

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica

Ramiro José Monteiro Cortez

VERSÃO DE TRABALHO



Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. Adriano Carvalho

Co-orientador: Eng. Nuno Rodrigues

11 de Março de 2013

© Ramiro Cortez, 2012

Resumo

Esta dissertação nasceu de uma proposta da empresa JPM, uma empresa com negócios na áreas da energias renováveis. A proposta consiste num estudo sobre seguidores solares, em particular de um seguidor solar já existente e comercializado pela empresa. O sistema que a JPM possui trata-se de um seguidor de eixo azimute com a forma de uma roda onde estão instalados os painéis solares.

O seguidor da JPM faz o seguimento através do uso de um calendário astronómico, em malha aberta em que usa um algoritmo para determinar a posição do solar e deste modo passar a informação de quanto deve a roda rodar para ficar voltada para o sol.

Neste trabalho vão ser estudadas alternativas a este sistema, sendo implementada uma alternativa que use sensores para a determinação da posição do sol.

Ao longo desta dissertação vai-se documentar o trabalho realizado e as conclusões obtidas de forma a ser possível fazer uma comparação entre os dois sistemas de deteção do sol.

A solução implementada passa pelo uso de sensores para realizar o *tracking*, os sensores usados são fotodíodos e os resultados obtidos foram significativos com uma melhoria quando comparados com uma instalação fixa de entre 9% a 5%.

Abstract

This dissertation was born from a proposal of the JPM company, a company with business in the renewable energy market. The proposal consist about a study of all the different kind of solar tracker, in particular of the solar tacker that they sell. The system in study is a solar tracker of an azimuth axe with the shape of a wheel where the solar panel are installed.

The JPM tracker does the solar following using an astronomical chart, the algorithm for the sun detection works in open loop and calculates how much the wheel as to move to be directed to the sun.

In this work an alternatives will be studied to this system, it was decided to implement a solution that makes use of sensors to determine the sun position at a given time.

During this dissertation all the work and study done will be reported and analyzed in order to make an evaluation about the tracking systems.

The solution implemented makes uses of sensors, the sensors used are photodiodes and the results obtained are good, with improvings around the 9% to 5% when compared with a fixed configuration.

Agradecimentos

Ao longo desta dissertação foram muitas as pessoas que me ajudaram de um modo ou outro, gostaria agora de lhes agradecer.

Em primeiro gostaria de agradecer aos meus pais, pelo apoio prestado e pela compreensão, sem eles não teria a hipótese de tirar este curso.

Não posso deixar de agradecer ao meu Orientador, o Prof. Dr. Adriano Carvalho que sempre se mostrou disponível para me ajudar e esclarecer sempre que tal foi necessário.

Na JPM gostava de deixar os meus agradecimentos ao Rui Henriques, sem ele não seria possível testar o trabalho desenvolvido.

Agradeço em especial aos meus amigos, foram eles mais que ninguém que me apoiaram ao longo desta dissertação. Sempre prontos a ajudar no que fosse necessário, agradeço ao Norberto Matos por sempre ter a pergunta certa para o momento certo, ao Carlos Silva por estar sempre pronto para ajudar no que fosse preciso, ao "Prof" Abel por todas as duvidas e conselhos dados, ao Vitor Sobrado por sempre me incentivar, ao Filipe Pereira por aturar o meu mau humor e ao Agostinho por me ensinar a escrever.

Gostaria também de agradecer a todos os que acompanharam ao longo do meu percurso académico, foram muitos e é impossível nomeá-los a todos mas aqui fica a minha gratidão.

Ramiro Cortez

“Concentrate all your thoughts upon the work at hand. The sun’s rays do not burn until brought to a focus.”

Alexander Graham Bell

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação da Dissertação	1
1.2	Objectivos da Dissertação	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Estado da Arte	5
2.1	Energia Solar	5
2.1.1	Radiação Solar	6
2.2	Movimento da Terra	7
2.2.1	Declinação Solar	8
2.2.2	Posição do Sol	9
2.3	Paineis Fotovoltaicos	10
2.3.1	Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica	10
2.3.2	Influência do Ambiente	12
2.3.3	Associação dos Módulos FV	12
2.3.4	Sombreamento dos painéis FV	12
2.3.4.1	Efeito do Sombreamento em Módulos FV	14
2.4	Seguidores Solares	14
2.4.1	Seguidores Passivos	16
2.4.2	Seguidor Ativo	16
2.4.2.1	Seguidor Polar de Eixo Único	17
2.4.2.2	Seguidor de Eixo Horizontal	17
2.4.2.3	Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute	18
2.4.2.4	Seguidor de dois Eixos	18
2.4.2.5	Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos	20
2.5	Sistemas de controlo para Seguidores Solares	20
2.5.1	Seguimento com Sensores	21
2.5.1.1	Seguimento com Fotosensores	21
2.5.1.2	Visão Artificial	21
2.5.2	Seguimento sem Sensores	22
2.5.3	Seguimento Misto	23
2.6	Conclusões	23
3	Caracterização do Sistema	25
3.1	Descrição do Sistema	25
3.1.1	Autómato	25
3.1.2	Variador de Frequência	27
3.1.3	Motorredutor	28

3.1.4	Sensores do Sistema	29
3.1.5	Visão global do sistema do seguidor	30
3.1.6	Painéis Fotovoltaicos da Roda	30
3.1.7	Preço	31
3.2	Sistema de supervisão da Roda	31
3.2.1	Análise dos dados obtidos	32
3.2.2	Possíveis causa de Erros	34
3.3	Solução Proposta	35
3.4	Conclusões	35
4	Implementação de uma solução alternativa	37
4.1	Opções no Mercado	38
4.1.1	LDR ou Light Dependent Resistor	38
4.1.2	Fotodíodo	39
4.1.3	Fototransistor	40
4.1.4	Análise comparativa	40
4.1.5	Requisitos do Sensor	40
4.2	Critérios na escolha do fotodíodo	41
4.3	Circuito elétrico dos Sensores	43
4.3.1	Solução a Adotar para variar o ganho	45
4.3.1.1	Multiplexer Digital	46
4.3.1.2	Multiplexer Analógico	46
4.3.1.3	Potenciómetro digital	46
4.3.1.4	Solução escolhida	47
4.4	Circuito Final	48
4.5	Suporte para os Sensores	49
4.6	Conclusões	52
5	Sistema de Controlo e Implementação	53
5.1	Plataforma de Controlo do Sistema	53
5.1.1	Arduíno	54
5.1.2	PIC	54
5.1.3	A/D	55
5.2	Máquina de Estados	56
5.3	Backtracking	58
5.4	Protótipo	59
5.5	Implementação do controlo com sensores na roda	60
5.5.1	PCBs implementadas	61
5.6	Colocação dos sensores	63
5.7	Teste e resultados	64
5.8	Conclusões	71
6	Conclusões	73
6.1	Principais conclusões	73
6.2	Desenvolvimentos Futuros	74
Referências		75

Lista de Figuras

1.1	Arquitectura da Solução Proposta[1]	2
2.1	Perdas de radiação solar na atmosfera terrestre[2]	6
2.2	Mapa da Radiação na Península Ibérica[?]	7
2.3	Movimento da Terra em redor do Sol[3]	8
2.4	Altura do Sol nos hemisférios	9
2.5	Altura e ângulo de Azimute do Sol[4]	10
2.6	Modelo equivalente da célula Fotoelétrica	11
2.7	Curvas características dos Painéis Fotovoltaicos	11
2.8	Curvas I-V a diferentes níveis de radiação e temperatura	12
2.9	Módulos FV ligados em serie e em paralelo	13
2.10	Módulos FV ligados em serie e em paralelo	13
2.11	Efeito do sombreamento e os diodos <i>by-pass</i>	15
2.12	Gráfico da comparação da energia entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos[5]	15
2.13	Seguidor Passivo	16
2.14	Comparação da estimativa da energia produzida de um sistema de 1 kWp usando vários seguidores[6]	17
2.15	Seguidor Polar de Eixo Único	18
2.16	Seguidor de Eixo Horizontal	18
2.17	Seguidor Vertical ou de Azimute	19
2.18	Seguidor de Dois Eixos	19
2.19	Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos	20
2.20	a) Sensor de posição solar com placa de sombreamento b) Sensor com base inclinada para aumentar sensibilidade c) sensor de posição precisa com o uso de colimador	21
3.1	Roda Sola da JPM	26
3.2	Autómato FB-14MC-1	26
3.3	Variador de Frequência	27
3.4	Motorredutor	28
3.5	Sensor indutivo	29
3.6	Sistema de controlo da Roda simplificado	30
3.7	<i>Sunny Beam</i>	31
3.8	Dados da potência na instalação fixa no dia 14 de Janeiro	32
3.9	Dados da potência na instalação fixa no dia 21 de Janeiro	32
3.10	Dados da potência na roda no dia 14 de Janeiro	33
3.11	Dados da potência na roda no dia 21 de Janeiro	33

4.1	Fluxograma do Sistema de medição e controlo	38
4.2	LDR e respetivo simbolo elétrico	39
4.3	Comprimento de onda e radiação visível	41
4.4	Circuito de testes do Fotodiodo	43
4.5	Teste de linearidade ao fotodiodo	43
4.6	a) modo de curto circuito b) modo de contra polarização	44
4.7	Circuito usado	45
4.8	Forma em interna de um potenciômetro digital	47
4.9	Configuração dos pinos do Max4618 e tabela para a escolha da entrada/saída	47
4.10	Circuito final	48
4.11	Suporte dos Sensores	49
4.12	Suporte com Sombra	50
4.13	Calculo da distancia dos Sensores	50
4.14	Suporte para Testes	51
5.1	a) Um Arduíno UNO b) uma PIC UNO	55
5.2	Máquina de estados implementada	57
5.3	Estados de leitura dos sensores indutivos e crepuscular	57
5.4	Posição dos sensores para a o <i>back-tracking</i>	59
5.5	a) <i>Stepper motor</i> b) Servo motor	60
5.6	Sistema com controlo a partir do arduino	61
5.7	PCB dos sensores	62
5.8	PCB das reles	62
5.9	Circuito da relé	62
5.10	Ligaçao entre as PCB	63
5.11	PCB com arduino acoplado	64
5.12	Circuito para os sensores indutivos	64
5.13	Suporte e posição dos sensores	65
5.14	Gráfico da Potência dia 25	65
5.15	Gráfico da Potência dia 26	66
5.16	Sombra nas <i>strings</i>	66
5.17	Gráfico da energia ao longo do dia 25	67
5.18	Gráfico da energia ao longo do dia 26	67
5.19	Gráfico da potênciia ao longo do dia 25 da instalação fixa	68
5.20	Gráfico da potênciia ao longo do dia 25 da roda	69
5.21	Gráfico da potênciia ao longo do dia 26 da instalação fixa	69
5.22	Gráfico da potênciia ao longo do dia 26 da roda	70

Lista de Tabelas

2.1	Autores e Coordenadas Calculadas	22
3.1	Características do Variador de Frequência	28
3.2	Características do Motorredutor	29
3.3	Características Elétricas dos Painéis	31
3.4	Comparação entre a energia gerada em ambos os sistemas	33
4.1	Características Elétricas dos Sensores estudados	40
4.2	Outras características dos Sensores estudados	41
4.3	Características base do fotodíodo(temperatura de 25°C)	42
4.4	Valores das resistência para variar o ganho	48
4.5	Cálculos para a colocação dos Sensores	51
5.1	Características das Plataformas Estudadas	55
5.2	Energia gerada ao longo dos dias 25 e 26	68
5.3	Energia gerada ao longo dos dias 25 no período sem sombra	70
5.4	Energia gerada ao longo dos dias 26 no período sem sombra	70

Abreviaturas e Símbolos

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
HRA	Angulo Horário
LDR	<i>Ligh Dependent Resitor</i>
ID	Corrente no díodo,
IPV	Corrente da célula PV
ISC	Corrente de curto-circuito da célula PV
VT	Tensão correspondente à temperatura T
FV	Fotovoltaicos
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i>
NEP	<i>Noise Equivalent Power</i>
PCB	<i>Printed circuit board</i>
SPA	<i>Solar Position Algorithm</i>
EEROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
EMF	<i>Electro magnetic field</i>

ϕ	Fator de idealidade
I_o	Corrente de Saturação
k	Constante de Boltzmann (J/K)(1,380x10-23)
q	Carga do eletrão (C)(-1,602x10-19)
δ	Declinação
Φ	Latitude
α	Altitude ou inclinação solar

Capítulo 1

Introdução

As necessidades energéticas mundiais aumentam de ano para ano de forma constante, neste momento uma das principais formas de colmatar esta necessidade é recorrer aos combustíveis fosseis que são uma fonte energética muito poluente e não renovável. De forma a encontrar uma alternativa a este recurso existe um cada vez maior interesse pelas chamadas energia renováveis, que são fontes de energia limpa e inesgotável.

Uma das fontes de energia renovável que mais tem vindo a aumentar é a energia solar, em especial a energia solar fotovoltaica. Com os avanços que se tem verificado nos últimos anos em relação a esta tecnologia e com o crescente interesse pela mesma, tem vindo a aumentar a necessidade por tecnologias que valorizem o investimento efetuado e aumentem o rendimento que se pode retirar deste tipo de tecnologia.

Dentro das tecnologias que podem ser usadas para aumentar o rendimento da tecnologia fotovoltaica, encontram-se os seguidores solares. O interesse por esta tecnologia deve-se ao facto de ser uma tecnologia relativamente simples e que permite na maioria dos casos aumentos na produção significativos em troca de um investimento relativamente baixo, quando comparado com o custo dos painéis fotovoltaicos,

1.1 Motivação da Dissertação

No panorama atual, em que as questões climáticas e energetísticas são um problema cada vez com maior dimensão, é importante estudar e desenvolver alternativas energéticas limpas e renováveis que possam colmatar as necessidades atuais de forma rentável e economicamente competitiva.

Deste modo, o interesse em estudar fontes de energia alternativas aos combustíveis fosseis torna-se mais pertinente. Nesta dissertação o enfoque vai estar na Energia solar.

A Energia Solar é uma energia limpa e praticamente inesgotável, que pode ser aproveitada através de várias tecnologias, desde a tecnologia solar térmica até à tecnologia solar fotovoltaica.

A tecnologia solar fotovoltaica em especial, vai ser alvo de estudo neste trabalho, pensa-se que tal tecnologia venha a tornar-se uma das fontes energéticas com maior crescimento no futuro como se pode ver na fig. 1.1.

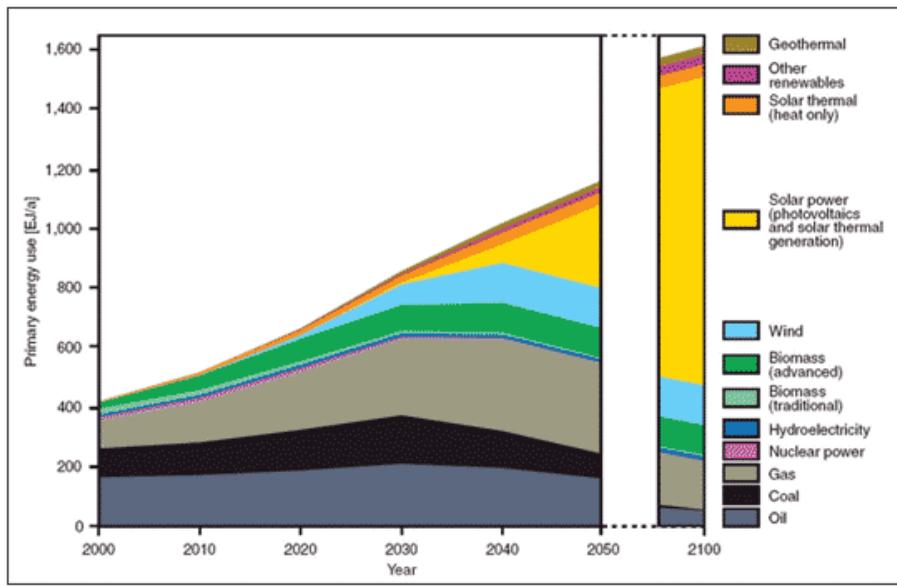


Figura 1.1: Arquitectura da Solução Proposta[1]

A este facto, aliando a queda dos preços nos painéis fotovoltaicos e a procura que se tem sentido por este tipo de tecnologia, tornou o investimento em tecnologias que possam aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos viável.

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos depende de vários aspetos entre os quais os seguintes; qualidade das células fotovoltaicas, sombreamento nas células, capacidade de seguimento do sol de forma a maximizar a incidência da radiação solar, entre outros.

Deste modo o interesse em estudar os sistemas de seguimento existentes no mercado.

1.2 Objectivos da Dissertação

O objetivo desta dissertação é o de analisar um seguidor solar já existente e comercializado pela JPM e de desenvolver uma solução alternativa ao sistema de *tracking* implementado pela JPM. O sistema da JPM faz o seguimento do Sol através do uso de um algoritmo astronómico que calcula a posição do Sol. Este sistema além de ser capaz de fazer o *tracking* do sol é também capaz de fazer *backtracking* sempre que algum dos seus painéis se encontra sombreado.

A JPM detetou que o seu sistema, que faz uso de um controlo em malha aberta, nem sempre é capaz de fazer o seguimento correto do Sol, de tal modo propôs a implementação de uma alternativa para poder comparar os dois sistemas. Deste modo o objetivo desta dissertação é implementar uma proposta alternativa que faça uso de sensores, testá-la e apresentar resultados.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo contem uma introdução e contextualização do trabalho que foi desenvolvido ao longo da dissertação.

O segundo capítulo faz um levantamento de toda a tecnologia existente na área em estudo, neste os principais tipos de configuração de seguidores até ao tipo de seguidor usado.

No terceiro capítulo apresenta-se o seguidor da JPM, as várias componentes que o compõe e como interagem entre si. Neste capítulo é feito, também uma análise ao sistema já existente.

O quarto capítulo é onde se desenvolve o método alternativo de *tracking* para a roda. Como foi decidido desenvolver um sistema que faça uso de sensores, é neste capítulo que se encontram os vários sensores estudados e os circuitos implementados.

No quinto capítulo esta a informação sobre o sistema implementado para controlar a roda e adquirir os dados dos sensores. Neste capítulo estão descritos os passos necessários à implementação do sistema e os resultados obtidos.

No sexto e último capítulo podem ler-se as conclusões obtidas e as propostas de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo está organizado em seis secções distintas.

A primeira secção incide sobre a radiação solar e a sua importância para os sistemas fotovoltaicos e refere ainda as principais perdas que a radiação solar sofre ao entrar na atmosfera.

A segunda secção aborda o tema do movimento da Terra em redor do Sol. Este tema tem uma importância especial, pois permite perceber o porquê da dificuldade da implementação dos sistemas de seguimento solares fiáveis.

Na terceira secção são apresentados os painéis fotovoltaicos. Os painéis fotovoltaicos são peças essenciais de um sistema fotovoltaico. Nesta secção referem-se as curvas características dos painéis e o seu modelo elétrico equivalente. Ainda nesta secção vem referido o efeito da temperatura e do sombreamento sobre os painéis.

A quarta secção descreve os tipos de seguidores encontradas no mercado, do ponto de vista do eixo de seguimento.

A quinta secção refere-se o método que os seguidores possuem para fazer o seguimento

A última secção é uma pequena conclusão sobre o que foi estudado neste capítulo, que permite tirar conclusões sobre o tema a ser abordado.

2.1 Energia Solar

A energia solar é uma energia abundante e de fácil acesso, pode ser aproveitada por toda a gente, tem a enorme vantagem de ser uma energia limpa e renovável.

A tecnologia usada para a aproveitar é de baixa manutenção e tem vindo a sentir os seus custos diminuir de forma constante, devido ao aumento da procura, dos novos avanços tecnológicos e a maior eficiência de toda a tecnologia envolvida.

A energia solar pode ser dividida em duas grandes vertentes, a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica. A energia fotovoltaica vai ser alvo de maior interesse nesta dissertação. A energia fotovoltaica tem vindo a crescer de forma constante em quase todo o mundo, sendo uma das vantagens desta tecnologia a sua modularidade e facilidade de instalação. A modularidade

desta tecnologia torna-a ideal para a produção doméstica e permite que seja usada para aplicações que necessitem de grande potência como para aplicações de baixa potência.

De forma a perceber a energia solar e neste caso a energia fotovoltaica, é necessário compreender como se obtém a mesma.

2.1.1 Radiação Solar

Esta parte da dissertação descreve a importância da radiação para os sistemas fotovoltaicos e as ferramentas para a medir.

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

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

Estes fatores vão ter diferentes efeitos conforme o local da superfície terrestre que se vai estudar, por exemplo, num deserto, vai haver pouca variação da radiação recebida devido ao efeito das nuvens, enquanto que uma região equatorial vai sentir pouco efeito devido às estações do ano.

A importância de ter em conta estes fatores, tem a ver com o facto de a quantidade de radiação solar que alcança a superfície terrestre, por hora, ser superior à energia consumida na terra por ano. Na figura 2.1 pode ver-se o peso de cada um dos efeitos referidos em cima.

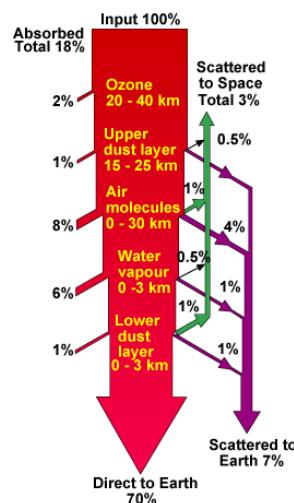


Figura 2.1: Perdas de radiação solar na atmosfera terrestre[2]

Em sistemas com painéis fotovoltaicos é essencial saber a quantidade de luz solar disponível numa determinada localização e durante quanto tempo. A radiação solar é a energia radiante emitida pelo Sol, que é medida em unidades de kW/m^2 , e varia durante o dia desde 0 kW/m^2 até um máximo de 1 kW/m^2 , durante o período de maior radiação. A radiação solar é altamente dependente da localização e do tempo local, logo existir a necessidade de a medir. Para esse efeito usam-se aparelhos construídos para o efeito:

- Piranómetro: mede a radiação global;
- Actonógrafo: mede e regista a radiação global;
- Heliógrafo: mede e regista o número de horas de insolação;
- Piroheliómetro: mede a radiação direta normal;

Os dados obtidos por estes aparelhos permitem desenhar mapas de radiação. Na fig. 2.2 pode ver-se o mapa da radiação solar anual na Península Ibérica.

