Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FEUP

Previsão de produção fotovoltaica a muito curto prazo usando análise e modelação de dinâmica de sombras

José Henrique Oliveira Lopes

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor Cláudio Monteiro

Fevereiro de 2010

© José Henrique Oliveira Lopes, 2010

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

MIEEC - MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES 2009/2010

A Dissertação intitulada

"Previsão de Produção Fotovoltaica a Muito Curto Prazo Usando Análise e Modelação de Dinâmica de Sombras"

foi aprovada em provas realizadas em 23 de Fevereiro de 2010

o júri

Presidente Professor Doutor José Eduardo Roque Neves dos Santos
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor José Carlos Lourenço Quadrado
Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa do Instituto Politécnico de Lisboa

Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

José Henrique O. Lopes

José Henrique Oliveira Lopes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

As energias de fonte renovável como a solar fotovoltaica, eólica e hídrica, são descritas como sendo fontes de energia intermitentes. O recurso solar é um bom exemplo, pois devido à existência de nuvens, a energia solar que chega à superfície terrestre varia de uma forma significativa ao longo do tempo. Como consequência, a potência de saída de uma dada central solar vai também variar, podendo desta forma introduzir perturbações na rede eléctrica. As variações de uma central solar fotovoltaica caracterizam-se por grandes oscilações no valor da potência, para intervalos de tempo que podem ser inferiores a um minuto.

O tema desta dissertação tem como objectivo encontrar uma solução para este tipo de problemas, procurando conceptualizar um produto que permita fazer uma previsão de irradiância solar, para um horizonte temporal de apenas alguns minutos. Conhecendo a forma como a potência de saída da central evolui com a irradiância, é assim possível obter uma previsão da potência total gerada.

Nesta dissertação é desenvolvida uma metodologia de previsão a muito curto prazo, onde se faz referência a componentes de hardware e software, necessários para o processo. As ferramentas aqui desenvolvidas, permitem através do uso de informação visual contida em arquivos fotográficos obter valores de irradiância. Esta informação visual consiste na captação fotográfica das condições atmosféricas que se fazem sentir no local da captura da imagem. Estas ferramentas são o primeiro passo para a obtenção de um produto final, demonstrando ainda a sua viabilidade técnica.

Palavras-chave: Energia solar, Previsão de Potência Solar Fotovoltaica, Processamento de Imagem.

Abstract

Energy sources such as solar photovoltaic, wind and hydro power are generally known as intermittent sources of energy. The sun is a good example, as its emitted radiation sometimes finds clouds on its way to the Earth's surface, which results in a variation of the solar power that reaches the Earth's surface over time. Therefore, the instant power generation for a solar power plant will vary, which may cause perturbation on the electric grid. The variations on the output of a solar power plant are characterized for long oscillation on the power values, where these oscillations can occur on minute time bases.

The goal of this dissertation is to find one solution for this kind of problems, as it tries to conceptualize a product which allows solar irradiance forecasting, for a time horizon of just some minutes. Knowing how the power output of the plant evolves with the irradiance, is it possible to obtain an estimate of the total power generated.

The work developed on this dissertation has, as a result, a methodology which allows very short term forecasting, and it includes all the information about both hardware and software that is needed for the process. The developed tool accepts, as the input, visual information obtained from picture data storage collected onsite, and the output is the forecasting of irradiance values. The pictures are obtained using photography which reveals the atmospheric conditions on the required site. As a result, this thesis is the first step towards the final product, as it demonstrates technical viability of such project.

Keywords: *Solar Energy, Solar Power Forecasting, Image Processing.*

Agradecimentos

Este é o momento de agradecer a todas as pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para a elaboração e sucesso desta dissertação. Assim sendo, quero agradecer às seguintes pessoas:

Ao meu orientador, Professor Doutor Cláudio Monteiro, por todo o seu apoio, motivação, concelhos e disponibilidade, factores fundamentais para o evoluir favorável do trabalho desenvolvido.

A todos os colegas da sala J104, pelo companheirismo e apoio durante estes últimos 5 meses.

Ao Bruno Santos e Mauro Rocha pela ajuda prestada na revisão do texto final.

A todos os colegas e amigos que fizeram parte do dia-a-dia durante todo o curso.

Finalmente à minha família, em especial aos meus pais e irmã pelo apoio contínuo e incondicional durante toda a minha vida…

Thanks boss! See you around

Índice

Resumo ..... **iii**

Abstract ..... **v**

Agradecimentos ..... **vii**

Índice ..... **ix**

Lista de figuras ..... **xii**

Lista de tabelas ..... **xv**

Abreviaturas e Símbolos ..... **xvi**

Capítulo 1 ..... **1**

Introdução 1
1.1 - Enquadramento 1
1.2 - Motivação 4
1.3 - Objectivos 4
1.4 - Estrutura da dissertação 4
1.5 - Informação usada nesta dissertação 5
1.5.1 - Captura de imagens 5
1.6 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação 7

Capítulo 2 ..... **9**

Estado da Arte 9
2.3 - Introdução 9
2.4 - Ferramentas e metodologias 10
2.4.1 - Modelos de estimativa de radiação solar 10
2.4.2 - Sistemas de aquisição automática de imagens do hemisfério celeste 11
2.5 - Metodologia de cálculo de irradiância solar sobre uma superfície 13
2.5.1 - Coordenadas solares 14
2.5.2 - Ângulo de incidência dos raios dólares num plano inclinado 16
2.5.3 - Irradiância solar na superfície terrestre 17
2.5.4 - Componentes da radiação solar no plano inclinado 17
2.5.4.1 - Componente directa 19
2.5.4.2 - Componente difusa 20
2.5.4.3 - Albedo 20
2.5.4.4 - Síntese 21
2.6 - Inteligência artificial 21
2.6.1 - Estrutura e funcionamento de um neurónio 21

2.6.2 - Arquitectura das redes neuronais 23
2.6.3 - Processo de aprendizagem das redes neuronais 24
2.6.4 - Configuração da estrutura de redes neuronais..... 25
2.6.5 - Estandardização 26
2.6.5.1 - Método Min-Máx..... 26
2.6.5.2 - Método Z-Score..... 26
2.6.5.3 - Método *Decimal Scaling* 27
2.7 - Modelos de Regressão..... 27
2.8 - Avaliação de modelos..... 29
2.8.1 - MAPE – Erro Médio Absoluto Percentual..... 29
2.8.2 - MAE - Erro Médio Absoluto..... 29
2.8.3 - Coeficiente de determinação R2 30

Capítulo 3 31

Metodologia proposta 31
3.5 - Introdução 31
3.6 - Descrição da metodologia..... 31
3.7 - Etapas do projecto 32
3.7.1 - Captura de imagens..... 33
3.7.2 - Previsão meteorológica 34
3.7.3 - Dinâmica e movimento de nuvens..... 34
3.7.4 - Processamento de imagens..... 35
3.7.5 - Estimativa das componentes da radiação solar para céu limpo 35
3.7.6 - Estimativa das componentes directa e difusa..... 36
3.7.7 - Previsão de potência 36
3.8 - Cenários de previsão 36
3.8.1 - Cenário 1..... 37
3.8.2 - Cenário 2..... 40
3.8.3 - Cenário 3..... 41
3.8.4 - Cenário 4..... 42
3.8.5 - Conclusões..... 44
3.9 - Algoritmo de processamento de imagens..... 44
3.9.1 - Etapas do algoritmo..... 44
3.9.1.1 - Imagens de entrada 45
3.9.1.2 - Máscara fixa 46
3.9.1.3 - Máscara flutuante..... 46
3.9.1.4 - Classificação de imagens 46
3.9.1.4.1 - Céu limpo..... 48
3.9.1.4.2 - Nuvem..... 48
3.9.1.4.3 - Sol visível 49
3.9.1.5 - Contagem de pixéis classificados 50
3.9.1.6 - Dados de saída 51
3.10 - Modelo de estimativa de irradiância solar..... 51
3.10.1 - Radiação solar directa 52
3.10.2 - Radiação solar difusa..... 53
3.10.3 - Estimativa das componentes directa e difusa da radiação horizontal para céu limpo 54
3.10.3.1 - Síntese..... 58
3.11 - Cálculo da potência de saída de uma instalação fotovoltaica 59

Capítulo 4 63

Resultados..... 63
4.1 - Introdução 63
4.2 - Processamento de imagens 63
4.3 - Estimativa de irradiância..... 66
4.3.1 - Componente directa 67
4.3.2 - Componente difusa 68
4.4 - Análise de variáveis 68

4.5 - Simulação de potência de uma central fotovoltaica exemplo 72
4.5.1 - Cenário 1 – Módulos fixos 73
4.5.2 - Cenário 2 – Módulos com seguidor azimutal 75
4.5.3 - Cenário 3 – Módulos com seguimento solar de dois eixos 76
4.6 - Componente global 78
4.7 - Análise de erro 79
4.8 - Requisitos de processamento 81

Capítulo 5 83

Conclusões 83
5.1 - Conclusões gerais 83
5.2 - Trabalhos futuros 84

Referências 85

Lista de figuras

Figura 1.1 - Centrais fotovoltaicas de potência superior a $200\,\mathrm{kWp}$. Potência instalada e acumulada anual a nível global. Adaptado de [3]. 3

Figura 1.2 - Situação portuguesa de potência instalada relativo ao solar fotovoltaico entre 2006 e prevista até 2013 [6]. 3

Figura 1.3 - Total Sky Imager [9]. 6

Figura 1.4 - Exemplo de uma imagem capturada pelo TSI 6

Figura 2.1 - Efeito da redução de níveis de cinza em imagens com mesma resolução espacial [20]. Em (a) com 256, (b) com 16, (c) com 8 e (d) com 4 níveis de cinza. 11

Figura 2.2 - Imagem original e classificada, obtidas através do TSI 12

Figura 2.3 - Fotografia do *AllSky camera*, alimentada por um módulo fotovoltaico [22]. 13

Figura 2.4 - Variação da declinação da terra ao longo do ano [23]. 14

Figura 2.5 - Ângulos de posição solar. Adaptado de [23]. 15

Figura 2.6 - Ângulo de incidência solar numa superfície inclina. Adaptado de [24]. 16

Figura 2.7 – Valores da irradiância para a componente directa (esquerda) e difusa (direita). 18

Figura 2.8 - Representação esquemática das componentes da radiação solar [25]. 19

Figura 2.9 - Coordenadas angulares para o cálculo do ângulo sólido [25] 20

Figura 2.10 - Modelo simplificado da estrutura de um neurónio [38] 22

Figura 2.11 - Função de transferência LOGSIG [37] 22

Figura 2.12 - Função de transferência TANSIG [37] 22

Figura 2.13 - Função de transferência PURELIN [37] 23

Figura 2.14 - Rede neuronal do tipo *feedforward* [38] 23

Figura 2.15 - Rede neuronal do tipo *feedback* [37]. 24

Figura 2.16 - Exemplo de uma regressão linear [41] 28

Figura 3.1 - Etapas da metodologia adoptada 33

Figura 3.2 - Exemplo de uma sequência de imagens de captura das condições atmosféricas locais 34

Figura 3.3 - Identificação de movimento em sequência de imagens 35

Figura 3.4 - Sequência de imagens (Exemplo cenário 1)..... 38

Figura 3.5 - Evolução das componentes directa e difusa da irradiância solar para uma parte do dia (Exemplo cenário 1). Valores da irradiância expressos em $W/m2$. 39

Figura 3.6 - Relação percentual entre a componente medida e a respectiva componente estimada para condições de céu limpo (Exemplo cenário 1). 39

Figura 3.7 - Sequência de imagens (Exemplo cenário 2)..... 40

Figura 3.8 - Sequência de imagens (Exemplo cenário 3)..... 41

Figura 3.9 - Valores medidos e estimados da irradiância solar (Exemplo cenário 3). Valores expressos em $W/m2$. 41

Figura 3.10 - Cociente entre valores medidos e estimados da componente directa e difusa (Exemplo cenário 3). 42

Figura 3.11 - Formação de nuvens localmente (Exemplo cenário 4) 43

Figura 3.12 - Valores medidos e estimados da irradiância solar (Exemplo cenário 4). Valores expressos em $W/m2$. 43

Figura 3.13 - Diagrama de etapas do algoritmo de processamento de imagens..... 45

Figura 3.14 - Composição das várias cores através do sistema de cores primárias RGB 47

Figura 3.15 - Decomposição da imagem original nas cores primárias 47

Figura 3.16 - Processo de classificação de pixéis 49

Figura 3.17 - Figura exemplo resultante do processamento de imagens 50

Figura 3.18 - Identificação das várias linhas delimitadoras de área..... 51

Figura 3.19 - Exemplo onde se verifica durante certa parte do dia a condição de céu limpo . 54

Figura 3.20 - Relação entre os valores medidos de irradiância directa e os valores calculados de irradiância global 55

Figura 3.21 - Curva de estimativa da componente directa da radiação para céu limpo 56

Figura 3.22 - Relação entre os valores medidos de irradiância directa e os valores calculados de irradiância global 57

Figura 3.23 - Curva de estimativa da componente difusa da radiação para céu limpo 58

Figura 3.24 – Diagrama de síntese da estimativa das componentes directa e difusa da radiação solar para dia de céu claro..... 59

Figura 3.25 - Curvas características da potência de um painel fotovoltaico em função da temperatura [42]. 60

Figura 3.26 - Operação do MPPT para dois níveis de irradiância sobre o módulo fotovoltaico e duas cargas [23]. 61

Figura 4.1 – Exemplo para céu limpo 64

Figura 4.2 – Exemplo onde o sol se encontra numa posição baixa no horizonte 64

Figura 4.3 – Exemplo com céu parcialmente nublado 65

Figura 4.4 - Identificação de variáveis. 67

Figura 4.5 – Representação dos valores medidos e estimados para a componente directa. Valores em $W/m2$ 67

Figura 4.6 – Representação dos valores medidos e estimados para a componente difusa. Valores em $W/m2$ 68

Figura 4.7 – Irradiância solar para diferentes planos e componentes (Cenário 1) 74

Figura 4.8 – Valor estimado da potência de saída da central FV (Cenário 1) 74

Figura 4.9 - Irradiância solar para diferentes planos e componentes (Cenário 2) 75

Figura 4.10 – Valor estimado de saída da central FV (Cenário 2) 76

Figura 4.11 - Irradiância solar para diferentes planos e componentes (Cenário 3) 77

Figura 4.12 – Valor estimado de saída da central FV (Cenário 3) 77

Figura 4.13 – Potência de saída da central FV 78

Figura 4.14 – Indicação das dimensões da imagem em pixéis 80

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Exemplos de regressões não lineares [41] 28

Tabela 3.1 - Sequência de imagens (Cenário 1) 37

Tabela 4.1 – Teste de variáveis da componente directa 69

Tabela 4.2 – Teste de variáveis da componente difusa (parte I) 70

Tabela 4.3 – Teste de variáveis da componente difusa (parte II) 71

Tabela 4.4 – Tabela com os coeficientes de temperatura do módulo fotovoltaico 72

Tabela 4.5 – Tabela de características eléctricas do módulo fotovoltaico 73

Tabela 4.6 – Quantificação de pixéis úteis por imagem classificada 80

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

ARIMA	*Autoregressive Integrated Moving Average*
ARM	*Atmospheric Radiation Measurement*
FV	Efeito Fotovoltaico
GMT	*Greenwich Mean Time*
JPEG	*Joint Photographic Experts Group*
MAPE	*Mean Absolute Percentage Error*
MAE	*Mean Absolute Error*
MLP	*Multi Layer Perceptron*
MPPT	*Maximum Power Point Tracker*
NOCT	*Nominal Operating Cell Temperature*
NWP	*Numerical Weather Predictions*
MM5	*Fifth Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model MM5*
RGB	*Red, Green, Blue*
RNA	Redes neuronais artificiais
TDNN	*Time Delay Neural Network*
TSI	*Total Sky Imager*

Lista de símbolos

δ	Declinação
β	Inclinação do plano
d	Distância
ζ_{sup}	Ângulo de incidência dos raios solares sobre uma superfície inclinada
θ_z	Distância Zenital
α_s	Elevação Solar
Ψ_s	Azimute Solar

φ_{sup}	Ângulo de Azimute da superfície inclinada
ω_s	Ângulo Horário Solar
ϕ	Latitude geográfica
I_0	Constante solar de radiação extraterrestre
I	Irradiância solar
G	Radiação Solar Global
$G(0)$	Radiação Solar Global no plano horizontal
E_0	Radiação Solar extraterrestre
B	Radiação Solar Directa
$D(0)$	Radiação Solar Directa no plano horizontal
D	Radiação Solar Difusa
R	Albedo
L	Radiância solar
ρ	Coeficiente de reflexão do solo
k_t	Índice de atenuação
MA	Índice de Massa de Ar
S_{out}	Potência de saída
T_c	Temperatura da célula fotovoltáica
T_{amb}	Temperatura ambiente
η	Rendimento
w	Ângulo horário
w_n	Ângulo horário correspondente ao nascer do sol
w_p	Ângulo horário correspondente ao por do sol
T_h	Hora
$^{\circ}C$	Graus Célsius
m	Metro
m^2	Metro quadrado
km	Quilometro
W	Watt
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt pico
MW	Megawatt
MWp	Megawatt pico
$\%$	Percentagem

Capítulo 1

Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto.

Neste trabalho de dissertação são apresentadas metodologias, com o objectivo de permitir prever a muito curto prazo, a radiação solar nas suas várias componentes, permitindo desta forma fazer a previsão de produção eléctrica de uma qualquer instalação de energia solar fotovoltaica ou mesmo centrais de concentração solar.

Este capítulo apresenta uma visão da temática e define quais os objectivos e motivações inerentes à sua realização. Na parte final deste mesmo capítulo apresenta-se uma breve descrição sobre a estrutura desta dissertação.

1.1 - Enquadramento

Actualmente existe um enorme investimento em recursos renováveis, consequência fundamental da preocupação que existe sobre o evoluir degradante das condições ambientais em todo o mundo. Uma maior utilização dos recursos renováveis disponíveis, permite travar o crescimento das emissões poluentes enviadas para atmosfera, trazendo automaticamente uma menor dependência da humanidade face aos combustíveis fósseis. De todo o modo, o uso de energias renováveis é ainda limitado devido a aspectos económicos e técnicos relacionados directamente com o tipo de fonte renovável que se pretende obter energia.

As energias de fonte renovável como a solar fotovoltaica, eólica e hídrica são descritas como sendo fontes de energia intermitentes. Os aproveitamentos eólicos e pequenas hídricas são mais correctamente classificados como sendo tecnologias de fonte variável em vez de intermitente, pois grandes variações da potência de saída destas fontes acontecem numa base de tempo muito superior à casa do minuto. Contudo, para o fotovoltaico o termo intermitente é o mais correcto para o classificar, uma vez que devido aos sombreamentos causados por nuvens, a potência de saída deste tipo de centrais pode variar abruptamente. Esta variação abrupta é consequência da evolução rápida dos sombreamentos ao longo do terreno. Estas variações associadas à dimensão da central fotovoltaica podem ter impactos

nas reservas primárias [1], pois estas variações de potência têm amplitudes que podem ser de 80% da potência total ou mesmo superiores para centrais de concentração solar.

A central fotovoltaica de Moura em Portugal, é uma das maiores centrais fotovoltaicas instaladas em todo o mundo até a actualidade. Esta central tem uma capacidade instalada de 46 MW, e para intervalos inferiores a um minuto há registos de variações de carga de 40 MW para 5 MW, devido à simples intermitência de sombras de nuvens. Grandes variações de potência têm consequências nas reservas primárias do sistema eléctrico de energia, não tanto devido só à amplitude das variações, mas também devida à rapidez com que estas sucedem. Para centrais fotovoltaicas e com uma previsão a muito curto prazo, este tipo de variações pode ser atenuado, bastando para tal actuar sobre o ponto óptimo dos inversores dos respectivos painéis fotovoltaicas. A rampa de crescimento gradual da potência é facilmente controlável pelos inversores, mas a rampa de decréscimo só é possível com recurso a uma previsão a muito curto prazo.

Para centrais de concentração solar, térmica ou fotovoltaica, a variação na potência de saída é ainda mais grave, devido ao facto de este tipo de centrais aproveitar unicamente a componente directa da radiação solar. Neste tipo de centrais solares é muito importante conhecer a evolução das sombras ao longo do tempo, sobre os espelhos reflectores.

Para as centrais de concentração solar térmicas em torre principal, uma grande variação na energia recebida pode danificar o receptor solar, pois sobre condições normais de radiação, a temperatura no receptor é de $800\,°\mathrm{C}$, mas com a diminuição abrupta da radiação solar a temperatura no receptor desce drasticamente. Quando o sol volta a ficar a descoberto, a temperatura do receptor volta a subir quase instantaneamente, dando-se o choque térmico. Se isto ocorrer demasiadas vezes o receptor solar acaba por ficar danificado devido a fadiga térmica [2]. Uma previsão a muito curto prazo é essencial para este tipo de centrais, pois permite anteceder e evitar os efeitos causados por variações na energia solar recebida, não só na central, mas também na rede eléctrica a que esta se encontra ligada. A variação da potência de saída, pode ainda ser resolvida com o uso de um sistema de armazenamento de calor, ou com o uso de energias alternativas, como por exemplo o gás natural, de forma a suavizar a intermitência. No entanto, para uma gestão optimizada destes sistemas a previsão a muito curto prazo seria na mesma essencial.

Actualmente existem instalados a nível mundial mais de 1900 centrais fotovoltaicas com potência unitária superior a $200\,\mathrm{kWp}$. A potência acumulada de todas estas centrais é superior a $3600\,\mathrm{MWp}$ e a média de potência de saída acumulada é de $1800\,\mathrm{MWp}$ (Ver Figura 1.1). Mais de 500 das centrais mencionadas estão localizadas na Alemanha, mais de 370 nos Estados Unidos e mais de 750 em Espanha [3]. Em 2008 a potência total fotovoltaica instalada em Portugal era de cerca de $68\,\mathrm{MWp}$ e a meta para o presente ano de 2010 é de $200\,\mathrm{MWp}$ de capacidade total licenciada [4] (Ver evolução da potência instalada em Portugal na Figura 1.2). Com a descida do custo de painéis fotovoltaicos é de esperar que haja uma maior penetração deste tipo de tecnologia em termos de potência instalada nos anos que se seguem. É esperado que o mercado de painéis solares fotovoltaicos atinja mais de $100\,\mathrm{GW}$ em 2020 e para solar fotovoltaico de concentração uma potência total de $450\,\mathrm{MW}$, existindo expectativas de que o valor poderá ser ainda $20\,\mathrm{MW}$ superior [5].

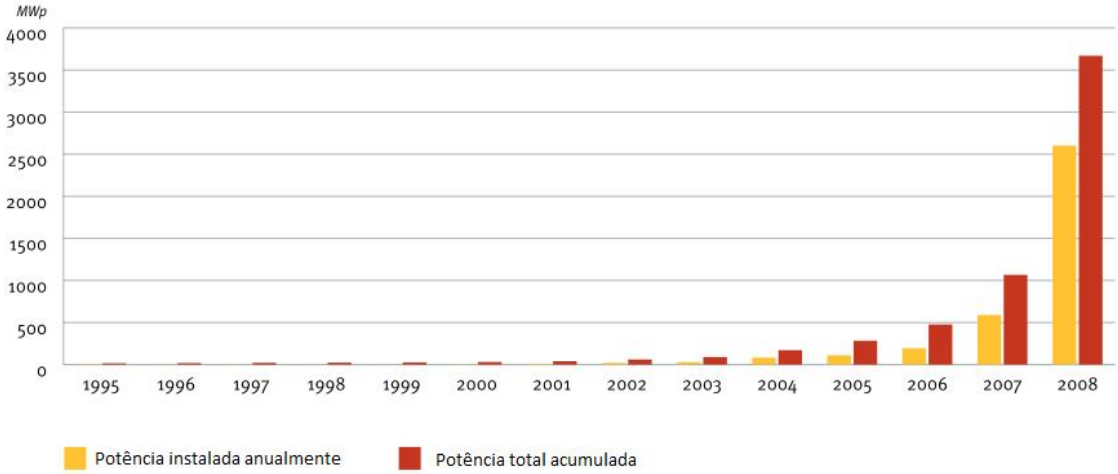
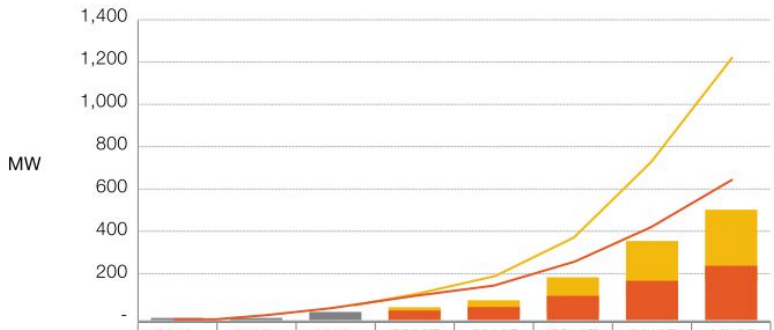


Figura 1.1 - Centrais fotovoltaicas de potência superior a 200 kWp. Potência instalada e acumulada anual a nível global. Adaptado de [3].



		2006	2007	2008	2009E	2010E	2011E	2012E	2013E
Annual market (MW)	Moderate scenario	0	14	50	40	50	100	160	230
	Policy-Driven scenario				50	80	180	350	500
Projected cumulative PV power installed (MW)	Moderate scenario	3	18	68	108	158	258	418	648
	Policy-Driven scenario				118	198	378	728	1,228

Figura 1.2 - Situação portuguesa de potência instalada relativo ao solar fotovoltaico entre 2006 e prevista até 2013 [6].

Por fim, é de referir que o impacto que a energia solar tem sobre o sistema eléctrico é tanto maior quanto maior a sua penetração na rede, podendo ser crítico em redes isolados com elevada penetração deste tipo de fonte. As ilhas são um exemplo onde a componente fotovoltaica pode ter uma elevada percentagem no parque total de produção eléctrica. Tem-se como exemplo, a ilha de Porto Santo no arquipélago da Madeira, onde já se encontra em curso o licenciamento de um parque fotovoltaico de 2 MW, com capacidade para alimentar 50% das habitações da ilha durante o ano, a excepção da altura do Verão devido à afluência turística.

1.2 - Motivação

O grande crescimento esperado de fontes renováveis, nomeadamente fontes de aproveitamento de energia solar, associados à intermitência na potência fornecida por estas, leva a que haja necessidade de se conseguir uma solução que permita diminuir os impactos negativos que estas centrais podem trazer ao sistema eléctrico de energia. O desenvolvimento de sistemas de previsão é uma das soluções.

Actualmente nos parques eólicos existem regras de injecção de potência na rede. Estas regras são aplicadas essencialmente em momentos em que por alguma razão, o parque ficou desligado da rede e se pretende fazer a sua religação. Esta religação tem de ser feita de modo gradual, ou seja, cada gerador do parque é ligado à rede de forma desfasada no tempo, de modo a evitar maiores perturbações na rede, consequência de grandes injecções de potência em curtos intervalos de tempo. Com o aumento da potência dos parques solares, regras similares poderão no futuro vir a ser aplicadas, obrigando desta forma os promotores de parques solares a controlar as variações bruscas no fornecimento de energia.

Métodos, ferramentas e serviços para previsões a curto prazo de potência solar estão disponíveis para períodos de base de uma hora [7-8], mas não para períodos na base do minuto. A motivação para este trabalho resulta essencialmente em procurar dar resposta a todos estes pontos aqui mencionados, procurando desta forma fazer-se uma antecipação e apresentação de uma resolução do problema que poderá num futuro próximo evidenciar-se de forma muito mais notória, recorrendo para tal a novas metodologias e tecnologias.

1.3 - Objectivos

O trabalho que é proposto nesta dissertação consiste fundamentalmente na criação de uma nova metodologia, que permita obter valores de radiação directa e difusa para um horizonte de tempo de até uma hora, de forma a permitir fazer a previsão de energia de um determinado parque solar fotovoltaico. Desta forma os objectivos para este trabalho de dissertação são:

- Construção de uma metodologia capaz de permitir realizar a previsão da radiação solar das várias componentes em intervalos de tempo de um minuto até um horizonte de tempo de alguns minutos;
- Justificar e provar as várias etapas da metodologia;
- Identificar técnicas, ferramentas e modelos úteis que possam ser utilizadas no projecto;

1.4 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos. Nos capítulos 1 e 2 é feita uma apresentação do tema, tendo por objectivo facilitar a interpretação do trabalho desenvolvido. Nos capítulos 3 e 4 são apresentados as ferramentas desenvolvidas, bem como

resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta as conclusões relevantes obtidas através do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao trabalho, onde se apresentam os objectivos a alcançar, bem como, qual a motivação para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte relativo a projectos existentes actualmente, que foram de alguma forma, importantes para o desenvolvimento do trabalho apresentado. Neste capítulo são ainda descritas ferramentas de cálculo de irradiância para um plano inclinado, bem como uma explicação do que são e como funcionam as redes neuronais artificiais.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida no âmbito deste trabalho de dissertação. São apresentadas todas as etapas, sendo feito uma descrição com detalhe de cada uma. É ainda feita uma descrição das ferramentas desenvolvidas bem como identificação de todos os aspectos importantes para o seu funcionamento.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através das ferramentas desenvolvidas e descritas no capítulo 3. São apresentados vários testes, bem como é também feita uma identificação dos principais factores que influenciam a eficácia das ferramentas desenvolvidas.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas todas as conclusões obtidas neste trabalho de dissertação, bem como também é feita uma referência a trabalhos futuros.

