLR(RELAYPORT,RELAY2B);
}

void relay3ON(void){
    BCLR(RELAYPORT,RELAY3A); // Activa bobina para colocar rele na posicao FINAL
    BSET(RELAYPORT,RELAY3B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(RELAYPORT,RELAY3A); // DESLIGA bobine do rele
    BCLR(RELAYPORT,RELAY3B);
}

void relay3OFF(void){
    BSET(RELAYPORT,RELAY3A); // Activa bobina para colocar rele na INICIAL
    BCLR(RELAYPORT,RELAY3B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(RELAYPORT,RELAY3A); // DESLIGA bobina do rele
    BCLR(RELAYPORT,RELAY3B);
}

```

```

void relay4ON(void){
    BCLR(PORTRELAY4,RELAY4A); // Activa bobine para colocar rele na posicao FINAL
    BSET(PORTRELAY4,RELAY4B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(PORTRELAY4,RELAY4A); // DESLIGA bobina do rele
    BCLR(PORTRELAY4,RELAY4B);
}

void relay4OFF(void){
    BSET(PORTRELAY4,RELAY4A); // Activa bobina para colocar rele na INICIAL
    BCLR(PORTRELAY4,RELAY4B);
    _delay_ms(100);
    BCLR(PORTRELAY4,RELAY4A); // DESLIGA bobina do rele
    BCLR(PORTRELAY4,RELAY4B);
}

void mos1ON(void){
    BCLR(PORTB,MOS1); // Activa mosfet (a LOW) Circuito ligado à bateria
}
void mos1OFF(void){
    BSET(PORTB,MOS1); // Desliga mosfet (a High) Circuito ligado à bateria
}
/***** FIM DE PROGRAMA *****/

```

Anexo G- Programação em Linguagem C Para o Sistema Hídrico

```

/*****
* File Name      : Sistemahidrico.c
* Author        : Filipe Santos, Lina Texeira
* Date First Issued : 28/10/2010
*****/
#define F_CPU 8000000UL

/***** LIVRARIAS *****/
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/sfr_defs.h>
#include <avr/power.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <util/delay.h>

/***** NOMENCLATURA E CONSTANTES *****/
#define XBEE_SLEEPPORT PORTD // Porta dos pinos de controle dos relés
#define XBEE_SLEEPDDR DDRD
#define XBEE_SLEEP PD4
#define ADCVH 0
#define ADCCH 1
#define LED PE0 // LED informacao antigo PB2
#define LEDDDR DDRE
#define PORTLED PORTE

/***** FUNÇÕES AUXILIARES *****/
#define HI(x) (x>>8) // Utilizado para obter o MSB de número de 16 bit
#define LO(x) (x&0xff) //
#define BSET(p,b) ((p) |= (1<<b)) // Set bit
#define BCLR(p,b) ((p) &= ~(1<<b)) // Clear bit

/***** VARIÁVEIS GLOBAIS *****/
volatile int segundos = 0; // Variável de tempo
volatile int vhidro=0, chidro=0;

/***** APONTADORES DAS FUNÇÕES *****/
void USART_Init( unsigned int baud );
void USART_Transmit( unsigned char data );
unsigned char USART_Receive( void );

int measureADC( char adcN );
void Send();
void configRTC( void );
unsigned char checksumCalc( unsigned char * data_in, unsigned short
    number_of_bytes_to_read, short array_index_counter );

void startSystem( void );
void measureSensors( void );

void ledON( void );
void ledOFF( void );
void XBeeSleepON( void );
void XBeeSleepOFF( void );

void startSystem( void ) {
    BSET( LEDDDR, LED ); // Coloca o pino LED como output

    // Estado inicial
    ledON(); // LED ligado
}

```

```

clock_prescale_set(0); // Define prescaler do relógio a 1 => uC a 8MHz

ADMUX = 0xE0;           // Configura conversor ADC
ADCSRA = 0x86;         //
DIDR0 = 0xFF;          // Poupança de energia

USART_Init(51);         // 9600 8bit + 1 stopbit XBEE

configRTC();           // Configura RTC
_delay_ms(1000);       // Espera que cristal estabilize
sei();                 // Activa interrupções
ledOFF();              // LED desligado
}

/***** PROGRAMA PRINCIPAL *****/
int main() {
    startSystem();
    for(;;)
    {
        if(segundos == 60){ //configuracao do tempo de amostragem e decisão
            segundos = 0;

            ledON();
            measureSensors(); // Recolhe amostras da Tensão e corrente.
            Send();           // Constrói msg API XBee e envia para o XBee
            ledOFF();
        }
    }

void measureSensors(){
    vhidro = measureADC(ADCVH);
    chidro = measureADC(ADCCH);
}

void Send(){
    //unsigned checksum = 0;
    int j = 0;

    char msgAPIXBee[23] =
{0x7E,0x00,0x13,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,
0x00,0xF3,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00};