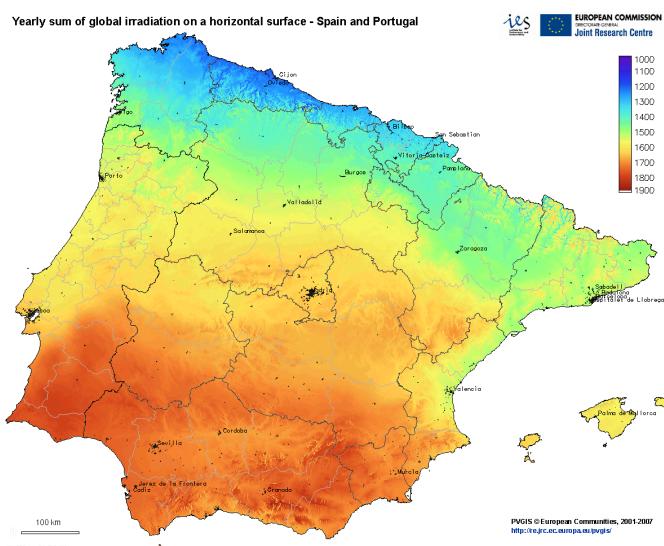


Figura 2.2: Mapa da Radiação na Península Ibérica[?]

2.2 Movimento da Terra

O movimento do Terra em redor do Sol vai ser de grande importância em qualquer projeto que envolva a produção de energia fotovoltaica. Este subcapítulo incide um pouco sobre o assunto.

O aparente "movimento" do Sol, causado pelo movimento da Terra, sobre o seu eixo, vai fazer variar o ângulo a que a componente direta da luz vai atingir a Terra, como tal é necessário perceber o movimento da Terra em redor do Sol.

A posição do Sol vai depender da posição do observador na Terra, data e dia do ano.

O movimento da Terra em redor do Sol não vai ser constante durante o ano, provocando o aumento do número de horas de luz durante o Verão e diminuição durante o Inverno. Este facto vai ser importante, dependendo do tipo de seguimento que é usado.

2.2.1 Declinação Solar

Como o eixo da Terra é inclinado, a radiação solar vai atingir a Terra com uma inclinação que vai variar conforme a época do ano, no solstício de Inverno a inclinação vai ser de $-23,45^\circ$ e no solstício de verão vai ser de $23,45^\circ$, na Fig. 2.3 pode ver-se o movimento da Terra em redor do Sol.

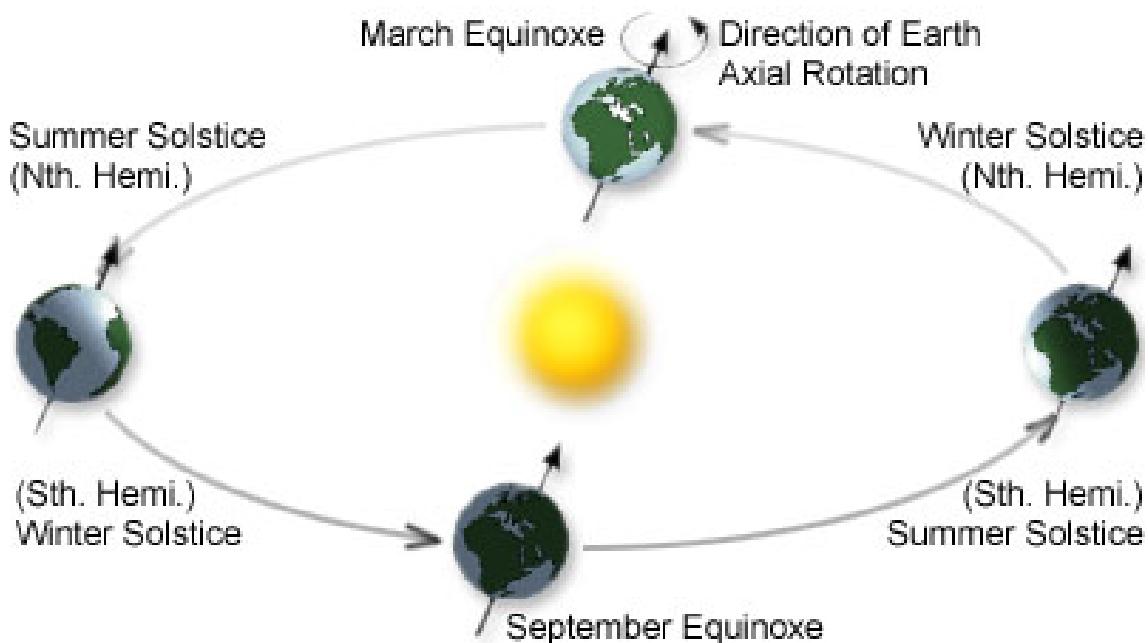


Figura 2.3: Movimento da Terra em redor do Sol[3]

O ângulo de desvio do Sol medido diretamente a partir do equador é o ângulo de declinação δ . A fórmula matemática da declinação segundo o dia(n) do ano é a seguinte[7]

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

Devido a este efeito, quando se instala um painel solar, este vai ser instalado com um declive igual à Latitude do local de instalação. No hemisfério norte o painel vai ser colocado com face virada para Sul. O declive do painel, em condições ideais, deveria ser superior à latitude do local no Inverno e inferior no Verão, como se pode ver na Fig. 2.4.

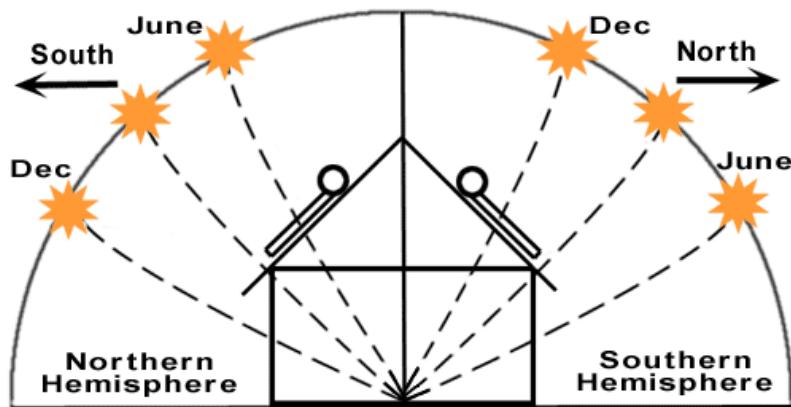


Figura 2.4: Altura do Sol nos hemisférios

2.2.2 Posição do Sol

A determinação da posição do Sol vai ser de máxima importância na elaboração de qualquer sistema de seguimento. A posição do sol pode ser obtida tendo em conta o ângulo da altitude e o ângulo de azimute.

O ângulo de azimute é o ângulo formado entre a direção Sul e a projeção da linha Sol-Terra sobre a horizontal. É um ângulo que vai ter uma variação entre um valor positivo e um valor negativo, para Oeste é positivo e para Este negativo. A equação seguinte permite calcular o ângulo de azimute. O azimute varia com a latitude e a época do ano.

$$\text{Azimute} = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos(HRA)}{\cos \alpha} \right] \quad (2.2)$$

Ao falar em altitude do Sol, é necessário referir o ângulo Zenital. O ângulo Zenital é o ângulo formado entre os raios solares e a vertical(Zénite). Corresponde ao ângulo que é necessário corrigir no painel para este formar um angulo de 90º face aos raios solares[3]. A Altura do Sol é o ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal e pode ser calculada com a seguinte equação.

$$\text{Altura}_{\text{Solar}} = \sin^{-1} [\sin \delta \sin \phi + \cos \phi \cos(HRA)] \quad (2.3)$$

Na Fig. 2.5 pode ver-se uma representação de ambos os ângulos.

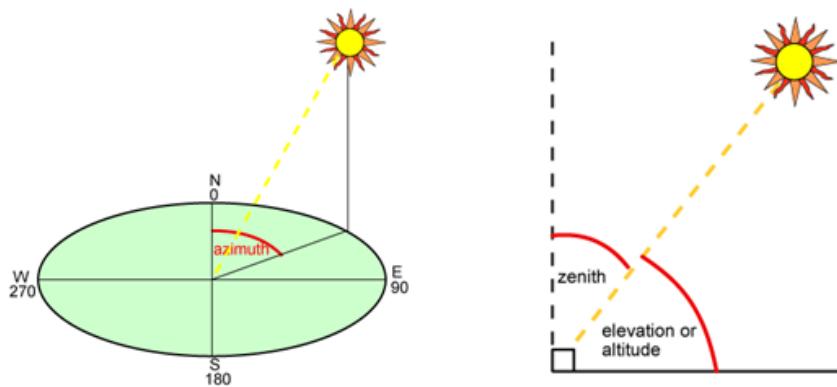


Figura 2.5: Altura e ângulo de Azimute do Sol[4]

2.3 Paineis Fotovoltaicos

Os Painéis Fotovoltaicos são componentes essenciais nos sistema de energia fotovoltaica, visto que sem eles não seria possível converter a radiação solar em energia elétrica. São conjuntos de células fotovoltaicas interligadas entre si com o objetivo de converter energia solar em energia elétrica. Ao conjunto de células fotovoltaicas normalmente dá-se o nome de módulo. Quando se tem vários módulos ligados entre si forma-se, um array.

As células fotovoltaicas são constituídas principalmente por materiais semicondutores como a silício cristalino e o arseneto de gálio. A célula fotovoltaica possui dois contactos elétricos em extremos opostos, que vão permitir fechar o circuito elétrico. O conjunto de células fotovoltaicas encontra-se protegido por uma capa protetora que deve ser um material condutor térmico, para dissipar o calor acumulado. A importância de possuir tal característica sera explicada a seguir.

2.3.1 Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica

O modelo equivalente do painel fotovoltaico pode ser representado pelo circuito da Fig. 2.6. O modelo é conhecido pelo modelo de díodo único. O circuito é composto por uma fonte de corrente, um díodo e duas resistências. As equações que definem o circuito são as seguintes:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.4)$$

$$I_D = I_o \times [e^{\frac{V_{pv}}{phV_T}} - 1] \quad (2.5)$$

$$I_{PV} = I_{SC} - I_p - I_D \quad (2.6)$$

$$V_{PV} = V_T L_n \left[\frac{I_{SC} - I_{PV}}{I_o} \right] + 1 \quad (2.7)$$

ϕ - Fator de idealidade

I_o - Corrente de Saturação,

I_D - Corrente no diodo,

I_{PV} - Corrente da célula PV,

I_{SC} - Corrente de curto-circuito da célula PV,

k - Constante de Boltzmann ($\frac{J}{K}$) ($1,380 \times 10^{23}$),

q - Carga do eletrão (C) ($-1,602 \times 10^{19}$),

V_{PV} - Tensão da célula PV,

V_T - Tensão correspondente à temperatura T.

R_s - Resistência em Serie

R_p - Resistência em Paralelo

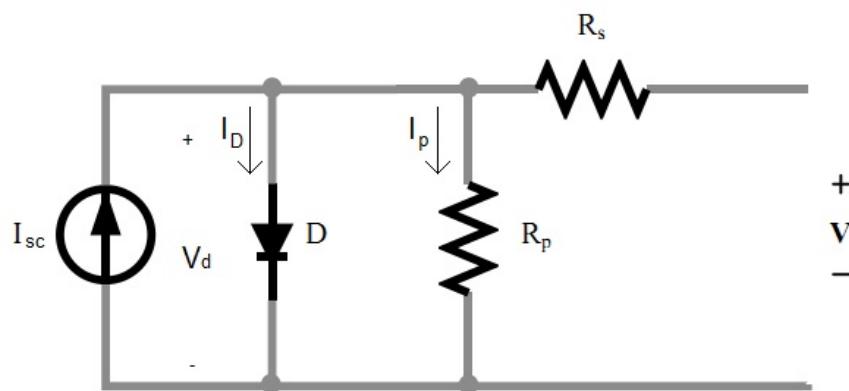


Figura 2.6: Modelo equivalente da célula Fotoelétrica

Deste modelo obtém-se o comportamento do painel fotovoltaico através das duas curvas características; corrente-tensão e potência-tensão. Estas curvas vão sofrer alterações conforme a radiação e a temperatura. Na Fig. 2.7 podem ver-se as curvas características de um painel de 230Wp, para a radiação de $1000 W/m^2$ e temperatura de $25^\circ C$.

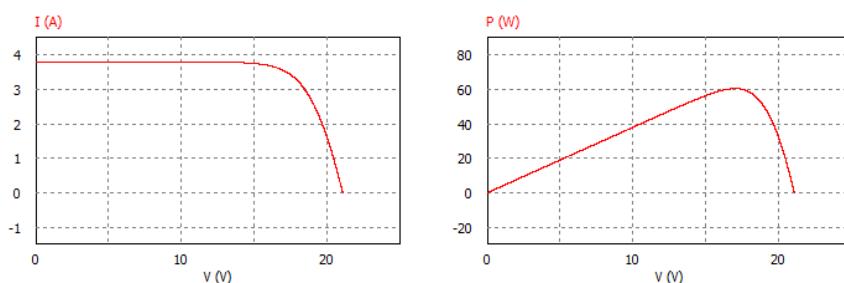


Figura 2.7: Curvas características dos Painéis Fotovoltaicos

2.3.2 Influência do Ambiente

A produção energética de um painel fotovoltaico vai estar dependente de dois fatores ambientais; a temperatura ambiente e a radiação solar que vai receber. Estes dois fatores vão provocar efeitos nas curvas características do painel. A radiação vai fazer aumentar a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto. A corrente de curto circuito vai ter uma relação quase linear com a radiação. Por sua vez a temperatura ao aumentar vai fazer diminuir a tensão de circuito aberto e aumentar ligeiramente a corrente de curto-círcito. Isto é explicado pelo facto da temperatura ser dependente da radiação.

Na Fig. 2.8. é possível ver a influência da temperatura e radiação na curva I-V.

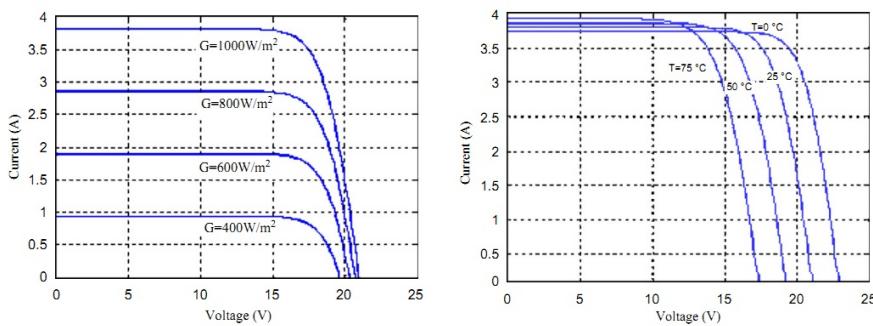


Figura 2.8: Curvas I-V a diferentes níveis de radiação e temperatura

2.3.3 Associação dos Módulos FV

Os módulos fotovoltaicos podem ser ligados entre si de forma a criarem *arrays*. O objetivo de ligar os módulos fotovoltaicos prende-se com a necessidade de ter uma maior tensão ou corrente nos terminais.

Os módulos fotovoltaicos podem ser associados de duas maneiras, em série ou em paralelo, como se pode ver na Fig. 2.9.

A associação em série permite obter maiores tensões enquanto se mantêm a corrente estipulada do módulo. A associação em paralelo permite obter maiores correntes enquanto se mantêm a tensão estipulada do módulo.

É normal utilizar-se os dois tipos de associação ao mesmo tempo.

2.3.4 Sombreamento dos painéis FV

Ao instalar os painéis fotovoltaicos é preciso ter em conta o efeito do sombreamento nos mesmos e as condições que vão levar a que o mesmo aconteça.

O sombreamento dos painéis está normalmente associado aos seguintes fatores:

- A distância entre as *strings* de módulos FV, caso as *strings* de painéis sejam montadas sem se respeitar uma distância mínima, podem vir a provocar sombreamento uns aos outros.

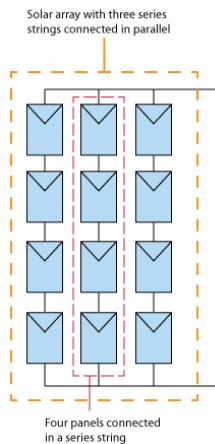


Figura 2.9: Módulos FV ligados em serie e em paralelo

- Perdas de orientação no caso em que se usam seguidores.

De forma a poder retirar o máximo rendimento de um painel fotovoltaico deve ter-se o máximo cuidado de forma a evitar o sombreamento do mesmo. Tal situação ganha especial importância quando se associam vários módulos, dado que permitir sombra sobre um deles, dependendo da posição em que se encontra, pode significar perdas muito acentuadas na produção obtida.

É preciso ter especial atenção na forma como se vão instalar os painéis fotovoltaicos de forma a evitar que em instalações em que existam mais que uma fila de painéis, a fila da frente não vá criar sombra sobre os painéis colocados a na fila de trás. Normalmente o espaço para a instalação dos painéis fotovoltaicos é limitado e tenta-se colocar o máximo de painéis na área disponível, de tal forma deve-se realizar a montagem dos painéis como se pode ver na fig. 2.10

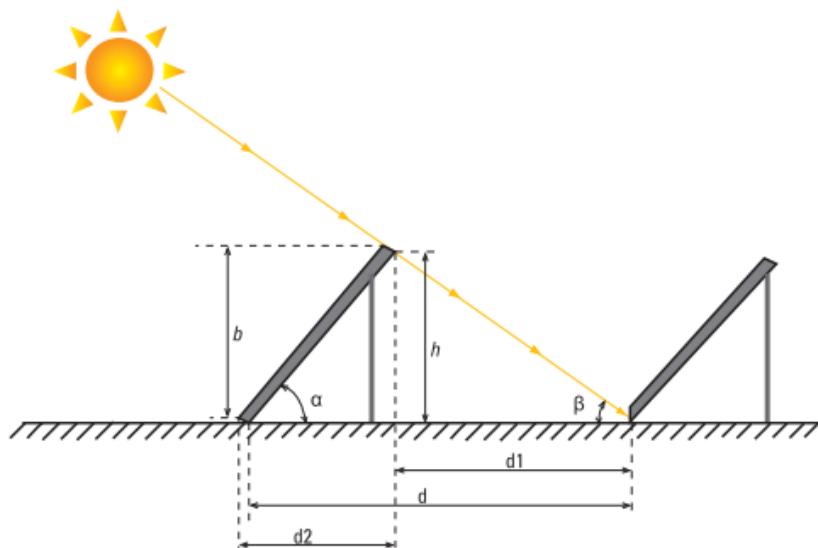


Figura 2.10: Módulos FV ligados em serie e em paralelo

Onde d é igual:

$$d = b \times \left(\cos \beta + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right) \quad (2.8)$$

β - Ângulo que corresponde à altura mínima do Sol a 22 de dezembro, que vai determinar a distância máxima entre fileiras de forma a evitar sombreamento entre elas.

α - Inclinação dos painéis.

d - distância entre as *string* de painéis.

b - comprimento do painel

h- altura

A distância entre as *string* de painéis, d(m), vai depender do comprimento do módulo b(m), da inclinação do painel β e do valor mínimo da altura solar que é tolerada no sombreamento α .

2.3.4.1 Efeito do Sombreamento em Módulos FV

O sombreamento dos módulos fotovoltaicos acarreta consequências negativas, estas consequências vão afetar tanto a eficiência dos módulos como podem pôr em causa a segurança dos mesmos.

Um módulo fotovoltaico é construído por células fotovoltaicas ligadas entre si. Quando uma parte do módulo está a ser sombreado as células fotovoltaicas deixam de se comportar como fontes de corrente e passam a comportar-se como uma "barreira" à passagem da corrente elétrica. Este fenómeno vai provocar dois efeitos nefastos, um deles será o de impedir que qualquer energia gerada pela série possa ser aproveitada, a outra consequência do efeito de sombreamento será que a parte sujeita a sombreamento ao não deixar passar a corrente, poderá aquecer e vir a destruir o módulo.

O efeito de sombreamento pode ser evitado com a utilização de diodos *by-pass*. Os diodos vão desviar a corrente das células sombreadas e evitar que estas aqueçam e ao mesmo tempo permitem que se possa recolher a energia produzida nas restantes células [8], como se pode ver na Fig. 2.11.

2.4 Seguidores Solares

Um seguidor solar é um dispositivo mecânico que tem por objetivo garantir que os painéis fotovoltaicos ficam sempre na posição mais favorável a captar o máximo de radiação solar possível. O custo de um sistema de seguimento, quanto se tem em conta o valor do projeto de um sistema fotovoltaico é de um incremento de 20% desse valor, mas é preciso ter em conta que um sistema deste tipo pode vir a aumentar as receitas geradas em cerca de 40%[9]. Os seguidores fotovoltaicos são sistemas que normalmente têm baixo custo de manutenção.

Na fig. 2.12, pode ver-se um gráfico com a comparação da energia produzida entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos.

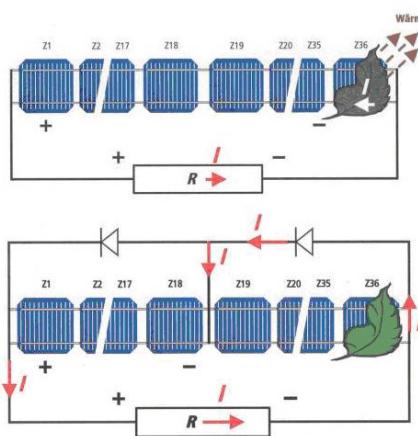
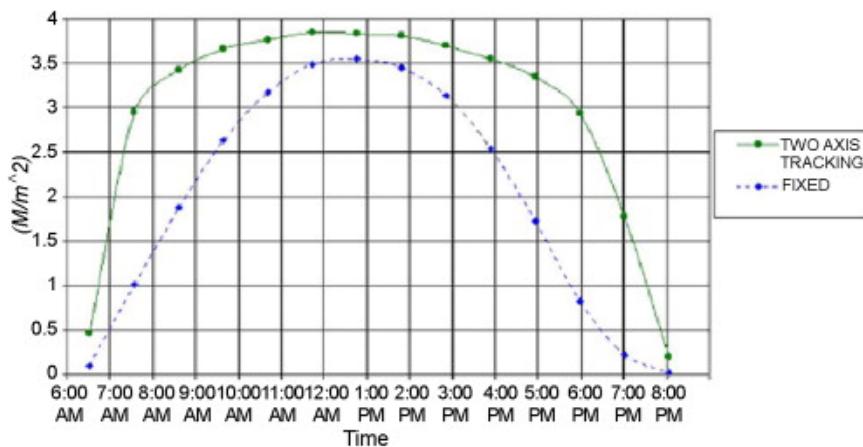
Figura 2.11: Efeito do sombreamento e os diodos *by-pass*

Figura 2.12: Gráfico da comparação da energia entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos[5]

Os seguidores solares podem ser utilizados em basicamente todas as aplicações que usem energia solar, até à relativamente pouco tempo eram usados essencialmente na produção de energia solar térmica, mas nos últimos anos com a redução dos custos na tecnologia fotovoltaica tem vindo a aumentar a sua utilização aliada a energia fotovoltaica.