1.5 - Informação usada nesta dissertação

Os dados usados para a realização desta dissertação foram na sua maioria recolhidos da base de dados da ARM - Atmospheric Radiation Measurement. A ARM [9] é um programa que visa essencialmente fazer a recolha e registo de dados, de modo a permitir à comunidade científica estudar os efeitos relacionados com as alterações climáticas.

Da base de dados da ARM foram assim recolhidos dados relativos a medições de radiação solar directa e difusa, e arquivos fotográficos relativos às condições atmosféricas visíveis verificadas no local de medição relativa a duas localizações, Ilha Graciosa[1] – Açores e Southern Great Plains[2] – Estados Unidos da América.

Procurou-se que estas localizações tivessem uma latitude ao nível do território português, levando assim à escolha destas duas localizações dentro das dez possíveis que a ARM possui espalhadas pelo globo.

1.5.1 - Captura de imagens

As imagens recolhidas da base de dados são obtidas com um equipamento designado de TSI - *Total Sky Imager* (Figura 1.3). Este equipamento é comercializado pela Yankee

[1] Localização: 39° 5' 28" Norte, 28° 1' 45" Oeste, Altitude: 15.24 metros.

[2] Localização: 36° 36' 18.0" Norte, 97° 29' 6.0" Oeste, Altitude: 320 metros.

Environmental Systems e é usado com a finalidade de recolher dados sobre o índice de cobertura de nuvens.

Figura 1.3 - Total Sky Imager [9]

O equipamento é composto essencialmente por um espelho convexo e por uma câmara fotográfica fixa, orientada para o espelho. O espelho permite obter imagens com um ângulo de visão de 180°, obtendo desta forma imagens de todo o hemisfério visível. O registo das condições atmosféricas é feito somente durante o dia, em intervalos de tempo fixos que podem ir de 30 segundos a um mínimo. Na figura seguinte é apresentado um exemplo de uma imagem típica capturada por este equipamento.

Figura 1.4 - Exemplo de uma imagem capturada pelo TSI

Como se pode ver pela Figura 1.4, através do uso de um espelho convexo consegue-se ter uma visão geral de todo o céu visível a partir do ponto onde se encontra instalado o equipamento. A faixa preta sobre o espelho é utilizada neste dispositivo de forma a evitar os raios solares directos sobre a objectiva da câmara. Desta forma, a faixa é ajustada automaticamente durante o dia, através de um motor eléctrico, permitindo manter o sol constantemente oculto nas imagens que são obtidas pelo dispositivo.

As imagens utilizadas nesta dissertação estão arquivadas em formato JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) e têm uma resolução de 358 por 288 pixeis.

1.6 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação

No desenvolvimento desta dissertação foram usadas como ferramentas principais de trabalho o ambiente de programação do MATLAB, para toda a programação e processamento de imagens, bem como a ferramenta *toolbox nntool* presente também no MATLAB para a criação de modelos de estimativa de valores de irradiância utilizando redes neuronais. Toda a análise e tratamento de dados, bem como simulações foram feitos com recurso a Excel do Microsoft Office. Foi também utilizada a ferramenta SOLVER presente no Excel para modelização e determinação de parâmetros de funções [10].

Capítulo 2

Estado da Arte

2.3 - Introdução

Ao contrário do que acontece para a previsão de vento, onde os modelos de previsão se encontram num ponto relativamente maduro, na previsão de irradiação solar os modelos e métodos existentes estão ainda numa fase muito embrionária. Os modelos mais comuns envolvem imagens de satélite e dados meteorológicos para fazerem a previsão de energia solar.

A nível macroscópico os modelos de previsão de radiação solar são usados essencialmente para ajudar a identificar zonas óptimas para instalação e exploração de projectos relacionados com o aproveitamento da energia solar. Ao nível da central, os modelos de previsão são essenciais para a gestão das centrais, bem como para manter a estabilidade da rede. Em [11] é feita uma caracterização dos sistemas de previsão quanto ao seu horizonte de previsão, no entanto esta caracterização está mais ligada a sistemas de previsão relacionados com a previsão do recurso eólico. Em [12-14] são apresentados várias metodologias relacionadas com a previsão da radiação solar, no entanto, não existe uma definição exacta do horizonte temporal de cada tipo de previsão. Assim sendo, aqui são considerados quatro horizontes temporais de previsão de radiação solar, de modo a situar o trabalho desenvolvido nesta dissertação:

- Previsão a muito curto prazo: É uma previsão onde o horizonte temporal pode variar de alguns segundos até uma hora. Este tipo de previsões é feito com o auxílio de dados recolhidos no local para o qual se pretende fazer a previsão. Este é o tipo de previsão estudado no âmbito da presente dissertação.

- Previsão a curto prazo: Tipo de previsão com horizonte temporal compreendido entre 1 hora e 7 dias. Neste caso, a previsão local de irradiância solar pode ser feita com recurso à modelos numéricos de previsão (NWP - *Numerical Weather Prediction*) como o *Fifth Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model MM5* (MM5) [15-16].

- Previsão a longo prazo: Tipo de previsão com horizonte temporal compreendido entre 7 dias e vários anos. Este é um tipo de previsão que é baseada em simulação do recurso energético.

- Previsão a muito longo prazo: Tipo de previsão com horizonte temporal para várias dezenas de anos. Este tipo de previsões do recurso solar, é baseada nos estudos sobre as alterações climáticas.

Os modelos actuais que fazem previsão a muito curto prazo (horizonte de previsão até seis horas) usam fundamentalmente imagens de satélite [12, 16-18], modelos estatísticos autorregressivos do tipo ARIMA bem como inteligência artificial baseada em redes neuronais [18-19]. No entanto, os modelos que usam imagens de satélite estão limitados a uma resolução que no melhor dos casos é de $4\,\mathrm{km}$, o que é manifestamente insuficiente para uma previsão com horizonte temporal a muito curto prazo e com a precisão que se pretende obter no âmbito do tema desta dissertação, de forma a dar resposta aos problemas apresentados no primeiro capítulo.

Para a previsão a muito curto prazo, além da necessidade de um modelo de previsão das condições atmosféricas com precisão adequada, são também necessários modelos de transferência de energia solar, que tenham em conta o estado atmosférico verificado no local de estudo.

2.4 - Ferramentas e metodologias

Neste ponto é feito uma apresentação de ferramentas e metodologias, que foram identificadas no trabalho de pesquisa e que se revelaram importantes, de modo a permitir construir uma metodologia nova, com o objectivo de atingir o fim proposto pelo tema desta dissertação.

2.4.1 - Modelos de estimativa de radiação solar

A ideia principal do trabalho desenvolvido nesta dissertação consiste em conseguir estimar as várias componentes da radiação global, usando para tal a fotografia digital, ou seja, conseguir converter a informação de uma fotografia em valores de irradiância. Para tal, cada fotografia tem de ser tirada em condições especiais, devendo assim o dispositivo ser capaz de captar todo o céu envolvente, estando ao mesmo tempo, fixo sempre na mesma posição.

Neste trabalho foram identificadas várias metodologias para estimativa de radiação solar. Uma destas metodologias revelou-se especialmente interessante no âmbito do tema desta dissertação, identificada em [20].

Em [20] é apresentado um trabalho onde o autor utiliza a fotografia digital de modo a fazer uma caracterização da energia difusa. Isto é conseguido com o recurso a uma câmara fotográfica monocromática, para a qual é feito o registo de imagens de todo o céu visível,

usando para tal uma lente angular *fish-eye* que permite aumentar o ângulo de visão da câmara.

A cada fotografia retirada é aplicado um algoritmo que diminui o número de níveis de cinza da imagem, passando assim de um total de 256 níveis para 16 níveis (ver exemplo na Figura 2.1). Com isto é obtido uma imagem com contornos bem definidos, correspondendo a um mapa de distribuição de intensidade direccional da radiação difusa.

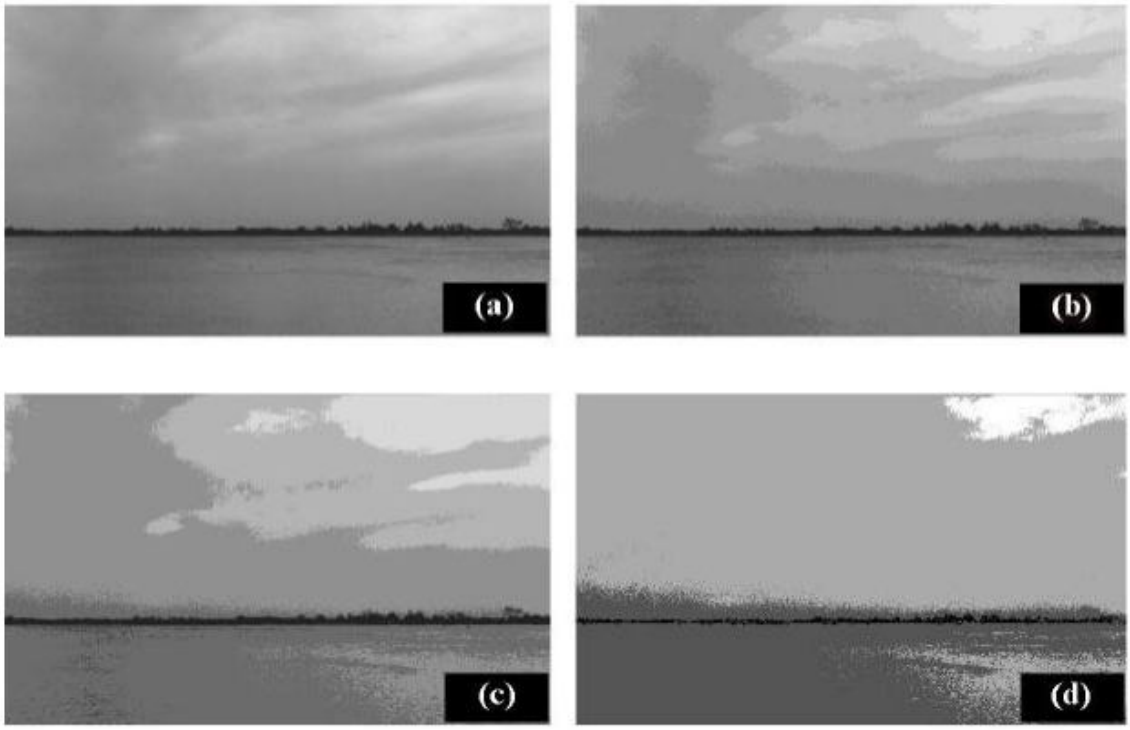


Figura 2.1 - Efeito da redução de níveis de cinza em imagens com mesma resolução espacial [20]. Em (a) com 256, (b) com 16, (c) com 8 e (d) com 4 níveis de cinza.

Com isto o autor utiliza um modelo matemático que atribui ao ângulo sólido de cada pixel na imagem um peso, de modo a que a contribuição total de todos os pixéis correspondam ao valor de irradiância medido no mesmo momento de cada foto. Desta forma é feita a estimativa da componente difusa da radiação solar, com estimativas muito próximas dos valores registados por piranómetros. Fica assim demonstrado a eficácia deste tipo de técnicas.

2.4.2 - Sistemas de aquisição automática de imagens do hemisfério celeste

Actualmente existem vários sistemas que fazem captura de imagens de exterior de forma autónoma e automática. Estes sistemas estão desenhados de forma a poderem operar em condições de ar livre, necessitando assim de calibrações e componentes especiais de modo a funcionarem eficazmente em condições de grande luminosidade. Estes equipamentos estão

também preparados para operarem continuamente e independentemente das condições atmosféricas que se possam verificar.

Na metodologia adoptada nesta dissertação, houve uma necessidade de se encontrar ou desenvolver um equipamento que permitisse fazer uma captura automática das condições meteorológicas no espectro de gamas da radiação visível. Da pesquisa realizada identificaram-se vários equipamentos disponíveis comercialmente, mas nenhum deles está desenhado para o fim que se pretende dar com o tema desenvolvido nesta dissertação.

Um dos equipamentos identificados é o TSI. No final do capítulo anterior fez-se uma breve descrição deste equipamento, no entanto é momento de a completar um pouco mais. Este equipamento é utilizado em algumas estações meteorológicas, onde o seu fim se destina ao registo do índice de fracção de céu encoberto por nuvens. O histórico de dados criado é utilizado por cientistas, com o fim de ajudar a identificar quais as causas por detrás das alterações climáticas e eventuais impactos sobre a fauna e flora locais [21]. Para que seja possível determinar qual o índice de nuvens em cada imagem, é aplicado um algoritmo que tenta identificar na imagem o que é céu limpo do que não é. Com isto, cada pixel é classificado de céu limpo, nuvem ou desconhecido, sendo assim reconstruída uma nova imagem correspondente, só com as cores respectivas de cada classificação (ver Figura 2.2). No final de todo o processo é feita a contagem total de pixéis correspondentes a cada classificação, permitindo assim estimar a fracção de céu ocupado por nuvens.

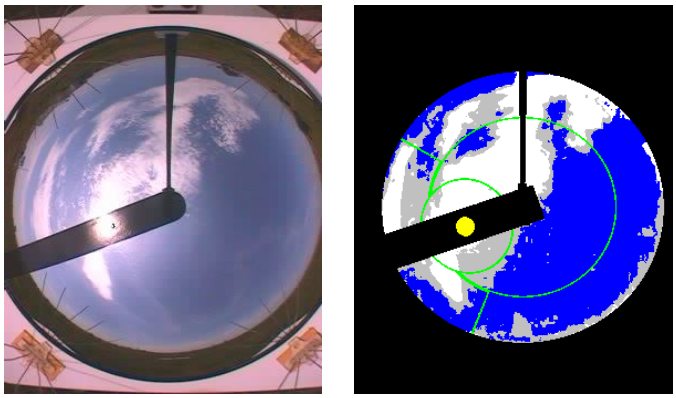


Figura 2.2 - Imagem original e classificada, obtidas através do TSI [9].

Na imagem da esquerda da Figura 2.2 é visível todo o céu envolvente, bem como a sua condição atmosférica. A imagem da direita da mesma figura corresponde à classificação da imagem da esquerda, onde as cores, branco e cinzento correspondem à identificação de nuvens e a azul à condição de céu limpo. Toda a zona preta da imagem corresponde a pixéis onde a classificação foi ignorada.

Outros equipamentos como o da Figura 2.3 possuem características que se pretendem num futuro protótipo de aplicação da metodologia desenvolvida nesta dissertação, como sendo a capacidade de captar imagens de todo o céu, incluindo o sol visível, ter uma interface que permita transmitir os dados para um computador e ser um equipamento robusto de modo a resistir às adversidades próprias de um equipamento que é instalado ao ar livre. O equipamento referenciado possui ainda um módulo fotovoltaico que garante a sua alimentação.

Figura 2.3 - Fotografia do *AllSky camera*, alimentada por um módulo fotovoltaico [22].

Ainda assim, este equipamento não esta preparado para fazer capturas de imagem durante o dia, pois ele foi desenhado e calibrado para captar imagens do céu durante a noite, sendo utilizado fundamentalmente por astrónomos.

Existem outros tipos de metodologias. Em [2] é apresentado um sistema de segurança de uma central solar térmica de concentração em torre, que consiste no uso de uma câmara, constantemente orientada para a posição do sol, de modo a identificar a presença de nuvens em seu torno. Desta forma, quando existem nuvens na eminência de ocultarem os raios solares, existe um sistema que regula a orientação dos espelhos, de forma a evitar grandes variações de temperatura no receptor solar, evitando assim que este fique danificado.

2.5 - Metodologia de cálculo de irradiância solar sobre uma superfície

Este ponto apresenta as noções mais importantes sobre o cálculo de irradiância solar sobre uma superfície inclinada, tendo em conta os efeitos da atmosfera sobre a energia solar recebida na superfície terrestre, as várias componentes da radiação solar, determinação da posição solar e determinação de parâmetros associados à estimativa destas mesma componentes.

A irradiância é definida como a densidade de fluxo radiativo, em unidades de potência por unidade de área ($\mathrm{W/m^2}$). Por sua vez, radiação solar é a designação de energia radiante pelo sol por unidade de área, sendo aqui usadas as unidades ($\mathrm{Wh/m^2}$).

2.5.1 - Coordenadas solares

A Terra possui uma orbita elíptica em torno do Sol, o que leva a que a distância entre os astros seja variável ao longo do ano.

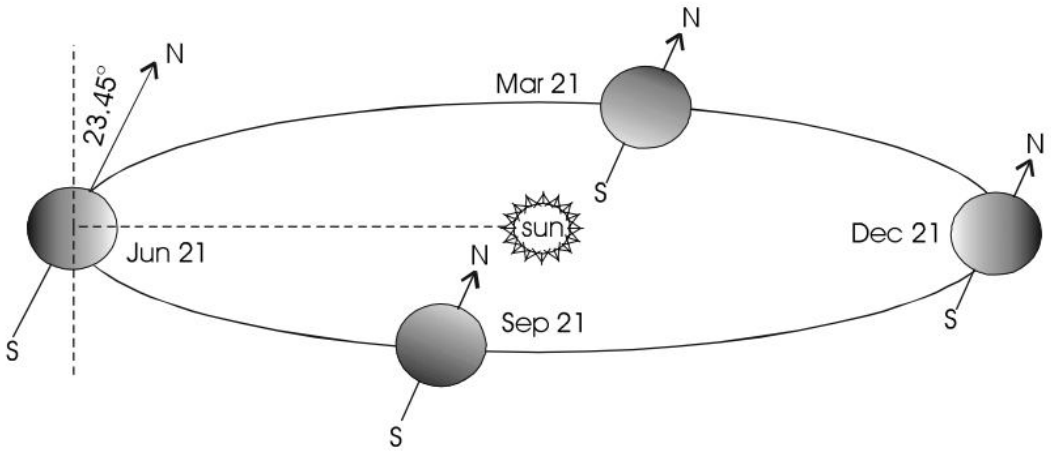


Figura 2.4 - Variação da declinação da terra ao longo do ano [23]

A distância d (em km) varia entre os $1{,}47 \times 10^8\ \mathrm{km}$ e os $1{,}52 \times 10^8\ \mathrm{km}$, e é calculada de forma aproximada para qualquer dia do ano n, através da expressão [23]:

$$\mathrm{d} = 1{,}5 \times 10^8 \left\{1 + 0{,}017 \mathrm{sen}\left[\frac{360(\mathrm{n} - 93)}{365}\right]\right\} \tag{2.1}$$

Devido à dispersão radial da radiação solar, a variação da distância vai afectar a quantidade de energia solar recebida na superfície terrestre.

O eixo de rotação da terra é inclinado de 23,45°, originando a que haja uma declinação que varia com o dia do ano. A declinação δ, é o ângulo dado entre o vector normal ao plano do equador e os raios directos do sol, sendo determinado por:

$$\delta = 23{,}45 \times \mathrm{sen}\left[\frac{360(\mathrm{n} - 80)}{365}\right] \tag{2.2}$$

É considerado que um ano tem 365 dias.

Para a determinação da irradiância solar sobre o plano horizontal, é necessário saber a posição do sol sobre o plano horizontal. Desta forma, é indicado seguidamente as variáveis geométricas normalmente usadas e como podem ser calculadas.

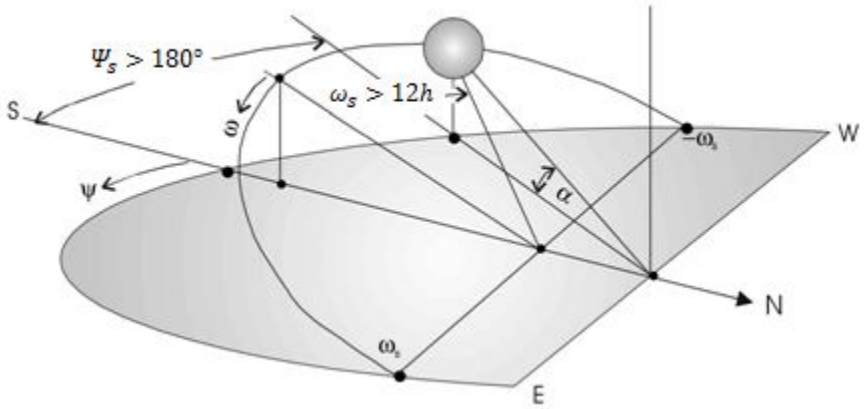


Figura 2.5 - Ângulos de posição solar. Adaptado de [23].

Utilizam-se como variáveis a distância zenital θ_z, elevação solar α_s e o ângulo de azimute solar Ψ_s. A distância zenital é o ângulo entre zénite e a direcção dos raios solares sobre o plano. A elevação solar é o ângulo entre o plano horizontal e os raios directos sobre o plano. A relação entre elevação solar e a distância zenital é:

$$\alpha_s = 90 - \theta_z \tag{2.3}$$

O ângulo de azimute solar é o ângulo formado entre a direcção Norte e a projecção da linha Sol - Terra sobre a horizontal. Quando a projecção da linha Sol – Terra é sobreposta à direcção Sul, o ângulo de azimute solar é de $180°$.

A evolução temporal ao longo do dia, é dada pelo ângulo horário solar ω_s. Assim, uma rotação completa da terra ao longo de 24 horas, corresponde a ter um ângulo horário de $15°$ por hora. O ângulo horário solar é negativo para a parte da manhã do dia e negativo para a parte da tarde, sendo nulo quando o sol está mais alto, ou seja, no meio-dia solar.

Os ângulos horários de nascer ω_n e por do sol ω_p são dados por:

$$\omega_n = -\omega_p = -\arccos(-\mathrm{tg}\delta.\mathrm{tg}\phi) \tag{2.4}$$

O parâmetro ϕ representa a latitude do local em estudo.

A seguinte expressão dá a relação entre ângulo horário solar e a respectiva hora T_h, onde T_h varia de 0 a 24.

$$\omega = \frac{12 - T_h}{24} \times 360 = 15(12 - T_h)° \tag{2.5}$$

A elevação solar e azimute são determinadas com as seguintes expressões:

$$\mathrm{sen}\,\alpha_s = \mathrm{sen}\,\delta.\mathrm{sen}\,\phi + \cos\delta.\cos\phi.\cos\omega \tag{2.6}$$

$$\Psi_s = \begin{cases} 180° - \arccos\frac{\text{sen }\alpha.\text{sen }\phi - \text{sen }\delta}{\cos\alpha.\cos\phi}, \text{para } \omega \leq 12\text{h} \\ 180° + \arccos\frac{\text{sen }\alpha.\text{sen }\phi - \text{sen }\delta}{\cos\alpha.\cos\phi}, \text{para } \omega > 12\text{h} \end{cases} \quad (2.7)$$

NOTA: Todas as expressões são calculadas em graus.

2.5.2 - Ângulo de incidência dos raios solares num plano inclinado

O ângulo de incidência dos raios solares de vector s sobre uma superfície inclinada com vector normal n designado de ζ_{sup}, é mais complexo de se calcular, pois é necessário ter agora em conta o ângulo de inclinação da superfície β e o ângulo que faz entre a sua orientação com sul geográfico, designado de ângulo de azimute da superfície inclinada φ_{sup}.

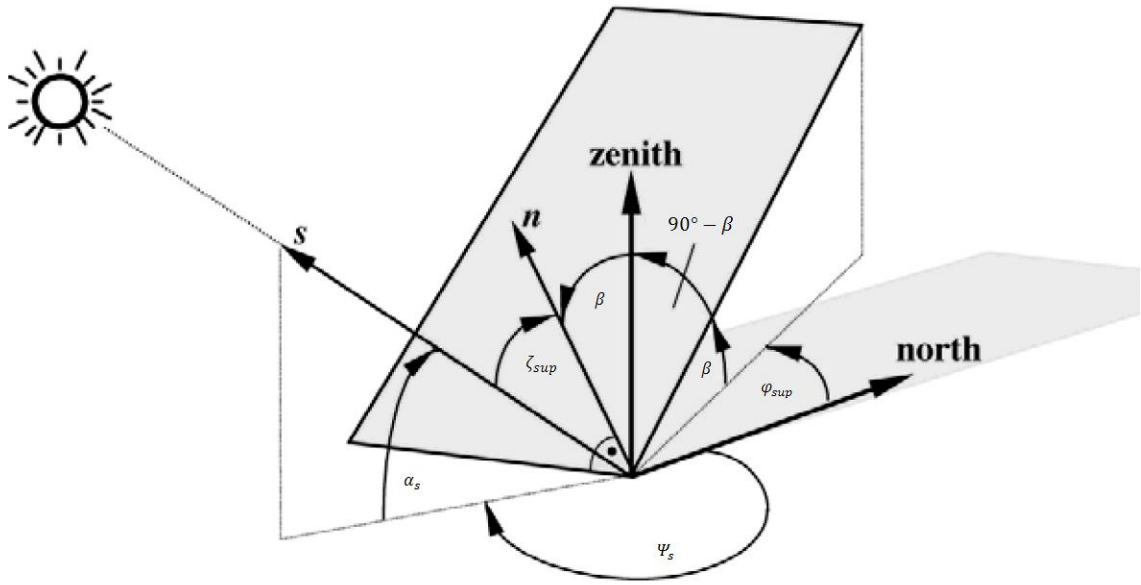


Figura 2.6 - Ângulo de incidência solar numa superfície inclina. Adaptado de [24].

Apresentando a expressão final, o ângulo de incidência ζ_{sup} é determinado a partir da multiplicação escalar dos vectores s e n através da expressão 2.8 [24].

$$\zeta_{sup} = arcos(s \cdot n) \quad (2.8)$$

$$\zeta_{sup} = arcos\left(-\cos\alpha_s \cdot \text{sen}\,\beta \cdot \cos\left(\Psi_s - \varphi_{sup}\right) + sen\,\alpha_s \cdot cos\,\beta\right) \quad (2.9)$$

2.5.3 - Irradiância solar na superfície terrestre

O Sol irradia constantemente da sua superfície $63{,}11\ \mathrm{MW/m^2}$ [24]. Devido à distância Sol Terra, determinada pela expressão 2.1, a irradiância solar recebida acima da atmosfera terrestre varia entre os 1325 W/m2 e os 1420 W/m2, sendo o seu valor médio anual designado de constante solar extraterrestre, com valor $\mathrm{I_0} = 1367 \pm 2\ \mathrm{W/m^2}$[23].

À medida que a radiação solar passa sobre a atmosfera terrestre, esta é modificada pela interacção com os vários elementos aí existentes. Alguns destes, como as nuvens, reflectem a radiação solar. Outros, por exemplo, ozono, oxigénio, dióxido de carbono e vapor de água, têm uma absorção significativa da radiação solar em diferentes bandas do espectro [25-26].

De modo a ser estimada a irradiância resultante na superfície terrestre, é usado o conceito de massa de ar MA (ou AM em inglês). MA é um valor sem unidades que traduz o caminho total que a luz solar tem de percorrer através da atmosfera até atingir a superfície terrestre ao nível do mar. A massa de ar que os raios solares atravessam, é maior, quanto menor a elevação solar, traduzindo-se assim numa atenuação na energia transmitida. Para raios solares incidentes perpendicularmente ao plano horizontal terrestre tem-se um MA unitário, mas à medida que a distância zenital aumenta, o valor de MA é também aumentado. Para raios solares fora da atmosfera terrestre MA tem valor nulo.

Para uma atmosfera homogénea, e considerando uma aproximação geométrica simples, o índice de massa de ar é dado por:

$$MA = \frac{1}{sen\ \alpha_s} \tag{2.10}$$

Após a penetração na atmosfera e para dias de céu limpo, o valor da irradiância solar global é reduzida para valores típicos de $1000\ \mathrm{W/m^2}$, valor este que é usado por defeito nos testes de painéis fotovoltáicos.

Desta forma, a irradiância global no solo em plano perpendicular aos raios solares, pode ser calculada com valor razoável de aproximação pela seguinte expressão [25]:

$$\mathrm{G} = \mathrm{I_0}.\varepsilon \times 0{,}7^{\mathrm{MA}^{0{,}678}} \tag{2.11}$$

Para termos o mesmo valor correspondente ao plano horizontal $\mathrm{G}(0)$, basta entrar com a influência da altura solar:

$$\mathrm{G}(0) = \mathrm{G} \times \mathrm{sen}\ \alpha_\mathrm{s} \tag{2.12}$$

Os valores da variável global são normalmente expressos em watt por metro quadrado.