    _delay_ms(13);
    // Compila msg com dados
    // vaero=0,caero=0,vbat=0,cstepup=0
    msgAPIXBee[18] = HI(vhidro);
    msgAPIXBee[19] = LO(vhidro);
    msgAPIXBee[20] = HI(chidro);
    msgAPIXBee[21] = LO(chidro);
    msgAPIXBee[22] = checksumCalc((unsigned char*) &msgAPIXBee,19,3);

    for(j=0;j<23;j++){
        USART_Transmit(msgAPIXBee[j]);
    }
    _delay_ms(2); // Aguarda que a comunicação termine
}

/***** INTERRUPTOS *****/
// Interrupção do RTC
ISR(TIMER2_OVF_vect){
    ledON();
    _delay_ms(100);
    segundos++;
    ledOFF();
}

/***** Comunicação USART *****/

void USART_Init( unsigned int baud )
{
    /* Set baud rate */
    UBRR1H = (unsigned char)(baud>>8);
    UBRR1L = (unsigned char)baud;
    /* Enable receiver and transmitter */

```

```

UCSR1B = (1<<RXEN1)|(1<<TXEN1); // (1<<RXCIE1|
/* Set frame format: 8data, 2stop bit */
UCSR1C = (0<<USBS1)|(3<<UCSZ10);
}

void USART_Transmit( unsigned char data )
{
/* Wait for empty transmit buffer */
while ( !( UCSR1A & (1<<UDRE1)) )
;
/* Put data into buffer, sends the data */
UDR1 = data;
}

unsigned char USART_Receive( void )
{
/* Wait for data to be received */
while ( !(UCSR1A & (1<<RXC1)) )
;
/* Get and return received data from buffer */
return UDR1;
}
/***** FIM Comunicação USART *****/

/***** FUNÇÕES AUXILIARES *****/
int measureADC( char adcN ){
int aux1=0,aux2=0,auxt = 0;
int i;
ADMUX=0xE0+adcN; // Selecciona o sensor a medir
_delay_us(1);
for(i=0;i<16;i++){
ADCSRA |= (1<<ADSC); // Inicia a conversão
loop_until_bit_is_set(ADCSRA, ADIF); // Espera que a conversão termine
aux1 = ADCL;
aux2 = ADCH;
aux1 = (aux1>>6);
aux2 = (aux2<<2);
aux1 = aux2+aux1; // ADCL + ADCH = 10bit's
auxt = auxt+aux1;
}
auxt = (auxt>>4); // Igual a / 16 sem arredondamento
return auxt;
}

/*
* checksumCalc - Calcula o checksum para a msg API do XBee
* Calcula o resultado de 8 bits da soma dos vários bytes
* da msg, excepção do 0x7E e comprimento (MSB e LSB).
* Devolve a subtração do resultado anterior de 0xFF
*/
unsigned char checksumCalc (unsigned char * data_in,unsigned short
number_of_bytes_to_read,short array_index_counter){
unsigned char checksum;
checksum = 0;
number_of_bytes_to_read+=array_index_counter;
while (array_index_counter != number_of_bytes_to_read){
array_index_counter++;
checksum += data_in[array_index_counter - 1];
}
checksum = 0xFF-checksum;
return checksum;
}

void configRTC(void){
ASSR =0x20; // Activa modo assíncrono (recebe impulsos externos)
TIMSK2=0x00; // Desactiva todas a interrupções para alteração correcta dos registos
OCR2A =0x00; // Inicializa registo de comparacao
OCR2B =0x00; // Inicializa registo de comparacao
TCCR2A=0x00; // Configura modo normal
TCCR2B=0x05; // Inicia o timer com prescaler 05 => 128 cristal 32768 Overflow 128 =>
T = 1s
TIMSK2=0x01; // Activa interrupção de overflow
}
/***** Funções auxiliares controle de reles e mosfet *****/

```

```
void ledOFF(void) {
    BCLR(PORTLED,LED);    // Desliga LED
}
void ledON(void) {
    BSET(PORTLED,LED);    // Liga LED
}
void XBeeSleepOFF(void) {
    BCLR(XBEESLEPPORT,XBEESLEEP);    // Desliga XBEE Sleep
}
void XBeeSleepON(void) {
    BSET(XBEESLEPPORT,XBEESLEEP);    // LIGA XBEE Sleep
}
/***** FIM DE PROGRAMA *****/
```