Existem muitos tipos de seguidores solares, estes variam em custo, complexidade e funções. Podem fazer o seguimento através de vários eixos e garantir diferentes níveis de precisão.

Podem classificar-se em relação ao tipo de seguimento, da seguinte forma:

- Passivos

- Ativos

2.4.1 Seguidores Passivos

Este tipo de seguidor é baseado na expansão térmica de um líquido do tipo Freon[10].

Este tipo de gás aumenta de volume quando sujeito ao aumento de temperatura, o gás ao expandir vai provocar o movimento dos painéis solares de uma forma já definida no sentido de os apontar para o sol. Na Fig. 2.13 pode ver-se um exemplo deste tipo de seguidor. Nesta figura o gás é colocado em tubos, um de cada lado do painel, ao aquecer o gás vai passar para o estado gasoso e condensar no tubo do lado oposto, provocando o movimento.

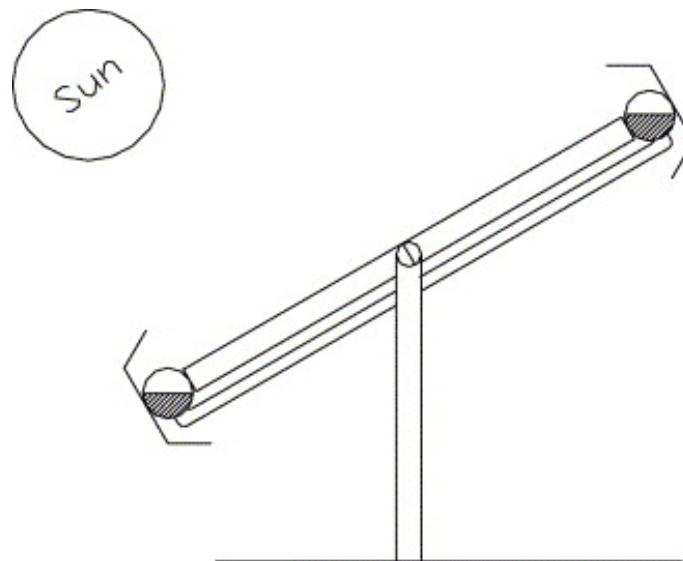


Figura 2.13: Seguidor Passivo

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

2.4.2 Seguidor Ativo

São seguidores que podem fazer o seguimento por diferentes métodos, podem utilizar sensores ou algoritmos cronológicos do "movimento" do sol e vão ser responsáveis por fazer o seguimento do sol de forma ativa ao fazer atuar algum tipo de motor. A sua classificação pode ser feita em relação ao seu movimento eixo, da seguinte forma:

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

- Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

Na fig. 2.14, pode ver-se uma comparação da energia produzida por diferentes tipos de seguidores em diferentes locais.

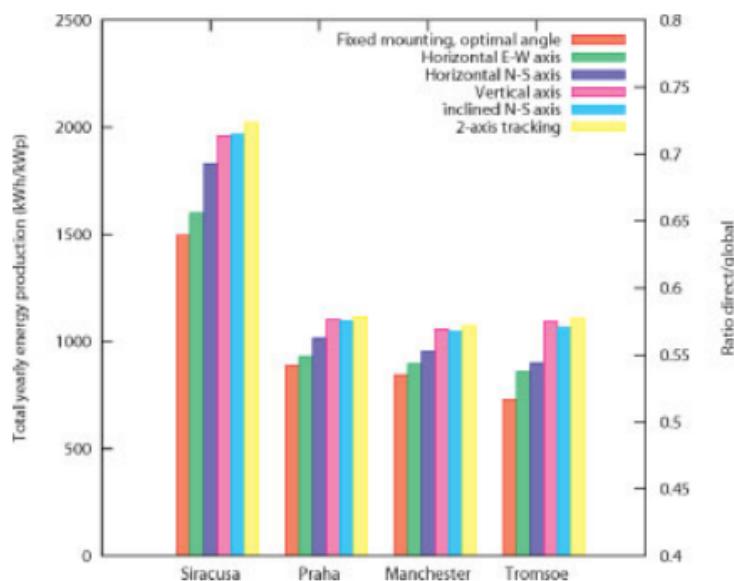


Figura 2.14: Comparação da estimativa da energia produzida de um sistema de 1 kWp usando vários seguidores[6]

2.4.2.1 Seguidor Polar de Eixo Único

Este tipo de seguidor tem um eixo N-S fixo num ângulo, normalmente a latitude do local. Este eixo vai ser o eixo de rotação para o seguidor. Ao adotar este eixo como eixo de rotação vai garantir que o painel vai estar perpendicular ao sol nos equinócios da Primavera e de Outono. Em qualquer outro dia um pequeno erro vai acontecer.

Os seguidores de eixo polar são relativamente simples e vão aumentar a eficiência do sistema. Na Fig. 2.15 pode ver-se um exemplo deste tipo de seguidor.

2.4.2.2 Seguidor de Eixo Horizontal

Este seguidor tem um eixo horizontal que vai servir como pivô para os painéis, permitindo deste modo um seguimento sazonal do sol. São seguidores muito simples e de instalação muito económica e com pouca manutenção. A sua eficiência não é tão grande como a dos outros seguidores mas mesmo assim são uma opção a considerar quando o objetivo é aumentar a eficiência total do sistema, visto que este sistema pode suportar um grande número de painéis. O sistema de eixo horizontal ao contrário de outros sistemas, não necessita de um sistema automático de

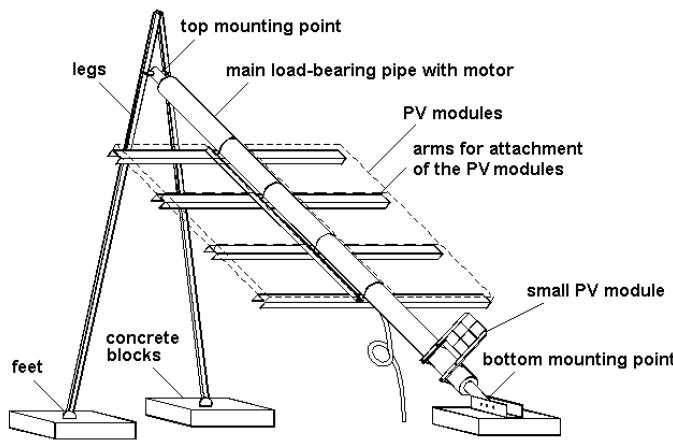


Figura 2.15: Seguidor Polar de Eixo Único

seguimento, podendo antes funcionar através de uma série de posições fixas, determinadas anteriormente à instalação. Na Fig. 2.16 pode-se ver um destes seguidores.

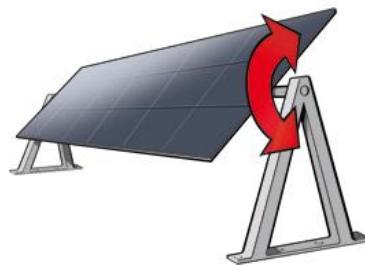


Figura 2.16: Seguidor de Eixo Horizontal

2.4.2.3 Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute

Neste tipo de seguidor o painel vai rodar sobre uma base fixa, ou seja vai provocar uma variação do azimute ao longo do dia.

É possível afirmar que um seguidor vertical vai colher menos 7% da radiação que um seguidor de dois eixos e mais 4% do que um seguidor polar[9].

A vantagem deste tipo de seguidor é o facto de ser muito robusto e fácil de implementar, em muitos casos esta vantagem compensa a menor radiação colhida, motivo pelo qual este tipo de seguidor se torna cada vez mais utilizado. Na Fig. 2.17 pode ver-se um destes seguidores.

2.4.2.4 Seguidor de dois Eixos

Este seguidor tem um poste vertical que vai permitir movimento segundo o eixo E-W e um poste horizontal que vai permitir movimento segundo o eixo N-S. A armação sobre a qual os



Figura 2.17: Seguidor Vertical ou de Azimute

painéis vão ser montados está presa ao poste que permite o movimento N-S. Até hoje são o tipo de seguidor mais comum, usado principalmente nos parques solares e em instalações de grandes dimensões. Alguns deles podem suportar uma área de colheita até 300 metros quadrados.

A grande desvantagem deste tipo de seguidor é o esforço a que estão sujeitos, principalmente devido ao seu peso e ao facto de que tem que ser bloqueados sempre que se registar muito vento.

Em muitas aplicações, devido à complexidade mecânica que é necessária para este tipo de seguidor não se tornam competitivos quando comparados com um seguidor vertical. Na Fig. 2.18 pode ver-se a um destes seguidores.



Figura 2.18: Seguidor de Dois Eixos

2.4.2.5 Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

Este seguidor consiste numa plataforma que vai rodar sobre uma base fixa e fazer o seguimento de E-W. Em cima dessa plataforma vão estar os painéis que por sua vez vão estar assentes em fileiras sobre um eixo horizontal que vai fazer o seguimento N-S.

Este tipo de seguidores são normalmente usados para coordenar o seguimento de um grande número de painéis, é um seguidor muito robusto e de construção simples.

A desvantagem é o facto de ser necessária muita manutenção das partes móveis, remoção de obstáculos que possam surgir na área do seguidor e o mais importante é o facto de ser necessário uma grande área para esta configuração de seguidor, área essa que não vai estar disponível ao contrário do que acontece com os seguidores de dois eixos polares.

Seguidores deste tipo tem uma estrutura metálica com uma serie de apoios fixos à terra que vai servir de suporte a uma roda circular, que vai ser a responsável pelo movimento da base. Na Fig. 2.19 pode-se ver um destes seguidores.

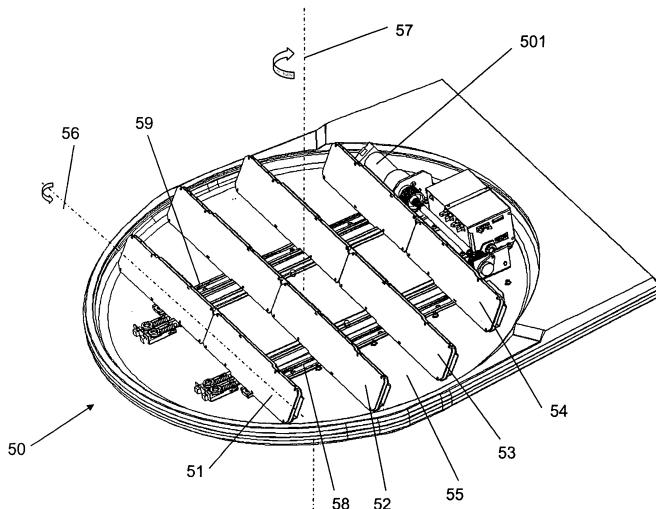


Figura 2.19: Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

2.5 Sistemas de controlo para Seguidores Solares

Existem muitas maneiras de fazer o controlo de um sistema de seguimento, pode ser feito em malha aberta ou malha fechada, recorrendo ao uso de sensores ou de algoritmos de determinação do sol ou podem ainda ser feitos recorrendo a todos elementos que foram referidos.

Em seguida vai fazer-se referência às três principais estratégias usadas nos seguidores, controlo com sensores e controlo sem sensores[11] e o controlo misto.

2.5.1 Seguimento com Sensores

Os seguidores podem usar dispositivos fotossensíveis para determinar a posição do sol, para tal usam fotosensores como os LDR, fotodiodos e fototransistores também podem fazer o seguimento recorrendo ao uso de câmaras, nas subsecções que se seguem, explicam-se estas soluções.

2.5.1.1 Seguimento com Fotosensores

Uma das estratégias usadas é recorrendo ao uso de sensores. Este tipo de controlo é feito em malha fechada e usa pelo menos um sensor por cada eixo. Os sensores obtêm dados que por sua vez vão fazer com que o controlo ative os atuadores. Os sensores usados normalmente são compostos por, pelo menos um par de fotosensores, que geram diferentes correntes sempre que não estão alinhados com o sol. Os fotosensores podem ser montados em superfícies inclinada de forma a aumentar a sensibilidade. Em algumas aplicações são montados com "palas" de forma a ajudar a determinar a direção do Sol. Na Fig. 2.20 podem ver-se alguns tipos de sensores[12].

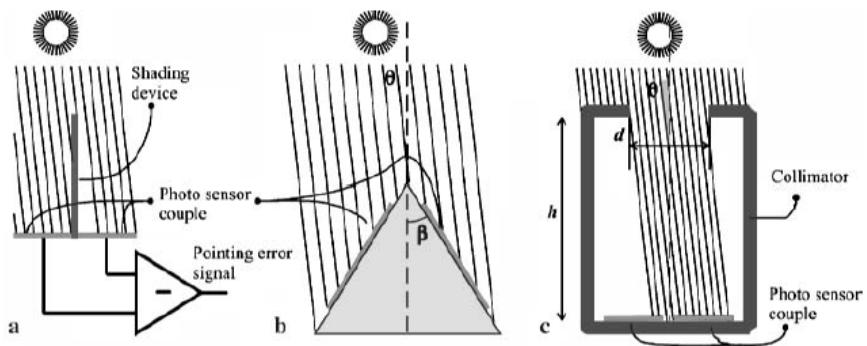


Figura 2.20: a) Sensor de posição solar com placa de sombreamento b) Sensor com base inclinada para aumentar sensibilidade c) sensor de posição precisa com o uso de colimador

As desvantagens de sistema deste tipo de I é o facto de os fotosensores terem que ser iguais de forma a garantir leituras idênticas caso contrário a determinação da posição do sol não será feita de forma precisa. Outro problema é o efeito semicondutor de envelhecimento, juntamente com o lixo que se possa acumular na superfície de proteção do sensor. Estes dois efeitos vão contribuir para uma imprecisão da parte do sensor ao longo do tempo.

2.5.1.2 Visão Artificial

Este tipo de seguidor usa uma câmara de filmar para fazer a determinação da posição do sol. São normalmente sistemas mais complexos quando comparados com os sistemas que usam fotosensores e implicam maior manutenção e maiores cuidados na instalação.

Os sistemas que recorrem a câmaras funcionam do seguinte modo, é definida uma posição central no campo de visão da câmara, e o algoritmo de busca procura manter o sol centrado nesse ponto. Deste modo procura-se garantir que o sistema irá estar sempre a seguir o sol. Os problemas

deste tipo de sistema tem a haver com a necessidade de se ter algum tipo de proteção e filtro para proteger a câmara e evitar que a mesma sature e se danifique.

As vantagens apontadas a este tipo de sistema são[13]

- grande resolução e precisão, visto que permite localizar o objetos de características conhecidas;
- relativa insensibilidade a ruído, sujidade e outras causas pela degradação da imagem;
- Grande número de algoritmos de deteção e identificação que não podem ser usados por outros dispositivos fotossensíveis.
- grande visão periférica

2.5.2 Seguimento sem Sensores

Este tipo de controlo é feito em malha aberta através do uso de algoritmos que vão calcular as coordenadas solares.

Os algoritmos usados podem ser classificados em dois grupos, dependendo da simplicidade da fórmula do algoritmo. O primeiro grupo normalmente calcula dados como a declinação solar ou a equação do tempo. Para tal necessita da data, hora e ano do momento a calcular. O segundo grupo tem uma complexidade elevada e normalmente necessita de grande capacidade de processamento. É capaz de calcular dados como a posição precisa do sol, a declinação, a ascensão solar e a posição elíptica do sol, para tal precisa como o grupo anterior da data, hora e ano mas também de dados como a temperatura, pressão, latitude e longitude, entre outros dados que dependem do tipo de algoritmo que está a ser usado[9]. Estes tipos de algoritmos conseguem garantir grande precisão com erros máximos até $0,0003^\circ$ para grandes períodos de tempo como é o caso do algoritmo SPA (solar position algorithm)[14].

Na tabela 2.1 podem ver-se os autores de alguns algoritmos e os dados que calculam.

Tabela 2.1: Autores e Coordenadas Calculadas

Autor	Declive	Ascensão direta	Equação dos tempo	Azimute	Elevação
Cooper,1969	x				
Spencer,1971	x			x	
Swift,1976	x				
Pitman and Vant-Hull, 1978	x			x	
Walraven, 1978	x	x			x
Lamm, 1981				x	
Michalsky,1981	x	x	x	x	

2.5.3 Seguimento Misto

Este tipo de controlo é uma junção dos dois tipos de controlo falados anteriormente. É normalmente em malha fechada e com uso de sensores, mas também usa algoritmos de cálculo da posição do sol.

A vantagem em relação aos outros tipos de controlo é o facto de poder usar algoritmos de menor fiabilidade para determinar uma posição aproximada do sol e seguida usar os sensores para fazer a localização do sol de forma mais precisa.

2.6 Conclusões

Ao longo deste capítulo o objetivo principal foi o de conhecer o que existe atualmente no mercado de seguidores, os diferentes tipos de seguidores e os respetivos métodos de seguimento.

No final deste capítulo foi possível concluir que tipo de seguidores tem maiores vantagens quando comparados com os outros, vantagens económicas e tecnológicas, permitindo deste modo ter o conhecimento necessário para comparar os diferentes modelos.

Outro dos objetivos foi obter conhecimentos básicos sobre os sistemas fotovoltaicos e tudo o que diz respeito a estes sistemas, perceber como funcionam e como reagem a temperatura e outros efeitos como o sombreamento.

Um dos pontos fundamentais foi obter uma compreensão do que é necessário ter em conta aquando, de um avaliação do sistema de seguimento fotovoltaico.

Capítulo 3

Caracterização do Sistema

Este capítulo contém a descrição do sistema que a empresa JPM possui em funcionamento.

Faz-se uma análise dos pontos fortes e fracos deste sistema vai descrever-se as várias componentes que o compõem. Uma análise crítica é realizada ao longo de todo o capítulo.

Neste capítulo são identificadas as principais fontes de erros, e são apresentadas as soluções propostas para os problemas encontrados.

3.1 Descrição do Sistema

O sistema em causa é uma roda solar onde estão assentes os painéis fotovoltaicos responsáveis pela geração da energia elétrica. Nesta secção são descritas as componentes deste sistema.

A roda tem um diâmetro de cerca de 9 m, e é composta por três *strings* de painéis fotovoltaicos, sendo que duas das *strings* são composta por oito painéis e uma delas por 6 painéis. A string de 6 painéis; é a que está à frente. Possui ainda um inversor da SMA modelo SB380. Como o objetivo desta dissertação está relacionado com o sistema de *tracking* utilizado, não é feita uma explicação muito pormenorizada desta componente do sistema.

Na fig. 3.1 pode ver-se uma imagem da roda da JPM.

O controlo e movimento da roda é feito por várias componentes, essas componentes são um autómato, um variador de velocidade e um motoredutor. Juntas estas três componentes serão responsáveis pelo sistema de *tracking* implementado, sistema esse que tem por fim colocar a roda voltada para o sol de forma a maximizar a radiação colhida pelos painéis. Em seguida, as várias componentes do sistema são descritas.

3.1.1 Autómato

O autómato programável ou PLC como é mais conhecido, é usados na indústria para desenvolver vários tipos de comando, desde o comando de um simples motor até ao comando de controladores de grande complexidade, que controlam vários processos ao mesmo tempo.

O autómato é onde se processam as ordens de movimento do *tracker* que vai ser responsável por indicar para que lado deve a roda rolar. Esta ordem é decidida através de um algoritmo do



Figura 3.1: Roda Sola da JPM

tipo astronómico que calcula a posição para onde a roda deve estar voltada de forma a garantir a máxima exposição à radiação solar. O algoritmo calcula o ângulo para o qual a roda deve rodar através do sinal de relógio do autómato. É ainda responsável por determinar quando deve ser feito *back-tracking* e, no caso de tal ser necessário, deve calcular o desfasamento a fazer para que as string de trás não fiquem sombreadas.

A programação do autómato é feita em Ladder, Linguagem de Contactos. A linguagem Ladder consiste numa lista de instruções simbólicas, que quando ligadas entre si, constituem o programa do autómato.

O autómato em causa é um autómato do fabricante FATEK, do modelo FBs-14MC, como pode ver-se na fig. 3.2.



Figura 3.2: Autómato FB-14MC-1

As características deste autómato são as seguintes:

- 8 entradas digitais (2 a 100KHz+ 6 a20kHz)
- 4 saídas (2 a 100KHz + 4 A 20KHz)
- 11 porta RS232 ou USB(expansível até 5, RS485 ou Rs232 ou Ethernet ou GSM)
- Possui um relógio interno

3.1.2 Variador de Frequência

O controlador de velocidade ou VFD(Variable- frequency drive) em inglês, é um dispositivo que controla a velocidade e o binário do motor ao variar a frequência e a tensão de entrada do mesmo.

O variador de frequência utilizado é do fabricante EMERSON da gama SKA, como pode ver-se na fig. 3.3.



Figura 3.3: Variador de Frequência

Na tabela 3.1 estão descritas as características do variador de frequência.

O variador recebe informação do autómato através das suas entradas digitais, que lhe vão dar a informação sobre para que lado o motor deve rodar.

A entrada analógica 1, que é a referência para a velocidade é fixa de fabrica e o autómato em nada interfere com este valor o que vai fazer com que a roda rode em velocidade constante sempre que a ordem para isso seja dada.

O controlo da roda é feito em malha aberta.

Tabela 3.1: Características do Variador de Frequência

Entradas e Saídas	Declive Funções	Valores	Quantidade
	Enable/Reset		
Entradas Digitais	Sentido Positivo	24V	4
	Sentido Negativo		
	Referencia de Velocidade		
Saídas Digitais	Velocidade Zero	24V	1
Saída do Rele	Segurança do Drive	Contacto normalmente aberto	1
Entrada Analógica 1	Referencia de Velocidade	0-110V	1
Entrada Analógica 2	Referencia Remota de Velocidade	0-20mA ou 4-20mA	1
Saída Analógica	Velocidade do Motor	0-10V	1

3.1.3 Motorredutor

Um motorredutor é um motor elétrico que possui um conjunto de engrenagens de forma a garantir um binário elevado para o movimento do motor. São utilizados nas mais diversas aplicações.

O motorredutor em causa é da marca SEW modelo S37DR63M4, como se pode ver na fig. 3.4.