2.5.4 - Componentes da radiação solar no plano inclinado

A luz que chega ao solo consiste em duas componentes, a directa e a difusa. A componente directa da radiação, consiste nos raios solares que atingem o solo sem sofrer

qualquer reflexão. Esta componente tem desta forma direcção bem definida. Por sua vez, a radiação difusa não tem direcção definida. Esta componente tem origem principal na reflexão causada por nuvens ou então pela própria atmosfera, tendo a sua contribuição vinda de todo o hemisfério celeste à excepção do disco solar.

A soma da componente directa B e difusa D da radiação solar é designada de radiação global G.

As componentes directa e difusa podem variar muito ao longo do dia. Dias com baixa irradiância global, têm uma componente difusa elevada, podendo esta componente corresponder a aproximadamente 100% da radiação global. Isto acontece em dias em que não existe sol visível.

Pelo contrário, em dias de céu limpo a componente difusa diária será aproximadamente de 20%.

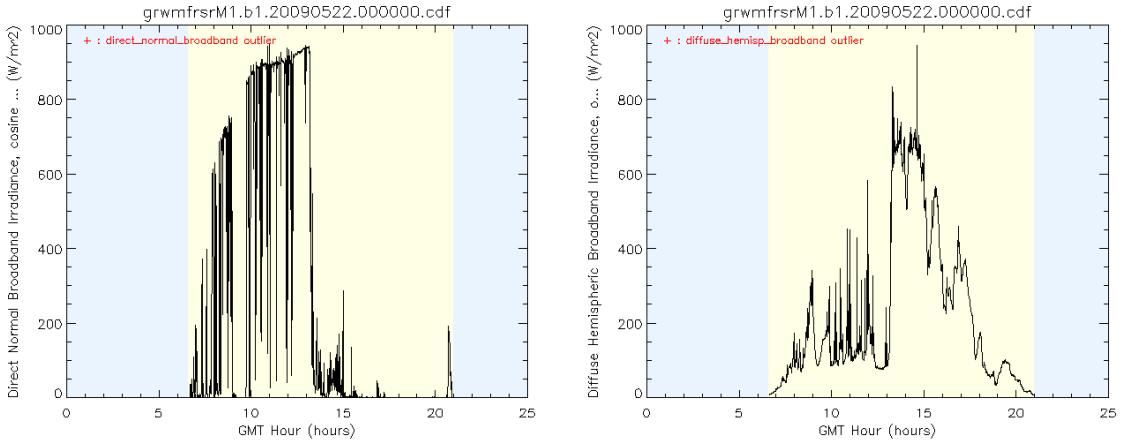


Figura 2.7 – Valores da irradiância para a componente directa (esquerda) e difusa (direita) [9]

Na Figura 2.7 está representado a variação das componentes ao longo do dia 22 de Maio de 2009 na ilha Graciosa. É notório que quando a componente directa diminui, a componente difusa aumenta e vice-versa.

Geralmente nas estações meteorológicas só é medida a componente global, sendo as componentes directa e difusa, estimadas pelo uso de um coeficiente de atenuação k_t. O índice k_t é a relação entre a irradiância global medida e a irradiância extraterrestre estimada. É necessário ainda multiplicar esta relação pelo coeficiente de massa atmosférica de modo a termos k_t actualizado para o momento de altura solar correspondente.

$$k_t = \frac{G}{E_0 . \operatorname{sen} \alpha_s} \tag{2.13}$$

Dependendo do valor que k_t toma, é usado um modelo de regressão, por exemplo os modelos diários de Collares-Pereira e Rabl [27] ou o modelo de Ruth e Chant. Para modelos de estimativa mensal existe o modelo de Page ou o modelo de Iqbal. Estes modelos permitem desta forma calcular a radiação difusa e consequentemente a radiação directa pela diferença entre componente global e difusa.

Para um plano inclinado pode-se ter mais uma componente, designada de albedo. O albedo é radiação que atinge o plano inclinado, depois de esta ter sido reflectida pelo espaço envolvente, como se representa na Figura 2.8.

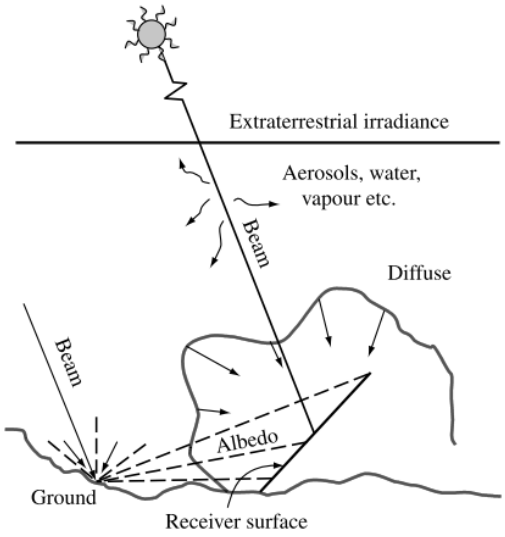


Figura 2.8 - Representação esquemática das componentes da radiação solar [25]

Para uma superfície inclinada, a radiação global é expressa pela soma da componente directa B, difusa D e albedo R. Assim, a radiação global G, em função da inclinação do plano e da sua orientação relativamente a o sul geográfico é

$$G(\beta, \varphi_{sup}) = B(\beta, \varphi_{sup}) + D(\beta, \varphi_{sup}) + R(\beta, \varphi_{sup}) \tag{2.14}$$

2.5.4.1 - Componente directa

Sendo ζ_{sup} (2.9) o ângulo entre o vector perpendicular ao plano inclinado e a direcção dos raios solares sobre a superfície inclinada, a componente directa é determinada por:

$$B(\beta, \varphi_{sup}) = B.\max(0, \cos \zeta_{sup}) \tag{2.15}$$

Onde B corresponde à radiação solar directa no plano perpendicular aos raios solares. Esta expressão permite assim ignorar valores negativos, para quando a posição solar se encontra do lado de trás do painel. B pode ainda ser determinado a partir da sua componente em superfície horizontal através de

$$B = \frac{B(0)}{\operatorname{sen} \alpha_s} \tag{2.16}$$

2.5.4.2 - Componente difusa

A componente difusa é complexa de determinar, pois ela tem origem em todo o hemisfério celeste visível, a excepção da posição do disco solar. De maneira a ser calculada com precisão, tem de se ter em conta as condições meteorológicas do momento e calcular assim a contribuição de cada ângulo sólido.

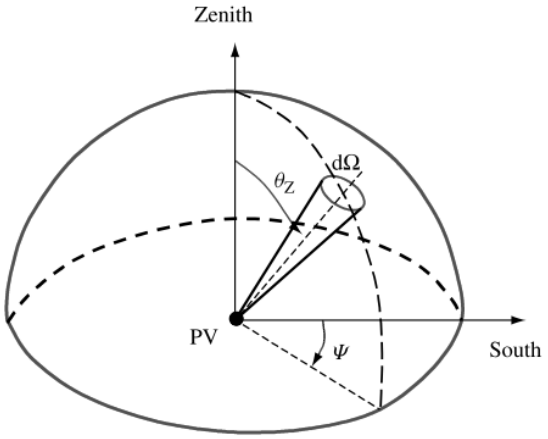


Figura 2.9 - Coordenadas angulares para o cálculo do ângulo sólido [25]

Nesta dissertação é apresentada uma forma de estimar esta componente para o plano horizontal tendo em conta as condições meteorológicas, funcionando o mesmo modelo para um plano inclinado. No entanto, o modelo não dá estimativas para um plano inclinado por não haver dados de treino no momento de execução do trabalho relativos a esta condição.

Desta forma, e de modo a simplificar, considera-se que a radiação é isotrópica, ou seja, a radiação esta distribuída de forma uniforme.

De forma semelhante ao que acontece para a radiação directa:

$$D(\beta, \varphi_{sup}) = \frac{D(0)}{\text{sen } \alpha_s} . \max(0, \cos \zeta_{sup}) \quad (2.17)$$

2.5.4.3 - Albedo

A contribuição do albedo é geralmente pequena, salvo casos de existência de neve ou então a instalação FV se encontrar em ambiente urbano [28]. Por esta razão, o modelo de cálculo desta componente é simples, considerando-se que o solo envolvente é horizontal, infinito e isotrópico. Desta forma, o albedo será maior quanto maior a inclinação da superfície alvo.

$$R(\beta, \varphi_{sup}) = \rho G(0) \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.18)$$

O coeficiente ρ, dá um índice de reflectividade do sol. Normalmente é usado o valor de $\rho = 0{,}2$.

2.5.4.4 - Síntese

Existem vários modelos de cálculo da radiação solar horária, sendo que a maior diferença entre eles, está na forma em como estes calculam a componente difusa, uma vez que a forma com a radiação se distribui sobre o céu é de difícil modelização [29]. A componente que resulta da reflexão da radiação incidente sobre o solo, tem uma complexidade de cálculo que varia de forma proporcional com a complexidade do solo envolvente. Relativamente a componente directa, esta é calculada de forma muito semelhante nos vários modelos existentes.

Fazendo assim uma pequena referência, os modelos mais importantes para o cálculo ou estimativa da recurso solar incidente sobre um determinado plano, para uma determinada localização são os seguintes:

- Modelos Isotrópicos [30-31]:
  - São modelos que consideram que o recurso solar se distribui de forma uniforme sob todo o hemisfério celeste, à excepção da posição solar, permitindo assim grande simplificação no cálculo da componente difusa.

- Modelos não isotrópicos:
  - Consiste no aperfeiçoamento do modelo Isotrópico, de forma a ter em conta a intensidade direccional difusa da radiação solar nas regiões próximas da posição solar e nas regiões do horizonte. Os modelos mais famosos são:
    - Modelo de Temps e Coulson [32];
    - Modelo de Perez [33];

- Existem ainda modelos que usam como variáveis de entrada dados relativos ao índice de nuvens e imagens de satélite [34-36];

2.6 - Inteligência artificial

Redes neuronais artificiais (RNA) são técnicas computacionais inspiradas na maneira como se organiza e como funciona o cérebro humano. Uma rede neuronal é um modelo matemático inspirado na estrutura neuronal do cérebro humano, que adquire conhecimento através da experiencia. Na sua constituição, uma rede neuronal é formada por várias unidades de processamento, denominadas de neurónios, que estão normalmente interligados por canais de comunicação aos quais está associado um determinado peso ou importância [37].

2.6.1 - Estrutura e funcionamento de um neurónio

Um neurónio pode possuir várias entradas para uma saída. Na Figura 2.10 está representada a constituição de um neurónio.

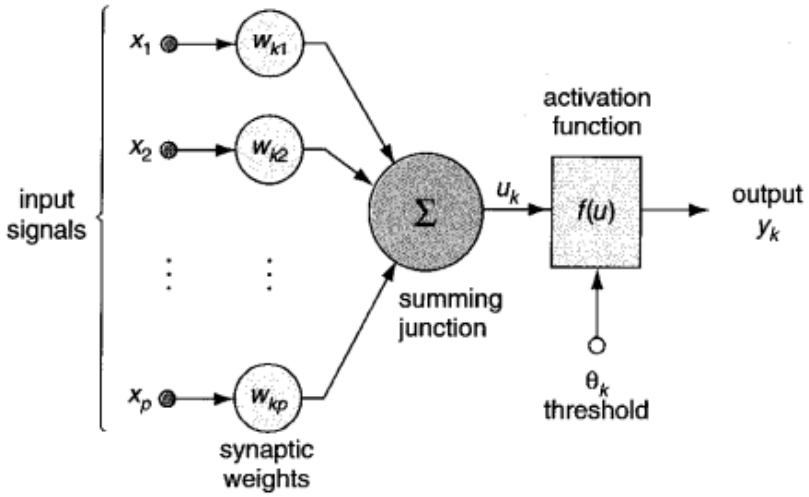


Figura 2.10 - Modelo simplificado da estrutura de um neurónio [38]

Onde:

- x_n– Entradas do neurónio;
- W_{kn} – Pesos atribuídos a cada entrada;
- U_k – Soma ponderada das várias entradas associadas aos respectivos pesos;
- θ_k – Função de activação, onde é transformado o sinal U_k na saída Y_k.

A função de activação do neurónio pode ser linear ou não linear, sendo as não lineares as mais usadas, dado que normalmente se pretende simular funções não lineares. Nas três figuras seguintes é feita a apresentação dos três tipos de funções mais vulgarmente usados.

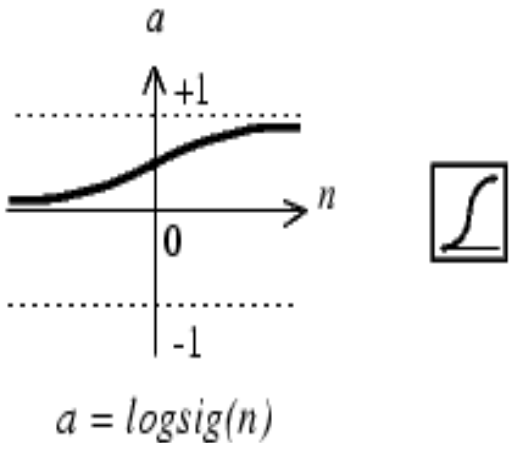


Figura 2.11 - Função de transferência LOGSIG [37]

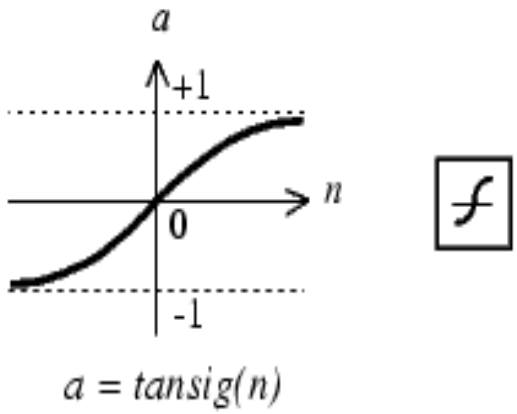


Figura 2.12 - Função de transferência TANSIG [37]

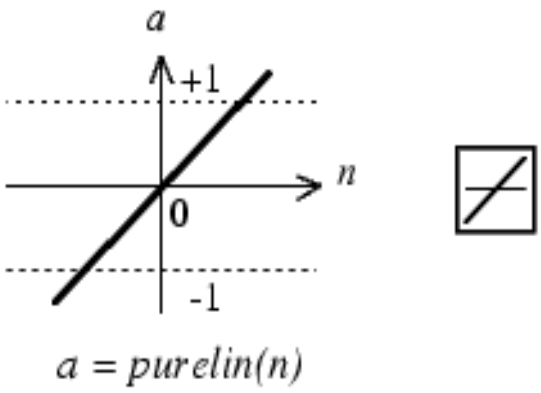


Figura 2.13 - Função de transferência PURELIN [37]

2.6.2 - Arquitectura das redes neuronais

As redes neuronais podem ser classificadas como sendo unidireccionais *(feedforward)* ou recorrentes *(feedback)*.

As mais usadas são as redes do tipo *feedforward*. Estas redes funcionam de forma progressiva, onde não existe informação adicional acerca dos processos a jusante, ou seja, sem realimentação (Figura 2.14).

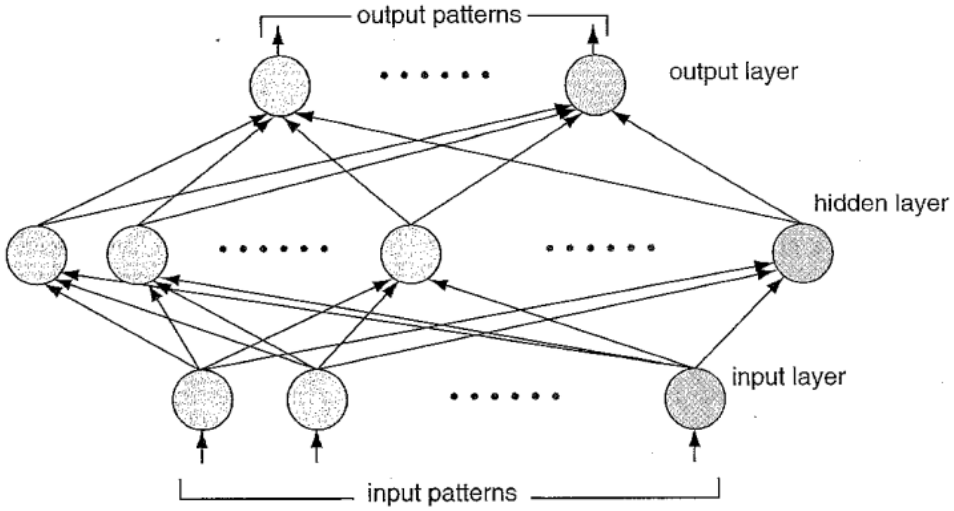


Figura 2.14 - Rede neuronal do tipo *feedforward* [38]

Neste tipo de redes os neurónios são organizados sob a forma de camadas, onde a informação é projectada a partir da camada de entrada para a camada de saída, mas não vice-versa, a rede é estritamente orientada num único sentido. Devido à sua representação em camadas são designadas por redes de camadas, sendo as *Multi Layer Perceptron* (MLP) um exemplo deste tipo de redes. Este tipo de redes tem sido muito utilizado em aplicações de previsão.

As redes com realimentação *(feedback)* têm também conexões entre os neurónios no sentido contrário. A figura seguinte apresenta um exemplo deste tipo de rede.

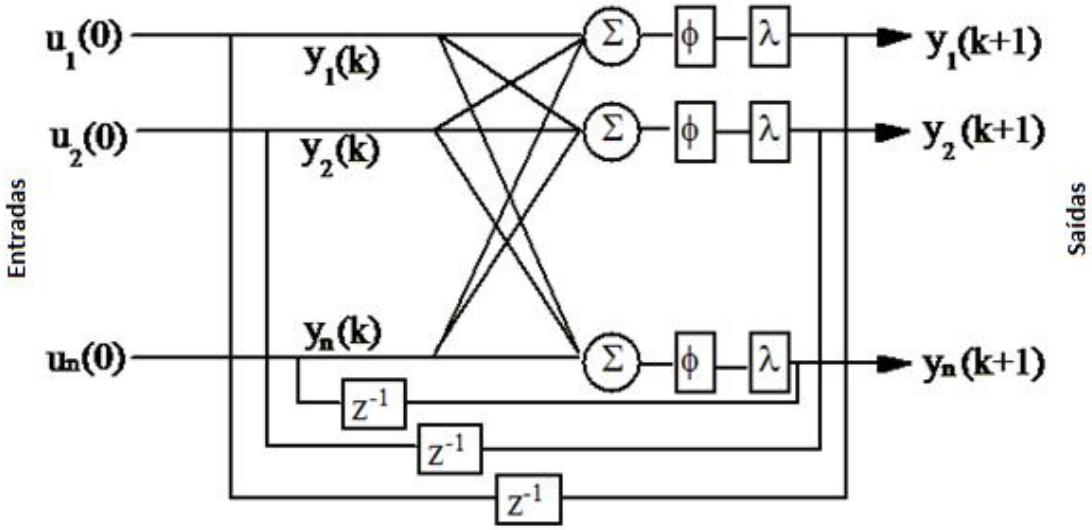


Figura 2.15 - Rede neuronal do tipo *feedback* [37]

Em conclusão, quando a informação usada em cada camada não constitui informação de entrada de nenhuma camada anterior, a rede designa-se por rede de alimentação directa *(feedforward)*. Caso contrário, designam-se por redes recorrentes *(feedback)*.

2.6.3 - Processo de aprendizagem das redes neuronais

O processo de aprendizagem das redes neuronais consiste essencialmente em determinar o valor de cada peso presente em cada um dos neurónios, para que uma dada entrada na rede neuronal, esta coloque à sua saída o valor pretendido. Para que isto seja possível existem vários tipos de metodologias que permitem determinar os pesos de cada neurónio. A este processo dá-se o nome de treino da rede neuronal, existindo também vários tipos de treino.

O treino da rede neuronal tem então por objectivo permitir estimar os pesos de cada neurónio, de modo a que para um dado exemplo de entrada a rede consiga simular na saída o valor correspondente ao que é dado como exemplo. O objectivo do algoritmo de treino é levar a que a rede neuronal aprenda, de modo a que o erro quadrado entre o valor obtido pela rede O_s, e o valor real T_s, tenda para zero.

$$E = \frac{1}{2}\sum (T_s - O_s)^2 \qquad (2.19)$$

O algoritmo de treino que permite levar a que o erro E tenda para zero pode ser de vários tipos:

- Aprendizagem supervisionada – a rede aprende com exemplos de sinais de entrada e saída conhecidos. Entre outros tipos de algoritmos de aprendizagem supervisionada, temos:
    - Aprendizagem por retropropagação é o método de aprendizagem supervisionada mais utilizado. Este método consiste num algoritmo que geralmente aplica o método dos mínimos quadrados para minimizar o

erro da rede neuronal e implementa o sistema de cálculo sucessivo das derivadas parciais numa direcção contrária à da normal propagação da informação através da rede. Formulação matemática disponível em [39];

- Aprendizagem pelo método Levenberg-Marquardt, é um método 10 a 100 vezes mais rápido do que o anterior, sendo uma variante do método de Newton[40].

- Aprendizagem não supervisionada – este treino está relacionado com situações em que não são conhecidos os valores de saída. Os conjuntos de entrada são mapeados num conjunto de dados de saída, seguindo um processo de classificação dos dados com base na sua semelhança. Os pesos são ajustados com o objectivo de maximizar a transferência de informação da entrada para a saída, sem existir um conhecimento prévio acerca da veracidade da saída obtida, dado não existirem observações reais.
  - Aprendizagem competitiva – Este método é caracterizado pelo seu bom comportamento em sistemas de classificação, dado que, na rede neuronal, perante um conjunto de entrada, todas as unidades de processamento vão concorrer entre si pelo direito de resposta. A aprendizagem tem capacidade de detectar características nos conjuntos de entrada.
- Aprendizagem forçada – No treino forçado não são fornecidas as saídas correctas para as entradas, mas são atribuídos prémios ou castigos consoante a performance do resultado obtido na saída.
  - Aprendizagem pelo método de Hebb – O método de Hebb tem como principio o reforço da sinapse quando os dois neurónios dessa ligação estão activos simultaneamente.

2.6.4 - Configuração da estrutura de redes neuronais

O processo de configuração de uma rede neuronal consiste em definir o número de camadas intermédias, bem como o número de neurónios da camada intermédia.

O número total de camadas é definido pelo número de camadas intermédias adicionado ainda as camadas de entrada e a de saída. A camada de entrada deve ter um número de neurónios igual ao número de entradas, tal como acontece para a camada de saída, onde o número de neurónios é igual ao número de saídas que se pretende. Em vez de se ter vários neurónios na camada de saída, pode-se adoptar por fazer uso de várias redes neuronais com um único neurónio de saída. Quanto ao número de camadas intermédias, normalmente uma camada é suficiente mesmo para problemas não lineares, podendo ser no entanto duas camadas intermédias para problemas muito complexos.

Neste momento falta apenas definir o número de neurónios da camada intermédia. No entanto não existe um método que garanta qual o número adequado de neurónios para esta camada, mas pode-se considerar que a regra de 2n+1 é adequada, uma vez que costuma proporcionar bons resultados. A variável n corresponde ao número de entradas da rede neuronal.

2.6.5 - Estandardização

Estandardização é um processo onde se faz um ajuste de escalas dos dados de entrada. Este processo tem como objectivo principal melhorar a eficiência do modelo bem como aumentar a rapidez do processo de aprendizagem. Neste processo é feita uma equalização das escalas de todas as variáveis de entrada, para uma gama de intervalos igual para todas as variáveis. A gama de intervalo pode ser por exemplo o intervalo [-1, 1], ou seja, pretende-se que qualquer valor que a entrada possa tomar se encontre dentro deste intervalo. Para se conseguir isto existem vários métodos de estandardização disponíveis, como por exemplo os métodos Min-Máx, *Z-Score* e o Método *Decimal Scaling* [37].

2.6.5.1 - Método Min-Máx

Este é o melhor método a ser aplicado, quando conhecidos os valores mínimos e máximos das variáveis de entrada. Neste tipo de estandardização é feito uma transformação linear dos dados originais. Na seguinte equação é apresentada a formulação matemática de estandardização dos dados:

$$\mathrm{v}' = \frac{\mathrm{v} - \min_{\mathrm{a}}}{\max_{\mathrm{a}} - \min_{\mathrm{a}}} \times (\max_{\mathrm{A}} - \min_{\mathrm{A}}) + \min_{\mathrm{A}} \tag{2.20}$$

Onde:

- v' - Valor de cada variável de entrada estandardizado
- v - Valor da cada variável de entrada a ser estandardizada
- min_a e max_a - Valor mínimo e máximo de cada variável do conjunto de entrada
- min_A e max_A - Valor mínimo e máximo da escala de estandardização

Para restaurar os valores nas escalas originais basta inverter o processo, designado de destandardização, através da equação seguinte:

$$\mathrm{v} = \frac{\mathrm{v}' - \min_{\mathrm{A}}}{\max_{\mathrm{A}} - \min_{\mathrm{A}}} \times (\max_{\mathrm{a}} - \min_{\mathrm{a}}) + \min_{\mathrm{a}} \tag{2.21}$$

Este é o método de estandardização utilizado no trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2.6.5.2 - Método Z-Score

Este método necessita da média e desvio padrão do conjunto de entrada. O valor v de A é escalado para v', onde $\overline{\mathrm{A}}$ e δ correspondem respectivamente à média e desvio padrão do conjunto de entrada A da seguinte equação:

$$\mathrm{v}' = \frac{\mathrm{v} - \overline{\mathrm{A}}}{\delta} \tag{2.22}$$

Para o processo de destandardização tem-se:

$$v = v' \times \delta + \overline{A} \tag{2.23}$$

2.6.5.3 - Método *Decimal Scaling*

Este método faz apenas um ajuste de escala decimal. É utilizado quando são apenas conhecidas a ordem de grandeza das variáveis. Assim sendo:

$$v' = \frac{v}{10^j} \tag{2.24}$$

A variável j é tal de forma a $\mathrm{Max}(|v'|) < 1$. Para restaurar os dados na escala original:

$$v = v' \times 10^j \tag{2.25}$$

2.7 - Modelos de Regressão

Os modelos de regressão são um dos métodos estatísticos usados para encontrar a relação entre variáveis. Estes modelos podem ser usados na previsão em vários sentidos:

- Previsão da evolução temporal (Y, t), com base no histórico das series temporais;
- Regressão univariável simples;
- Regressão multivariável, aplicadas em series temporais;
- Previsão de uma variável função das restantes (Y, X), geralmente multivariável.

De forma a conseguir realizar previsões futuras, é feita uma extrapolação para o futuro das relações causa-efeito já observadas no passado entre as variáveis. Contudo é necessário respeitar os seguintes pressupostos:

- Assume-se que o erro tem média nula e variância constante;
- Também se assume que os elementos do erro são independentes entre si;
- O erro deve ter uma distribuição Normal.

Existem dois tipos de regressões, as lineares e as não lineares. Esta classificação é somente devida a relação que existe entre as variáveis explicadores e as variáveis a prever.

Na figura seguinte é apresentado um exemplo de regressão linear entre duas variáveis.

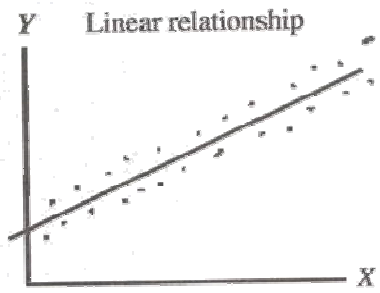


Figura 2.16 - Exemplo de uma regressão linear [41]

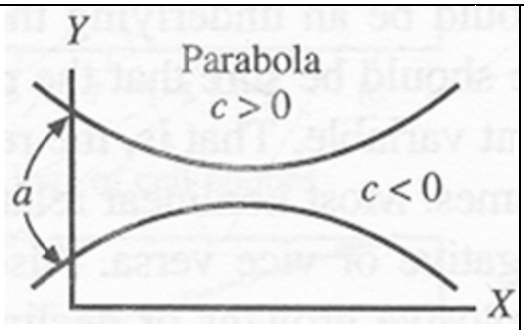
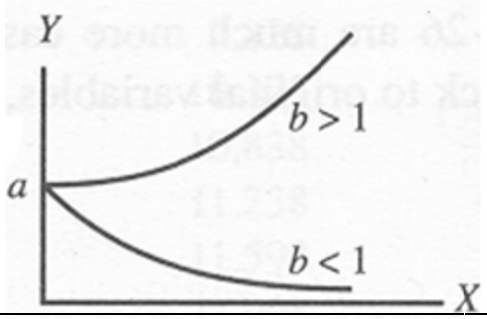
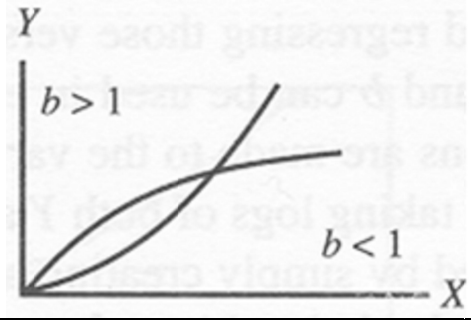
A variável Y depende de X da seguinte forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 . X \tag{2.26}$$

Onde β_0 e β_1 são parâmetros da regressão da variável Y.

Quanto a regressões não lineares, na tabela seguinte é apresentado um conjunto de exemplos.

Tabela 2.1 - Exemplos de regressões não lineares [41]

	Regressão polinomial de segunda ordem $Y = a + bX + cX$
	Regressão exponencial $Y = ab^X$
	Regressão potencial $Y = aX^b$

Tal como no exemplo anterior as variáveis a, b e c são parâmetros de regressão, e X é a variável independente, sendo Y a variável dependente.

O uso do método dos mínimos quadrados é uma das formas que permite a determinação dos parâmetros de regressão. Este método consiste em determinar os parâmetros de regressão para que o modelo de regressão aproxime o mais possível os valores apresentados graficamente. Em [41] está disponível a formulação deste método.

2.8 - Avaliação de modelos

Para avaliar o desempenho de um modelo podem utilizar-se variados indicadores estatísticos. Desta forma surgem diversas formas de avaliação, não existindo um consenso, sobre qual a melhor forma a se utilizar. De uma forma simples, pode-se referir que o erro que um sistema de previsão comete para um determinado instante consiste na diferença entre o valor real e o valor previsto.

2.8.1 - MAPE – Erro Médio Absoluto Percentual

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) é um método de avaliação da capacidade que um conjunto de informação tem em se adaptar aos valores reais de uma serie temporal. Matematicamente, o MAPE é a soma dos módulos dos erros (valor real menos o valor previsto), sobre o valor médio do conjunto, a dividir pelo número de dados referentes a todo o conjunto.

$$MAPE = \frac{\frac{1}{N}\sum|V_{real} - V_{previsto}|}{V_{médio}} \tag{2.27}$$

Onde:

- N é o número de elementos do conjunto;
- V_{real} é o valor real;
- $V_{previsto}$ é o valor previsto;
- $V_{médio}$ é o valor médio do conjunto.

2.8.2 - MAE - Erro Médio Absoluto

Mean Absolute Error (MAE) é a média dos erros absolutos, expressa da seguinte forma:

$$MAE = \frac{1}{N}\sum|V_{real} - V_{previsto}| \tag{2.28}$$

Onde:

- N é o número de elementos do conjunto;
- V_{real} é o valor real;
- $V_{previsto}$ é o valor previsto;

2.8.3 - Coeficiente de determinação R^2

O coeficiente R^2, representa a proporção da variável dependente V_{real} que pode ser explicada pelo modelo, sendo que este valor varia entre 0 e 1 (quanto mais perto de 1 for melhor é o modelo). R^2 é expresso da seguinte forma:

$$R^2 = \frac{\sum(V_{previsto} - V_{médio})^2}{\sum(V_{real} - V_{médio})^2} \quad (2.29)$$

Onde:

- V_{real} é o valor real;
- $V_{previsto}$ é o valor previsto;
- $V_{médio}$ é o valor médio do conjunto.

Capítulo 3

Metodologia proposta

3.1 - Introdução

Neste capítulo é feita a apresentação com detalhe da metodologia criada, em que tem como objectivo permitir fazer uma previsão a muito curto prazo da radiação solar. Com esta metodologia pretende-se determinar com precisão a evolução da radiação solar a nível local, usando para este objectivo novas técnicas e ferramentas.

O presente tema de dissertação é um tema demasiado amplo e complexo, que requer conhecimentos de várias áreas e que tem um tempo de conclusão muito superior ao que é reservado para o desenvolvimento da presente tese de dissertação. Assim sendo, o objectivo essencial deste trabalho de dissertação é apresentar uma metodologia, bem como a sua justificação. Desta forma, são desenvolvidas e apresentadas ferramentas, que numa primeira fase são essenciais para demonstrar o funcionamento e em que se baseia a metodologia aqui apresentada.

Etapas importantes como a simulação e dinâmica de nuvens não são desenvolvidas nesta tese. Esta é uma etapa importante, na medida em que é necessária para uma efectiva previsão da radiação solar. Ainda assim, neste trabalho são apresentados os requisitos necessários para cada etapa, identificando também maiores dificuldades e cenários que são de esperar.

3.2 - Descrição da metodologia

A metodologia aqui apresentada tem como fim obter uma previsão de valores de irradiação solar para um horizonte de tempo de alguns minutos. Devido ao pequeno horizonte que é requerido e à necessidade de uma maior precisão na evolução dos valores de irradiância, a metodologia aqui apresentada consiste em fazer uma aquisição de imagens em tempo real e de forma constante ao longo do dia. É objectivo captar nestas imagens as condições climatéricas que se fazem sentir localmente, de forma a poder a partir destas imagens, conseguir fazer estimativas e previsões de valores de irradiância com precisão

suficientes para as suas componentes directa e difusa, de modo a poderem ser usadas para o cálculo de potência eléctrica de uma qualquer central solar.

A previsão é desta forma feita essencialmente com recurso a técnicas de processamento de imagens, à semelhança do que acontece para as imagens de satélite, mas neste caso é necessário adaptar a metodologia, uma vez que as imagens são recolhidas a partir do solo. Devido à forma como as imagens são adquiridas, com recurso a equipamentos muito mais simples e económicos, quando comparados com o uso de satélites, tem-se como vantagem uma maior resolução, permitindo maior exactidão na previsão local. Como desvantagem, o uso deste tipo de informação local vai limitar o horizonte de previsão, uma vez que estamos limitados a um espaço muito menor quando comparado com o que é feito a partir de uma captura de imagens a partir do espaço, o que nos deixa limitados às condições verificadas localmente. O uso desta metodologia também só permitirá realizar previsões durante a existência de luz natural, uma vez que a captura de imagens é feita na faixa do espectro solar visível, mas tendo em conta ao fim que se destina, isto não vem introduzir qualquer limitação.

3.7 - Etapas do projecto

Na Figura 3.1 é apresentado a conceptualização criada no âmbito deste trabalho de dissertação, com objectivo de permitir a obtenção de uma previsão de irradiância solar, ou mesmo uma previsão de potência gerada a partir de uma dada central solar. No diagrama da figura estão representadas as várias etapas que o autor desta dissertação entendeu como necessárias para atingir o objectivo final proposto. Para cada etapa é feita uma descrição em detalhe do que se pretende obter. Mais tarde, são apresentadas as ferramentas que foram desenvolvidas durante o trabalho de dissertação e que se encaixam em algumas das etapas agora apresentadas.

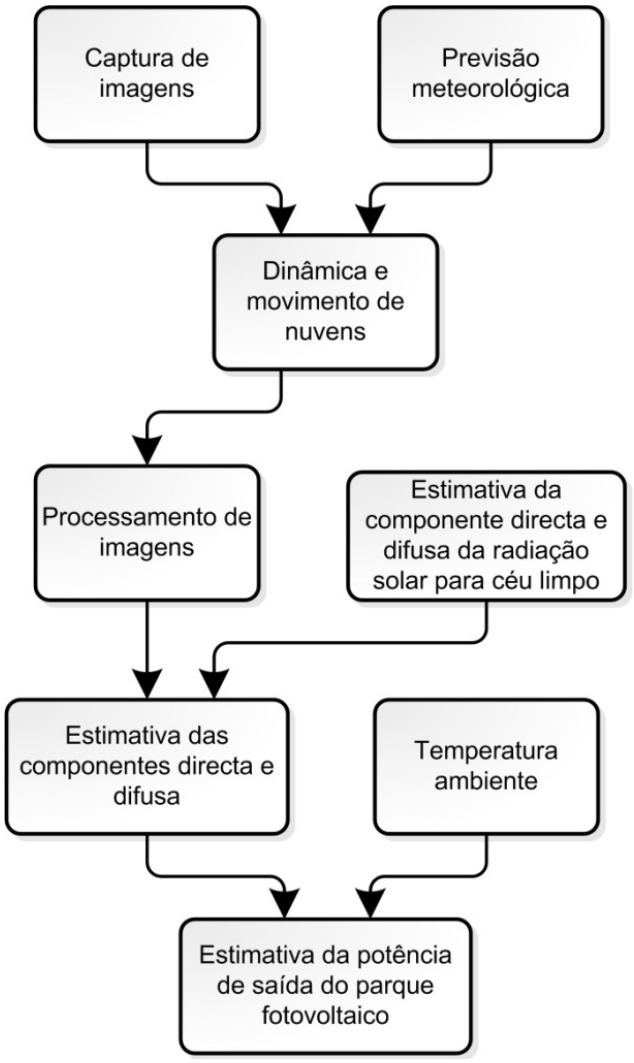


Figura 3.1 - Etapas da metodologia adoptada

3.7.1 - Captura de imagens

Esta é a etapa inicial de todo o processo. Esta etapa distingue logo à partida a forma como se pretende fazer este tipo de previsão, uma vez que esta técnica de captura de imagens a partir do solo não é realizada nas previsões comuns.

A captura de imagens é feita de forma contínua, em intervalos de tempo regulares de um minuto. Como se pode ver na sequência de imagens da figura seguinte, em cada imagem captada é registado o estado atmosférico de todo o céu visível, do ponto onde o sistema de captura de imagens se encontra instalado. Como já foi referido, o ângulo de visão aumentado deve-se ao uso do espelho convexo, que permite desta forma obter imagens com um ângulo de visão de $180°$.

Figura 3.2 - Exemplo de uma sequência de imagens de captura das condições atmosféricas locais

Como se pode observar pela Figura 3.2 todo o céu é visível, graças ao aumento do ângulo de visão proporcionado pela utilização do espelho. Com esta forma de captura de imagens é também visível uma progressão no movimento de nuvens, bem como a forma como a luz se difunde através da atmosfera.

3.7.2 - Previsão meteorológica

Esta é uma etapa optativa, na medida em que não é estritamente necessária para se conseguir atingir o objectivo final de obter uma previsão de radiação solar. No entanto, o uso de informação, obtida através de modelos meteorológicos permite dar maior horizonte de previsão à metodologia adoptada, uma vez que há maior capacidade em identificar a verdadeira situação atmosférica nas zonas mais distantes visíveis na imagem, uma vez que para grandes distâncias do ponto de captura das imagens existe dificuldade de identificação das condições atmosféricas, bem como a sua evolução. Com esta etapa pode-se por exemplo antecipar os locais onde eventuais nuvens vão surgir, a sua orientação de propagação sobre o terreno, bem como as suas características, nomeadamente altura e tipo de nuvens. Este problema de identificação das condições atmosféricas vai ser abordado na etapa referente ao processamento de imagens.

3.7.3 - Dinâmica e movimento de nuvens

Esta é uma etapa essencial, pois aqui são obtidas informações quanto à progressão das nuvens no terreno. Estas informações podem ser obtidas através de modelos meteorológicos comuns de previsão que recorrem a imagens de satélite, mas para maior precisão é essencial fazer um reconhecimento de nuvens através de um processamento de imagens, onde é utilizada a sequência de imagens obtidas para fazer a detecção de sentido e velocidade do movimento. Isto pode ser conseguido com recurso a um algoritmo de identificação de movimento, à semelhança do que acontece para as imagens de satélite [12], mas neste caso

é mais simples, pois o movimento local de nuvens é normalmente feito todo no mesmo sentido. No entanto é necessário ter em conta a distorção causada pela introdução do espelho convexo, podendo ser então necessário fazer uma linearização da imagem de modo a melhorar a detecção do sentido do movimento.

Figura 3.3 - Identificação de movimento em sequência de imagens

Dependendo da evolução e da rapidez com que esta se faz, é possível saber nesta etapa qual o horizonte de previsão que se consegue obter com esta metodologia. Este horizonte de previsão vai ser variável ao longo do tempo, sendo dependente principalmente das condições atmosféricas que se fazem sentir, bem como a posição relativa do sol.

3.7.4 - Processamento de imagens

Para esta etapa, foi desenvolvida uma ferramenta de raiz que permite classificar cada pixel pertencente à imagem. Esta ferramenta foi baseada nas imagens classificadas que o equipamento de captura TSI produz (Figura 2.2). Maiores detalhes da ferramenta e da metodologia por de trás da sua construção serão apresentados mais à frente neste mesmo capítulo.

Assim nesta etapa cada imagem é convertida numa tabela de dados segundo uma metodologia própria, de forma a estes dados serem utilizados no modelo de estimativa da irradiância solar.

3.7.5 - Estimativa das componentes da radiação solar para céu limpo

Nesta etapa são determinadas as componentes directa e difusa da radiação solar para a condição de céu limpo. Estas componentes são usadas como variáveis de entrada para o modelo de estimativa de irradiância. Estas componentes são determinadas com recurso a um ajuste da função que calcula a irradiância solar extraterrestre e os valores medidos de cada

componente da radiação solar verificados em dias de céu limpo. Mais à frente este assunto será mais detalhado.

3.7.6 - Estimativa das componentes directa e difusa

Esta é a última etapa da metodologia apresentada, no que respeita à previsão das componentes directa e difusa da radiação solar. Nesta etapa é criado um modelo usando redes neuronais, que tem como entradas os dados obtidos através do processamento de imagens e as componentes directa e difusa, estimadas para condição de céu limpo. O modelo aplicado é também detalhado mais à frente.

Após esta etapa está-se em condições de calcular a potência de saída de uma qualquer central solar, bastando para tal saber o modelo matemático que permite calcular a potência de saída em função da irradiância recebida.

3.7.7 - Previsão de potência

Esta é a etapa onde é feito o cálculo da potência de saída da central solar. A metodologia representada na Figura 3.1 refere-se ao caso particular de uma central solar fotovoltaica, mas a mesma metodologia funciona para qualquer outro sistema de aproveitamento de energia solar.

Para simulação da potência de saída de um sistema fotovoltaico, é necessário saber quais os valores de irradiância solar bem como a temperatura ambiente, uma vez que o rendimento dos painéis fotovoltaicos é fortemente influenciado pela temperatura. Ainda assim, estes dados não são suficientes para determinar a potência de saída de uma central solar, uma vez que são necessários dados adicionais que permitam prever o comportamento da central no que respeita a produção eléctrica em função dos vários factores que podem influenciar a curva de potência de saída. Uma forma de modelizar o comportamento de uma central solar seria recorrendo ao uso de redes neuronais artificiais. Assim sendo, a simulação que é feita nesta dissertação tem só em conta o comportamento dos painéis solares fotovoltaicos, simplificando assim a forma como a central fotovoltaica responde as variáveis irradiância e temperatura ambiente.

3.8 - Cenários de previsão

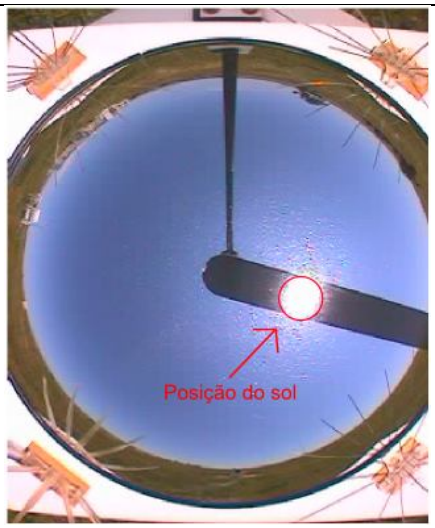
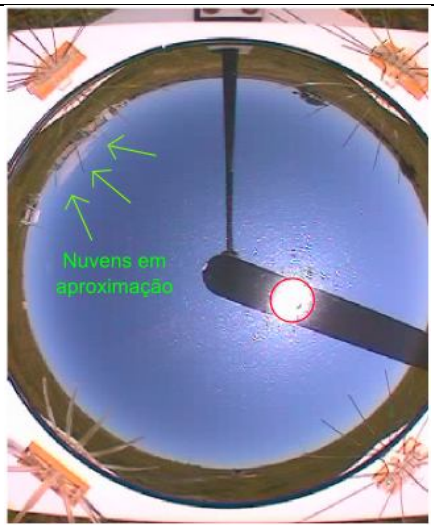
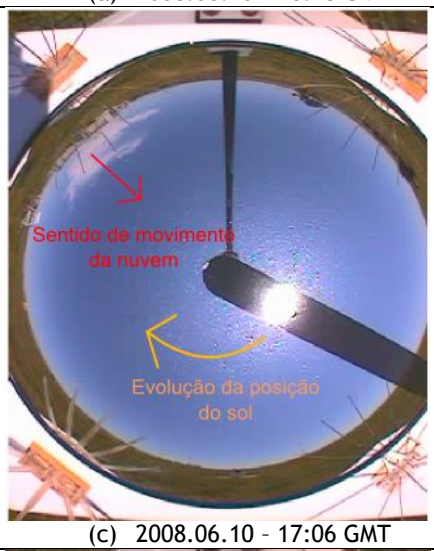
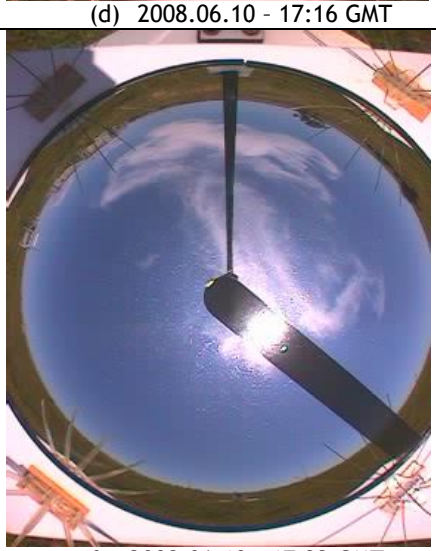
Neste trabalho foram identificados vários cenários de previsão, que vão afectar de forma directa o horizonte de previsão ou mesmo a qualidade da previsão. Estes cenários resultam essencialmente da orientação de progressão do sentido das nuvens relativamente à posição solar, bem como à posição do sol relativamente ao plano horizontal e por fim das condições atmosféricas que se fazem sentir.

NOTA: Todos os registos horários são feitos para o fuso-horário GMT.

3.8.1 - Cenário 1

Este cenário corresponde a um conjunto de situações que permite ter o maior horizonte de previsão. Na tabela seguinte está representado um exemplo ilustrativo.

Tabela 3.1 - Sequência de imagens (Cenário 1)

 (a) 2008.06.10 – 16:28 GMT	 (b) 2008.06.10 – 16:47 GMT
 (c) 2008.06.10 – 17:06 GMT	(d) 2008.06.10 – 17:16 GMT
(e) 2008.06.10 – 17:24 GMT	 (f) 2008.06.10 – 17:32 GMT

Como se pode observar, nas imagens apresentadas para este cenário, existe uma diferença de tempo superior a 30 minutos entre o momento em que é detectada a nuvem e o momento em que esta bloqueia parcialmente a luz solar. Este é o caso mais fácil de prever, pois existe uma progressão lenta do movimento das nuvens ao longo do tempo. Para além disto, as nuvens mantém praticamente constante a sua forma, facilitando a sua projecção em novas posições de forma a se obter a reconstituição da imagem futura e assim se obter a previsão.

Na figura seguinte está representado aproximadamente a hora seguinte às imagens apresentadas na tabela anterior. Serve este exemplo para demonstrar o impacto que as nuvens têm sobre a irradiância recebida à superfície.

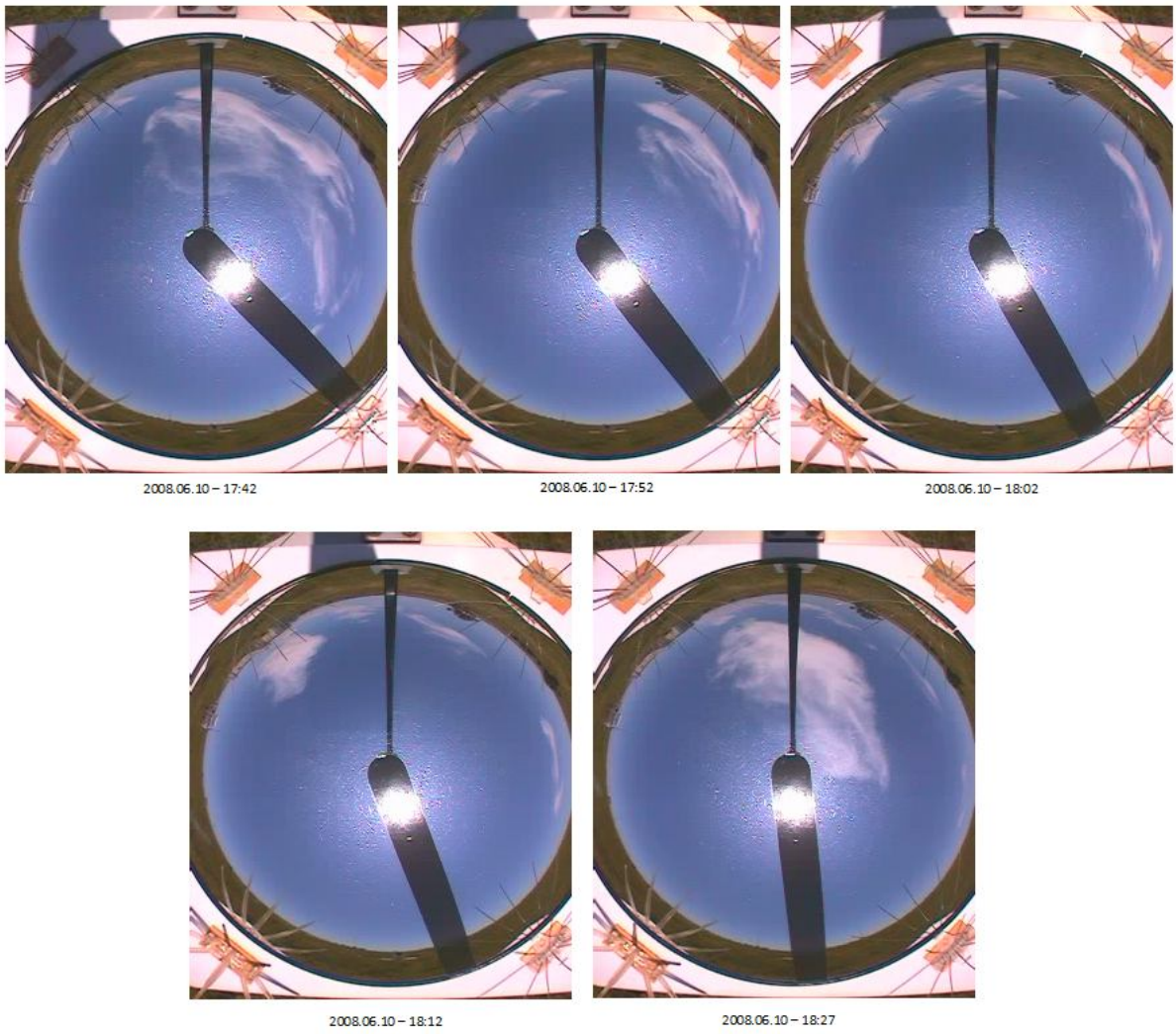


Figura 3.4 - Sequência de imagens (Exemplo cenário 1)

Todas as imagens apresentadas neste cenário correspondem a aproximadamente duas horas da duração do dia em questão. Nos dois gráficos seguintes é apresentado a evolução dos valores medidos de irradiância para o mesmo período em que estas imagens foram captadas.

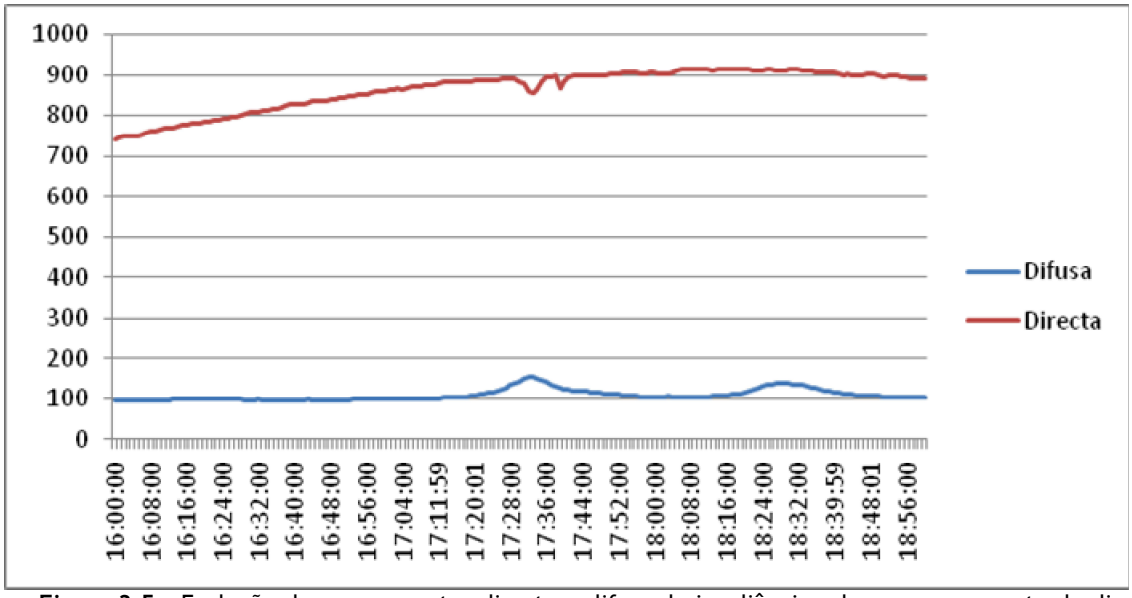


Figura 3.5 - Evolução das componentes directa e difusa da irradiância solar para uma parte do dia (Exemplo cenário 1). Valores da irradiância expressos em W/m^2.

Como se pode verificar na Figura 3.5 existe uma ligeira perturbação na energia solar recebida nas suas várias componentes. Para melhor demonstrar essa variação é apresentado a seguinte figura.

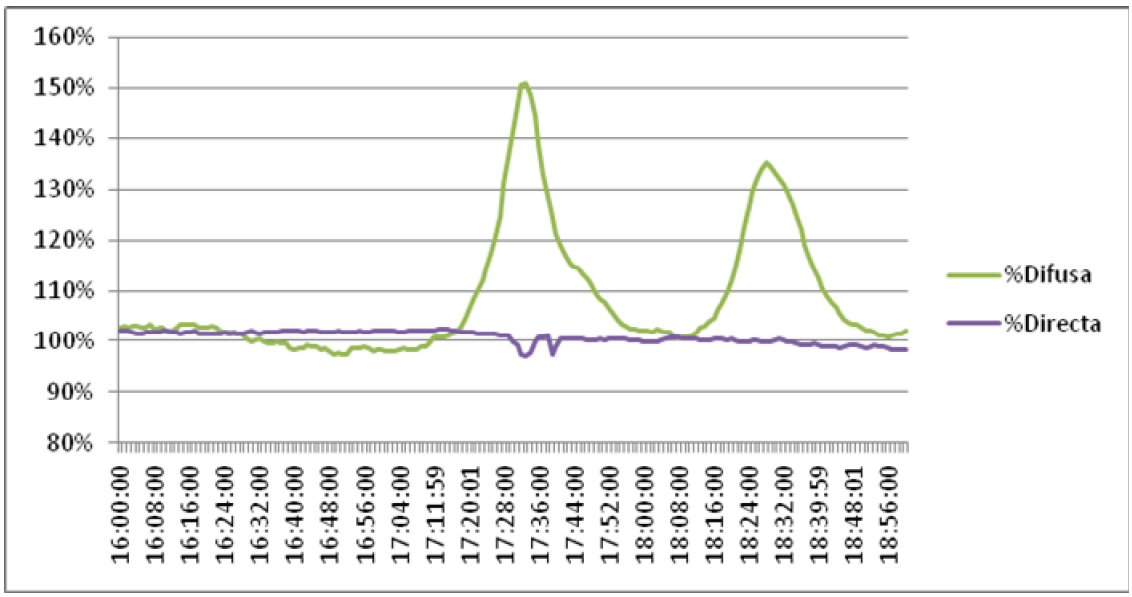


Figura 3.6 - Relação percentual entre a componente medida e a respectiva componente estimada para condições de céu limpo (Exemplo cenário 1).

Na Figura 3.6 é facilmente visível a influência das nuvens sobre o valor de irradiância recebida nas várias componentes. Como o sol foi só ligeiramente ocultado pelas nuvens, a componente directa da radiação solar praticamente que não foi afectada. Por outro lado, à medida que as nuvens se localizam mais próximas do ponto onde os dados foram recolhidos,

verifica-se um aumento acentuado da radiação difusa, devido ao facto de as nuvens reflectirem radiação em todas as direcções.