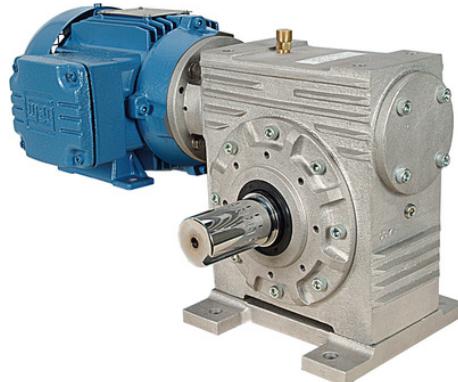


Figura 3.4: Motorredutor

As vantagens em usar um motorredutor são o facto de serem económicos e de produzirem pouco ruido, que no caso de aplicações de baixa potência para instalações em casas privadas é um ponto a ter em conta

Os dados técnicos do motor estão na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características do Motorredutor

Caixa de velocidade com um nível de redução	6,80 para 288,00
Caixa de velocidade com varios níveis de redução	110 para 33818
Binarios de saída[Nm](lb-in)	43 para 4000 (380 para 35400)
Níveis de potência do motor	0,12 para 22 (0,16 para 30)

3.1.4 Sensores do Sistema

O sistema em causa possui vários tipos de sensores. Nenhum deles está diretamente ligado à deteção da posição do sol. A função destes sensores é sim a de dar informações ao autómato de forma a garantir o funcionamento da roda em segurança e de forma eficiente.

O sistema possui três sensores indutivos e um sensor crepuscular.

Os sensores indutivos tem a função de fim de cursos. O objetivo dos mesmos é garantir que a roda em caso de falha não irá rodar para lá dos seus limites. Tem também a funcionalidade secundária de dar informação sobre a posição da roda visto que os mesmos estão colocados de forma a detetar três posições, nascente, sul geográfico e poente, na fig. 3.5 pode ver-se um sensor indutivo



Figura 3.5: Sensor indutivo

O sensor crepuscular tem o objetivo de informar o autómato do final e começo de dia. Essa informação será usada, no caso de detetar final de dia, para colocar a roda virada para nascente, ou seja, rodar a roda até o sensor indutivo que deteta a posição de nascente e deste modo preparar a roda para o próximo dia. No caso do sensor detetar nascer do dia o autómato desbloqueia a roda para que esta possa iniciar o *tracking*.

3.1.5 Visão global do sistema do seguidor

A roda da JPM possui várias componentes, na fig. 3.6 pode ver-se como é feita a ligação entre todas as componentes. É fundamental para a compreensão do mesmo perceber como interagem as componentes.

Pela fig. 3.6 percebe-se que se trata de um sistema simples mas robusto, com a capacidade para controlar a roda de forma a garantir a máxima de fiabilidade para esta aplicação



Figura 3.6: Sistema de controlo da Roda simplificado

3.1.6 Painéis Fotovoltaicos da Roda

A roda possui 22 painéis fotovoltaicos dispostos em três *string*, uma delas com seis painéis e as outras duas com oito painéis cada uma.

Os painéis são do fabricante Goosum e são constituídos por 60 células de silício mono cristalino de 6 polegadas. As células solares estão encapsuladas em EVA(acetato vinil etílico) resistentes a radiação UV. A parte frontal do painel é de vidro temperado. O vidro garante uma elevada transmissão de luz e protege dos agentes atmosféricos. A caixa de contactos no verso contém três diódios de bypass que evitam o sobreaquecimento das células solares.

Na tabela 3.3, pode ver-se os parâmetros elétricos dos painéis.

Tabela 3.3: Características Elétricas dos Painéis

Parâmetros elétricos em condições	1000 W/m, 25°C	800 W/m, 25°C
Potência nominal máxima	220 W	158 W
Tensão de circuito aberto	35.8 V	32.39 V
Tensão na máxima potência	28.1 V	25.24 V
Corrente de curto-circuito	8.6 A	7.11 A
Corrente na máxima potência	7.85 A	6.26 A

3.1.7 Preço

Um ponto importante de qualquer produto é o preço. O preço do produto será sempre um dos pontos mais importantes tanto da parte de quem vende, como da parte de quem compra. O vendedor tenta conseguir um preço que garanta um bom retorno e que ao mesmo tempo seja competitivo, enquanto que quem compra quer comprar ao melhor preço e com a melhor qualidade.

O preço do sistema da roda da JPM vai estar sujeito ao preço de mercado dos painéis fotovoltaicos, dos requisitos do cliente e local de instalação.

A JPM tem por base o preço na ordem dos 4000 a 4500 euros para a roda sem incluir os painéis, o inversor e a instalação.

3.2 Sistema de supervisão da Roda

A roda da JPM possui um sistema de supervisão que permite saber a potência gerada a cada momento pelos painéis fotovoltaicos.

O sistema da JPM é um *Sunny Beam*, trata-se de um sistema de supervisão que transmite os dados por *Bluetooth*, e que é capaz de guardar os dados enviados pelo inversor por um período de, até 90 dias. É capaz de fazer gráficos da potência gerada, diários e da potência mensal. Um *Sunny Beam* pode ser visto na fig. 3.7.

Figura 3.7: *Sunny Beam*

3.2.1 Análise dos dados obtidos

De forma a fazer uma análise ao sistema da JPM e a identificar possíveis problemas, foi feita uma análise de alguns dados obtidos através do *Sunny Beam*. Nas fig. 3.8 e fig. 3.9 pode ver-se o gráfico da potência gerada pelos painéis fixos da JPM em dois dias distintos e compará-los com os gráficos da potência gerada pela roda, na fig. 3.10, e fig. 3.11 para os mesmos dias respetivos.

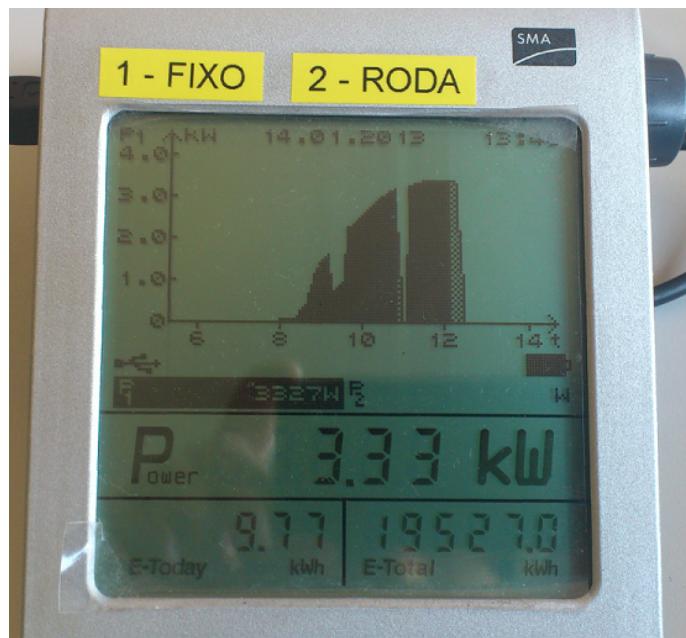


Figura 3.8: Dados da potência na instalação fixa no dia 14 de Janeiro

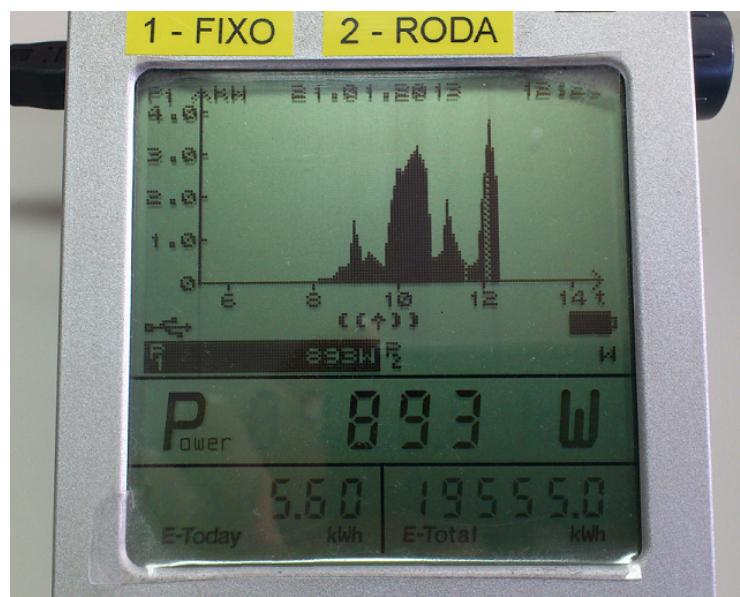


Figura 3.9: Dados da potência na instalação fixa no dia 21 de Janeiro

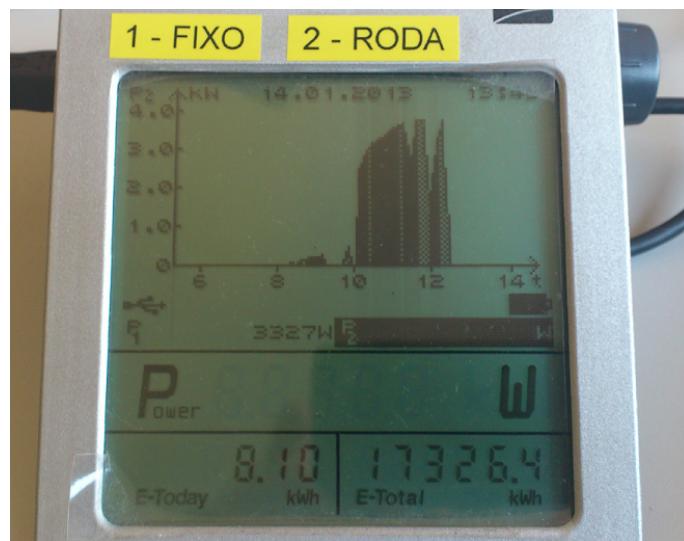


Figura 3.10: Dados da potência na roda no dia 14 de Janeiro

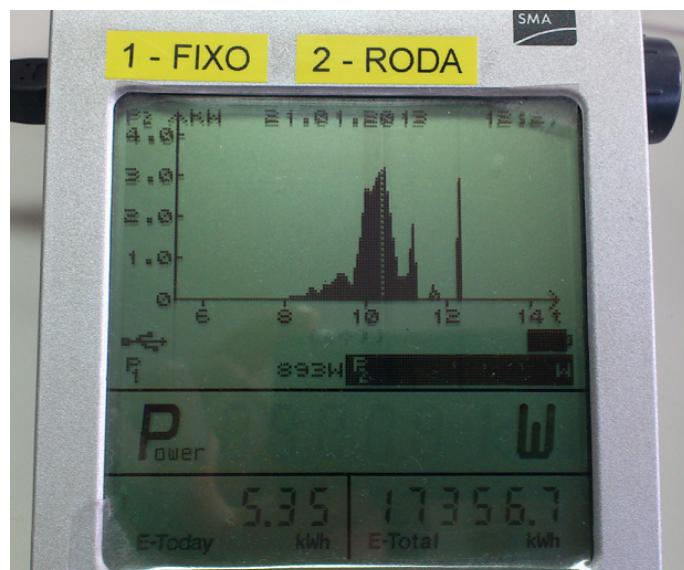


Figura 3.11: Dados da potência na roda no dia 21 de Janeiro

Tabela 3.4: Comparaçāo entre a energia gerada em ambos os sistemas

	14	21
Fixa	9,77 KW	5,6 KW
Roda	8,1 KW	5,35 KW
Diferença	1,67 KW	0,25 KW

Nas imagens 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 pode ver-se os valores da energia produzida até ao momento em que foram retiradas as imagens de ambas as instalações de painéis fotovoltaicos. Na tabela 3.4

foram compilados estes valores e feita a diferença entre ambas as instalações.

O que se nota ao analisar os dados é que a energia gerada na instalação fixa é superior á da roda, algo que não deveria acontecer. Tal caso, nota-se particularmente bem nos dados do dia 14 em que a diferença entre ambas as configurações chegou a 1,67 KW . Pelos dados consegue-se igualmente perceber uma menor produção da roda nas primeiras horas do dia, algo que se pode ver em ambas as imagens.

Um dos problemas que a JPM já tinha identificado na roda era o inicio e final do dia, algo que está de acordo com o que se vê nestes dados. A JPM tinha notado que a potência gerada pela roda era inferior para estes períodos do dia quando comparada com a potencia dos painéis fixos. Tal caso não deveria ocorrer visto que o objetivo da roda seria orientar os painéis para o sol e deste modo maximizar a área de exposição ao mesmo.

Destes dados torna-se possível observar que o *tracking* efetuado pelo sistema da JPM não está a funcionar da forma mais correta.

3.2.2 Possíveis causa de Erros

De forma a poder apresentar uma solução alternativa á JPM para o seguimento do Sol da roda solar, foi preciso identificar possíveis fontes de erro do sistema. Como não foi possível ter acesso ao algoritmo usado no seguimento foi preciso usar os dados recolhidos na realização do estado da arte desta dissertação, e dos dias analisados na secção anterior para identificar possíveis fontes de erro.

Uma fonte de erro presente em quase todos os sistemas que usam algoritmos astronómicos é o facto de quase todos eles necessitarem de um sinal de tempo com o maior grau de precisão possível. Atrasos de segundos ao longo de períodos grandes de tempo vão gerar erros de vários graus no seguidor.

A maioria dos algoritmos deste tipo também necessitam de ter a sua posição bem definida, sendo necessário pelo menos a coordenada de latitude para o algoritmo de seguimento. Esta coordenada é apenas necessária na altura da instalação, mas caso ocorra um erro vai influenciar o *tracking*.

Os atuadores da roda desde o motor ao variador de velocidade, vão sempre inserir erros no sistema através de atrasos entre o momento em que são dadas ordens e o momento em que são realizadas.

Outra causa de erro neste sistema é o *back-tracking* que a roda executa para tentar evitar o sombreamento nas *strings* de oito painéis. Pode afirmar-se que é uma fonte de erro pelos dados verificados em cima, visto que a execução de *back-traking* num sistema com erros de *tracking* apenas irá agravar o problema. A má execução de *back-tracking* é a causa mais provável para a diferença de valores que se notam entre as duas configurações, principalmente para as primeiras horas do dia, visto que como as *strings* da roda tem uma menor distância entre elas, é possível que o sombreamento das mesmas possa estar a ser uma das causas das perdas que podem ver-se.

Outra possível fonte de erros está no facto de a roda ter a função de *back-tracking*. Tal função deveria gerar ganhos, mas no caso de um seguimento pouco correto, tal função irá apenas agravar o problema de um seguimento mal feito.

3.3 Solução Proposta

Desde o início desta dissertação foi claro que a utilização de algoritmos astronómicos para a determinação da posição do Sol iria trazer uma série de problemas com um grau de complexidade elevada para uma aplicação deste tipo, principalmente se for tido em conta que o sistema da JPM não se trata de um sistema de *tracking* com as mesmas características dos estudados no capítulo 2. Dado que todos os estudados até agora tratavam-se de sistemas com apenas uma string em que não existia o problema de os painéis gerarem sombra sobre os painéis colocados nas *strings* de trás.

Deste modo foi apresentada á JPM a solução de se utilizarem sensores para a determinação da melhor posição para onde orientar a roda, Assim o controlo da roda passaria a ser feito não através do um algoritmo astronómico, mas sim através dos sinais recebidos pelos sensores. Tal permitiria ao sistema ter um *feedback* do que se estava a passar.

Tal solução tem a vantagem de permitir diminuir a complexidade do sistema de *tracking* e de permitir eliminar as possíveis causa de erro detetadas no sistema, que é usado neste momento. Vai além disso permitir testar uma solução alternativa à já implementada e permitir perceber se a utilização de sensores pode ser uma alternativa viável ao sistema da JPM.

3.4 Conclusões

Este capítulo teve como principal objetivo a descrição do sistema implementado. Foi dada especial atenção aos vários elementos que fazem parte do sistema e a forma como estão interligados.

A compreensão da forma de funcionamento da roda é de extrema importância visto que qualquer proposta de melhoria irá necessariamente influenciar o funcionamento da mesma, especialmente depois de se ter decidido alterar a forma como é feito o *tracking* da roda, passando o mesmo a ser feito através da utilização de um sistema realimentado.

Neste capitulo, foi feito ainda uma análise preliminar a possíveis causas de erro do sistema atual e foi avançada uma proposta para um sistema alternativo de *tracking* para a roda.

Na fase inicial do trabalho, foi concluído que o *back-tracking* para já não é uma opção a ser tida em conta. Mesmo assim será estudada e caso o sistema de *tracking* com sensores apresente bons resultados, um possível estudo sobre este assunto pode vir a ser retomado .

Capítulo 4

Implementação de uma solução alternativa

O presente capítulo descreve uma alternativa ao uso de um algoritmo baseado em calendário astronómico.

A solução escolhida passa pela utilização de sensores. Este capítulo vai descrever os sensores escolhidos e as razões pelas quais foram escolhidos, vai mostrar os circuitos de aquisição e vai ainda explicar como foram ultrapassados os problemas que foram levantados pela escolha desta solução.

Sensores e Transdutores

Um transdutor é um dispositivo que converte um sinal de uma forma física para um sinal correspondente noutra forma física, ou seja, é um conversor de energia. Dispositivos que convertem um sinal para outro sinal são sempre transdutores. Dispositivos com a mesma função mas que oferecem uma saída elétrica são designados sensores.

O termo sensor e transdutor pode ser usado como sinónimo, mas como normalmente o termo sensor sugere a capacidade de aquisição de dados, vai ser esse o termo usado nesta dissertação.

Sistema de Medição

Um sistema de medição é uma combinação de vários elementos que juntos vão desempenhar várias funções. O resultado de um sistema de medição deve ser independente do observador, empírico e numérico.

As quantidades numéricas devem respeitar a mesma relação que as variáveis físicas medidas, ou seja, num caso em que se queira medir a luminosidade quando comparada com outra lâmpadas, caso uma brilhe com mais intensidade o valor numérico dessa lâmpada deve ser superior ao da outra.

Na fig. 4.1, pode-se ver um fluxograma do sistema de medição e controlo.

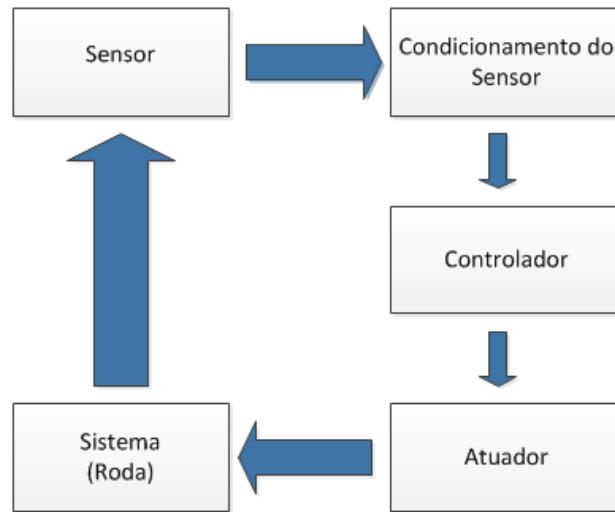


Figura 4.1: Fluxograma do Sistema de medição e controlo

4.1 Opções no Mercado

A escolha do tipo de sensor a ser utilizado é de extrema importância. Neste subcapítulo fez-se um levantamento das opções existentes no mercado, as suas características e uma comparação entre ambas as opções é realizada.

Vários dispositivos podem ser usados nesta aplicação, a de um seguidor solar, após um estudo do que existe no mercado, foi decidido concentrar a atenção em três componentes em especial, os fotodiodos, os fototransistores e os LDR (Light Dependent Resistor), devido ao seu preço relativamente baixo e a facilidade de acesso aos mesmos.

Em seguida é realizada uma análise de cada um deles.

4.1.1 LDR ou Light Dependent Resistor

O LDR é uma resistência elétrica que vai variar com a incidência de radiação eletromagnética. Normalmente o comprimento de onda da radiação que faz variar o LDR situa-se entre 0,4 e os 0,7 μm . O LDR esta incluído no grupo dos fotocondutores. Na fig. 4.2 apresenta-se um LDR e o respetivo símbolo elétrico.

São normalmente feitos de sulfeto de cádmio(CdS) ou de selenito de cádmio(CdSe) e costumam ser utilizados em várias aplicações, desde sistemas de deteção de cores até sensores de controlo de luzes automáticas.

O comportamento da resistência é o oposto ao da luminosidade, ou seja, quanto maior a luminosidade, menor será o valor da resistência . O valor da resistência costuma variar entre 1 Mohm em escuro e 100 ohm num dia de grande claridade .

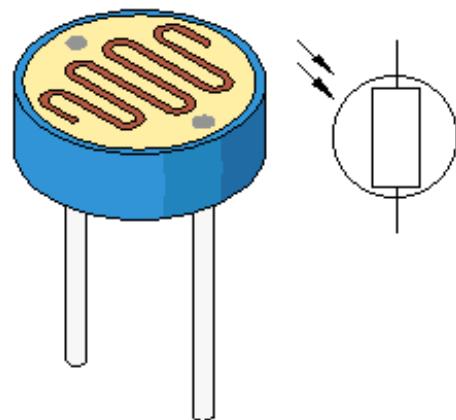


Figura 4.2: LDR e respetivo símbolo elétrico

Os LDRs vão sofrer alterações no seu comportamento com a temperatura. As baixas temperaturas, a sensibilidade e o tempo de resposta dos LDRs vai diminuir .

A grande desvantagem de um LDR está no facto do material ter memória, ou seja, o seu comportamento vai depender do que aconteceu nos dias anteriores, ou seja a resistência vai depender da luminosidade atual e da luminosidade dos dias anteriores. Tem um comportamento não linear á luz.

Na escolha de um LDR é preciso ter em conta o material de que é feito o LDR . O material de que foi feito o LDR vai influenciar o comprimento de onda detetado pelo mesmo, podendo tornar o LDR inutilizável para a aplicação em causa.

O uso de LDRs implica em quase todas as aplicações o uso de circuitos de maior complexidade, quando comparados com os fotodíodos e os fototransistores. Na comparação direta, o custo de um LDR deverá ser menor do que o de um fotodiode ou o de um fototransistor.

4.1.2 Fotodíodo

Num sensor fotovoltaico, quando acontece o efeito fotoelétrico é possível obter-se uma tensão que varia em função da intensidade da radiação recebida. Um fotodíodo é baseado no mesmo princípio que os fotodetectores, mas em vez de serem usados como sensores "auto-geradores", aplica-se uma tensão de contra polarização, quando usados em modo de contra polarização. A tensão vai ter o efeito de aumentar a largura de depleção do fotodiode, o que irá provocar uma resposta mais rápida e uma corrente proporcional á intensidade da radiação recebida .

Os fotodíodos são construídos basicamente da mesma forma que um díodo .As principais diferenças entre estes dois componentes está no facto de num fotodíodo ser construído com um invólucro transparente de forma a permitir que luz forneça energia a área fotossensível

Fotodíodos podem ser feitos de diversos materiais, desde silicone a germânio, garantindo deste modo a capacidade de detetarem uma grande gama de comprimento de onda . Os fotodíodos são usados nas mais diversas aplicações, desde sensores para portas até medidores do nível de açúcar no sangue.