3.8.2 - Cenário 2

Neste cenário é apresentado uma situação onde o horizonte de previsão é muito curto ou mesmo nulo. Na figura seguinte está representado uma sequência de imagens que serve de exemplo.

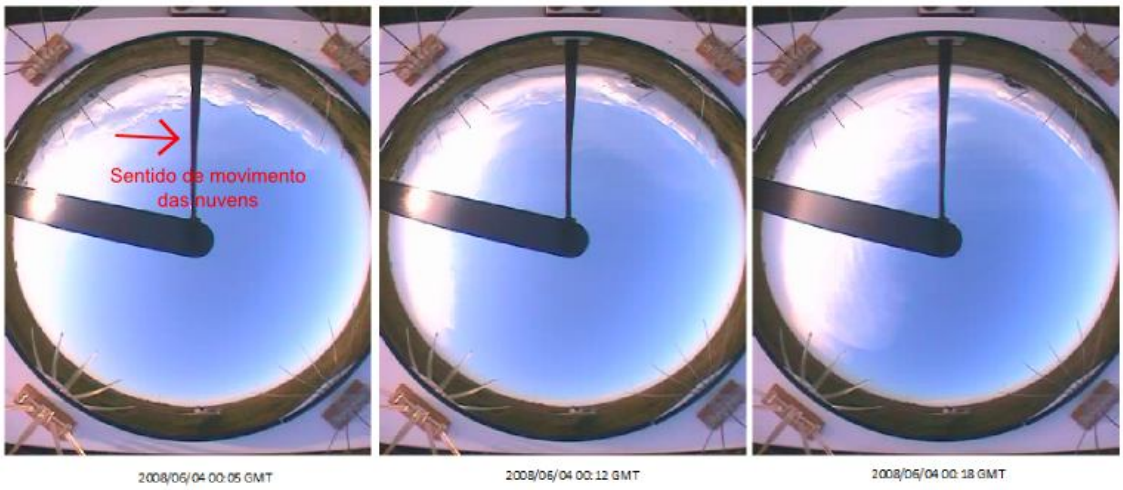


Figura 3.7 - Sequência de imagens (Exemplo cenário 2)

Na Figura 3.7 é apresentado uma situação em que existe um conjunto de factores que tornam a previsão a muito curto prazo ineficiente ou pouco precisa. O primeiro dos factores é o facto de a elevação solar ser baixa, tal como acontece na fase inicial e final do dia, ou então em meses de inverno, onde devido à inclinação da terra associada a latitude geográfica do local em estudo leva a ter o sol sempre a níveis baixos de elevação solar. Estando o sol numa posição muito próxima do limite do horizonte de visão, torna difícil detectar o que acontece em seu torno, principalmente quando o movimento das condições atmosféricas não é favorável tal como acontece na figura anterior. Por outro lado, se o movimento de nuvens for feito no sentido contrário, ter-se-á neste caso possibilidade de um elevado horizonte de previsão, pois o sol estará assim na posição aposta da posição onde surgem as nuvens, estando o equipamento de recolha fotográfica numa posição intermédia. Uma maior resolução de imagem pode permitir melhorar a identificação das condições atmosféricas próximas do horizonte.

Pelas razões apresentadas neste cenário justifica-se o uso de informações provenientes de modelos de previsão que utilizam como base imagens de satélite, uma vez que desta forma se pode antecipar qual a evolução das condições atmosféricas próximas do horizonte, conhecendo logo à partida qual o local onde podem surgir nuvens e ter uma ideia de qual o horizonte máximo que se pode ter numa previsão utilizando a metodologia aqui apresentada.

3.8.3 - Cenário 3

Neste cenário é apresentado um exemplo onde existe grande intermitência na radiação solar que é recebida sobre o solo. Este é um cenário onde a metodologia apresentada nesta dissertação pode ter grande importância, na medida em que pode evitar que a energia recebida de forma intermitente no tempo possa ser injectada da mesma forma na rede.

2008.06.12 – 17:06 GMT 2008.06.12 – 17:07 GMT 2008.06.12 – 17:08 GMT

Figura 3.8 - Sequência de imagens (Exemplo cenário 3)

Como se pode verificar pela sequência de imagens, o movimento de nuvens é muito rápido, o que leva a que mais uma vez o horizonte de previsão seja muito curto. No entanto este tipo de previsão pode ser especialmente interessante, mesmo para horizontes de tempo ligeiramente inferiores a cinco minutos, permitindo neste caso controlar a grande variação de potência que pode ser injectada na rede, especialmente no caso de centrais solares fotovoltaicas.

Na figura seguinte estão representados os valores medidos das componentes directa e difusa da irradiância solar.

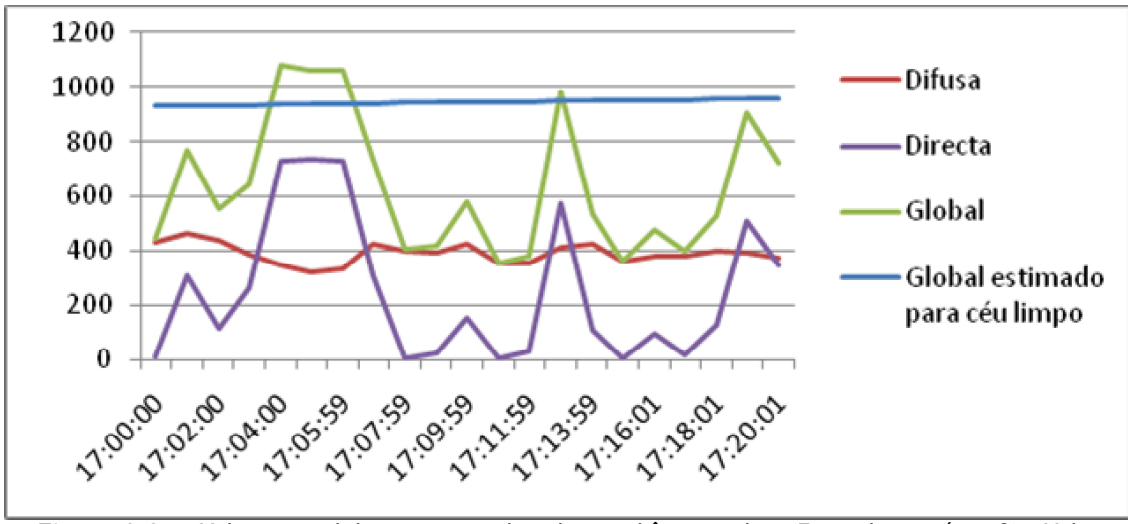


Figura 3.9 - Valores medidos e estimados da irradiância solar (Exemplo cenário 3). Valores expressos em W/m^2.

Na figura anterior é visível a grande variação que existe nos valores de irradiância medidos. Devido à grande heterogeneidade das condições atmosféricas a componente difusa tem um elevado valor, tendo valores que variam de forma pouco acentuada. Por outro lado a componente directa sofre grandes oscilações, devido à constante intermitência dos raios solares directos sobre o solo.

Na figura seguinte está representado o cociente entre os valores medidos e os valores estimados para cada componente em condição de céu limpo.

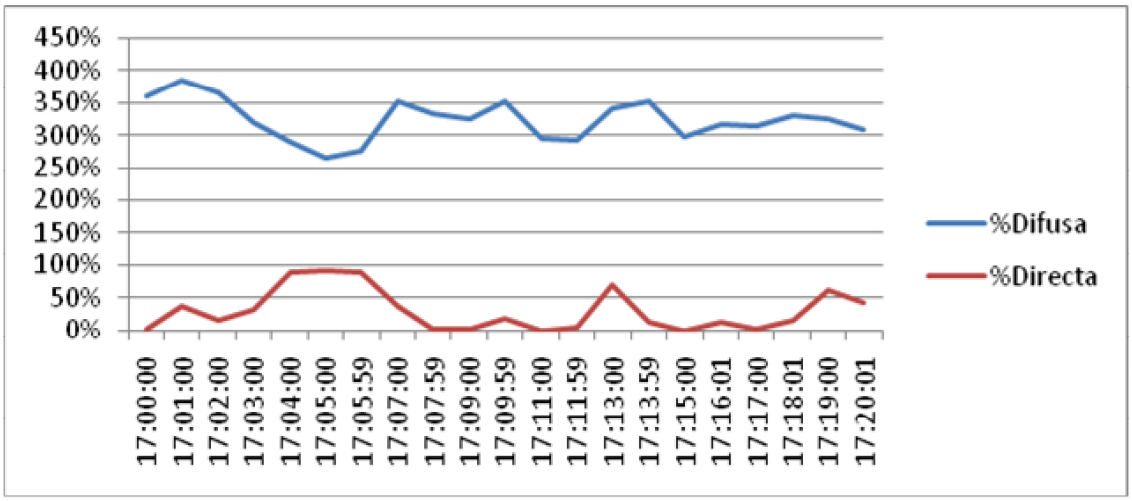


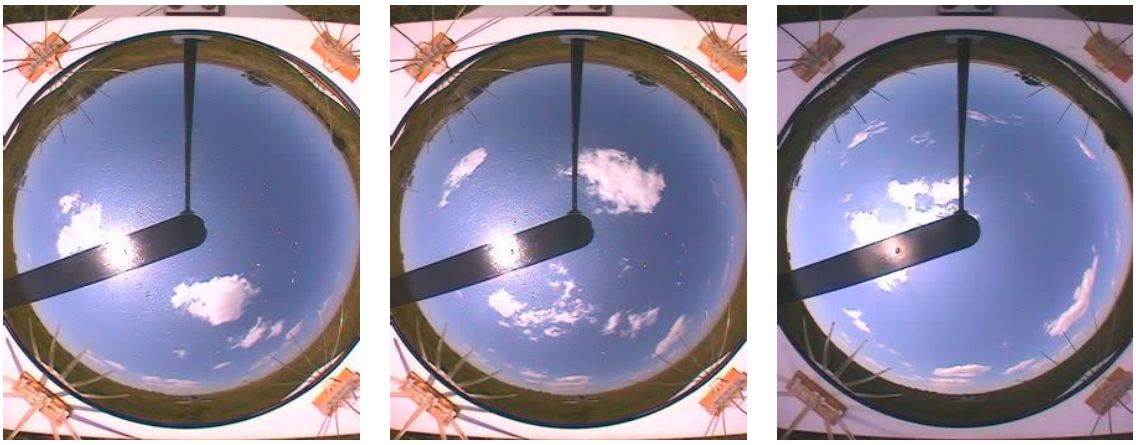
Figura 3.10 - Quociente entre valores medidos e estimados da componente directa e difusa (Exemplo cenário 3).

Esta última figura demonstra bem o aumento que a componente difusa sofre devido à heterogeneidade das condições atmosféricas. Um elevado valor da componente difusa associado a componente normal, leva a que nestas condições o valor total da irradiação recebida seja superior ao que é recebido em condições de céu limpo, uma vez que nestas condições a componente difusa é muito maior em comparação à condição de céu limpo. Por outro lado a componente directa é praticamente a mesma para a condição de céu limpo a quando da existência de sol visível.

Verifica-se assim que a causa de grandes variações de potência são devidas essencialmente a componente directa da radiação, já que a componente difusa se mantém razoavelmente estável, desde que as condições atmosféricas não se alterem de forma muito acentuada.

3.8.4 - Cenário 4

De todas as situações já apresentadas, esta é a mais complicada de prever. Este cenário faz referência à situação em que fazer a previsão de movimentos e dinâmica de nuvens é mais difícil, uma vez que existe situações em que as nuvens se formam e dissipam de forma aleatória, localmente e muito rápida.



2008/06/06 20:38 GMT 2008/06/06 20:41 GMT 2008/06/06 20:44 GMT

Figura 3.11 - Formação de nuvens localmente (Exemplo cenário 4)

Nesta ilustração é representado uma sequência de imagens onde se pode observar a existência de nuvens que se formam e dissipam de forma aleatória, não permitindo assim recriar uma imagem futura de forma a se obter a previsão de irradiância pretendida.

Pode-se verificar na figura seguinte que este tipo de formações também pode causar grandes variações no valor de irradiância recebida e em intervalos de tempo muito reduzidos.

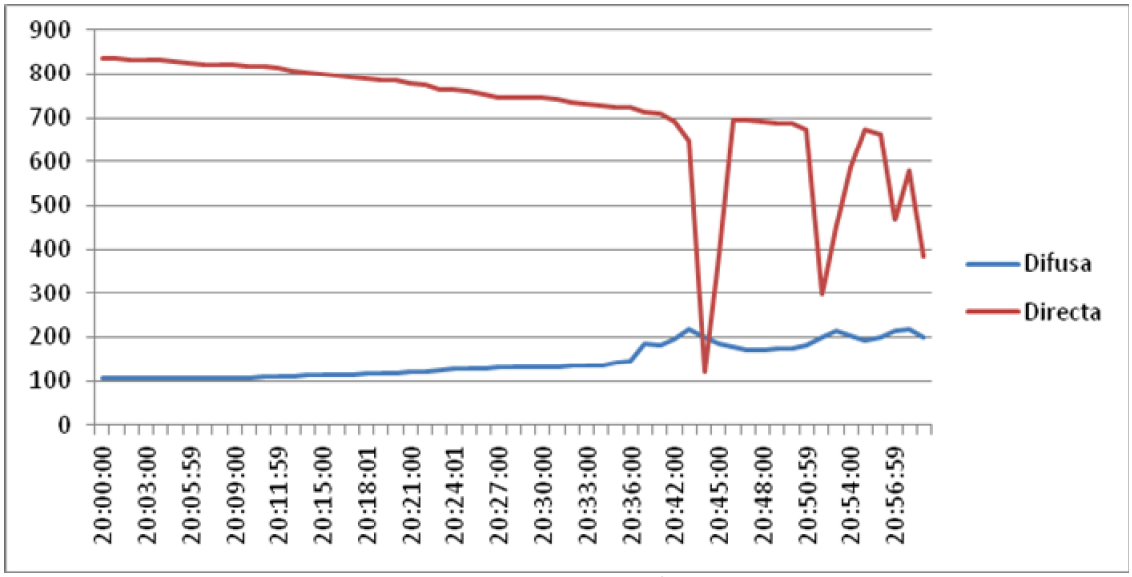


Figura 3.12 - Valores medidos e estimados da irradiância solar (Exemplo cenário 4). Valores expressos em W/m^2.

Este é provavelmente o cenário mais desfavorável de todos, na medida em que é o caso onde é mais difícil fazer uma previsão. No entanto, pelo conjunto de dados analisados, esta é uma situação que parece ocorrer com pouca frequência.

3.8.5 - Conclusões

Até agora foram descritos os quartos cenários identificados com recurso à análise de dados recolhidos. Poderá no entanto existir outras situações que se poderão ter em consideração, como é o caso de existência de condições atmosféricas especiais no local, que criam assim condições que podem dificultar a aplicação da metodologia desenvolvida.

Por fim, é de referir que em todos os cenários apresentados o maior factor que afecta o horizonte de previsão é a rapidez com que a evolução das condições atmosféricas se alteram, nomeadamente a rapidez com que o movimento de nuvens se faz sobre o terreno.

3.9 - Algoritmo de processamento de imagens

Para além da metodologia apresentada no capítulo anterior, foi desenvolvida uma ferramenta, de modo a organizar a informação visual registada em cada arquivo fotográfico, em dados que possam ser utilizados por um modelo de cálculo de valores de irradiância. Esta ferramenta foi inspirada nos arquivos que o equipamento de captura de imagens TSI realiza para cada imagem captada, onde também existe uma classificação de cada imagem de modo a identificar céu limpo de céu com presença de nuvens. Com cada imagem classificada resultante do processamento de imagens do TSI, é feita a contabilização do número total de pixéis classificados como sendo nuvens e pixéis classificados como sendo céu limpo. Desta forma é obtida a fracção de céu ocupado por nuvens, sendo este o objectivo para o qual este equipamento de captura de imagens foi desenvolvido.

No âmbito desta dissertação desenvolveu-se uma ferramenta de raiz que faz a classificação de cada pixel presente em cada imagem recolhida, já que o processamento de imagens do TSI não é feito da forma mais adequada para o que se pretende nesta metodologia, para além de também não serem conhecidos os valores dos vários parâmetros associados à identificação de nuvens, bem como não existir a organização de dados necessária para utilização no modelo de cálculo da irradiância para as várias componentes da radiação solar.

A construção desta ferramenta foi feita com recurso a programação em MATLAB, dado este programa ser especialmente adequado para a manipulação de tabelas de dados e operações matemáticas.

O processo de classificação de imagens aqui realizado, consiste fundamentalmente à atribuição de cores a cada pixel pertencente a imagem original.

3.9.1 - Etapas do algoritmo

Na figura seguinte está representado um diagrama onde são indicadas todas as etapas que foram implementadas para a construção desta ferramenta.

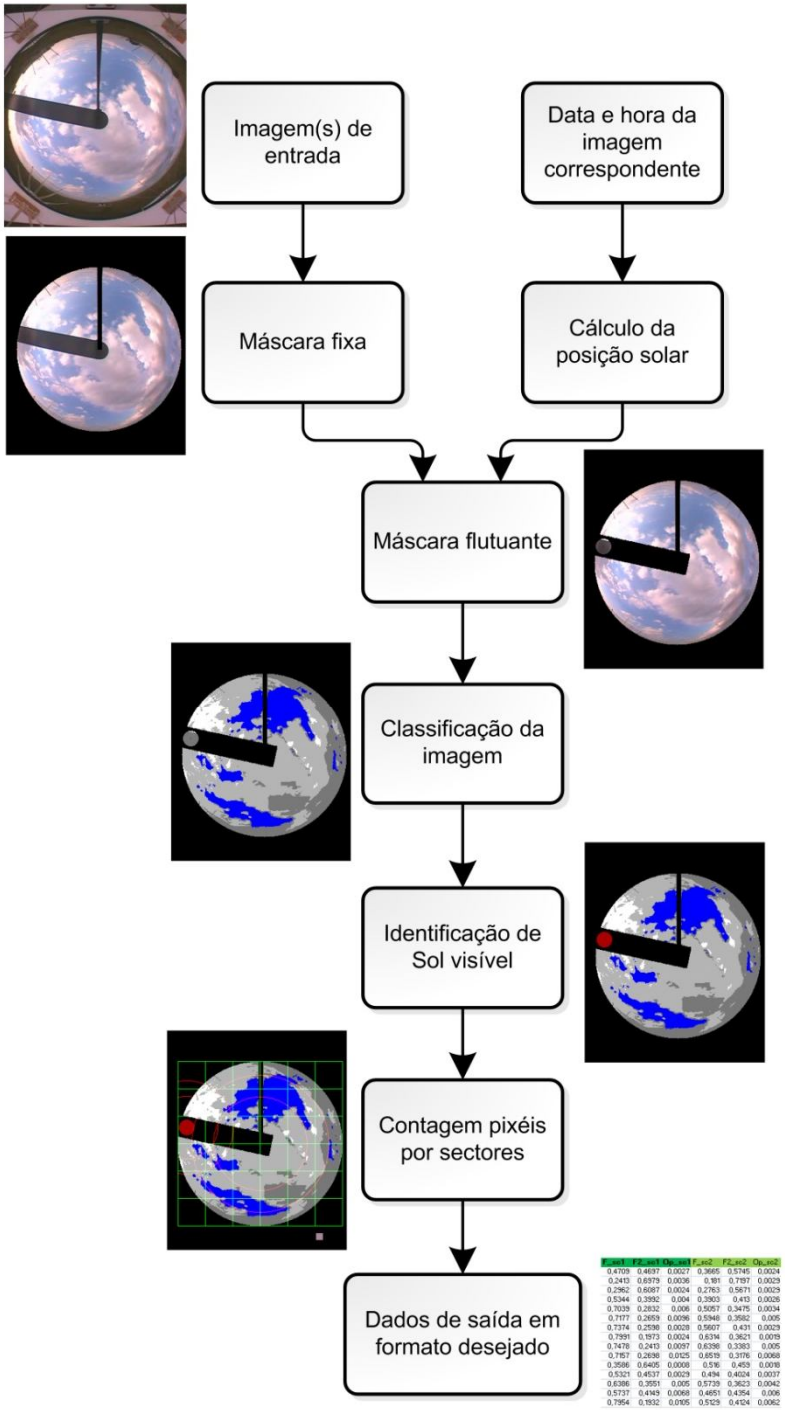


Figura 3.13 - Diagrama de etapas do algoritmo de processamento de imagens

3.9.1.1 - Imagens de entrada

Todo o processo começa com a importação das imagens de entrada. Para cada imagem tem de haver associado o momento em que esta foi adquirida. Nesta etapa são também feitos ajustes de parâmetros associados ao ponto central da imagem. Este ponto é usado como referência em todo o processo para que seja possível localizar na imagem a posição exacta do sol.

3.9.1.2 - Máscara fixa

Nesta etapa são eliminadas todas as partes da imagem que são constantes em todas as imagens adquiridas pelo TSI e que não tem qualquer informação visual sobre o estado atmosférico. Todos estes pixéis que não tem informação relevante tomam a cor preta de modo a não serem utilizados no processo de classificação.

3.9.1.3 - Máscara flutuante

Nesta etapa, à semelhança do que acontece na anterior, é feita a eliminação das partes móveis que não tem informação visual sobre o céu. Neste caso é ocultado a faixa preta que é colocada sobre o espelho de modo a ocultar os raios directos do sol. Como esta faixa se move ao longo do dia, é necessário calcular o azimute solar, de modo a determinar a posição da faixa preta ao longo de todo o dia. As coordenadas da posição solar são calculadas com recurso a data e hora exactas de cada imagem. O cálculo destas coordenadas é feito numa etapa anterior a presente, com recurso a expressões matemáticas apresentadas no capítulo dois da presente dissertação.

De notar que esta etapa é exclusiva para este equipamento de captura e imagens, uma vez que ele possui uma faixa preta para bloqueio dos raios solares directos sobre a objectiva da câmara fotográfica digital.

3.9.1.4 - Classificação de imagens

Cada imagem importada é convertida em três tabelas, onde cada tabela corresponde ao sistema primário de cores RGB (Red, Green, Blue), ou seja, em cada tabela está contida a informação relativa a uma cor primária. Nas imagens registadas pelo TSI, em cada pixel são usados 8 bits para quantificar o valor de cada cor primária. Assim sendo, os valores de cada cor primária variam unitariamente entre 0 e 255, correspondendo a 256 valores possíveis, ou seja $2^8 = 256$, onde o valor 0 corresponde à intensidade mínima de cada cor primária e o valor 255 a intensidade máxima. Da combinação das várias cores primárias obtêm-se qualquer cor. No sistema RGB o valor (0, 0, 0) corresponde à cor preta, o valor (255, 255, 255) corresponde ao branco. Na figura seguinte está representado como funcionam as combinações das várias cores, através do designado cubo RGB.

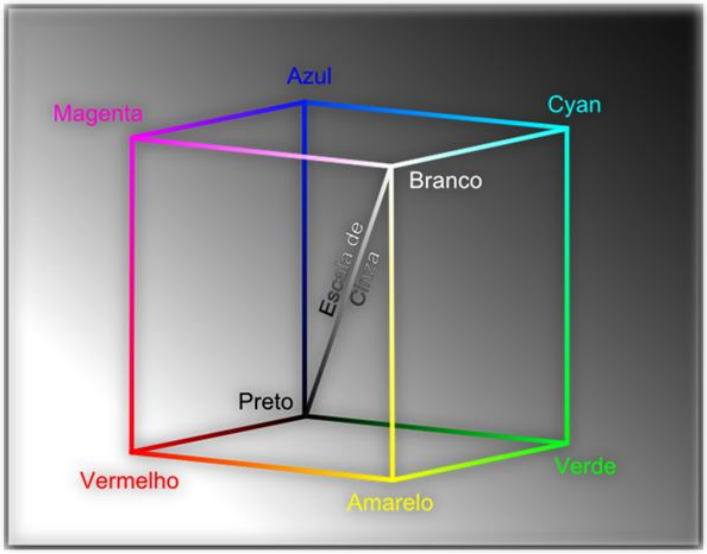


Figura 3.14 - Composição das várias cores através do sistema de cores básicas RGB

Na figura seguinte é representado a separação das cores primárias da imagem original.

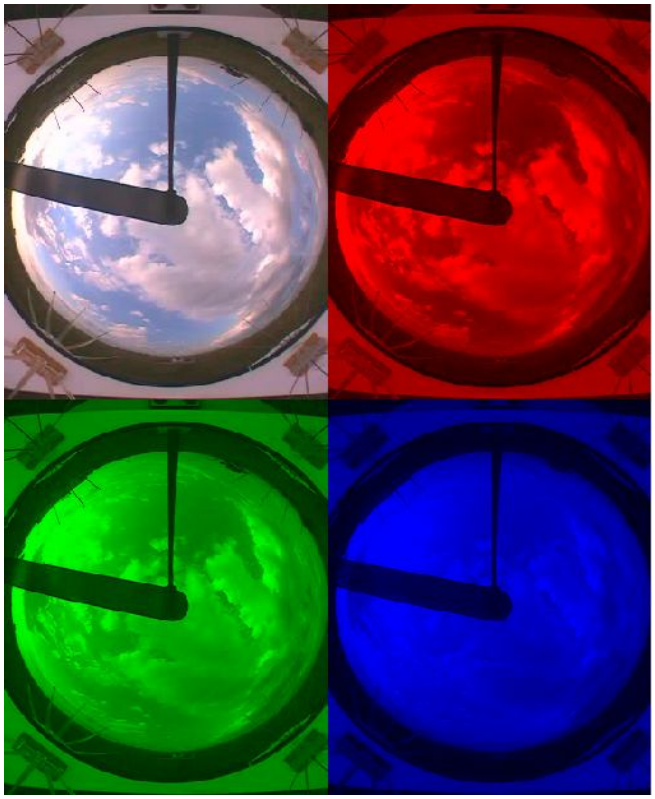


Figura 3.15 - Decomposição da imagem original nas cores básicas

Desta forma, para distinguir nuvens de céu limpo é tido em atenção o valor de cada cor primária para cada pixel. No entanto as nuvens têm muitas vezes tons azuis o que tornam difícil a sua distinção do céu limpo. Por outro lado, quando o sol tem uma elevação solar

baixa torna difícil distinguir céu limpo de nublado, uma vez que nas zonas em torno do sol os pixéis têm cores muito claras o que torna difícil fazer a sua distinção.

3.9.1.4.1 - Céu limpo

Um determinado pixel é classificado como céu limpo se a intensidade do azul do pixel for 25% maior em relação ao nível de cinzento desse mesmo pixel. O nível de cinzento V_{Cinza} do pixel é dado pela seguinte expressão:

$$V_{Cinza} = \frac{R + G + B}{3} \tag{3.1}$$

Se o pixel for classificado como céu limpo este passa a ter o valor (0, 0, 255) o que corresponde a ter visualmente a cor azul.

3.9.1.4.2 - Nuvem

Nesta metodologia, as nuvens são classificadas segundo três níveis diferentes de intensidade. Este número de níveis pode ser aumentado facilmente, mas tal não foi feito pois um maior nível de intensidades pode ser difícil de prever ou recriar no processo de previsão e simulação da dinâmica de nuvens. Esta distinção da intensidade dos pixéis tem por objectivo permitir fazer uma distinção da intensidade luminosa, que vai influenciar de forma directa a componente difusa da radiação.

Se um determinado pixel não foi classificado como sendo de céu limpo no ponto anterior, então este agora só pode ser classificado como sendo nuvem. Assim se o nível de cinzento for superior a 242 o pixel é classificado como sendo nuvem, passando o respectivo pixel a ter cor branca. Isto corresponde à situação em que o pixel correspondente registou grande intensidade luminosa. Existem mais dois níveis em que o pixel é classificado como sendo nuvem. Para uma maior facilidade de compreensão, na figura seguinte está representado o valor dos parâmetros que fazem a classificação de cada pixel.