Algumas das características que tornam os fotodíodos ideais para um grande conjunto de aplicações, são o facto de serem pequenos e leves. Facilmente se encontra um fotodíodo que se adapte á aplicação necessária. Tem um baixo preço e podem ser fabricados em diferentes tamanhos e com diferentes invólucros, com baixos custos envolvidos no processo. O uso deste tipo de componente vai implicar, para quase todas as aplicações o uso de algum tipo de circuito de amplificação.

4.1.3 Fototransistor

Um fototransistor é a combinação de um fotodíodo e um transistor n-p-n onde a radiação luminosa vai incidir na base e provocar uma corrente.

A desvantagem de um fototransistor, quando comparado com um fotodíodo, está na baixa linearidade e na largura de banda de valores que aceita, devido á grande capacidade entre a base e o coletor. A vantagem do fototransistor é o facto de terem ganho embutido que normalmente está na ordem das 100, ate vários milhares de vezes de amplificação.

Os fototransistores são usados numa largura de banda na entre os $0,4 \mu\text{m}$ e os $1,1 \mu\text{m}$.

Os fototransistores são usados em aplicações de comutação de estados, são também muito usados para fotodeteção. Devido ao facto de terem ganho embutido, são muito utilizados para aplicações em que a luminosidade seja muito baixa.

A nível prático os fototransistores ficam a perder em relação aos fotodiodes devido ao facto de existir muita pouca variedade a nível de empacotamento, o que vai limitar as aplicações onde poderiam ser usados.

4.1.4 Análise comparativa

Uma análise das características que distinguem as várias componentes descritas em cima, vai ser agora feita, como se pode ver na tabela 4.1 e na tabela 4.2, os dados das tabelas foram reunidos da leitura de varias *datasheets*.

Tabela 4.1: Características Elétricas dos Sensores estudados

Características Elétricas	Fotodíodo	Fototransistores	LDR
Comprimento de Onda(μm)	0.2-2	0.4-1.1	0.4-0.7
Sensibilidade	Excelente	Muito boa	Muito boa
Estabilidade	Muito boa	Boa	Fraca
Linearidade	Excelente	Boa	Boa
Desempenho/Custo	Boa	Excelente	Excelente

4.1.5 Requisitos do Sensor

Na escolha do tipo de sensor a ser usado deve-se respeitar alguns requisitos. Entre os requisitos a ter em conta, está o preço dos sensores e o custo da implementação da solução. Neste campo deve

Tabela 4.2: Outras características dos Sensores estudados

Outras características	Fotodíodo	Fototransistores	LDR
Custo	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo
Reprodutibilidade	Excelente	Baixa	Pobre
Robustez	Excelente	Excelente	Excelente
Facilidade de Customização	Facil	Baixa	Baixa
Tamanho	Pequeno	Pequeno	Pequeno

estar incluído o custo dos circuitos auxiliares que possam ser necessários e o custo de qualquer tipo de suporte físico que possa vir a ser usado. A nível de requisitos deverá ser tido em conta que o objetivo desta aplicação é a deteção da radiação solar. Deste modo o comprimento de onda que os sensores devem ser capazes de detetar deverá estar entre os 400 e os 1200 nm, de forma a serem sensíveis à luz visível. Nos dias nublados devem também ser capazes de detetar o sol, daí o facto de deverem ser capazes de detetar o espectro infravermelho, que tem comprimento de onda acima dos 800 nm, como pode ver-se na fig. 4.3.

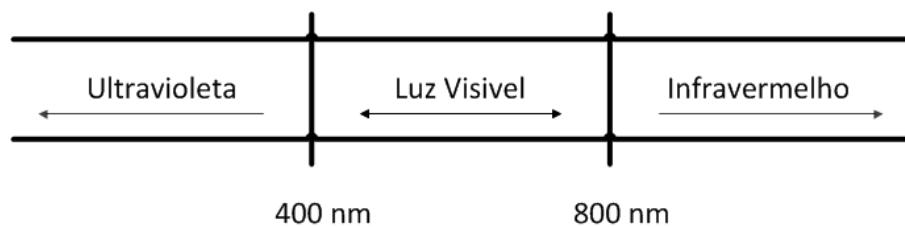


Figura 4.3: Comprimento de onda e radiação visível

Nos requisitos elétricos a linearidade dos sensores é um ponto essencial, juntamente com a sensibilidade dos mesmos. Nas outras características, o custo, a robustez e a facilidade de customização, foram os critérios a ter em conta.

Após este ponto e tendo em vista a tabela 4.1 e a tabela 4.2, os fotodíodos foram escolhidos não só devido aos critérios demonstrados anteriormente, mas também devido ao facto de serem a opção mais acessível e que já se encontrava disponível no laboratório de desenvolvimento.

4.2 Critérios na escolha do fotodíodo

Após a escolha do tipo de sensor a ser usado é preciso escolher entre os diversos fotodiodos existentes no mercado e qual o melhor para a aplicação pretendida.

Os critérios escolhidos para a comparação dos fotodíodos foram a gama do comprimento de onda detetado, o comprimento de onda de máxima sensibilidade, o tempo de subida e o tempo de descida, e o ângulo de meia sensibilidade.

A escolha do fotodíodo a ser usado estava limitada pelas opções existentes na Faculdade e pelo tempo disponível para a realização da dissertação. Deste modo deu-se preferência às opções já existentes. O modelo do fotodíodo escolhido foi o BPV10NF do fabricante Vishay. Na tabela 4.3 pode-se ver as características do fotodíodo.

Tabela 4.3: Características base do fotodíodo(temperatura de 25°C)

Parâmetro	Condições de teste	Símbolo	Typico	Unidade
Gama de comprimento de onda		$\lambda_{0,5}$	790 a 1050	nm
Comprimento de onda de máxima sensibilidade		λ_p	9 40	nm
Meio ângulo de sensibilidade		ϕ	± 20	graus
<i>Noise equivalent power</i>	$V_R = 20V$			
	$\lambda=950 \text{ nm}$	NEP	3×10^{-14}	$\text{W}\sqrt{\text{Hz}}$
<i>Detectivity</i>	$V_R = 20V$			
	$\lambda=950 \text{ nm}$	D	3×10^{124}	$\text{cm}\sqrt{\text{Hz/W}}$
Tempo de subida	$V_R = 50V$			
	$R_L = 50\omega$	t_r	2,5	ns
	$\lambda=820 \text{ nm}$			
Tempo de descida	$V_R = 50V$			
	$R_L = 50\omega$	t_f	2,5	ns
	$\lambda=820 \text{ nm}$			

Outras características adicionais dos fotodíodos é o facto de possuírem uma área sensível a radiação de 0,78 (mm^2), terem uma grande sensibilidade à radiação e uma largura de banda superior a 100 MHz a tensão de 12 V, possui ainda um filtro para bloquear a radiação fora da largura de banda dos 870 nm até aos 950 nm no empacotamento.

4.3 Circuito elétrico dos Sensores

Os fotodíodos sem algum tipo de circuito de aquisição de nada servem visto que os valores da corrente, que vão gerar, costumam ser muito baixos. De forma a ser possível testar a linearidade e o comportamento do fotodiode, usou-se um circuito de teste que se encontra na folha de características do fotodiodo. Na fig. 4.4, pode ver-se o circuito em causa.

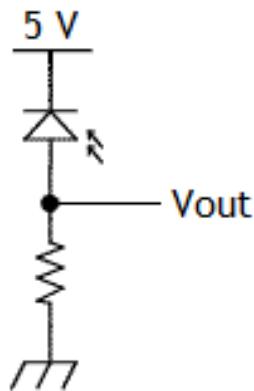


Figura 4.4: Circuito de testes do Fotodiodo

Com este circuito apenas se verificou a linearidade do fotodiodo, ao comparar os valores lidos a partir do fotodiodo com um luxímetro, na fig. 4.5 pode ver-se os resultados obtidos

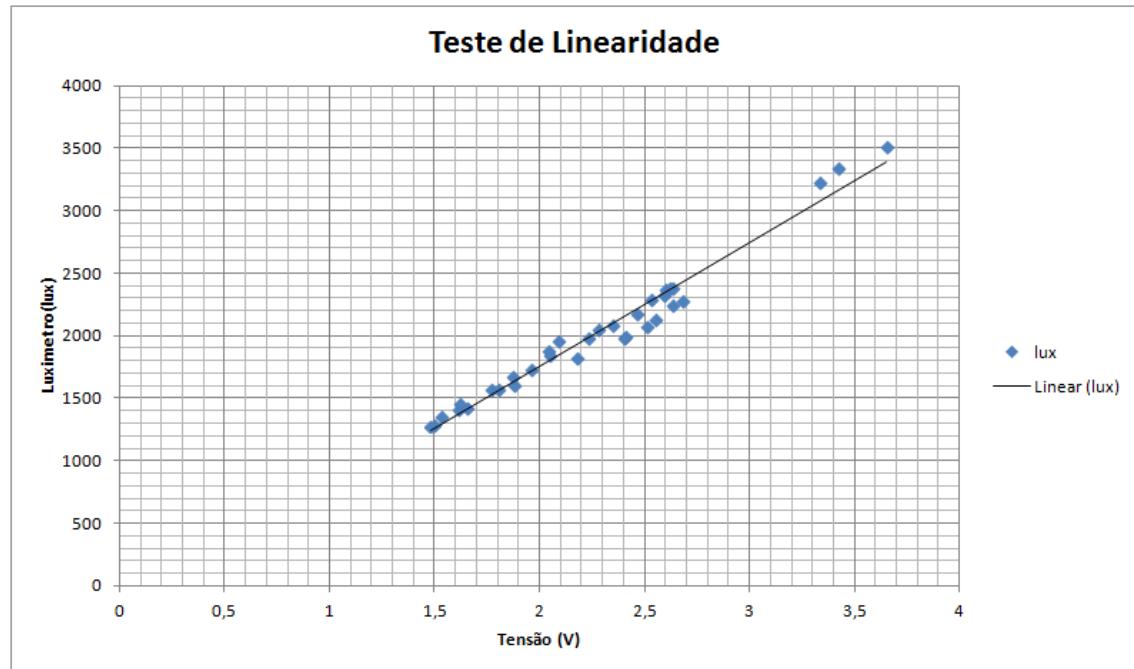


Figura 4.5: Teste de linearidade ao fotodiodo

Pelo gráfico consegue-se perceber que o fotodíodo vai saturar relativamente rápido, dai a necessidade de um circuito de amplificação que permita variar o ganho de modo a tentar evitar a saturação do mesmo.

Os fotodíodos operam em dois modos; o modo de curto circuito e o modo fotovoltaico. Em ambos os casos costuma-se usar circuitos de conversão de corrente para tensão, como pode ver-se na fig. 4.6.

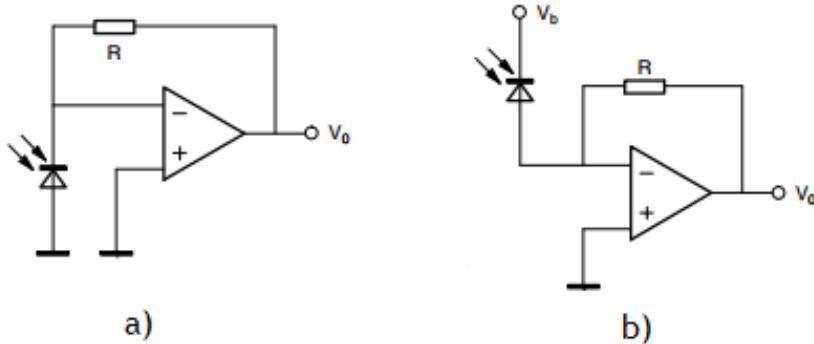


Figura 4.6: a) modo de curto circuito b) modo de contra polarização

A tensão de saída deste circuito é obtida pela seguinte formula:

$$V_o = -I_{SC} \times R \quad (4.1)$$

O circuito a) ajuda a minimizar o efeito da corrente negra e tem melhor sensibilidade enquanto que o circuito b) ajuda a melhorar a velocidade de deteção do diodo.

Em ambos os circuitos vistos na fig. 4.6, o amplificador está numa configuração inversora. Uma configuração inversora terá sempre o problema de ter um valor negativo na saída e a necessidade de alimentar o amplificador com uma tensão positiva e negativa. Este problema iria gerar certas dificuldades a nível de montagem. A altura em que se pensou nos circuitos para os fotodíodos, tinha-se colocado como ponto de partida a utilização de uma alimentação unipolar de 5V. Na realidade a alimentação disponível na roda é de 24V. A necessidade de conseguir inverter uma alimentação de positivo para negativo, pareceu ser algo que na realidade seria demasiado complexo para o problema em questão, visto que implicaria usar um conversor CC-CC, o que implicaria um maior custo para a aplicação em causa.

Deste modo optou-se por usar uma configuração não inversora em que se usa o fotodiodo em modo contra-polarizado, como pode-se ver na fig. 4.7.

O circuito de cima tem a seguinte formula para a saída:

$$V_o = -I_{SC} \times R_3 \times \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \right] \quad (4.2)$$

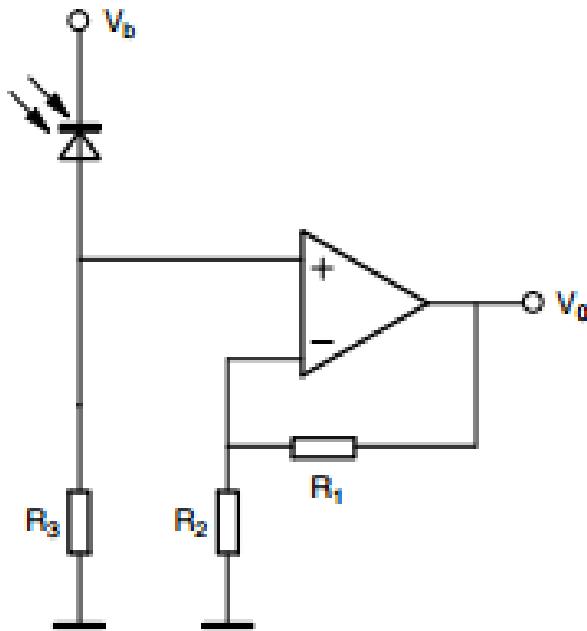


Figura 4.7: Circuito usado

A vantagem deste circuito é que permite funcionar apenas com uma tensão unipolar de 5V. Como o que se pretende com os sensores é obter uma diferença entre o par de sensores, esta configuração é mais que suficiente.

Como pode ver-se pela fórmula 4.2 e pela fig. 4.7, o ganho da configuração vai variar conforme as resistências R_1 e R_2 . De forma a tornar o sistema mais robusto, pretende-se obter uma forma de variar o ganho.

4.3.1 Solução a Adotar para variar o ganho

O objetivo dos sensores escolhidos e estudados na secção anterior é o de determinarem a posição do sol. De forma a serem capazes de cumprir este objetivo é preciso ter em conta que as condições em que o vão fazer, não vão ser constantes. Vão existir dias de maior claridade e dias de menor claridade, tal facto vai criar o problema de em dia de maior claridade os sensores, ao terem um ganho fixo poderem saturar e em dias de pouca claridade poderem não ser capazes de obter valores que possibilitem a determinação do sol.

Tendo em conta o problema explicado em cima, o que se procura é uma solução que possa ser usada para variar a resistência no circuito do sensor, ou seja, algo que permita mudar o valor da resistência. Além desta característica procurava-se um integrado que possuísse pelo menos uma entrada ligada a várias saídas, onde fosse possível escolher a saída desejada. Deveria ainda garantir que o fluxo de informação fosse bidireccional, tanto da entrada para a saída, como da saída para a entrada.

Após a identificação das principais características desejadas, foram identificados as seguintes soluções que cumprem os requisitos desejados:

- Multiplexer digital
- Multiplexer Analógico
- Potenciômetro digital

Depois de identificadas as componentes é preciso perceber o seu funcionamento, de forma a perceber se realmente podem ser usados para a aplicação pretendida.

4.3.1.1 Multiplexer Digital

Um *multiplexer* é um componente eletrónico muito usado em telecomunicações, visto que funciona como um seletor de sinal, permitindo ligar vários sinais distintos a uma única entrada, dando a possibilidade de se escolher que sinal se quer ler .

Os *multiplexer* costumam ser divididos em duas áreas, os *multiplexers* digitais e os analógicos. É importante fazer esta distinção, pois um *multiplexer* digital não poderia ser usado na aplicação pretendida.

Os *multiplexer* digitais possuem amplificadores internos e *buffers*, o que faz com que deixem de ter bidireccionalidade. Um *multiplexer* digital irá ter sempre um tempo de propagação relativamente longo, quando comparado com um *multiplexer* analógico.

4.3.1.2 Multiplexer Analógico

Um *Multiplexer Analógico* é um *switch* normal, ou seja, um botão de *on-off*. Tem normalmente um comando digital que permite escolher a entrada para a saída desejada ou o inverso. Podem ser usados como *multiplexer* ou *demultiplexer*, pois garantem a bidireccionalidade do sinal ao não possuírem nenhum tipo de amplificação de sinal e ao não terem nenhum buffer interno. Possuem resistências internas muito baixas quando *on*, desde cerca de alguns ohms até ao máximo, algumas centenas, e relativamente grande quando *off*, na ordem dos megaohm até os gigaohm.

4.3.1.3 Potenciômetro digital

Um potenciômetro digital tem a mesma função de um potenciômetro, ou seja, variar uma resistência. A diferença está que no caso do potenciômetro digital, usa-se um comando digital para variar a resistência.

Num potenciômetro digital tem-se uma série de resistências de pequeno valor que estão ligadas por interruptores, cada degrau escolhido vai corresponder ao valor da resistência pretendido, pode-se ver na fig. 4.8 uma representação de um potenciômetro digital. O comando vai ser feito ao passar ao integrado o número de divisões que se quer, e o numero de divisões vai corresponder a uma fração do valor total da resistência.

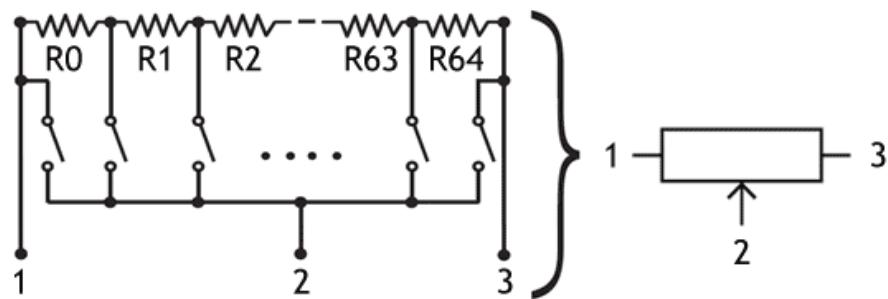


Figura 4.8: Forma em interna de um potenciómetro digital

O inconveniente de usar um potenciómetro digital está no facto de não ser bidireccional e o facto de ter um valor máximo de resistência limitado.

4.3.1.4 Solução escolhida

A solução escolhida dos integrados estudados, acabou por ser o *multiplexer* analógico. O facto de garantir bidirecionalidade do sinal tornam este componente ideal para variar o ganho de um amplificador, podendo deste modo escolher por exemplo, a resistência de realimentação de um circuito de amplificação. O componente escolhido foi um MAX4618, que possui a seguinte configuração dos pinos, fig. 4.9.

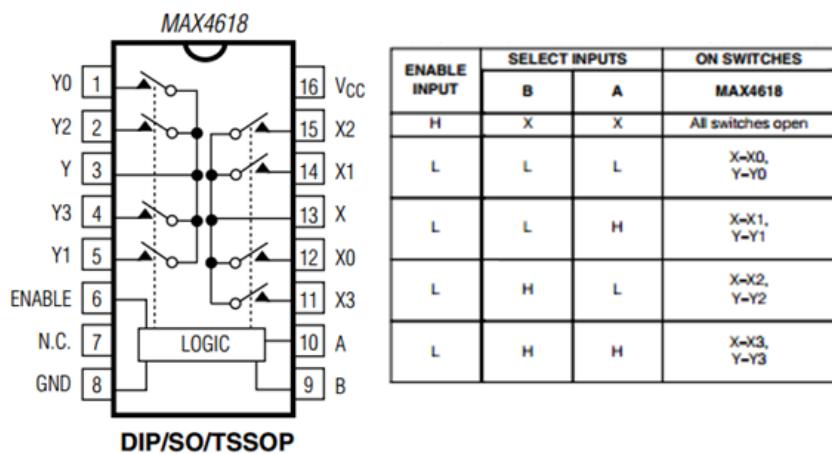


Figura 4.9: Configuração dos pinos do Max4618 e tabela para a escolha da entrada/saída

O objetivo é colocar o sinal numa das entradas e, Y ou X, e ligar por exemplo as saídas X0-Y0 com uma resistência. Ao colocar uma resistência real, tem-se ainda a vantagem de que a tolerância da resistência, ser sempre inferior à de um potenciómetro digital e o seu valor vai ser fixo não correndo o risco de variar.

4.4 Circuito Final

Depois de escolhido o integrado para MAX4618, com as características descritas em cima, faltou decidir que resistência variar no circuito.

A fórmula da saída no circuito escolhido vai ter ganho de $[1 + R1/R2]$, como a resistência R1 é responsável pela realimentação, decidiu-se variar a resistência R2. A resistência R1 ficou com o valor fixo de $100k\Omega$ e para a resistência R2 escolheu-se os seguintes valores, que se podem ver na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores das resistências para variar o ganho

	R1 ($k\Omega$)	R2 ($k\Omega$)	Ganho
Nível 1	100	10	11
Nível 2	100	47º	3.13
Nível 3	100	100	2
Nível 4	100	330	1.303

A desvantagem de usar a resistência R2 está no facto de não se conseguir um ganho menor que 1. O circuito ficou como se pode ver na fig. 4.10.