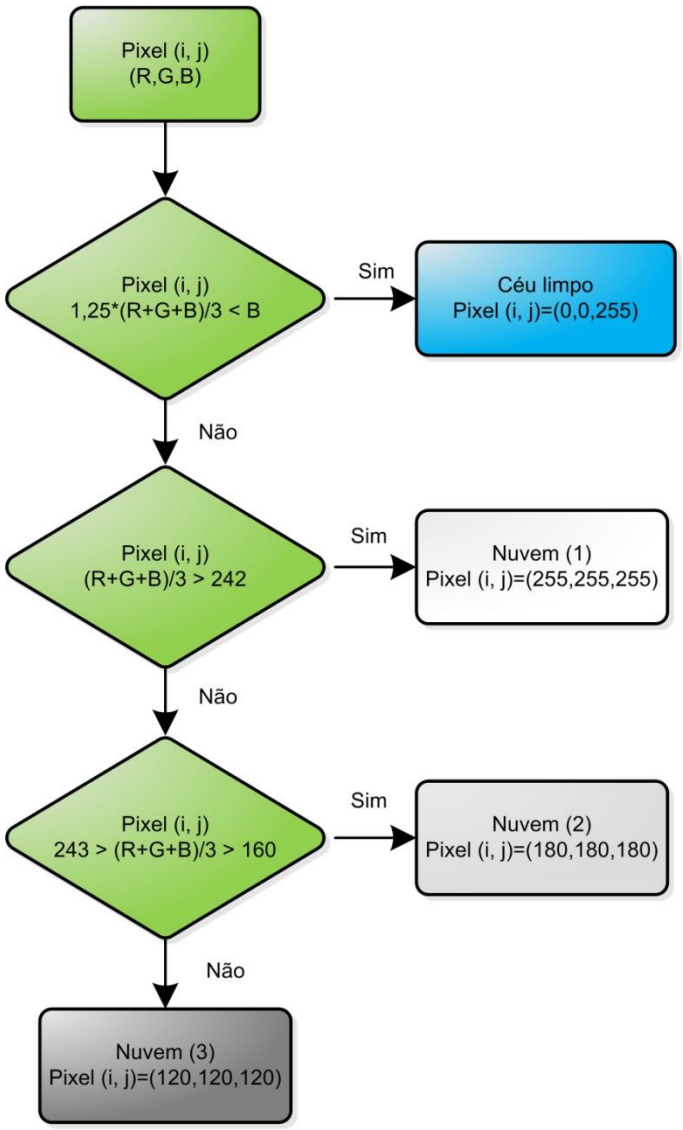


Figura 3.16 - Processo de classificação de pixéis

3.9.1.4.3 - Sol visível

É ainda feito uma identificação na zona correspondente à posição do sol, de modo a verificar se existe ou não sol visível. Esta variável está directamente relacionada com a componente directa da radiação solar, sendo esta identificação muito importante para a estimativa da componente directa da radiação solar. Desta forma, a identificação de raios solares directos sobre o solo é determinada através da intensidade de cinzentos sobre a faixa preta colocada sobre o espelho reflector do equipamento de captura de imagens. Esta análise é feita num pequeno raio, centrado na posição que o sol ocupa na imagem. Os pixéis analisados vão tomar a cor amarela ou vermelha conforme seja considerada a situação de sol visível ou não, respectivamente.

Considera-se a existência de sol visível se 2,5% dos pixéis analisados, em torno do sol, tiverem um valor de nível de cinzento superior a 240.

A variável correspondente a situação de sol visível toma o valor numérico de um para a situação de sol visível e o valor zero para a situação contrária.

3.9.1.5 - Contagem de pixéis classificados

De modo a ser possível converter a informação das imagens classificadas em valores de radiância, é necessário fazer uma organização dos dados de modo a que estes possam ser utilizados pelo modelo de estimativa da radiação solar.

Os dados usados no modelo consistem fundamentalmente na contagem de pixéis de cada tipo de classificação. A contagem é feita de modo a ter em conta a maneira como a luz se difunde no espaço envolvente. Uma vez que a intensidade solar se faz de forma geométrica sobre a atmosfera, foram criadas zonas circulares centradas no centro da imagem bem como zonas centradas na posição do sol. Para cada uma destas zonas é feita a contagem separada de pixéis para cada tipo de classificação. Na figura seguinte é apresentado o resultado de todo o processamento de imagens que foi explicado até ao momento.

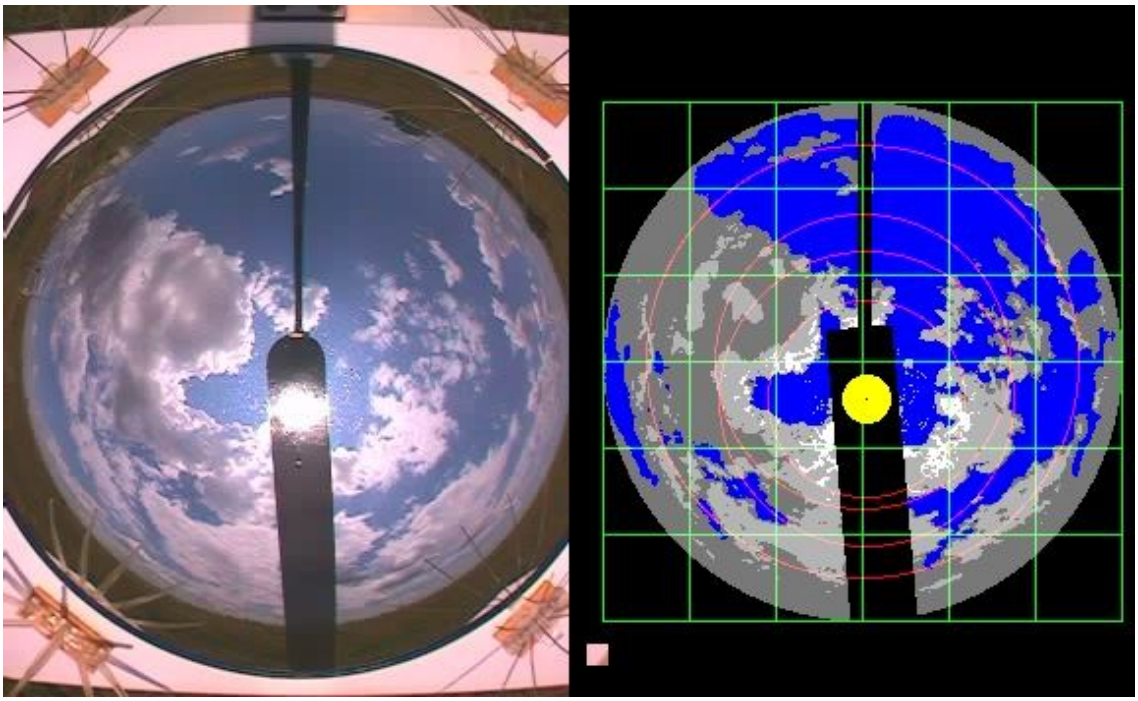


Figura 3.17 - Figura exemplo resultante do processamento de imagens

As áreas circulares, referidas no ponto anterior, são apresentadas em traços vermelhos na figura anterior. A contagem de pixéis é também feita para as áreas delimitadas pelas linhas verdes, no entanto esta informação não é usada nesta dissertação, uma vez que resulta da tentativa experimental para determinar a dinâmica e movimento de nuvens através do uso de redes neuronais. No entanto, o tempo disponível para a realização deste trabalho de dissertação não é suficiente para teste desta implementação.

3.9.1.6 - Dados de saída

O resultado de todo este trabalho de processamento de imagens é organizado em séries, para cada área e para cada classificação feita nas imagens. Os dados organizados desta forma, são no final de todo este processo exportados num formato conveniente. No caso deste trabalho de dissertação os dados foram armazenados num ficheiro Excel, de modo a facilitar a manipulação e análise de todo este processo.

Terminada esta etapa da metodologia apresentada nesta dissertação, está-se em condições de usar toda a informação reunida de modo a converte-la em valores de irradiância.

3.10 - Modelo de estimativa de irradiância solar

Na figura seguinte está representada a forma como se procedeu à divisão da imagem em diferentes áreas, definidas pelos traços a vermelho.

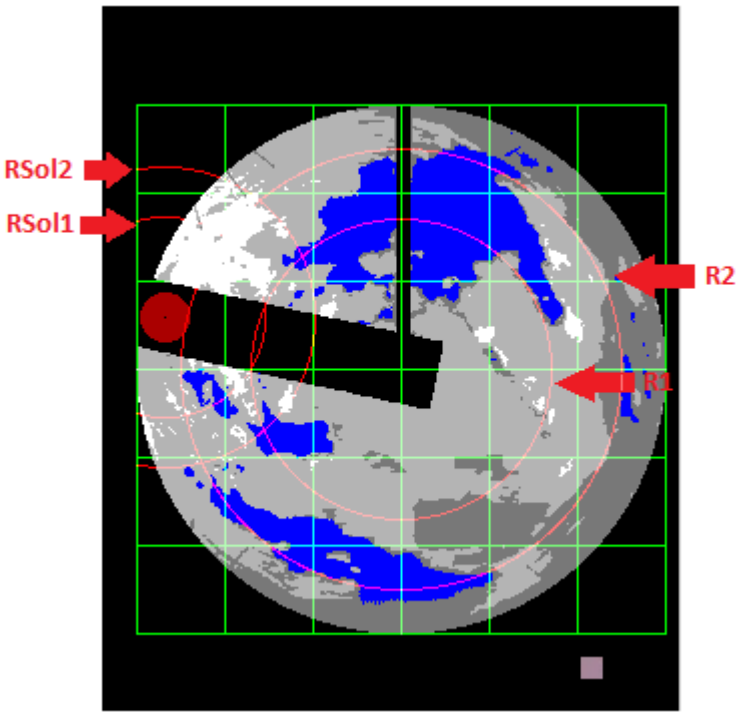


Figura 3.18 - Identificação das várias linhas delimitadoras de área

Estas áreas foram definidas de forma circular tendo em conta a maneira como a luz se difunde sob o hemisfério celeste. Sabe-se que a luz se espalha de forma radial, tendo valores semelhantes para pontos à mesma distância do sol, daqui resulta a criação de áreas circulares em torno da posição do sol. As áreas circulares centradas no centro da imagem estão relacionadas com a radiação difusa, não tendo à partida qualquer influência na componente directa da radiação. Esta metodologia de delimitação de áreas de forma circular resulta

também da forma como cada fotografia é adquirida, devido à introdução do espelho convexo que permite aumentar o ângulo de visão.

A conjunção de todos estes factores relacionados com a forma em como a luz se difunde no espaço, e a forma em como cada imagem é adquirida, conduziram à ideia de utilizar redes neuronais artificiais para estimativa dos valores de irradiância a partir da informação contida em cada imagem. O uso de redes neuronais permitiria à partida evitar modelos complicados de cálculo de irradiância, bem como a necessidade de parametrizações.

Para que o uso de redes neuronais fosse possível, houve necessidade de diminuir o número de variáveis, bem como fazer uma organização dos dados de forma a poder adequa-los ao uso de redes neuronais. Daqui resultou a divisão da imagem em várias áreas, bem como a necessidade de classificação da informação visível em cada imagem num número reduzido de classificações de forma a evitar o uso de grande quantidade de variáveis de entrada na rede neuronal.

Toda a simplificação que é feita neste ponto vem facilitar de certo modo a etapa correspondente à previsão de movimento e dinâmica de nuvens, onde se pretende recriar a imagem futura para a qual é aplicado este método de determinação da irradiância. Esta característica é sem dúvida um ponto a favor da metodologia aqui apresentada.

3.10.1 - Radiação solar directa

Tal como foi exposto no ponto anterior, são utilizados modelos baseados em redes neuronais para se proceder à estimação das componentes da radiação solar. Para cada componente que se pretende estimar, são utilizadas diferentes variáveis de entrada. As variáveis de entrada da rede neuronal para a estimativa dos valores de irradiância da componente directa são:

- Áreas circulares em torno do sol $RSol1$ e $Rsol2$;
    - Índice de ocupação de céu nublado para os três níveis de intensidade considerados na classificação da imagem (3 variáveis por área delimitada);
- Identificação de sol visível;
- Coordenadas de posicionamento solar, Azimute e Elevação Solar;
- Estimativa de componente de radiação solar directa para a condição de céu limpo.

Ao todo, ter-se-á para a componente directa, um total de 10 variáveis de entrada.

Tal como foi explicado anteriormente, houve necessidade de criar áreas circulares de forma a permitir organizar a informação contida em cada imagem de tal forma a poder ser utilizada para estimativa dos valores de irradiação. A criação de áreas circulares foi a melhor metodologia encontrada para se atingir este objectivo. Para a componente directa, houve necessidade de criar duas áreas circulares, de modo a permitir fazer a identificação da presença de nuvens perto da posição do sol. Sabendo à partida que a componente directa da radiação solar resulta basicamente do disco solar, as áreas criadas teriam então de ter uma dimensão pequena, pouco superior ao raio do sol correspondente nas imagens capturadas. No entanto devido à faixa preta que protege a câmara fotográfica dos raios solares esta obrigou

a que o raio das áreas circulares em torno do sol fosse ainda maior, de modo a permitir obter alguma informação sobre o índice de nebulosidade nesta região em torno do sol, resultando assim na dimensão total que é possível observar na Figura 3.18. Desta forma foram criadas duas zonas circulares em torno do sol, com áreas ligeiramente proporcionais, de modo a permitir à rede neuronal relacionar o índice de céu nublado em torno do sol como os valores de irradiância. A área de maiores dimensões em torno do sol é também especialmente importante para a estimativa da componente difusa segundo esta metodologia aqui aplicada.

Finalmente, para a estimativa da componente directa da radiação solar é utilizada uma rede neuronal do tipo MLP *feedforward*, treinada segundo o processo de aprendizagem por retropropagação. As entradas da rede já foram indicadas em cima. A rede possui uma única camada intermédia com um número de neurónios correspondente a expressão $2\mathrm{n} + 1$, ou seja, 21 neurónios. A estandardização dos dados utilizados foi feita segundo o método *Min-Máx*. A função de activação é TANSIG.

3.10.2 - Radiação solar difusa

Para estimativa da componente difusa há necessidade de um maior número de entradas para o modelo usando redes neuronais, quando em comparação com o modelo usado para determinação da componente directa. Isto deve-se à complexidade desta componente, pois a distribuição da luz solar difusa para um determinado ponto no solo é feita a partir de todo o hemisfério visível, ao contrário do que acontece para a componente da radiação directa, onde praticamente só a zona correspondente ao disco solar tem influência.

Para a estimação da componente difusa, são usadas as seguintes variáveis:

- Áreas circulares em torno do sol $RSol1$ e $Rsol2$; Áreas circulares centradas no centro da imagem e Área total da imagem:
    - Índice de ocupação de céu nublado para os três níveis de intensidade considerados na classificação da imagem (3 variáveis por área delimitada);
- Identificação de sol visível;
- Coordenadas de posicionamento solar, Azimute e Elevação Solar;
- Estimativa de componente de radiação solar difusa para a condição de céu limpo.

Ao todo tem-se até um total de 19 variáveis. Os procedimentos efectuados para determinação da componente difusa são os mesmos que os da componente directa, sendo então a única diferença o número de entradas e o número de neurónios da camada intermédia da rede neuronal, que neste caso se vêem aumentados.

Como se pode verificar, para a estimativa da componente difusa são usadas mais duas áreas circulares, também de raios diferentes, R1 e R2, ambos centrados no centro da imagem. Com estas duas áreas pretende-se também distinguir a variação da radiação difusa em diferentes áreas do hemisfério celeste. Foram assim delimitadas três áreas circulares com áreas totais semelhantes, de modo a permitir à rede neuronal aperceber-se da influência que cada área tem sobre o valor final de irradiância. O número total de áreas foi limitado de forma a não ter um número demasiado excessivo de variáveis de entrada na rede neuronal. Consoante a performance da metodologia em estimar os valores de irradiância, o número total de áreas pode ser facilmente alterado.

3.10.3 - Estimativa das componentes directa e difusa da radiação horizontal para céu limpo

O objectivo neste ponto é obter as curvas teóricas de radiação directa e difusa para a condição atmosférica de céu limpo. O objectivo é permitir melhorar o modelo de estimativa de valores de irradiância para situações onde não se identificam condições de céu nublado nas imagens obtidas. A determinação destas curvas é feita com recurso à utilização de valores reais de irradiância para as várias componentes.

A metodologia aqui apresentada pretende encontrar uma relação entre a curva teórica de cálculo da componente teórica da radiação solar global, com os valores reais de irradiância medidos para a condição de céu limpo nas componentes directas e difusas. Na figura seguinte apresenta-se um exemplo, para o qual existe durante a primeira parte do dia condições de céu limpo.

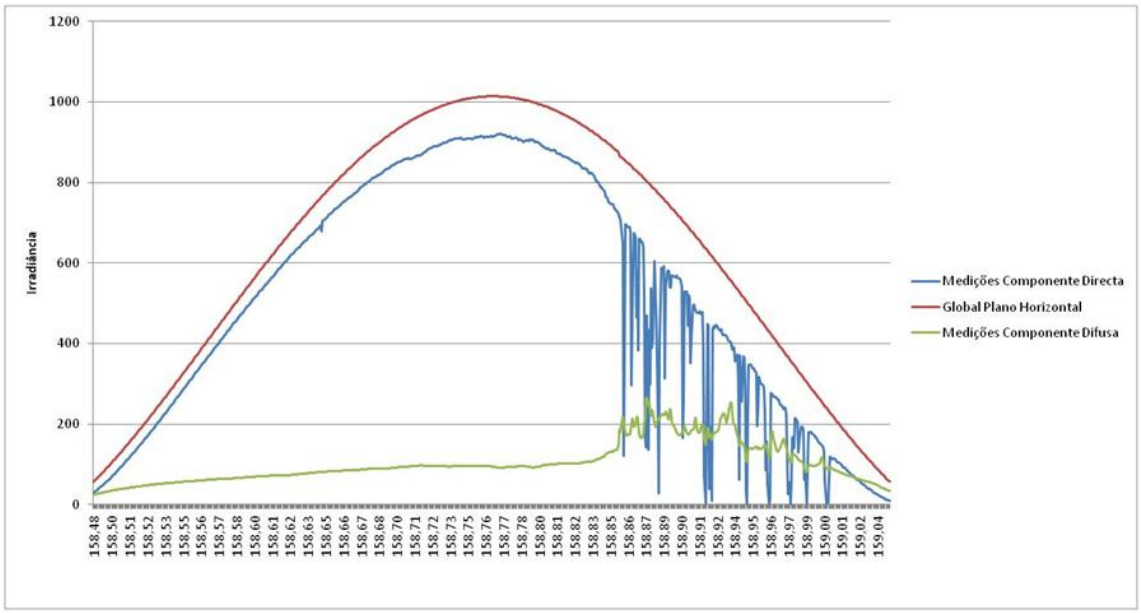


Figura 3.19 - Exemplo onde se verifica durante certa parte do dia a condição de céu limpo

Para o cálculo da irradiância global foi usada a expressão 2.11, presente no capítulo dois da presente dissertação.

Foi feita uma selecção de dados, para os quais se verificaram a condição de céu limpo. Com estes dados fez-se uma relação entre os dados medidos e os dados de irradiância global. Verificou-se existir uma relação matemática entre o conjunto de dados medidos e calculados. Na figura seguinte é apresentada a relação que existe entre estes dados, para o mesmo dia dado como exemplo na figura anterior. Repare-se que no exemplo que é dado, a condição de céu limpo é verificada durante quase toda a manhã, havendo pequenas perturbações. Assim sendo as figuras seguintes apresentam somente informação relativa à parte inicial do dia. O mesmo verificado para este dia, foi também verificado para os restantes dias do conjunto de dados utilizado nesta dissertação.

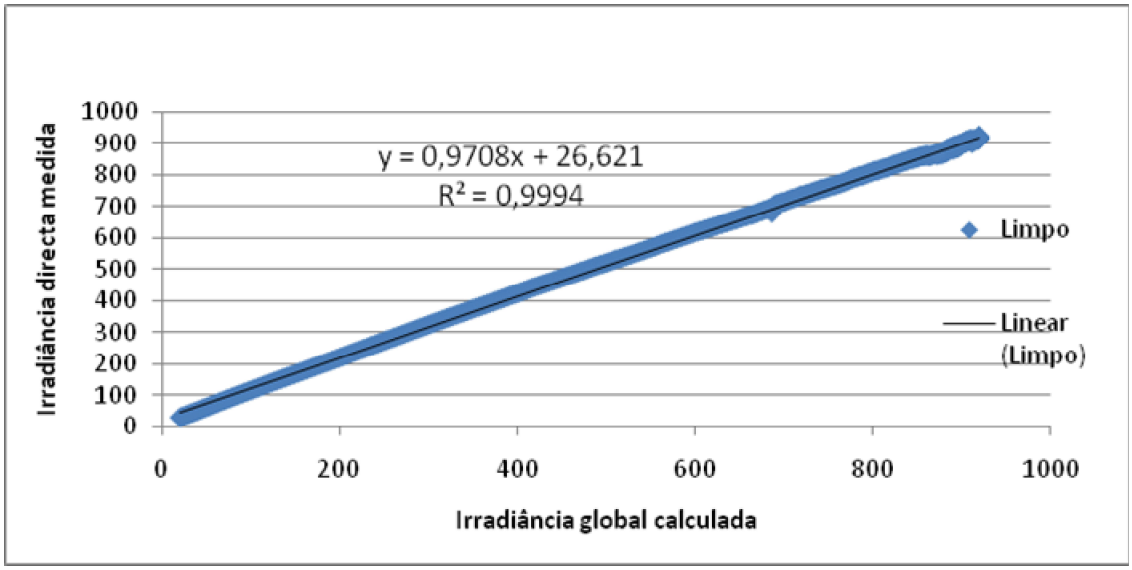


Figura 3.20 - Relação entre os valores medidos de irradiância directa e os valores calculados de irradiância global

Como se pode verificar no gráfico da Figura 3.20, existe uma relação linear entre os valores medidos da componente directa para a condição de céu limpo e os valores de radiação global calculados. Desta forma a estimação de cada componente da radiação solar directa B_{Cl} no plano horizontal é feita da seguinte forma:

$$B_{Cl} = a + b.G \tag{3.2}$$

Onde G é o valor calculado da componente global. A variável a permite fazer um ajuste na cota da curva de ajuste. A introdução desta variável permite um melhor ajuste da curva, nos momentos em que a elevação solar α_s tem valor baixo. A variável b é um coeficiente, que altera a amplitude da curva teórica da radiação global, de modo que o máximo desta curva corresponda de facto ao máximo das respectivas componentes.

O ajuste dos parâmetros a e b curva B_{Cl} é feito recorrendo a uma formulação semelhante à que é feita no método dos mínimos quadrados, mas neste caso são introduzidas penalidades de forma a fazer a curva aproximar os pontos máximos, ou seja, os pontos onde há correspondência do céu limpo.

A formulação matemática consiste em minimizar o valor d em função das variáveis a e b, sendo expressa da seguinte forma:

$$d = \sum_{i}^{n} (B_{Cl} - B_{medido}).k \tag{3.3}$$

Onde:

$$\begin{cases} k = 1, & se \quad B_{Cl} - B_{medido} > 0 \\ k = 2, & se \quad B_{Cl} - B_{medido} < 0 \end{cases} \tag{3.4}$$

O valor d corresponde desta forma à diferença entre os valores medidos da componente directa e os valores correspondentes calculados para o mesmo momento i da componente global. B_{Cl} corresponde à componente directa da radiação que se pretende aproximar e B_{medido} corresponde aos valores reais medidos da componente directa. A variável k é a chave deste processo, na medida em que vai tomar diferentes valores de forma a obrigar a B_{Cl} a aproximar os valores medidos da componente directa para a condição de céu limpo, tal como se pode ver pela condição (3.4). Desta forma d toma um valor maior quando a curva B_{Cl} se encontra abaixo dos valores medidos, uma vez que a diferença entre os valores é multiplicada por dois. Sendo o objectivo minimizar d, ter-se-á então uma boa aproximação da curva para os valores medidos em condições de céu limpo. Os parâmetros k foram escolhidos de forma a ter a melhor aproximação para o exemplo que é aqui apresentado.

Na figura seguinte é apresentado o resultado da estimativa da componente de céu limpo, calculada a partir de valores reais.

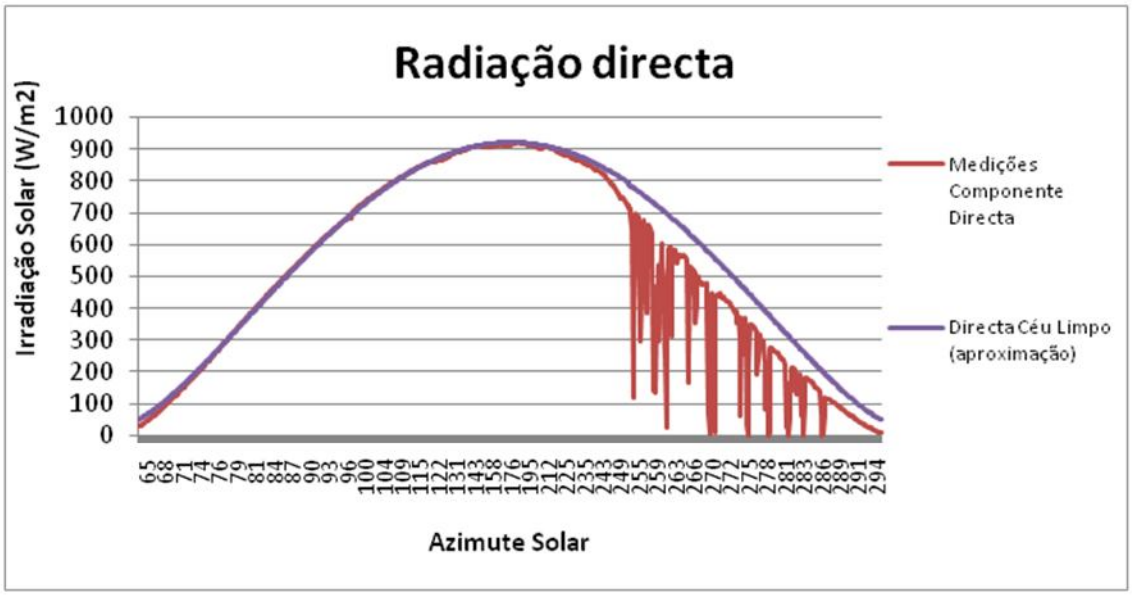


Figura 3.21 - Curva de estimativa da componente directa da radiação para céu limpo

Como se pode ver pela Figura 3.21, consegue-se com esta metodologia uma boa aproximação da curva para os valores de irradiância para a condição de céu limpo.

Para a componente difusa e à semelhança do que foi feito para a componente directa, é feito uma aproximação dos valores medidos para a condição de céu limpo, usando a curva de cálculo teórica da radiação solar global.

A relação entre os valores medidos de radiação difusa e os valores calculados da radiação global são apresentados na figura seguinte.

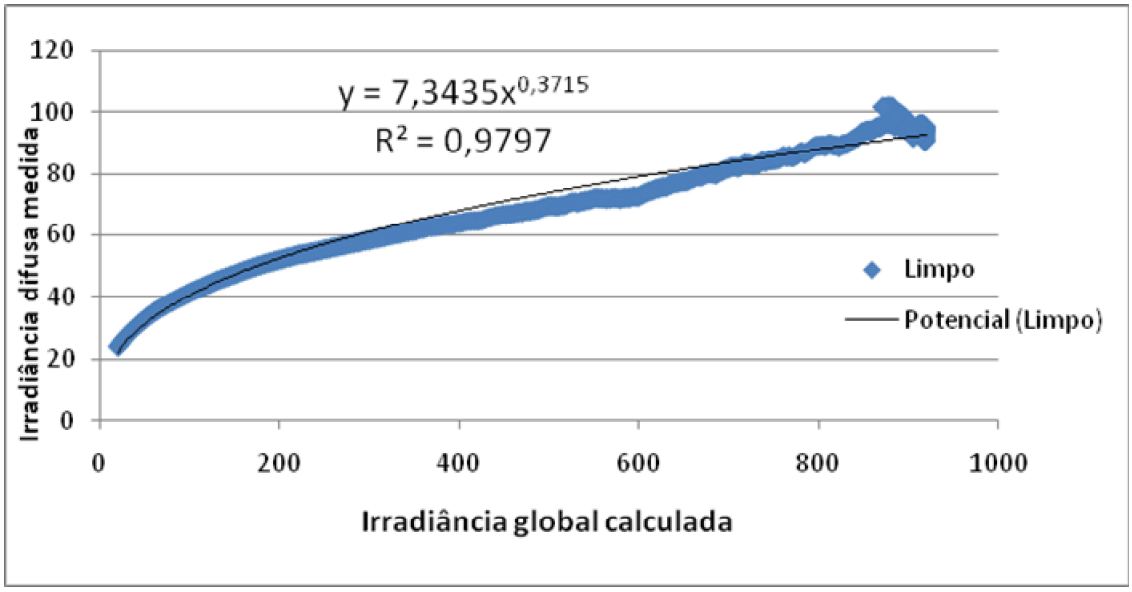


Figura 3.22 - Relação entre os valores medidos de irradiância directa e os valores calculados de irradiância global

Como se pode observar, a melhor relação entre os valores teóricos e medidos é dado por uma curva de potência. Desta forma a componente difusa D_{Cl} para a condição de céu limpo é dada pela seguinte expressão:

$$D_{Cl} = c.G^{f} \tag{3.5}$$

O calculo dos parâmetros c e f é feito da mesma forma que para a componente directa, sendo a única diferença os valores dos parâmetros k, uma vez que a componente difusa para céu limpo é sempre menor que para a condição de céu nublado.

$$d = \sum_{i}^{n} (D_{Cl} - D_{medido}).k \tag{3.6}$$

Onde:

$$\begin{cases} k = 10000, & se \quad D_{Cl} - D_{medido} > 0 \\ k = 1, & se \quad D_{Cl} - D_{medido} < 0 \end{cases} \tag{3.7}$$

Como se pode observar, os valores atribuídos a k têm para esta componente uma ordem de grandeza diferente. Isto deve-se ao facto de, nesta componente, a função de aproximação se aproximar muito melhor dos dados para a condição de céu limpo quando em relação com o que acontece para a componente directa, pois na componente directa se aumentar o valor de k para o qual foi atribuído o valor de 2 a curva deixava de aproximar tão bem os dados, revelando que a curva teórica usada não é exacta a forma como a irradiância varia na realidade para situações de céu limpo. Assim sendo para a componente difusa não é preciso

verificar se os valores atribuídos a k são bons, para ter uma boa curva de ajuste, bastando para tal atribuir um valor de penalização, garantindo desta forma garantido uma boa curva de aproximação. Falta ainda referir que o valor dos parâmetros é trocado para a componente difusa, uma vez que a radiação difusa é normalmente mais intensa na presença de céu encoberto do que na condição de céu limpo, levando assim a que a função venha a modelizar os valores de irradiância mais baixos.

A condição de céu limpo, significa então que as curvas de aproximação terão de se ajustar aos valores máximos medidos para a componente directa da radiação e aos valores mínimos medidos da componente difusa da radiação solar, salvo a excepção de se ter céu totalmente opaco, onde a componente difusa acaba por ser inferior à registada para dias de céu limpo.

Com esta simples metodologia consegue-se modelizar de uma forma bastante eficaz a componente difusa da radiação solar, tal como se pode verificar na figura seguinte.

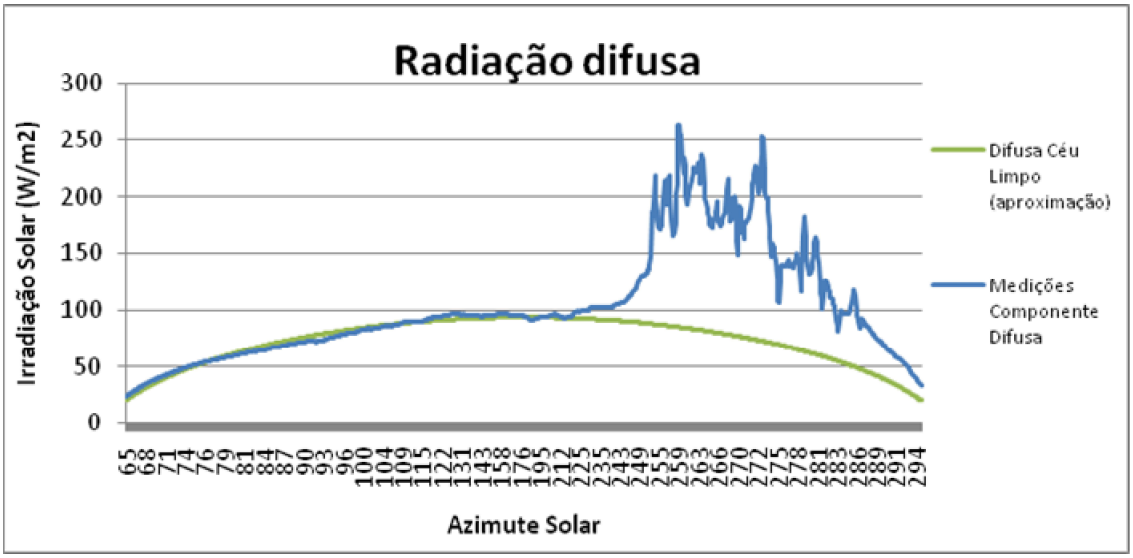


Figura 3.23 - Curva de estimativa da componente difusa da radiação para céu limpo

3.10.3.1 - Síntese

Na Figura 3.24 é apresentado um diagrama, onde a partir da componente global, são estimadas as componentes directa e difusa da radiação solar para céu claro, usando para tal uma função que melhor relaciona cada componente que se pretende estimar com os valores calculados da componente global. Tendo determinado os parâmetros de cada função, é assim obtida a respectiva componente calculada para dias claros.

Com estas componentes determinadas e em conjunto com as restantes variáveis, pode-se aplicar a rede neuronal para finalmente obter o valor de irradiância de cada componente.

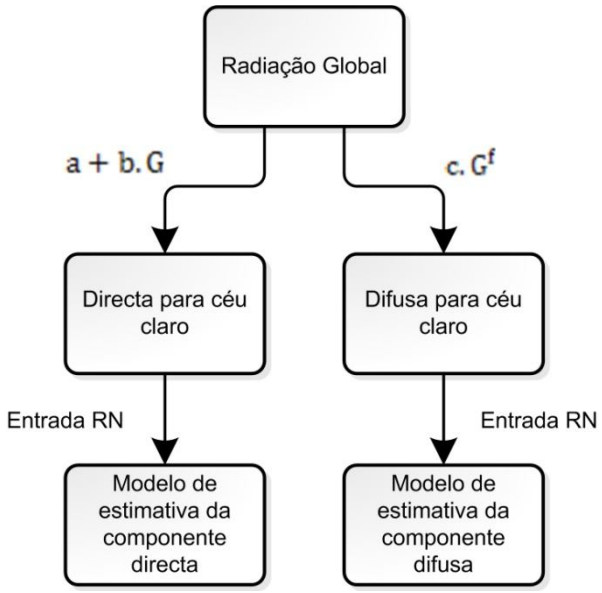


Figura 3.24 – Diagrama de síntese da estimativa das componentes directa e difusa da radiação solar para dia de céu claro.

3.11 - Cálculo da potência de saída de uma instalação fotovoltaica

Na sequência da metodologia apresentada anteriormente, é momento de passar ao cálculo da potência de saída de um determinado parque ou instalação fotovoltaica. É assim tido em conta as diversas características de cada parque fotovoltaico, fazendo-se uma estimativa do valor de saída do sistema com discretização minuto a minuto.

Tendo o valor total da radiação solar incidente sobre uma superfície de um sistema fotovoltaico genérico, procede-se então ao cálculo da potência de saída, tendo em conta as características do painel fotovoltaico em questão, mais concretamente à variação do seu rendimento com a temperatura.

A radiação incidente sobre o painel depende essencialmente do ângulo de incidência dos raios solares sobre o plano do painel. A radiação total incidente pode ser dada pela expressão (2.14). No entanto os modelos utilizados para calcular cada componente, à excepção da componente directa, são normalmente usados para determinar energia total diária ou mensal, e não para calcular a potência a cada instante. Sendo assim, devido à natureza de cálculo, a utilização destas expressões levariam a erros significativos, uma vez que não é considerada informação relativa às condições atmosféricas no momento.

O modelo construído, devido à sua estrutura, permite determinar ou estimar cada uma destas componentes para a configuração dos painéis FV da instalação FV. Isto é, tendo em conta o tipo de seguimento solar que fazem.

Na simulação de potência de saída que é feita neste trabalho, só é feita a estimação das componentes da radiação solar para o plano horizontal. Isto deve-se essencialmente à não existência de dados relativos a medições das várias componentes da radiação para planos

inclinados. Desta forma só é feita a correcção da componente directa da radiação, considerando que a componente difusa é igual para o plano do painel. O albedo é desprezado nas simulações efectuadas.

A potência de saída é determinada pela expressão:

$$S_{out} = G(\beta, \varphi_{sup}) \times \eta_{painel} \times \eta_{MPPT} \times A_{total} \quad (3.8)$$

Onde:

- S_{out} corresponde à potência de saída total em watts
- $G(\beta, \varphi_{sup})$ é a radiação total incidente sobre o painel(s) inclinado em W/m^2
- η_{painel} é o rendimento do painel fotovoltáico
- η_{MPPT} é o rendimento do MPPT - *Maximum Power Point Tracker*
- A_{total} é a área total, correspondente a todos os painéis em m^2.

Esta expressão é valida para o cálculo de potência, pois é considerado o uso de MPPT, que garante que é aproveitada toda a potência máxima disponibilizada pelo gerador FV. O MPPT, é um controlador electrónico, que regula a tensão de saída dos módulos fotovoltaicos, de modo a garantir sempre a potência máxima disponível à sua saída, maximizando desta forma, a potência injectada na rede. No valor do rendimento do MPPT foi também adicionado o rendimento considerado para uma central FV, devidas às perdas que existem nos mais diversos componentes, como por exemplo as cablagens.

Na Figura 3.25 estão representadas as curvas características de um típico painel fotovoltaico, para diferentes níveis de irradiância e de temperatura.

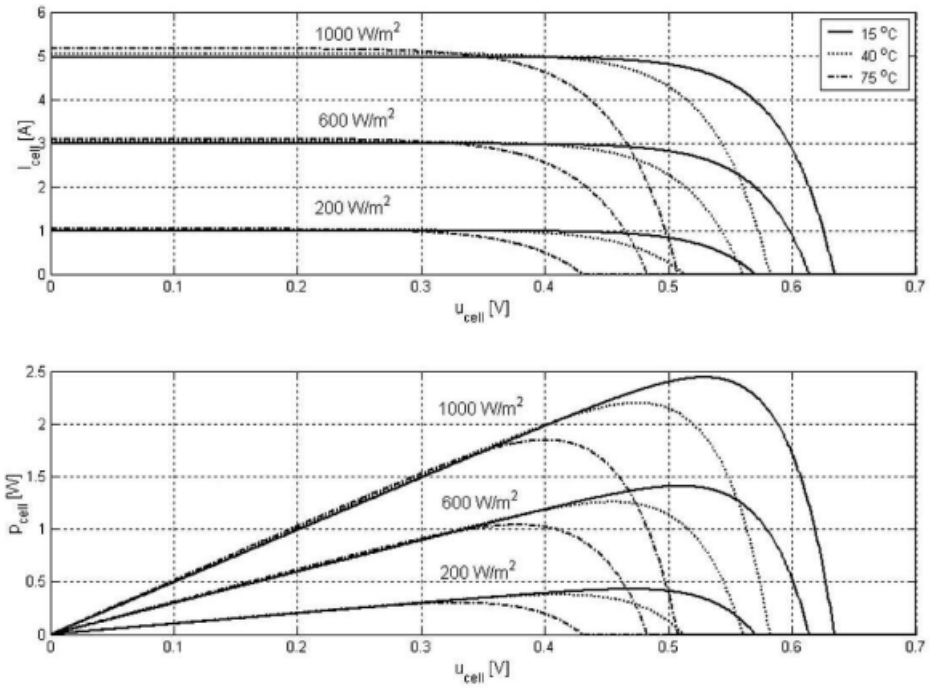


Figura 3.25 - Curvas características da potência de um painel fotovoltaico em função da temperatura [42].

A Figura 3.26 representa a acção do MPPT ao fornecer às cargas a potência máxima disponível pelo módulo fotovoltaico, fazendo para isso, um ajuste da tensão de saída do módulo.

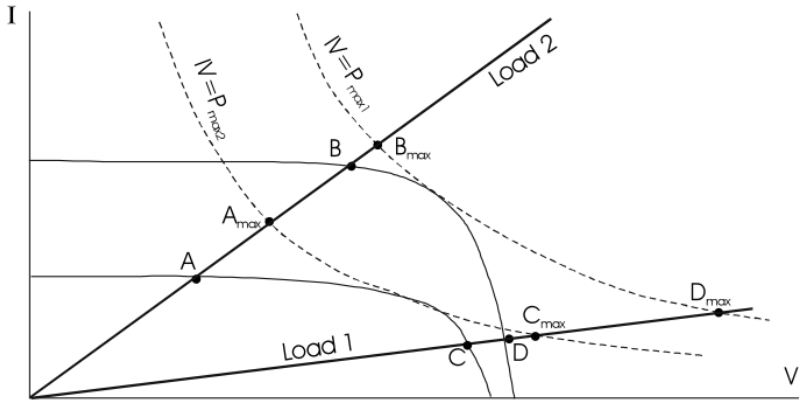


Figura 3.26 - Operação do MPPT para dois níveis de irradiância sobre o módulo fotovoltaico e duas cargas [23].

O rendimento do painel é afectado pela temperatura. É assim calculada a designada temperatura da célula T_c, através da seguinte expressão:

$$\eta_{\text{painel}}(T_c) = \eta_{\text{painel}}(T_0) \times (1 - \tau \times (T_c - T_0)) \tag{3.9}$$

O coeficiente τ corresponde à variação da eficiência do painel em função da temperatura. O parâmetro $\eta_{\text{painel}}(T_0)$ corresponde à eficiência do painel para a temperatura standard de teste, ou seja, de 25°C. Estes parâmetros são dados pelo fabricante do painel fotovoltaico.

Finalmente, a temperatura da célula é determinada pela expressão:

$$T_c = T_{\text{amb}} + G(\beta, \varphi_{\text{sup}}) \times \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \tag{3.10}$$

Onde, T_{amb} é a temperatura ambiente, NOCT - nominal operating cell temperature – é a temperatura que a célula atinge em condições de circuito aberto, a uma temperatura ambiente de 20°C, coeficiente MA de 1,5, condições de irradiância de 800 kW/m^2 e ventos inferiores a 1 m/s.

Capítulo 4

Resultados

4.1 - Introdução

Nesta secção é feita a apresentação dos resultados obtidos através das ferramentas desenvolvidas e descritas no capítulo anterior desta dissertação.

4.2 - Processamento de imagens

Seguidamente são apresentadas um conjunto de figuras, que resultam do processo de classificação de imagens. Tal como já foi referido, esta etapa de processamento de imagens em conjunto com o modelo de RN permite obter os valores de irradiância solar para as componentes directa e difusa.

Na Figura 4.1 é apresentado um exemplo onde em condições de céu limpo se podem detectar na zona em torno do sol da imagem classificada, a existência de pixéis classificados como não sendo céu limpo.

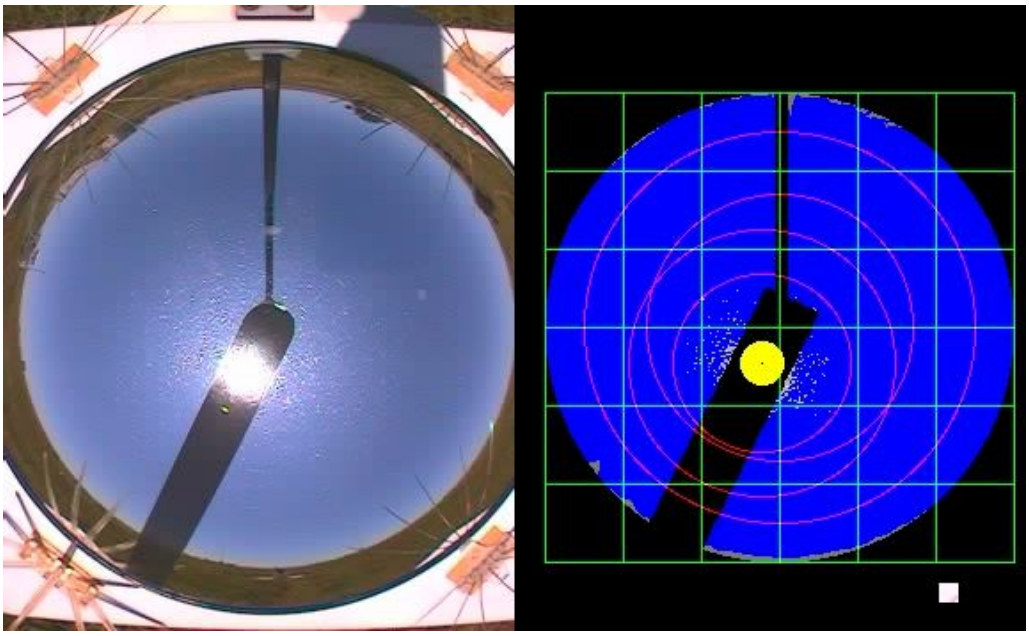


Figura 4.1 – Exemplo para céu limpo

Neste caso o erro de classificação resulta essencialmente do ligeiro estado degradado do espelho, que como se pode verificar se encontra um pouco baço, levando a que haja maior claridade da imagem junto à posição do sol, que em conjunto com a parametrização efectuada e apresentada na Figura 3.16 leva a erros de classificação.

Por outro lado, a situação pode ser ainda mais grave para posições de baixa elevação solar e com condição de céu limpo. Na Figura 4.2 é apresentado um exemplo desta situação.

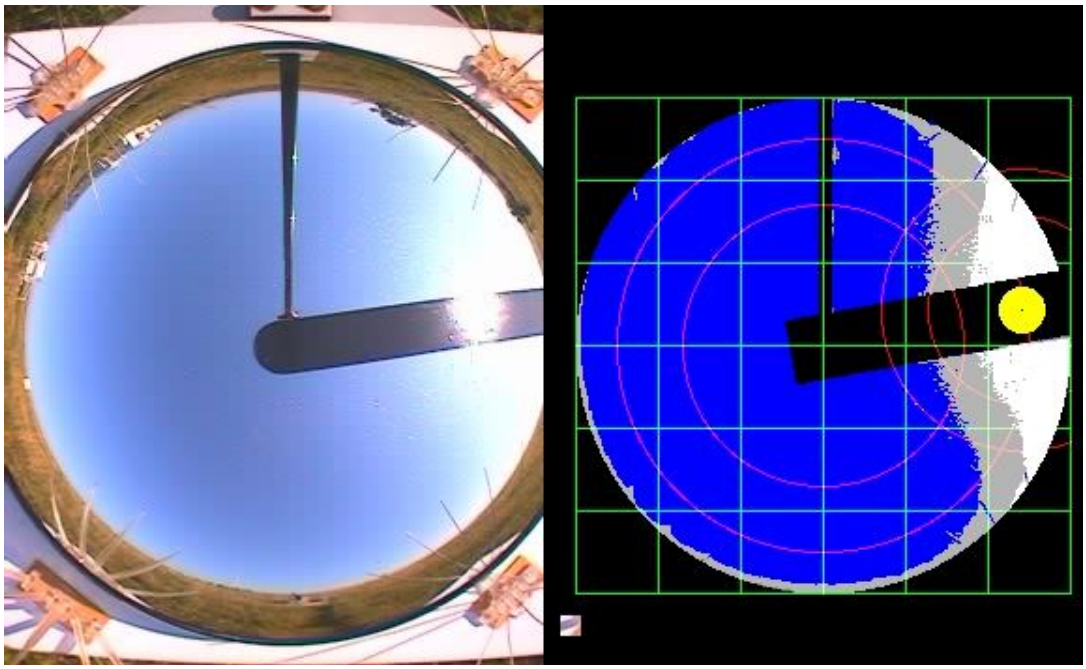


Figura 4.2 – Exemplo onde o sol se encontra numa posição baixa no horizonte

Como se pode observar de uma forma evidente neste exemplo, na imagem original verifica-se a não existência de qualquer nuvem no céu, no entanto na imagem classificada correspondente verifica-se uma grande quantidade de pixéis classificados como sendo nuvem.

Tal como no exemplo da Figura 4.1 à má classificação de pixéis deve-se a metodologia aplicada, onde devido ao nível de intensidade de um dado pixel da imagem original e do nível de azul, este é classificado como não sendo céu limpo. Pode-se assim concluir que a metodologia aplicada não é muito eficiente em cenários de céu limpo onde a posição do sol tem baixa elevação, ainda assim nada foi feito para eliminar este problema pela razão da grande intensidade luminosa em torno da posição do sol resultar de um efeito óptico, que devido à incidência dos raios solares sobre esta zona da atmosfera se fazerem incidir com grande inclinação sobre o plano horizontal. Havendo grande intensidade luminosa nesta região do hemisfério solar, significa também, que existe uma maior contribuição da componente difusa da radiação solar. Posto isto, e sendo as nuvens as que mais contribuem para uma maior componente da radiação difusa, ter a imagem classificada nestas condições não é de facto um mau resultado, uma vez que o modelo utilizando redes neuronais pode usar esta informação de forma correcta para compensar a componente difusa.

Os aspectos aqui relacionados com a dificuldade de classificação de imagens são também um motivo que justificam o uso de redes neuronais para a estimativa dos valores de irradiância, uma vez que a rede neuronal será capaz de se adaptar a estas "anomalias", devendo assim ser capaz de obter bons resultados.

Na Figura 4.3 é apresentado um exemplo onde se destaca a boa performance do algoritmo na detecção de nuvens, bem como a indicação de sol visível.

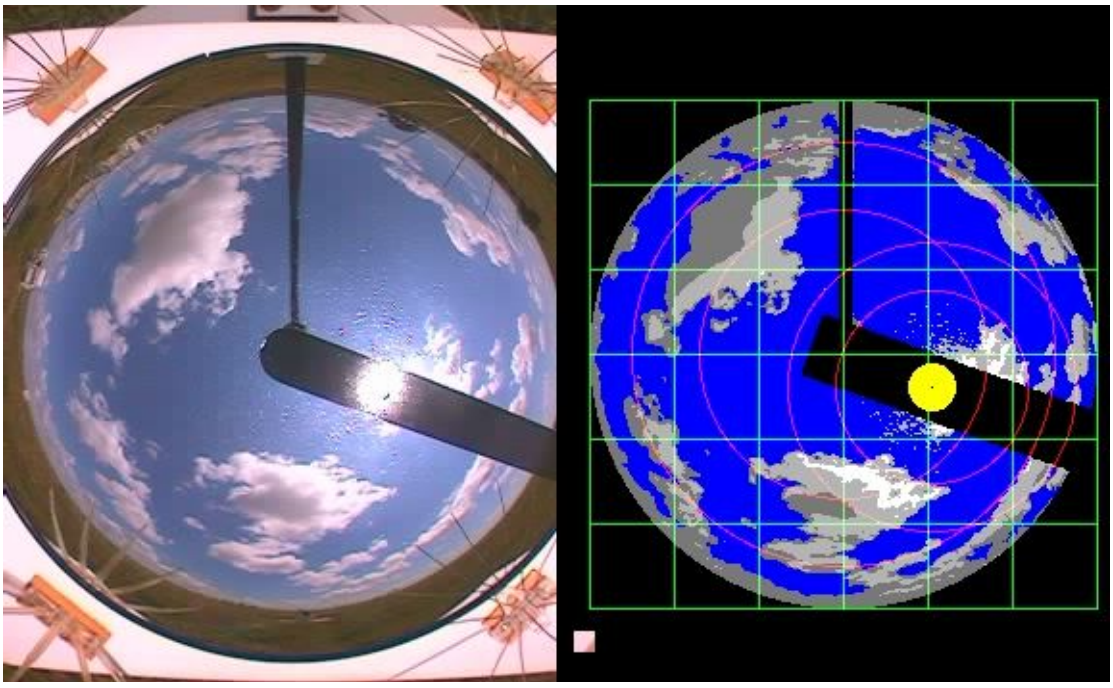


Figura 4.3 – Exemplo com céu parcialmente nublado

Como se pode verificar o algoritmo utilizando os valores de parametrização indicados na Figura 3.16, consegue neste caso fazer uma boa distinção de céu limpo de nuvem. É também visível nesta figura a diferente classificação de pixéis correspondentes à situação onde se verifica a existência de céu enublado, onde existe uma distinção da nuvem baseada no nível de intensidade dos pixéis.

Paralelamente a capacidade de identificação de sol visível ou não, existe também a identificação de vários erros de avaliação desta condição. Este facto prende-se

essencialmente com a definição de fronteira, para a qual se considera que estamos perante uma situação de sol visível ou vice-versa. Outro erro que influência a má identificação prende-se com o próprio equipamento de recolha de imagens, uma vez que foram identificadas irregularidades na faixa preta que foi colocada sobre o espelho convexo, que devido à sua textura não uniforme leva a que o reflexo do brilho do sol não seja constante. Outro factor prende-se também com a substituição da mesma faixa, onde as condições de reflexo são também alteradas. Para corrigir esta situação é feita também uma avaliação do brilho nos pixéis contidos no quadrado situado na parte inferior esquerda da Figura 4.3. Uma vez que a área na qual é feita esta análise de brilho pode estar em ângulo com a posição solar, o algoritmo altera a zona de análise de pixéis para o lado inferior direito quando o azimute solar é superior a $180°$. Esta situação está presente na Figura 4.1.

4.3 - Estimativa de irradiância

O conjunto de arquivos fotográficos utilizados para o algoritmo de processamento de imagens e consequentemente para o modelo de estimativa de irradiância corresponde a um mês de dados, mais precisamente ao mês de Junho de 2008. O conjunto de dados foi limitado a um mês devido ao massivo tamanho de arquivos com que se tem de lidar, bem como o tempo que é necessário para processar e filtrar toda a informação.

Na aplicação dos modelos baseados em redes neuronais para estimativa dos valores de irradiância foram usados os primeiros 29 dias do mês para treino de cada rede, e por fim o ultimo dia como conjunto de teste. Sendo os dados recolhidos em intervalos de tempo de um minuto, isto resulta em ter aproximadamente 28500 linhas de dados para treino e 980 linhas para o conjunto de validação.

Sendo os dados registados para o fuso horário GMT, o conjunto de treino corresponde a um conjunto parcial de dois dias.

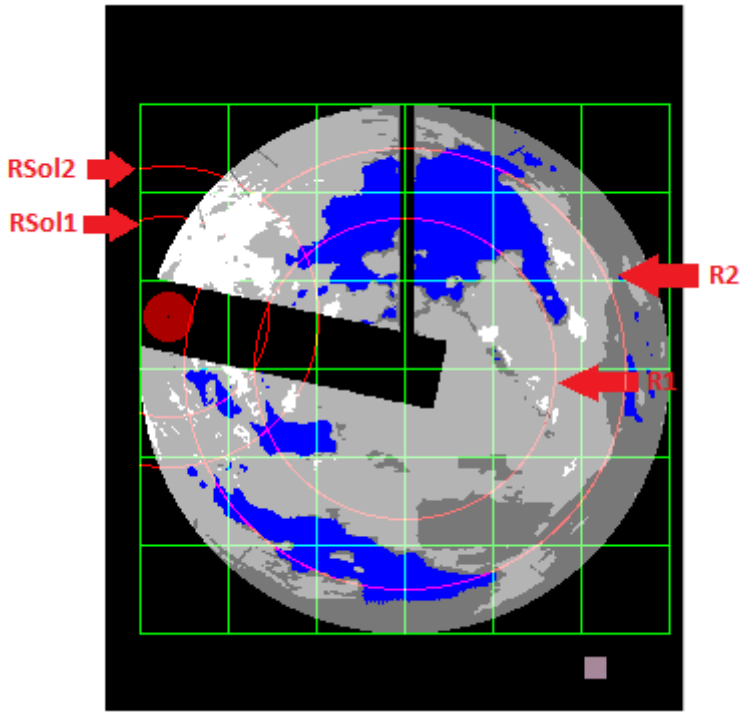


Figura 4.4 - Identificação de variáveis.

4.3.1 - Componente directa

Na figura seguinte está representado a curva correspondente ao valor real medido (roxo) da componente directa e a curva estimada (verde) a partir da metodologia aqui apresentada. Ambos as curvas são referentes ao plano horizontal e correspondem ao conjunto de dados de teste.

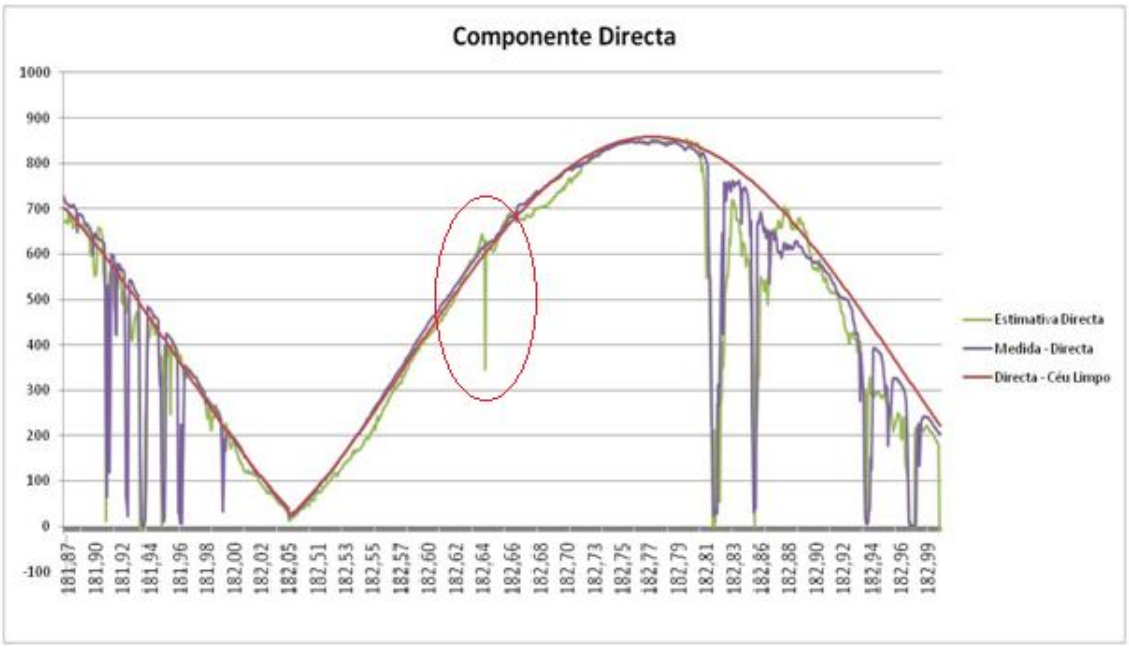


Figura 4.5 - Representação dos valores medidos e estimados para a componente directa. Valores em W/m^2.