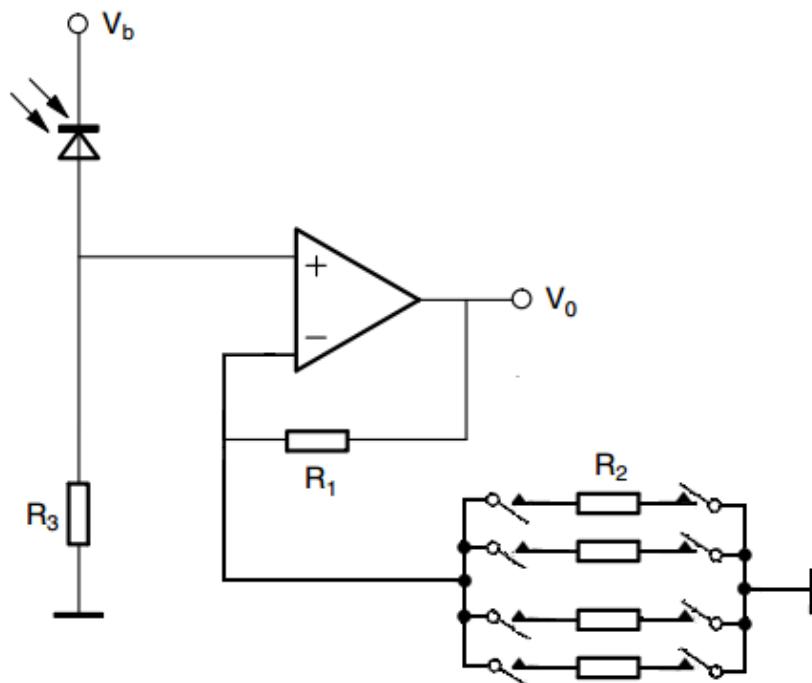


Figura 4.10: Circuito final

4.5 Suporte para os Sensores

Os sensores vão necessitar de um suporte físico de forma a poderem ser acoplados na roda. O suporte vai ser necessário não só para acoplamento dos sensores na roda, mas também para proteção contra os elementos, chuva e vento. Visto que os fotodiodos são relativamente frágeis e leves. O suporte deve garantir a proteção dos mesmos e ao mesmo tempo garantir que em caso de muito mau tempo, os sensores não são desviados da sua posição inicial.

O suporte deve realizar ainda uma outra função, a de sombrear um dos sensores sempre que a roda não esteja alinhada. Existem várias maneiras de criar este efeito, como se pode ver no Capítulo 2, na secção 2.5.1. A necessidade de criar sombra sobre um dos sensores está relacionada com o facto de ser necessário criar uma diferença de potencial entre os dois sensores, juntamente com o facto de os sensores em dias de muito sol irem saturar. Deste modo foi escolhido criar um suporte para sensores com a tipologia que se pode ver na fig. 4.11 onde se pode ver o suporte desenvolvido com a ajuda do programa *SolidWorks* que é um programa de CAD.

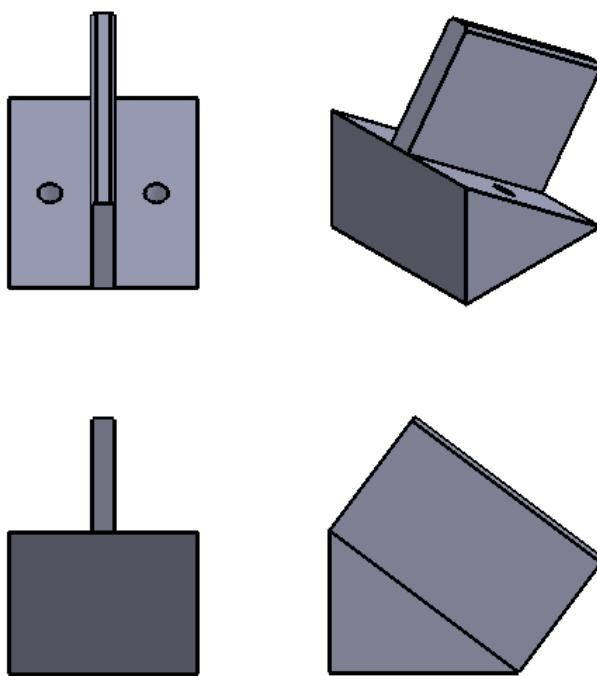


Figura 4.11: Suporte dos Sensores

Foi tido um especial cuidado com as dimensões da "pala" de forma a tentar garantir que a deteção do menor desvio em relação ao sol. Para tal foi feito um pequeno estudo para determinar as dimensões da "pala", e onde deveriam ser colocados os sensores, de forma a garantir que seria criada sombra sobre um dos sensores ao menor desvio. Na fig. 4.12 pode-se ver as três situações pretendidas.

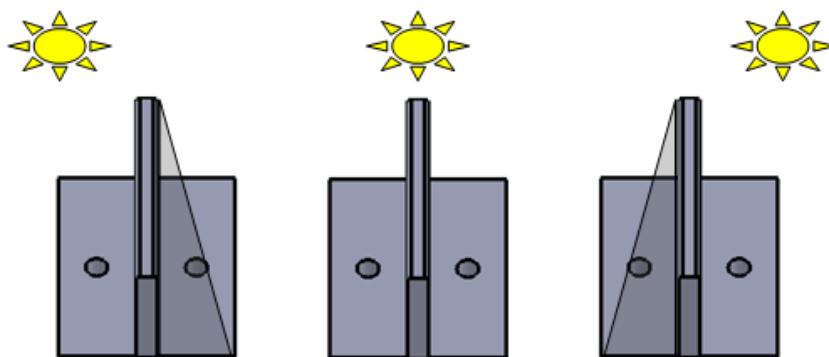


Figura 4.12: Suporte com Sombra

Para saber onde colocar os sensores e o tamanho da "pala" foi determinado o valor das seguintes variáveis, como se pode ver na fig. 4.13, a fig. 4.13 representa um dos lados do suporte do sensor.

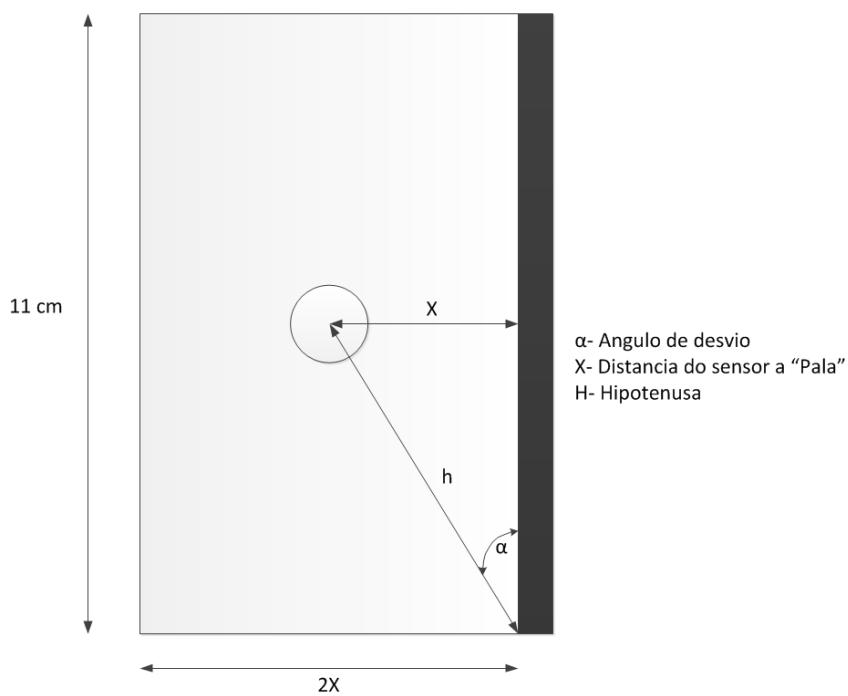


Figura 4.13: Calculo da distancia dos Sensores

De forma a calcular o ângulo de desvio(α) a partir do qual a "pala" vai produzir sombra, considerou-se um tamanho de 11cm para o comprimento da base. Deste modo ficou por determinar X, que seria a distância entre o centro do sensor e a "pala". Depois de determinado este

valor, o suporte do sensor iria ficar com uma área de 11cm * 4X cm.

Na tabela 4.5, pode ver-se como o comprimento de X vai afetar o ângulo de desvio. O ângulo de desvio corresponde ao cálculo da tangente de α .

Tabela 4.5: Cálculos para a colocação dos Sensores

X(cm)	Cat. Oposto(cm)	$\alpha(^{\circ})$
0.5	5.5	5.2°
1	5.5	10.3°
1.5	5.5	15.3°
2	5.5	20°
2.5	5.5	24.4°
3	5.5	24.4°
3.5	5.5	32.5°

Como é possível ver na tabela 4.5, quanto mais afastados da "Pala" forem colocados os sensores menor será o efeito da mesma e maior o angulo de desvio.

Um modelo deste suporte foi construído para teste e o seu aspeto pode ser visto na fig. 4.14.



Figura 4.14: Suporte para Testes

No suporte construído para teste, a distância dos sensores á "Pala"é de 1,5 cm, o que dá um ângulo de desvio de aproximadamente 15,3° . Este valor é bastante elevado, mas como se trata de um protótipo para testes, a tal facto não foi dada grande importância devido a natureza rudimentar do suporte da fig. 4.14.

4.6 Conclusões

Neste capítulo fez-se um estudo do tipo de componentes fotossensíveis que poderiam ser usadas neste sistema, chegando à conclusão que um fotodíodo parece ser a componente mais adequada neste caso.

Apesar de se ter um cuidado especial com a configuração a ser usada para o fotodíodo, de forma a tentar evitar a saturação, foi feito um estudo da melhor alternativa de variar o ganho do sistema de amplificação, optando-se antes por procurar um configuração que desse ganho para tentar ter um bom sinal nos dias nublados visto que com o suporte dos sensores se torna possível criar uma diferença entre os sensores, ao criar sombra sobre um deles.

O estudo sobre o suporte dos sensores, tornou possível perceber que seria melhor concentrar os esforços em conseguir bons sinais, em dias nublados do que tentar evitar a saturação nos dias com muito sol.

Capítulo 5

Sistema de Controlo e Implementação

Neste capítulo vai ser demonstrado o trabalho realizado na área de controlo da roda, este capítulo possui toda a informação referente aos conversores A/D utilizados para a aquisição do sinal dos sensores e todo o estudo realizado sobre as varias opções para o controlo.

A roda possui um autómato que é responsável tanto pela aquisição dos dados dos sensores indutivos de fim de curso, como pelo movimento da roda de forma a realizar o *tracking*. A aquisição do sinal do autómato é feita pelas entradas digitais que possui.

Ao usar os fotodíodos, um dos problemas que surgiu, foi o facto de ser necessário converter o sinal analógico que os sensores tem para um sinal digital, que o sistema de controlo fosse capaz de interpretar de forma a poder atuar com base nessa informação.

Nas subsecções deste capítulo pode encontrar-se toda a informação recolhida referente a estes pontos.

5.1 Plataforma de Controlo do Sistema

A introdução de vários sensores analógicos, como os fotodíodos, introduziu um novo requisito no sistema, que foi a necessidade de se ter um conversor de sinais analógicos para digitais.

O facto de ser necessário utilizar um conversor de sinais analógicos para digitais, mais o facto de a roda se encontrar na JPM, o que impossibilitava um fácil acesso ao mesmo, junto com a liberdade para se explorarem novas formas de executar o controlo da roda, levou a decisão de se procurarem alternativas à utilização do autómato. Deste modo surgiu a ideia de se utilizar um microcontrolador que já possuísse um conversor A/D e estivesse incluído numa plataforma de desenvolvimento.

Os requisitos que a plataforma de desenvolvimento deveria possuir são os seguintes:

- Possuir um conversor A/D com um mínimo de quatro entradas analógicas
- O conversor A/D deveria possuir resolução suficiente para no mínimo ter uma resolução de 10mV para a aquisição do sinal dos sensores

- Possuir entradas e saídas digitais, entre 5 e 10, para os sensores de fim de curso da roda e sinais de comando que fossem necessários gerar.
- Deveria ter um preço económico em relação ao autómato.
- Deveria ser simples e intuitivo de programar
- A alimentação do microcontrolador deverá estar entre os 5V e os 24V.

Depois de definido os requisitos que a plataforma de desenvolvimento deveria possuir, foram escolhidas as seguintes plataformas: Arduíno e a PIC.

Em seguida serão descritos as propriedades de cada uma destas plataformas.

5.1.1 Arduíno

O Arduíno é uma plataforma de desenvolvimento baseada nos microcontroladores do modelo ATmega, dependendo do modelo pode ter desde 14 até 54 saídas/entradas digitais, que podem ser usadas para gerar sinais PWM. Possui ainda entre 6 a 16 entradas analógicas com um ADC de 10 bits de resolução. Tem um cristal que funciona à frequência de 16MHZ.

Outra das características do Arduíno é o facto de ter vários tipos de memória, memória Flash , EEROM e SRAM.

O Arduíno é programado por uma linguagem própria muito semelhante à C.

A grande vantagem desta plataforma é o facto de ser completamente *Open Source*, podendo ser descarregado do site oficial os planos e as librarias necessárias à construção desta plataforma. O Arduíno possui ainda uma enorme variedade de acessórios e *shields* para as mais diversas aplicações.

Em média o preço de uma plataforma deste tipo ronda entre os pouco menos de 20 euros para o modelo mais fraco, até cerca de pouco menos de 60 euros para o modelo mais avançado , na fig.5.1 pode-se ver um Arduíno Uno.

5.1.2 PIC

Esta plataforma é baseada na plataforma Arduíno com a diferença de usar um microcontrolador da PIC. Neste caso para motivos de avaliação foi escolhido o modelo Chip Kit Uno32 que tem um microcontrolador do modelo PIC32.

O ambiente de desenvolvimento é igual ao do Arduíno e a forma física da placa é baseada na da plataforma Arduíno Uno.

A diferença entre este PIC e o Arduíno está essencialmente no processador que tem 4 vezes mais capacidade que o do modelo idêntico do Arduíno, ou seja um processador de 32 bits.

Este modelo possui 42 entradas/saídas digitais sendo cinco delas capazes de gerar sinais PWM, possui 5 entradas analógicas

O modelo ChipKit Uno32 tem um preço a rondar os 50 euros enquanto que o modelo o Arduíno Uno tem um preço de cerca de 25 euros. Na fig. 5.1 pode-se ver uma PIC Uno32.

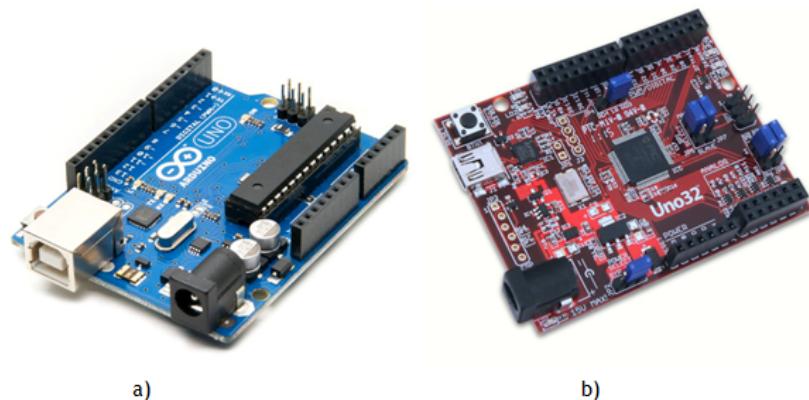


Figura 5.1: a) Um Arduíno UNO b) uma PIC UNO

Tabela 5.1: Características das Plataformas Estudadas

Características	Arduino Uno	Chip Kit Uno32
Microprocessador	Atmega328	PIC32MX320F128
Entradas/Saídas digitais	14	42
Entradas Analógicas	6	6
ADC	10 bits	10 bits
Preço*	±20	±50
Facilidade de Programação	Fácil	Média
Alimentação	5V	5V

* Depende do fornecedor

Na tabela 5.1 vem os principais dados de cada uma das plataformas:

Tendo em conta as características de ambas as plataformas o preço base, o número de entradas analógicas e a facilidade de programação, foram os fatores decisivos que levaram à preferência pela utilização do Arduíno Uno.

5.1.3 A/D

Após a escolha do dispositivo da Plataforma de Controlo foi necessário ter alguns cuidados aquando da aquisição de dados a partir do ADC do Arduino.

O ADC do arduino possui 10 bit, o que confere 1024 divisões. Como o sinal dos sensores vai ter uma tensão entre 0 e 5V é necessário converter estes valores para a escala que queremos pela fórmula que se vê.

$$Tensão do Sensor = Sinal do ADC \times \left[\frac{5}{1023} \right] \quad (5.1)$$

Pela fórmula de cima pode compreender-se que o valor lido pelo ADC vai estar numa escala entre 0 e 1023, a esse valor vai-se multiplicar o mínimo valor de resolução do Arduíno, que será $5/1023 = 0,0048$.

5.2 Máquina de Estados

Ao substituir o autómato, passou a ser necessário implementar o código responsável pela deteção da posição de maior radiação, como código responsável pelo movimento da roda. O código de controlo da roda, na solução da JPM estava implementado em *Ladder*. Tal não é possível de fazer com um Arduíno, por isso foi tomada a decisão de se implementar o código, segundo a lógica de uma máquina de estados, em que um estado está ativo de cada vez e é necessário que se realize algum acontecimento para se mudar para outro estado.

A máquina de estados foi implementada de forma a aproveitar a forma como o Arduíno corre o código. O código no Arduíno corre em duas funções distintas; a função "*void setup*" e a função "*void loop*". A função "*void setup*" corre quando o Arduíno começa a ser alimentado e quando o sistema é reiniciado. Serve para inicializar as variáveis, configurar as portas usadas e inicializar bibliotecas que possam vir a ser necessárias. A função "*void loop*" ao contrário da "*void setup*" corre de forma contínua e em "*loop*". É nesta função que corre o código que permite controlar a roda. Nesta função é onde se dão as ordens de movimento e onde se faz a leitura dos valores lidos pelas entradas analógicas ligadas aos sensores.

Foi decidido implementar o código da roda segundo a lógica de uma máquina de estados devido à facilidade que tal escolha vai proporcionar à implementação e testes que venham a ser feitos no futuro. Ao implementar uma máquina de estados, torna-se possível saber em que estado se está o que está a acontecer em cada momento, de tal modo será possível identificar erros e possíveis melhorias de uma forma mais rápida e simples. Tem também a vantagem de tornar o código simples e organizado de forma a que no futuro possa ser alterado ou se tal vier a ser necessário implementado em outra plataforma de controlo.

A máquina de estados que se pode ver na figura tem 10 estados. É a versão do código usada para os testes na roda, é um código simples que pode ser dividido em quatro partes distintas. No estado 1, é onde se realiza a configuração e inicialização das portas a ser usadas é também neste estado que se inicializam as variáveis. Depois temos o estado 2 que vai ser o estado onde se faz a escolha entre começar o *tracking* ou configurar o ganho dos sensores. Nos estados 3 a 6, faz-se a configuração do nível de ganho, tal é feito ao ler os valores dos A/D e ao compará-los com o estado anterior e a referência que foi colocada.

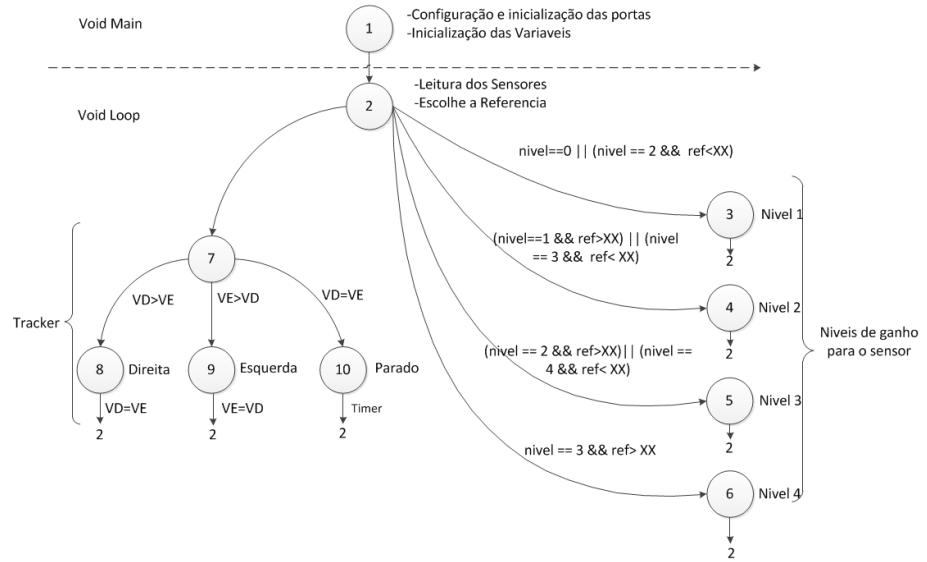


Figura 5.2: Máquina de estados implementada

Os estados 7 a 10 é onde se faz o *tracking*. O estado 7 funciona como um estado de referência que tem por fim evitar voltar ao estado 2 sem que tal não seja necessário. Nos estados 8, 9 e 10 faz-se o controlo da roda ao dar as ordens para que lado esta se deve mover.

Na fig. 5.2, pode ver-se a máquina de estados implementada.

A máquina de estados da fig. 5.2, foram ainda acrescentados mais quatro estados. Nestes estados adicionais é onde se faz o controlo de segurança para que a roda não rode mais do que o permitido, e onde se faz a aquisição do sensor crepuscular. Na fig. 5.3, pode-se ver esses estados adicionais.

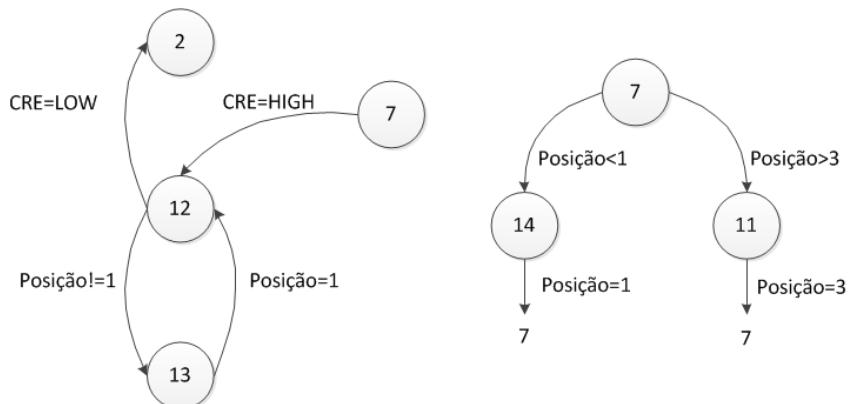


Figura 5.3: Estados de leitura dos sensores indutivos e crepuscular

Os estados 12 e 13 têm a função de receber o sinal do sensor crepuscular. Quando este está no sinal lógico positivo vai bloquear o sistema de *tracking* e colocar a roda na sua posição inicial.

Os estados 14 e 11, têm a função de um contador onde se incrementa e decrementa o número de vezes que foi detetada a passagem pelo sensor indutivo. Quando o número de vezes é superior a três ou inferior a um a roda bloqueia e dá sinal que não é possível rodar naquele sentido.

5.3 Backtracking

A roda solar implementada pela JPM é capaz de fazer o seguimento do sol. Tal facto vai aumentar a produção global da mesma. Para além do seguimento normal do sol a roda é também capaz de fazer *backtracking*, que consiste em criar um desvio proposto em relação à posição do sol. Tal facto parece ser à primeira vista contra produtivo, mas se for tido em conta o facto de a roda dispor de três séries de painéis é fácil perceber que em certas horas do dia, conforme o sol perde altura, ocorrerá a situação em que as *string* que se encontram atrás da string principal vão estar sombreadas. Tendo em conta esta situação pode-se considerar que provocar o desvio pode vir a gerar uma maior produção da roda do que na situação em que a roda está perfeitamente alinhada.

A ideia de provocar um desalinho na roda pode ser bom ou mau conforme o momento do dia. Por exemplo, ao meio-dia ter a roda alinhada é a situação ideal visto que o sol está na sua altura máxima em relação ao horizonte, mas é fácil perceber que passado algum tempo, com a perda de altura do sol, provocar um desvio na roda que permita que nenhuma das *string* esteja sombreada pode significar um ganho muito superior em relação à situação de se ter a roda perfeitamente alinhada. Para perceber este facto é preciso ter em conta que o diâmetro da roda é fixo, tornando deste modo o espaço disponível fixo o que leva à necessidade de colocar os painéis mais próximos uns dos outros.

Ao implementar a funcionalidade de *backtracking* é preciso ter em conta que tal situação vai estar dependente de um bom sistema de *tracking*. Caso o mesmo falhe num sistema que está em malha aberta provoca um desvio na roda vai apenas agravar o problema. Uma análise a esta funcionalidade torna evidente que implementar tal funcionalidade num sistema que recorre a sensores para fazer o *tracking* vai ter vantagens em relação a um sistema como o da JPM que faz o seu seguimento através de um calendário astronómico, que caso entre em erro ao realizar o *backtracking* só irá agravar o problema e não terá o *feedback* necessário para o perceber.

Uma solução para reproduzir a funcionalidade de *backtracking* com sensores não seria algo de grande dificuldade. Para tal foi proposto que se colocasse mais quatro sensores iguais aos usados para o *tracking*. Os sensores seriam colocados do seguinte modo, como pode ver-se na fig. 5.4.

O objetivo de tal disposição seria o de comparar o valor do par de sensores, ao comparar o valor do sensor colocado no topo do painel com o de baixo, seria possível perceber pelos valores lidos se o painel estava sombreado ou não. O sensor superior iria funcionar como a referência e no caso do sensor inferior o registar valores menores seria o sinal de que um desvio deveria ser introduzido.

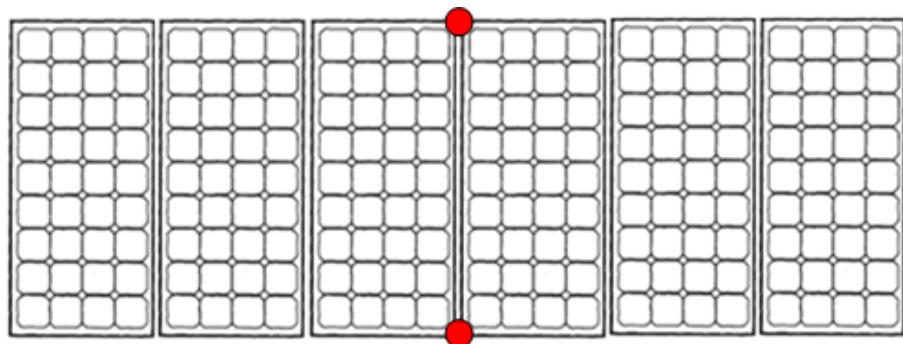


Figura 5.4: Posição dos sensores para a o *back-tracking*

De forma a perceber para que lado seria provocado o desvio, a leitura dos sensores seria realizada no fim de cada busca pelo sol e caso fosse detetada sombra, o movimento a realizar seria no sentido contrário ao realizado anteriormente, ou seja, caso os sensores de *tracking* dessem ordem para a direita e fosse detetada sombra, seria dada a ordem de movimento para a esquerda, até os sensores de sombra estarem iguais.

Apesar da solução ter sido aceite pela JPM, devido a dificuldade de realizar testes foi decidido não avançar para a parte experimental desta solução, sendo deste modo impossível confirmar se esta seria uma solução viável.

5.4 Protótipo

No seguimento do trabalho foi decidido desenvolver um sistema alternativo ao método de "*tracking*" usado na JPM. Deste modo foi tomada a decisão de desenvolver um pequeno protótipo que fosse capaz de seguir o sol, e onde fosse possível testar os sensores e sistema de controlo escolhido.

O objetivo do protótipo não iria estar limitado somente a testes mas teria também como segundo objetivo a ideia de desenvolver um sistema de "*tracking*" que iria atuar de forma separada da roda. O protótipo teria um pequeno motor que iria rodar conforme a informação dos sensores, após alcançar a posição onde deveria ter maior radiação disponível. O sistema de controlo do pequeno motor passaria a informação de posição onde se encontra o sol e deste modo a roda seria capaz de rodar para a posição pretendida, passando deste modo a existir dois sistemas independentes, um para o "*tracking*" e outro para a geração de energia.

As vantagens que se previam em optar por este sistema estavam no facto de se poupar energia com a movimentação da roda, que iria rodar apenas para a posição pretendida e o facto de no caso de existir mais do que um a roda solar, se poderia usar o mesmo sistema de "*tracking*" para as varias rodas, conseguindo deste modo um ganho significativo do ponto de vista económico visto que se passaria a ter um sistema de "*tracking*" comum a todas as rodas.

Para a construção do protótipo foi feito um pequeno estudo comparativo entre diversos tipos de motores. O motor deveria ser pequeno, ter um preço acessível e de preferência possuir uma

forma de determinar de forma quantitativa o movimento realizado, ou seja, caso rodasse para a direita o sistema de controlo deveria ser capaz de perceber quantos graus rodou o motor. Devido à baixa potência necessária para o motor, visto que a sua finalidade seria rodar os sensores, foi escolhido um motor DC.

Após uma analise das opções existentes foi fácil chegar à conclusão que o tipo de motor que melhor ia de encontro aos requisitos referidos, seria ou um servomotor ou um motor de passo, ambos os tipos de motores tem o seu movimento escalonado, o que torna possível saber o número de graus que rodaram. No caso do motor de passo esse escalonamento é feito pelo número de passos do motor e no caso de um servomotor o quantificado pelos impulsos que o servo motor vai receber, sendo que o período do impulso vai determinar o movimento tornando o mesmo quantificável. Na fig. 5.5 pode ver-se tanto um servomotor como um motor de passo.



Figura 5.5: a) *Stepper motor* b) *Servo motor*

A proposta de desenvolver este protótipo foi feita a JPM que a recusou, preferindo deste modo dar preferência a um estudo mais focado sobre o sistema já existente.

5.5 Implementação do controlo com sensores na roda

De forma a poder implementar o sistema proposto na roda da JPM, foi necessário realizar algumas adaptações ao sistema desenvolvido e dar robustez ao sistema, visto que o mesmo vai ser implementado ao ar livre e vai estar sujeito às condições ambientais que se fizerem sentir.

O sistema tem como objetivo substituir o autómato que faz o controlo da roda, como foi visto no capítulo 3, passando o mesmo a ser feito pelo Arduíno,fig. 5.6.

Para implementar este sistema, o primeiro facto a ter em conta é o sistema ter uma alimentação de 5V tanto para o Arduíno como para os sensores, enquanto que no local a alimentação disponível é de 24V, tal problema foi facilmente resolvido com a utilização de um regulador de tensão de 24V para 5V.

Outro problema que fez notar foi o facto de o variador de velocidade receber sinais de 24V, o que não é possível com o Arduíno, para isso foi desenvolvido um pequeno sistema com relés. Para

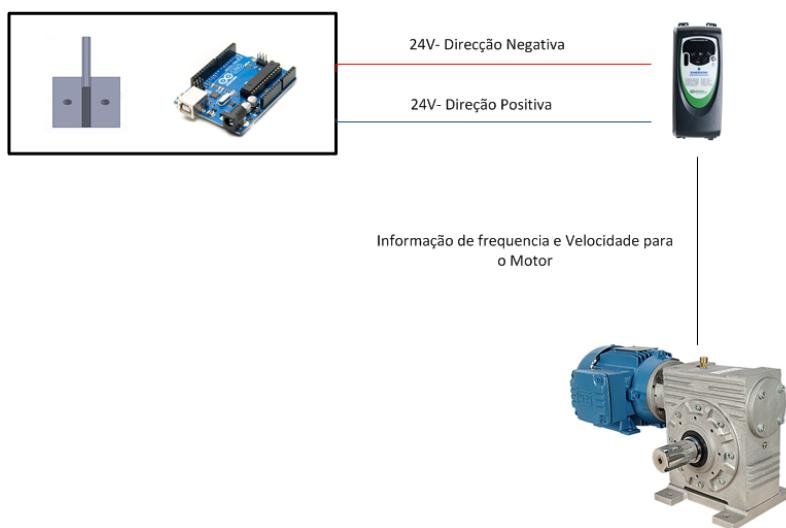


Figura 5.6: Sistema com controlo a partir do arduino

colmatar tal facto, o circuito vai ser mostrado mais adiante. Os sensores indutivos e crepuscular da roda, também tinham valores na ordem dos 24V o que obrigou a uma adaptação dos mesmos.

De forma a dar uma maior robustez e modularidade ao sistema, todos os circuitos foram implementados em PCB.

5.5.1 PCBs implementadas

PCB ou *Printed circuit board* são placas de circuitos impressos onde se desejam os circuitos elétricos a ser usados. São normalmente feitas com um material não condutor, onde são desenhadas pistas de cobre que vão garantir a conectividade entre as componentes.

Foi tomada a decisão de criar duas PCB distintas na primeira fase de testes. Esta decisão foi tomada pelo facto de não se ter a certeza a altura da implementação, de como se faria a ligação entre o sistema desenvolvido e a roda da JPM. Por esse motivo foram criadas duas PCBs distintas uma seria responsável pela conversão de 24V para 5V e pelas relés que passam os comandos do Arduíno para o variador de velocidade, a outra PCBs teria o circuito dos sensores.

Na fig. 5.7, pode ver-se a PCB dos sensores, onde os circuitos já foram explicados anteriormente e na fig. 5.8, pode ver-se a PCB com os relés.

Na fig. 5.9 pode-se ver o circuito elétrico implementado para a relé.

O Arduíno é responsável por dar um sinal lógico entre um 1 e 0. A resistência de $10k\Omega$ tem como função para evitar o fecho da relé.

O díodo, que se pode ver tem o efeito de roda livre, de forma a proteger o arduino da corrente de desmagnetização da relé. Caso o díodo não existisse, havia a possibilidade do arduino ser danificado.

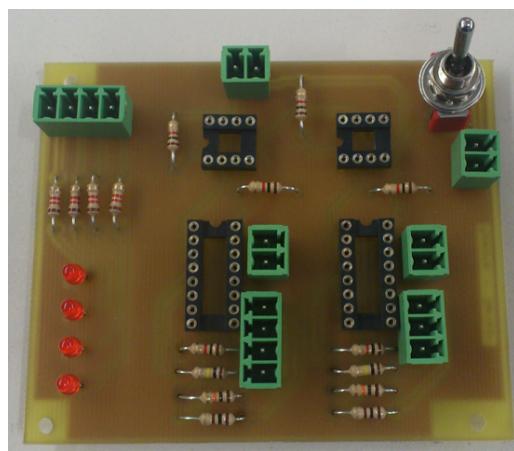


Figura 5.7: PCB dos sensores

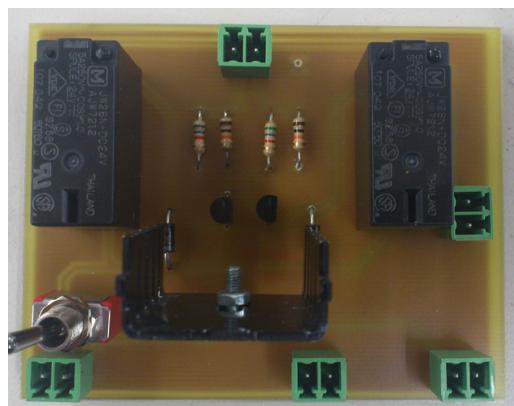


Figura 5.8: PCB das reles

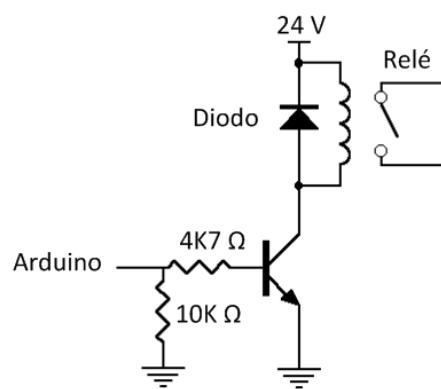


Figura 5.9: Circuito da relé

Nesta PCB existe ainda um regulador de tensão de 24V para 5V do modelo TS7805 e um interruptor, que tem por fim cortar a alimentação das relés. Como as PCB são para testes este

interruptor tem o objetivo de cortar a alimentação em caso ocorra algum problema.

As PCB e o arduino ficam ligados como se pode ver na fig. 5.10.

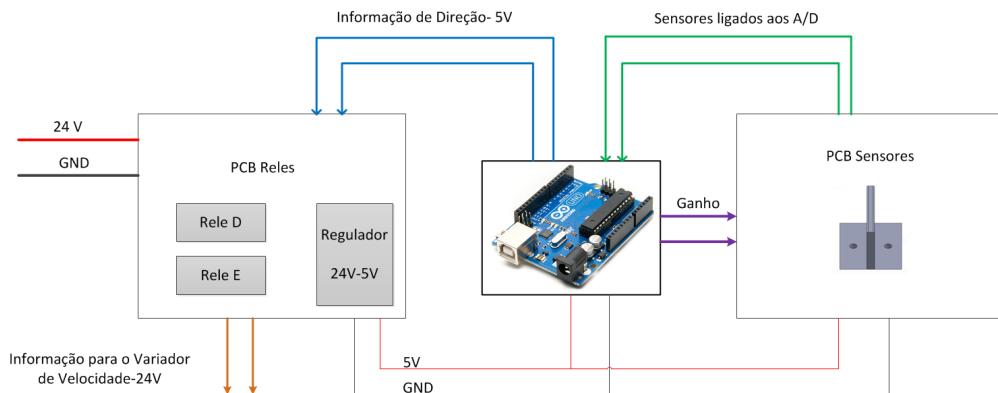


Figura 5.10: Ligação entre as PCB

Após os testes iniciais para comprovar que o sistema faz o "tracking" e que funcionava com o sistema já implementado a JPM, pediu que se passasse tudo para uma PCB única, que evitasse o uso de fios e onde fosse possível ligar diretamente o Arduíno.

A PCB completa, vai permitir encaixar o Arduíno diretamente na PCB, permitindo deste modo reduzir substancialmente o uso de cabos. A nova PCB foi feita a pensar na possibilidade de se ligarem mais sensores para o *tracking* a placa, na fig. 5.11 pode ver-se o aspeto da PCB com o arduino acoplado.

Na PCB foi também adicionada os circuitos necessários à ligação dos sensores indutivos e crepusculares que existiam na roda. Estes sensores tem um sinal analógico de 24V, mas funcionam como sinais digitais ou seja 0 ou 1, para quando está desligado ou ligado. Como o Arduíno nas suas entradas digitais apenas permite sinais até 5V foi preciso um divisor de tensão que reduzisse a tensão de 24V para 5V. De forma a garantir a proteção do Arduíno foi ainda adicionado um seguidor de tensão antes da entrada do Arduíno como se pode ver na fig. 5.12.

5.6 Colocação dos sensores

O sistema desenvolvido foi testado na roda da JPM. Antes de realizar os testes foi necessário decidir onde colocar os sensores na roda.

Após observar a mesma e por iniciativa da JPM foi decidido colocar os sensores na string da frente, mesmo no centro da mesma. Este local foi escolhido por ter boa visibilidade e não estar obstruído.

De forma a colocar os sensores e as PCB de comando junto da roda e a dar alguma proteção ao sistema, visto que ia ficar ao ar livre e sujeito aos elementos, colocou-se as PCB e o Arduíno dentro de uma pequena caixa de proteção. Esta caixa ia ficar colocada num suporte metálico, que foi adicionado à estrutura da roda, como pode ver-se na fig. 5.13

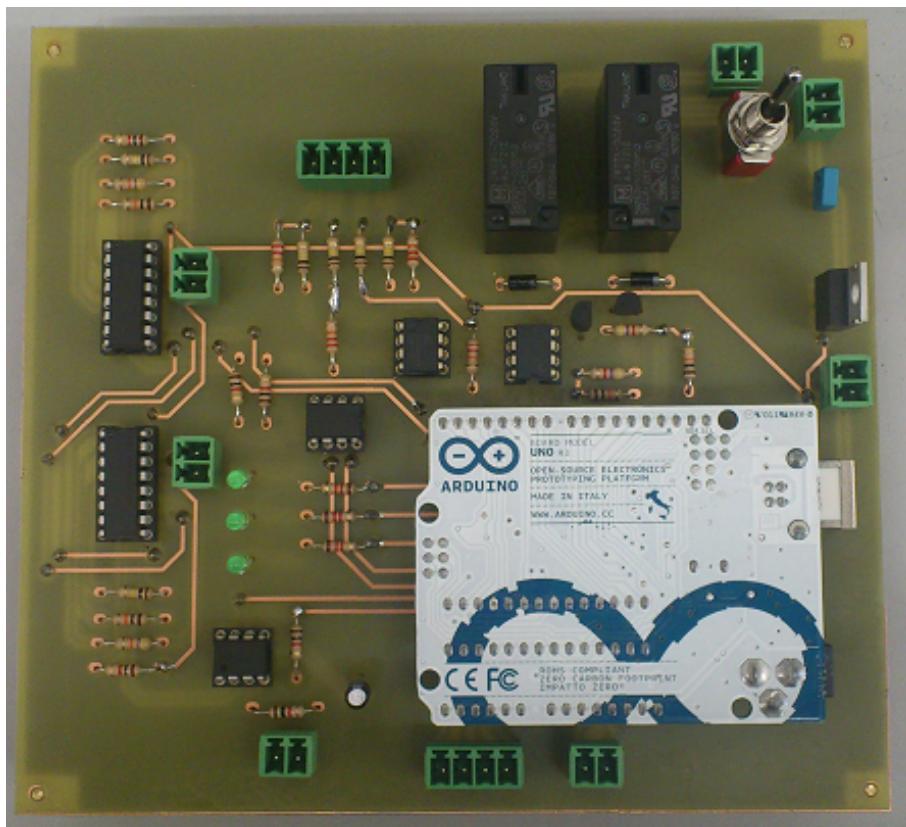


Figura 5.11: PCB com arduino acoplado

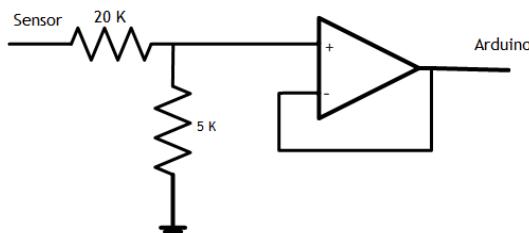


Figura 5.12: Circuito para os sensores indutivos

5.7 Teste e resultados

Devido à dificuldade em realizar testes, pelo facto da roda estar num local de difícil acesso, por fatores climatéricos e de segurança,visto que sempre que chovia, deixava de ser possível trabalhar na roda, e pela própria distância entre a FEUP e a JPM ,não foi possível realizar tantos testes como os pretendidos.

Os testes realizados na roda ocorreram nos dias 25 e 26 de Fevereiro. É de salientar que foram dois dias pouco nublados e com sol abundante, tornando-se em dias ideais para testes com um sistema que usa sensores.



Figura 5.13: Suporte e posição dos sensores

Os resultados do dia 25, podem ser visto na fig. 5.14, e os resultados de dia 26 na fig. 5.15. Nas figuras 5.14 e 5.15 pode ver-se uma comparação entre a instalação fixa da JPM e o sistema desenvolvido as imagens contêm a potência produzida que se estava a ler no inversor através do *Sunny Beam* no momento em que foi feita a medição.

É de notar nestas imagens que os dados registados são desde o momento em que o sistema com sensores foi ligado até ao final do dia. No dia 25 o sistema foi ligado às 10h00 e no dia 26 foi ligado as 9h00, esta diferença é importante e vai ser analisada mais à frente.

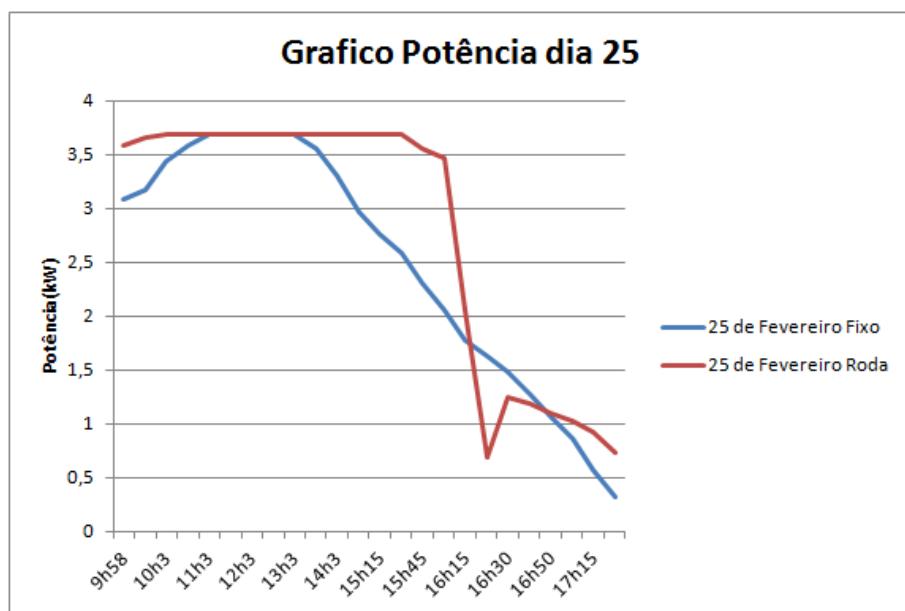


Figura 5.14: Gráfico da Potência dia 25

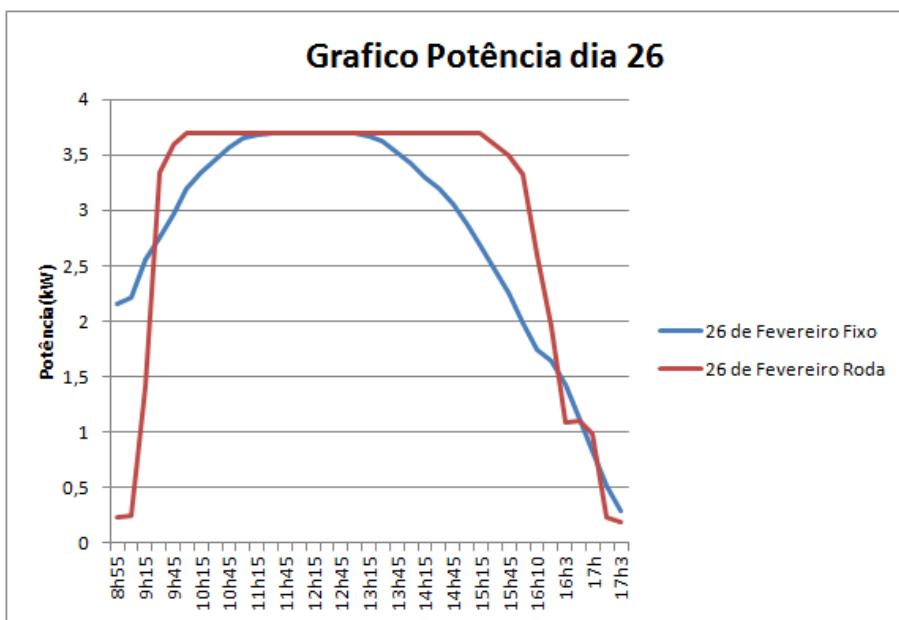


Figura 5.15: Gráfico da Potência dia 26

Os gráficos obtidos da potência permitem perceber, que os resultados são bastante satisfatórios para ambos os dias. Percebe-se, que a roda consegue chegar ao pico de potência muito mais rápido, e mantê-lo durante mais tempo que o sistema fixo. Estes dados são conformes com o que foi estudado no capítulo 2.

Nestes gráficos pode ver-se ainda uma queda a pique da potência a partir das 16h10. Em ambos os casos, e uma subida a pique no caso do dia 26 a partir da 9h30 da manhã. Tal facto é provocado pelo sombreamento das *string* de oito painéis, devido ao facto da roda estar voltada para o sol e as *strings* terem pouca distância entre si, como pode ver-se na fig. 5.16.



Figura 5.16: Sombra nas *strings*

Em seguida podem-se ver as fig. 5.17 e a fig. 5.18 com os gráficos da energia gerada ao longo do dia. Em ambos os dias e com os dados referentes tanto ao sistema fixo como aos da roda.

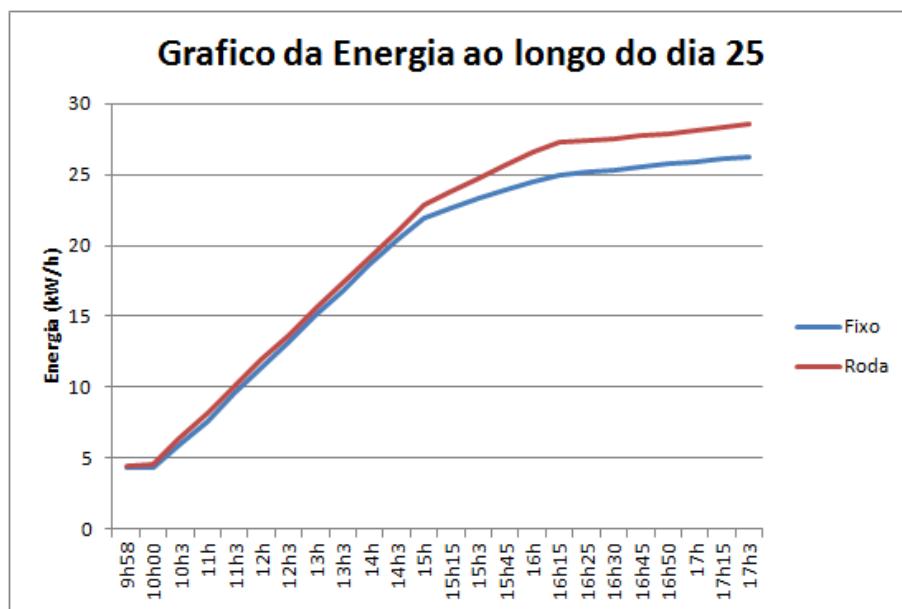


Figura 5.17: Gráfico da energia ao longo do dia 25

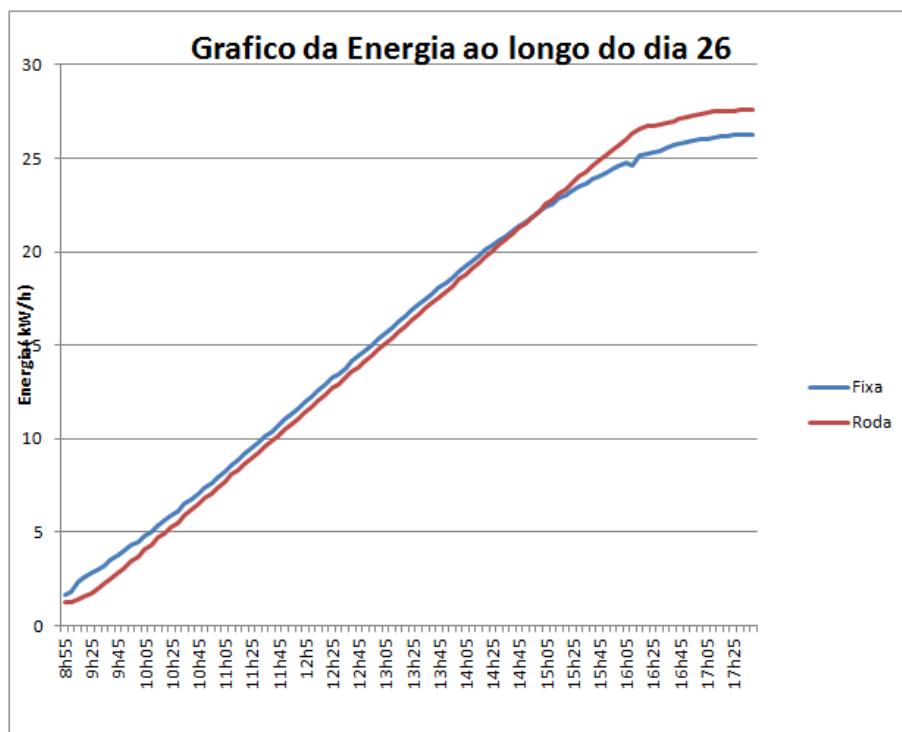


Figura 5.18: Gráfico da energia ao longo do dia 26

A fig. 5.17 e a fig. 5.18 mostram a evolução da energia gerada ao longo do dia, tem como objetivo dar a perceber como foi a evolução na produção e permitir perceber a partir de que momento começou a notar-se o efeito do sistema implementado na produção diária.

Como não se consegue ver em pormenor o valor da energia gerada no final do dia, pode ver-se esses valores na tabela 5.2, a tabela tem os valores da energia total gerada ao fim dos dias em causa e a diferença entre ambas as configurações.

Tabela 5.2: Energia gerada ao longo dos dias 25 e 26

	Fixo(kW/h)	Roda(kW/h)	Diferença	Percentagem
Dia 25	26.21	28.53	2.32	8.85%
Dia 26	26.26	27.57	1.31	4.99%

Numa análise preliminar é fácil perceber que o seguidor consegui melhores resultados que a instalação fixa, conseguindo no dia 25 mais 2,32 kWh e no dia 26 mais 1,31kWh, mesmo assim é importante fazer um estudo mais profundo aos resultados, visto que para dois dias com as mesmas condições a diferença em nível de energia gerada é de quase o dobro. Nos gráficos da potência, fig. 5.14 e fig. 5.15, é possível observar que em ambos os casos a potência aumenta de forma abrupta e diminui de forma abrupta a partir de certas horas. Tal facto acontece devido ao sombreamento das string. A partir das 9h30 as *strings* deixam de estar sombreadas e voltam a estar novamente sombreadas a partir das 16h10, o sombreamento das *string* vai provocar uma queda a pique da potência, para complementar os dados das figuras 5.14 e fig. 5.15, pode ver-se os mesmos graficos em separados e tirados diretamente do *Sunny Beam*, fig. 5.19, fig 5.20, fig. 5.21 e fig. 5.22.

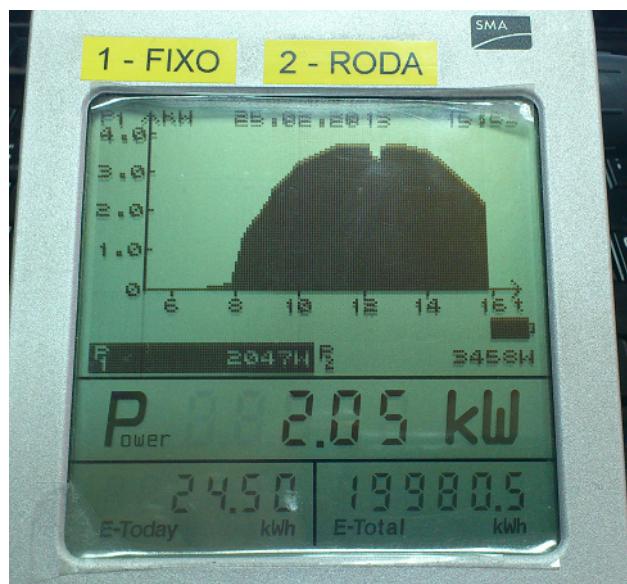


Figura 5.19: Gráfico da potência ao longo do dia 25 da instalação fixa

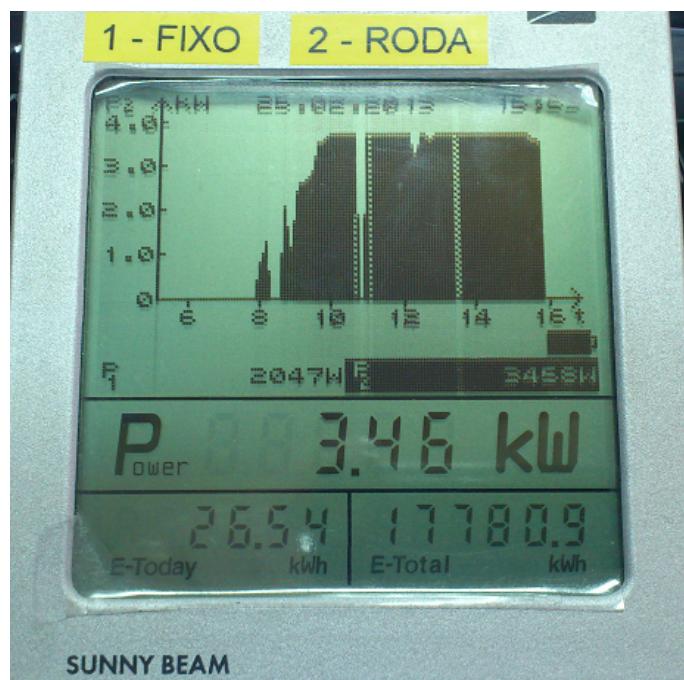


Figura 5.20: Gráfico da potência ao longo do dia 25 da roda

Na fig. 5.20 é importante dizer, que no gráfico, nos momentos em que a potência parece ter caído a pique no período das 10h às 12h, não se tratou de um problema do seguimento, mas sim do inversor a atuar, segundo a JPM, visto que foi feita a verificação física de que a roda continuava virada para o sol.

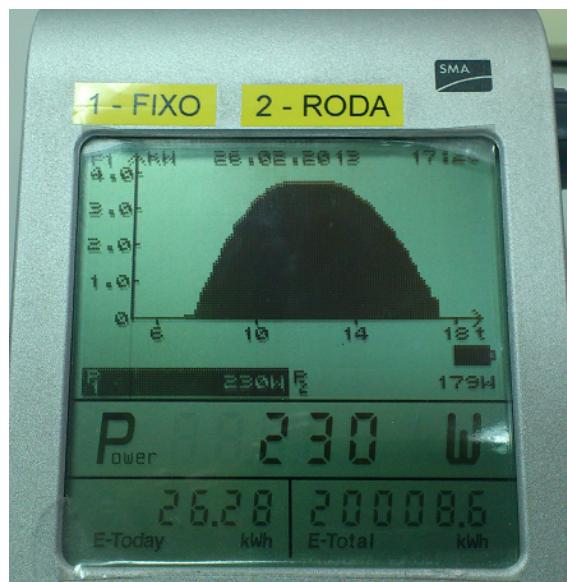


Figura 5.21: Gráfico da potência ao longo do dia 26 da instalação fixa

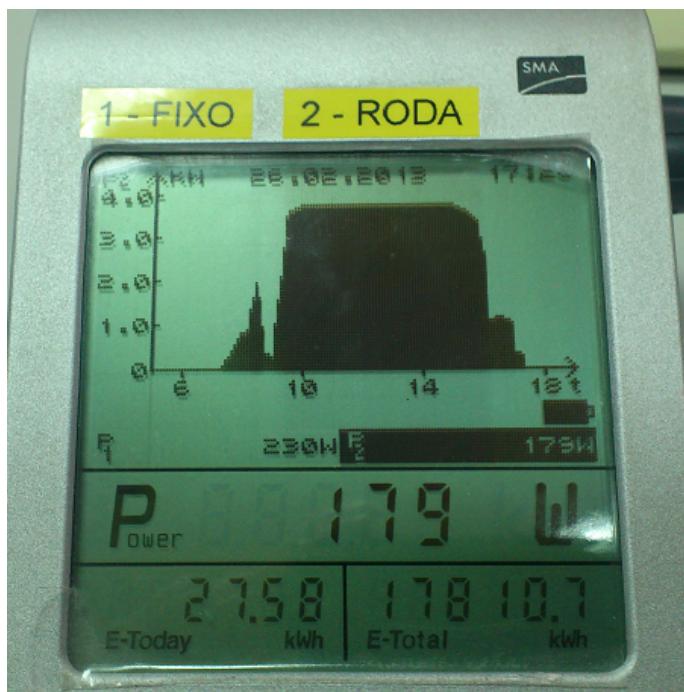


Figura 5.22: Gráfico da potência ao longo do dia 26 da roda

É de salientar na fig. 5.22 a queda abrupta da potência lida no inversor, no momento em que foi ligado o sistema de tracking. A queda abrupta ocorre às 9h00.

Devido ao facto das *strings* ficarem sombreadas, foi importante analisar os resultados para os períodos em que não estão sombreadas, das 9h30 até às 16h30, na tabela 5.3, pode-se ver esses dados para o dia 25 e na tabela 5.4, pode ver-se esses dados para o dia 26.

Tabela 5.3: Energia gerada ao longo dos dias 25 no período sem sombra

	Horas	Fixo	Roda	Diferença	Percentagem
Dia 25	9h30	4.31	4.5	0.19	
	16h30	25.3	27.52	2.22	
Energia período		20.99	23.02	2.03	9,67%

Tabela 5.4: Energia gerada ao longo dos dias 26 no período sem sombra

	Horas	Fixo	Roda	Diferença	Percentagem
Dia 26	9h30	3.02	1.94	1.08	
	16h30	25.43	26.78	1.35	
Energia período		22.41	24.84	2.43	10,84%

Nos dados da tabela, é importante salientar, que os dados da coluna que contêm a diferença entre os resultados obtidos em ambas as instalações é o módulo dessa diferença.

Esta tabela é importante, pois permite perceber que apesar de no dia 26 se ter produzido pouco mais de metade do que foi produzido no dia 25, a realidade é que no período em que não existe sombreamento, a energia produzida foi maior no dia 26.

Uma observação do gráfico da potência e a de energia para este dia permite perceber que a perda de produção total para este dia, dia 26, deve-se ao período da manhã. Nesse dia ao ligar o sistema, a roda mais cedo, começou-se o dia com sobra nas *strings*, o que fez com a potência gerada nesse intervalo de tempo, fosse muito díspar entre a instalação fixa e a roda. Outro fator para essa diferença, na energia produzida, deve-se ao facto de como se esteve a fazer testes no dia anterior, a roda ter sido deixada bloqueada, numa direção, que a deixava numa situação pior do que a instalação fixa.

Dos dados observados é possível perceber que devido a configuração da roda, a sombra irá ser sempre um problema, mas é de salientar que os ganhos nos períodos sem sombra foram de cerca de 10% um valor significativo.

5.8 Conclusões

Neste capítulo pode ver-se o colmatar de todo o trabalho realizado ao longo da dissertação.

Ao longo do capítulo, foi referido o estudo e o trabalho realizado para tornar possível implementar o sistema desenvolvido na instalação física da JPM.

Das conclusões, que se podem tirar do trabalho demonstrado, neste capítulo, é o facto de o Arduíno ter demonstrado ser uma ferramenta bastante robusta e fácil de programar, mostrando ser mais do que suficiente para o projeto desenvolvido.

Em relação à implementação do sistema na roda da JPM pode dizer-se, que as PCB implementadas foram capazes de fazer a ligação entre o arduino, os sensores e o sistema já existente na JPM.

Pode concluir-se que os resultados obtidos, apesar de poucos, permitem retirar conclusões importantes sobre o sistema desenvolvido.

Os resultados obtidos demonstram uma melhoria em relação a uma instalação fixa na ordem dos 10%, para os períodos sem sombra.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo encontram-se as principais conclusões do trabalho realizado.

Ao longo do trabalho realizou-se um estudo dos principais tipos de fotosensores. Estudaram-se das suas características e uma comparação entre os diversos fotosensores identificados. Deste estudo foi possível concluir que os fotodíodos são os que melhor se enquadram para a aplicação em causa. Dos testes realizados conclui-se que é possível conceber um sistema de *tracking* recorrendo a este tipo de sensor.

De forma a implementar o controlo da roda foi necessário realizar um estudo de possíveis plataformas de desenvolvimento onde fosse possível implementar a máquina de estados utilizada para controlar a roda. A plataforma de desenvolvimento escolhida foi o arduino, esta plataforma permite uma prototipagem rápida, visto que tem um suporte rico em bibliotecas e utilizadores.

Dos testes realizados pode concluir-se que os resultados foram satisfatórios e permitiram tirar conclusões, estas conclusões vêm descritas na secção seguinte.

6.1 Principais conclusões

Ao longo desta dissertação foi possível tirar as seguintes conclusões:

- Os fotodíodos com sensores, permitem a implementação de um sistema de *tracking* com resultados relevantes, mas conclui-se que caso fosse necessário implementar um sistema com um elevada precisão os mesmos não seriam uma boa opção visto que saturaram a partir de valores na ordem dos 5000 lux, um valor baixo quando comparado com um dia de Sol.
- Neste trabalho conclui-se que o arduino como uma plataforma de controlo para a roda apresenta uma série de vantagens quando comparado com outras plataformas existentes no mercado nomeadamente o facto do arduino ser uma ferramenta *Open Source* que pode ser utilizada por todos sem custos adicionais
- Dos resultados obtidos conclui-se que o sistema de *tracking* apresenta vantagens em relação a um sistema fixo, com resultados superiores em produção de energia entre os 9% e os 5% quando tido em conta o dia todo, e uma melhoria na ordem dos 10% para o período sem sombreamento das *strings*.

- Com a configuração que a roda têm, com um espaço limitado entre as *strings* torna-se impossível obter resultados iguais aos que foram vistos na fig. 2.12. O que consegue concluir é que para a roda da JPM vir a ser aproveitada no seu máximo será necessário implementar *back-tracking*

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Ao longo do trabalho foram identificados varias áreas que podem ser desenvolvidas no futuro de forma a melhorar o sistema, as propostas de desenvolvimento estão listadas a seguir:

- No trabalho desenvolvido ficou claro que o sistema da JPM só poderá ser avaliado e aproveitado apos a implementação de *back-tracking*, com tal este ponto fica pendente como o principal desenvolvimento a ser executado num trabalho futuro.
- Realizar uma comparação entre os dois sistemas de *tracking* o que JPM desenvolveu e o que foi desenvolvido, só deste modo será possível perceber se o trabalho realizado trás vantagens.
- Juntar os dois sistemas desenvolvido e perceber se existe alguma vantagem em utilizar por exemplo o sistema da JPM para os períodos críticos em que as *strings* têm sombra e o sistema com sensores para o resto do dia.
- Criar um sistema de recolha de dados que permita criar um histórico tanto da energia produzida como da potência que se esta a ler no inversor.
- Ter um sistema independente para localizar o sol que seja capaz de passar essa informação a roda, a vantagem de tal sistema seria de no caso de se ter mais que uma roda se poder usar o mesmo sistema de *tracking* para todas, conseguindo deste modo uma serie de vantagens económicas.

Referências

- [1] Responding to climate Change. Responding to climate change 2009 & restriction map, November 2012. URL: <http://www.rtcc.org/2009/html/renew-solar-1.html>.
- [2] Atmospheric effects. Atmospheric effects, November 2012. URL: <http://pvcdrom.pveducation.org/SUNLIGHT/ATMOSP.HTM>.
- [3] wiki.naturalfrequency.com. Solar position: Variation, November 2012. URL: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Seasonal_variation.
- [4] PV EDUCATION.ORG. Elevation angle, November 2012. URL: <http://http://www.pveducation.org/properties-of-sunlight/elevation-angle>.
- [5] Salah Abdallah e Salem Nijmeh. Two axes sun tracking system with plc control. *Energy Conversion and Management*, 45:1931 – 1939, 2004. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890403003066>, doi:10.1016/j.enconman.2003.10.007.
- [6] Thomas Huld, Tomáš Cebecauer, Marcel Šúri, e Ewan D. Dunlop. Analysis of one-axis tracking strategies for pv systems in europe. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(3):183–194, 2010. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.948>, doi:10.1002/pip.948.
- [7] Krisztina Leban Alin Argeseanu, Ewen Ritchie. A new solar position sensor using low cost photosensors matrix for tracking systems. *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, Issue 6, Volume 4, páginas 189–198, Junho 2009.
- [8] L. Shengyi G. Lijun, R. A. Dougal e A. P. Iotova. Parallel-connected solar pv system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, páginas 1548–1556, Junho 2009.
- [9] Jesús P. Vara JUSTO R. Calvo Francisco J. Gómez Gil, Miguel Martín. A review of solar tracker patents in spain. *Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on RENEWABLE ENERGY SOURCES*, páginas 292–297, Junho 2009.
- [10] C Alexandru, C.; Pozna. Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system. *Automation, Quality and Testing, Robotics*, vol. 3, páginas 434–439, Maio 2008.
- [11] Krisztina Leban Ewen Ritchie, Alin Argeseanu. Robust solar position sensor for tracking systems. *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, páginas 49–54.

- [12] Inspira's cpv sun tracking. Em Antonio L. Luque e Andreev Viacheslav, editores, *Concentrator Photovoltaics*, volume 130 de *Springer Series in Optical Sciences*, páginas 221–251. Springer Berlin Heidelberg, 2007. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68798-6_11.
- [13] M. Davis, J. Lawler, J. Coyle, A. Reich, e T. Williams. Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance. Em *Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE*, páginas 1 –6, may 2008. doi:10.1109/PVSC.2008.4922522.
- [14] Roberto Grena. An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82(5):462 – 470, 2008. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07002162>.