A estimativa de irradiância para cada minuto, apresentada na Figura 4.5, corresponde a um MAPE de 8,90%.

Nesta figura é visível um bom acompanhamento dos valores obtidos pela rede neuronal, principalmente em momentos transitórios, onde se verifica "quebras" de radiação directa. É possível ver também próximo do momento 182,65 (dia do ano no horário GMT) uma quebra no valor estimado, quando na realidade não foi registado nenhuma variação nos valores medidos. Isto corresponde claramente a uma má avaliação da condição de sol visível.

4.3.2 - Componente difusa

Nas mesmas condições, a figura seguinte é referente aos valores medidos e estimados da componente difusa da radiação solar para o conjunto de teste.

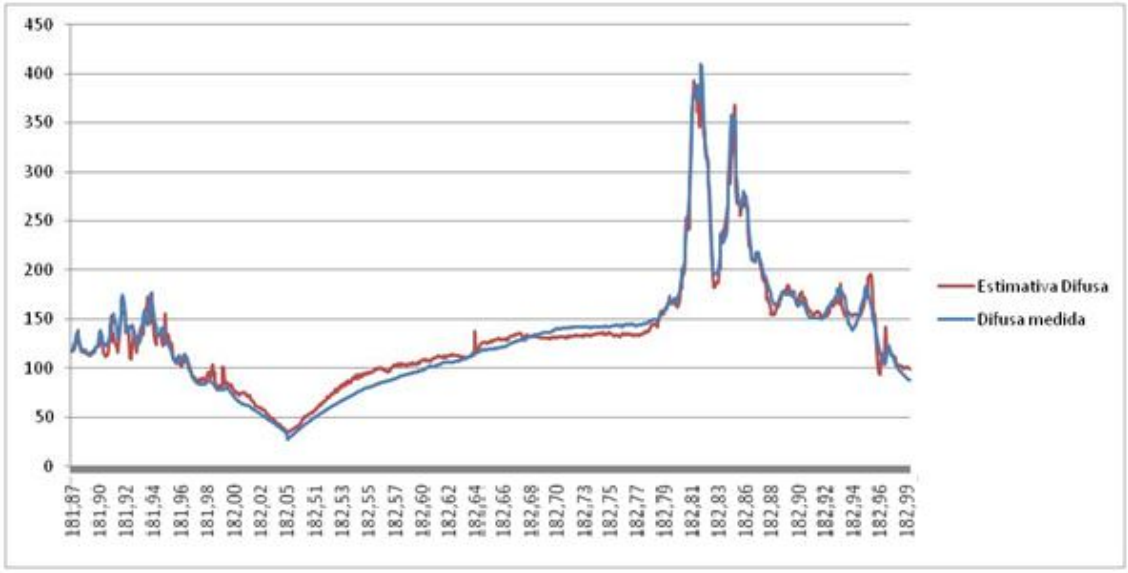


Figura 4.6 – Representação dos valores medidos e estimados para a componente difusa. Valores em W/m^2.

Como se pode ver claramente na Figura 4.6, os resultados aqui obtidos para a estimativa de irradiância são ainda melhores do que para a componente directa. O MAPE correspondente para este conjunto de teste é de 6,09%. Tal como para o caso anterior, o modelo funciona muito bem em momentos onde se verifica variações nos valores de irradiância medidos. Aqui verifica-se também um ligeiro pico nos valores estimados devido a má avaliação do sol visível, como é possível verificar no momento 182,65. Por aqui se pode concluir que a variável correspondente à identificação de sol visível tem uma pequena influência, já que o pico não é tão acentuado como no caso anterior.

4.4 - Análise de variáveis

Neste ponto são apresentados vários testes que foram efectuados ao conjunto de treino, de modo a verificar o erro obtido para o uso de diferentes variáveis.

Tabela 4.1 – Teste de variáveis da componente directa

Teste ->		1	2	3	4
RSol1	Op	x	x	x	x
	Esp	x	x	x	x
	P. Esp	x	x	x	x
RSol2	Op				x
	Esp				x
	P. Esp				x
R1	Op				
	Esp				
	P. Esp				
R2	Op				
	Esp				
	P. Esp				
Total	Op				
	Esp				
	P. Esp				
Sol visível		x	x	x	x
Comp. Directa CL			x	x	x
Comp. Difusa CL					
Azimute		x		x	x
Altura solar		x		x	x
MAPE		**12,11%**	**12,12%**	**10,85%**	**8,90%**
Nº de Entradas		6	5	7	10
Nº Neurónios camada intermédia		13	11	15	21

A Tabela 4.1 apresenta as várias experiências que se realizaram de modo a verificar como evoluí o erro do conjunto de dados de teste com a utilização de diferentes variáveis de entrada. Na tabela acima indicada é apresentado o erro médio absoluto percentual (MAPE) obtido para cada teste de variáveis realizado, estando representado a fundo negro o melhor valor de estimativa encontrado. O símbolo x significa que a variável indicada na parte esquerda da tabela é utilizada para o teste. As variáveis Op, Esp e P. Esp correspondem aos nomes que foram atribuídos aos pixéis onde se faz identificação de nuvens. O termo Op corresponde à situação de nuvens opacas, onde estas são identificadas na Figura 4.4 com a cor cinzento mais escuro. O termo Esp e P. Esp correspondem também aos pixéis classificados como sendo nuvens, mas neste caso são nuvens ou partes destas que tem maior brilho, consequência da sua menor espessura, daí as abreviaturas correspondem a nuvens espessas e pouco espessas, tendo neste caso uma cor cinzento claro e branco respectivamente na Figura 4.4.

Os vários testes apresentados na Tabela 4.1 servem também para identificar se existe variáveis que não acrescentam melhorias no resultado final obtido pela rede neuronal, ficando desta forma demonstrado que todas as variáveis usadas são importantes para a

obtenção do valor final de irradiância. Fica aqui também demonstrado que a informação sobre o índice de céu nublado em torno da posição do sol é importante para obter a estimativa da componente directa da radiação solar, como se pode verificar pela comparação entre os testes 3 e 4, onde em ambos é utilizada a informação sobre o índice de céu nublado em torno do sol para o perímetro mais pequeno (RSol1), estando portanto diferenciados unicamente no perímetro circular de maior área (RSol2).

Tabela 4.2 - Teste de variáveis da componente difusa (parte I)

Teste ->		1	2	3	4	5	6
RSol1	Op			x		x	x
	Esp			x		x	x
	P. Esp			x		x	x
RSol2	Op			x		x	x
	Esp			x		x	x
	P. Esp			x		x	x
R1	Op		x	x	x		
	Esp		x	x	x		
	P. Esp		x	x	x		
R2	Op		x	x	x		
	Esp		x	x	x		
	P. Esp		x	x	x		
Total	Op	x		x			
	Esp	x		x			
	P. Esp	x		x			
Sol visível							
Comp. Directa CL							
Comp. Difusa CL							
Azimute				x	x		x
Altura solar				x	x		x
MAPE		**14,40%**	**16,55%**	**9,30%**	**24,87%**	**21,03%**	**15,95%**
Nº de Entradas		3	6	17	8	6	8
Nº Neurónios camada intermédia		7	13	35	17	13	17

Tabela 4.3 – Teste de variáveis da componente difusa (parte II)

Teste ->		7	8	9	10	11	12	13
RSol1	Op	x	x	x	x	x	x	x
	Esp	x	x	x	x	x	x	x
	P. Esp	x	x	x	x	x	x	x
RSol2	Op	x	x	x	x	x	x	x
	Esp	x	x	x	x	x	x	x
	P. Esp	x	x	x	x	x	x	x
R1	Op	x	x	x	x	x	x	x
	Esp	x	x	x	x	x	x	x
	P. Esp	x	x	x	x	x	x	x
R2	Op	x	x	x	x	x	x	x
	Esp	x	x	x	x	x	x	x
	P. Esp	x	x	x	x	x	x	x
Total	Op			x	x	x	x	
	Esp			x	x	x	x	
	P. Esp			x	x	x	x	
Sol visível				x		x	x	x
Comp. Directa CL								
Comp. Difusa CL			x	x	x		x	x
Azimute		x	x	x	x	x		x
Altura solar		x	x	x	x	x		x
MAPE		**9,79%**	**9,87%**	**6,09%**	**7,72%**	**7,54%**	**9,75%**	**8,15%**
Nº de Entradas		14	15	19	18	18	17	16
Nº Neurónios camada intermédia		29	31	39	37	37	35	33

À semelhança do que foi feito para a componente directa, na Tabela 4.2 e Tabela 4.3 são apresentados os vários testes que foram realizados de modo a verificar como evolui a performance da rede neuronal para o conjunto de dados de teste. O melhor resultado obtido é apresentado no teste número 9, onde são usadas como entradas todas as variáveis já descritas no capítulo anterior e que se podem também identificar na Tabela 4.3 com a utilização do símbolo x.

Na comparação do teste 2 e 4, verifica-se que houve uma degradação na eficiência da rede neuronal com a introdução de novas variáveis. Isto pode ser atribuído à má interpretação da rede neuronal sobre as variáveis de entrada, levando a que a rede neuronal não tenha conseguido encontrar uma relação entre as variáveis de entrada como os valores de treino, resultando assim numa má performance nos resultados de teste. No entanto, a utilização das variáveis azimute e altura solar revelaram-se importantes para uma melhor eficiência, como é visível na comparação dos testes 5 e 6, onde o teste 5 não usa estas variáveis, tendo um erro maior quando comparado com o teste 6. A apresentação deste número de testes serve essencialmente para demonstrar a influência das várias variáveis de entrada disponíveis sobre o resultado final obtido pela rede neuronal.

No teste número 13 são utilizadas as mesmas variáveis que no teste número 9, à excepção das variáveis de índice de nuvens relativamente a todo o céu. Desta forma, não existe neste caso informação sobre o índice de nuvens no perímetro exterior à linha delimitadora de área $R2$. Este comentário deve-se ao facto de numa possível simulação da dinâmica de movimento de nuvens, parte da informação contida nesta região ignorada pelo teste 13 seria desconhecida, uma vez que o limite de visão está limitado até à linha de horizonte, o que leva a não saber o que se encontra para lá dessa linha, logo será também impossível recriar na imagem futura parte desta informação desconhecida, resultando assim num aumento do erro. Ainda assim, o erro não será tão elevado, uma vez que a área ignorada neste teste tem dimensões consideravelmente superiores às dimensões da região que supostamente não será conhecida numa simulação da dinâmica do movimento de nuvens, podendo mesmo afirmar-se que o erro pode para este caso variar então entre os 6,09% e os 8,15%.

4.5 - Simulação de potência de uma central fotovoltaica exemplo

Neste ponto é feita uma apresentação de um exemplo ilustrativo de simulação da potência de saída de uma determinada central fotovoltaica. Os cálculos realizados foram já explicados no capítulo 2 e 3 desta dissertação, onde o valor de potência total de saída da central fotovoltaica é calculado através da expressão (3.8).

Este exemplo de simulação não tem em conta a forma como a potência de saída da uma qualquer central fotovoltaica varia na realidade. Normalmente a potência de saída não varia de forma linear com o valor de irradiância sobre os painéis fotovoltaicos. Desta forma, o exemplo aqui exposto foi simplificado relativamente a este aspecto.

Este exemplo refere-se a uma central semelhante há que existe em Ferreira do Alentejo. Uma parte desta central tem 7 MW de potência instalada, usando para tal 35.000 módulos, do tipo SUNTCH, modelo STP200.

Nas duas tabelas seguintes são apresentadas as características técnicas deste módulo, obtidas através da folha de características do produto.

Tabela 4.4 - Tabela com os coeficientes de temperatura do módulo fotovoltaico

Temperatura nominal de operação (NOCT)	$45°C \pm 2°C$
Coeficiente de temperatura para Pmax	$-(0{,}47 \pm 0.05)\%/°C$
Coeficiente de temperatura para Voc	$-(0{,}34 \pm 0.01)\%/°C$
Coeficiente de temperatura para Isc	$-(0{,}055 \pm 0.01)\%/°C$

Tabela 4.5 – Tabela de características eléctricas do módulo fotovoltaico

Tensão de circuito aberto (Voc)	33,4 V
Tensão óptima de operação (Vmp)	26,2 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	8,12 V
Corrente óptima de operação (Imp)	7,63 V
Potência máxima para STC (Pmax)	200 Wp
Temperatura de operação	$-40°C\ a\ +\ 85°C$
Máxima tensão do sistema	600 V em corrente contínua
Tolerância de potência	$\pm\ 3\%$
STC: Irradiância 1000W/m2, Temperatura da célula a $25°C$*, MA=1,5*	

A simulação realizada corresponde a uma hipotética central fotovoltaica com as mesmas características atrás indicadas, mas neste caso a central encontra-se localizada na mesma localização de onde foram recolhidos os dados respectivos aos arquivos fotográficos e às medições de irradiância solar.

Para esta simulação foi utilizado o conjunto de dados de teste das redes neuronais utilizadas. Foram utilizados três cenários que correspondem à forma como os painéis solares se encontram instalados. No primeiro cenário os módulos encontram-se fixos, no segundo cenário os módulos têm um seguidor solar azimutal e no 3 cenário considera-se que os painéis se encontram sempre orientados para a posição do Sol, usando para tal um sistema de seguimento solar de dois eixos.

As condições de simulação para os três cenários referem-se a uma temperatura ambiente constante de $25℃$. Considera-se também que os valores de irradiância são iguais para todo o parque solar, e que o rendimento de todos os componentes da central à excepção dos painéis solares é de 80%.

4.5.1 - Cenário 1 – Módulos fixos

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos para este cenário. A componente difusa utilizada para o plano do painel é a mesma que obtida para o plano horizontal.

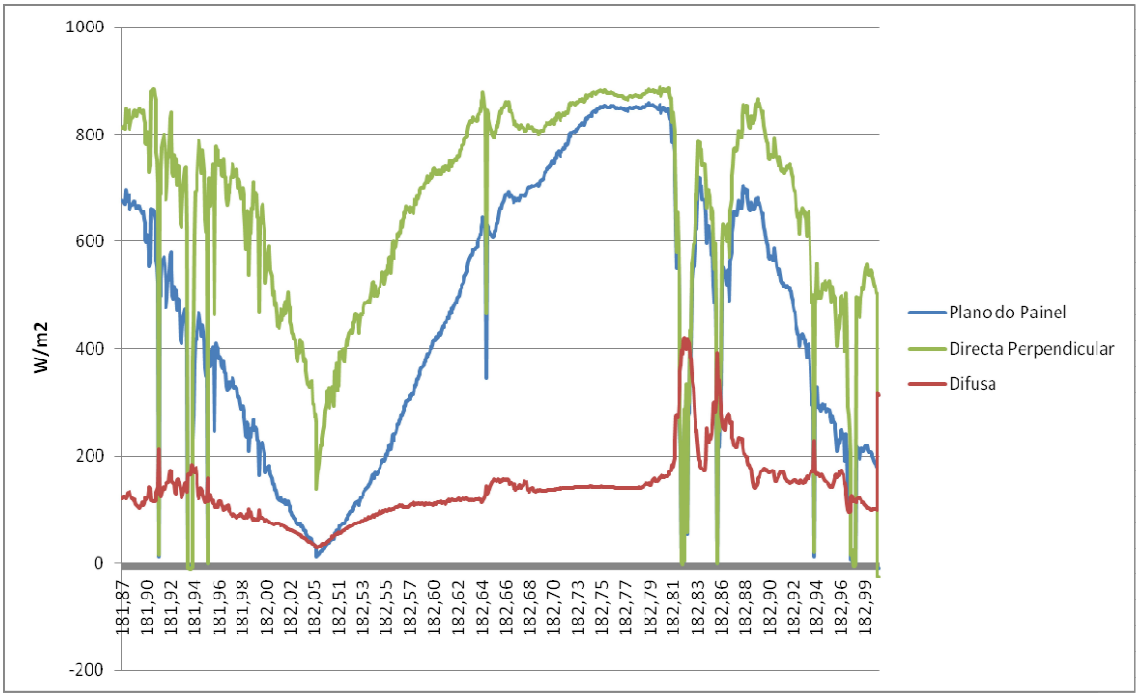


Figura 4.7 - Irradiância solar para diferentes planos e componentes (Cenário 1)

Na Figura 4.7 são apresentados os valores das irradiância, considerados para o plano do painel. Com estes valores é possível calcular a potência de saída da central FV, obtendo o resultado na figura seguinte.

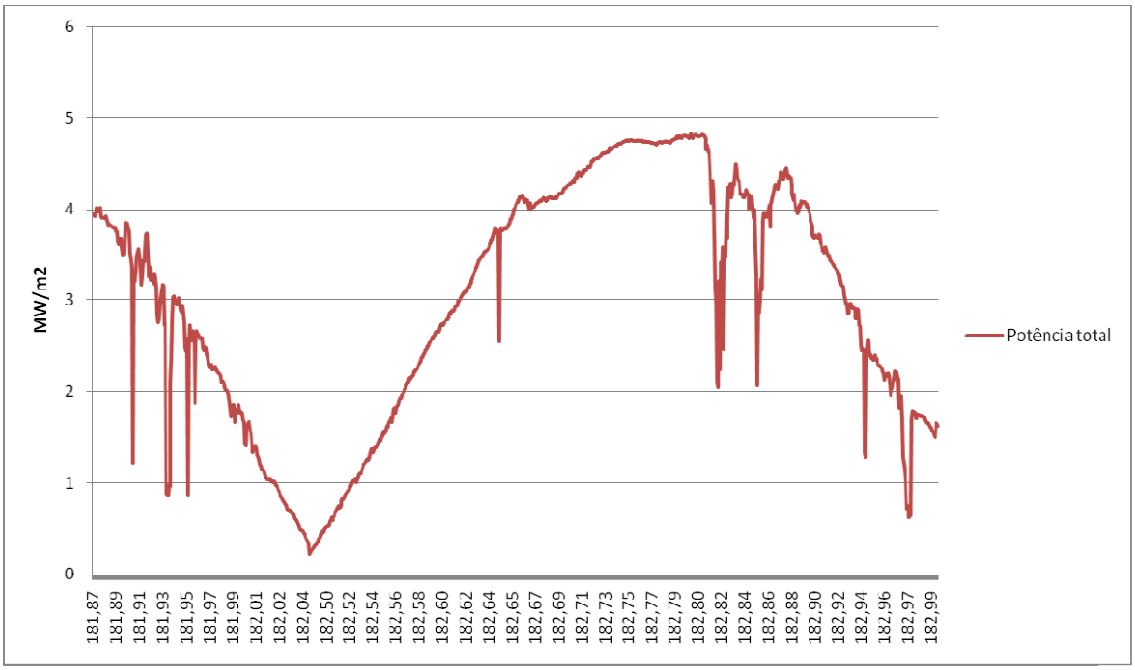


Figura 4.8 - Valor estimado da potência de saída da central FV (Cenário 1)

Com esta configuração dos painéis obtém-se para este conjunto de teste uma produção total de $48{,}68\,\mathrm{MWh}$. Esta quantificação de energia é feita com recurso à agregação da energia produzida a cada minuto. De referir que os painéis estão orientados para o Sul geográfico e que a inclinação destes foram optimizados para este exemplo com recurso ao SOLVER do Excel de modo a obter a maior quantidade de energia possível, não estando portanto optimizados para uma produção anual.

4.5.2 - Cenário 2 – Módulos com seguidor azimutal

Neste cenário a inclinação dos painéis é fixa, mudando unicamente a sua orientação perante o azimute solar.

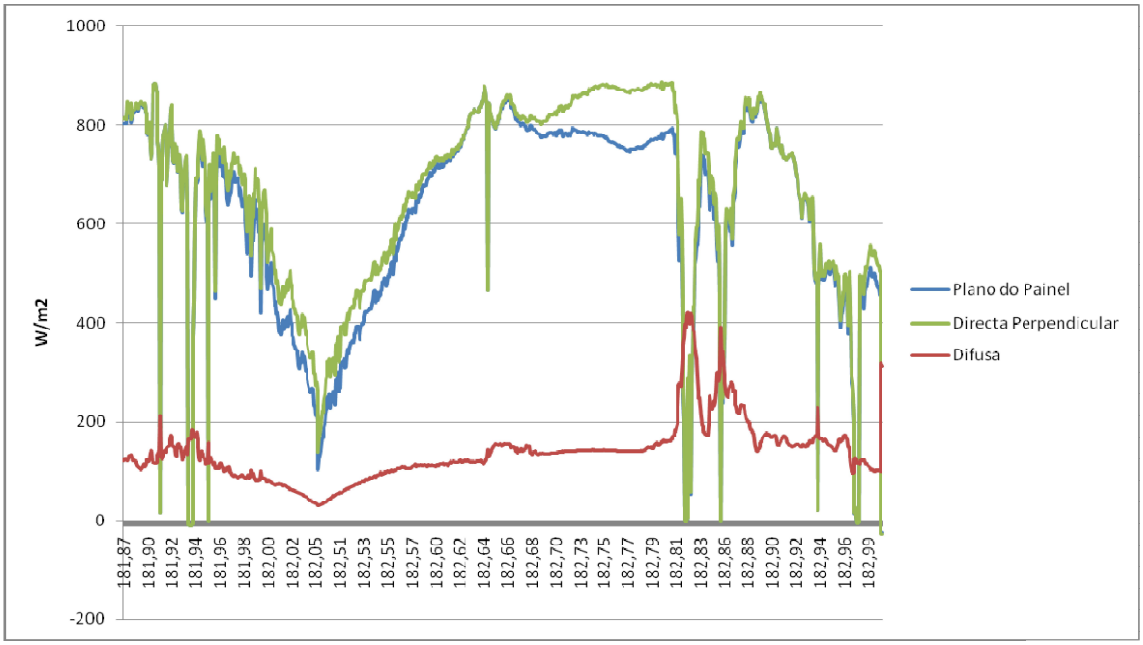


Figura 4.9 - Irradiância solar para diferentes planos e componentes (Cenário 2)

Pode-se observar pela Figura 4.9 que o valor da irradiância sobre o plano do painel se altera significativamente com a utilização deste tipo de seguimento solar, permitindo ao sistema fazer um melhor aproveitamento da energia disponível. Uma vez mais a inclinação do painel foi optimizada para este intervalo de tempo.

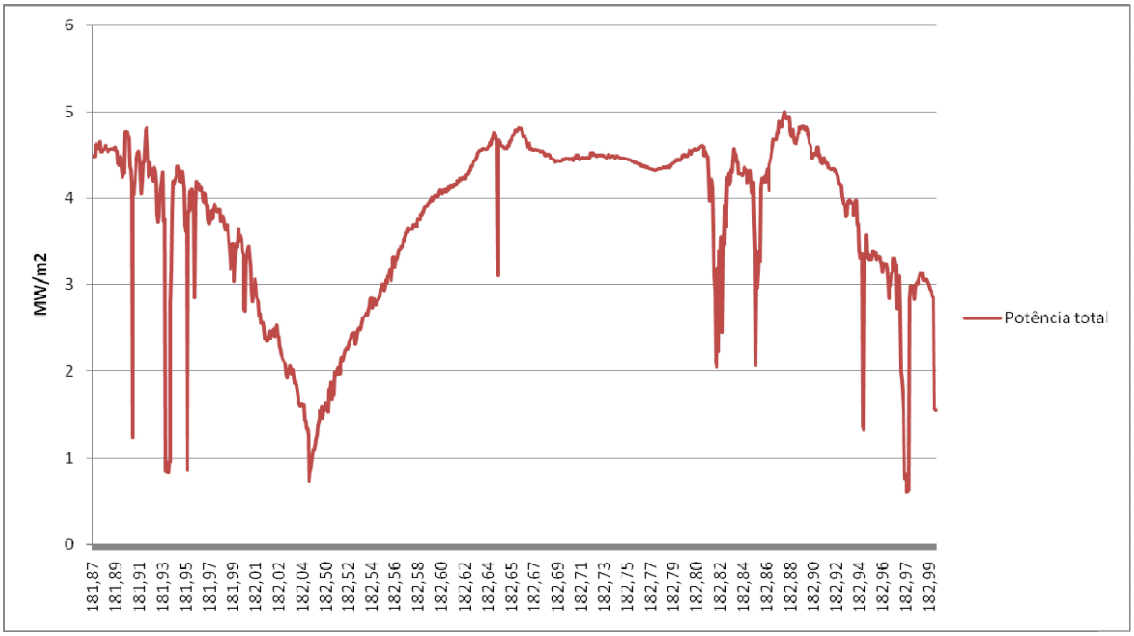


Figura 4.10 – Valor estimado de saída da central FV (Cenário 2)

Permitindo este sistema de seguimento um maior aproveitamento da energia solar, é obtido para este cenário uma energia total de $61{,}31$ MWh, o que representa um aumento de 26% relativamente ao cenário anterior. Na realidade o aumento não será tão grande devido a questão de sombreamentos causados pelos módulos uns sobre os outros.

4.5.3 - Cenário 3 – Módulos com seguimento solar de dois eixos

Neste cenário os planos dos módulos fotovoltaicos encontram-se sempre perpendiculares aos raios solares incidentes. Como é de esperar, esta é a situação que maior aproveitamento faz da componente directa da radiação solar.

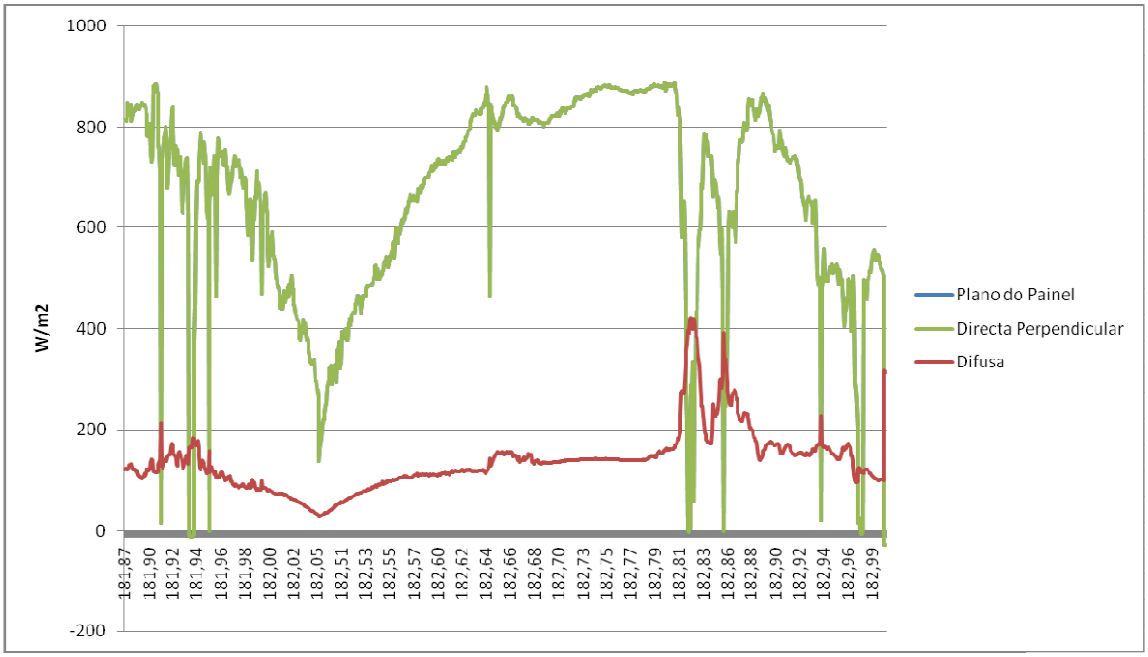


Figura 4.11 - Irradiância solar para diferentes planos e componentes (Cenário 3)

Como se pode observar pela Figura 4.11 a componente directa é totalmente aproveitada, uma vez que a irradiância sobre o plano do painel é sempre máxima, resultando que as curvas Plano do Painel e Directa Perpendicular estejam sobrepostas.

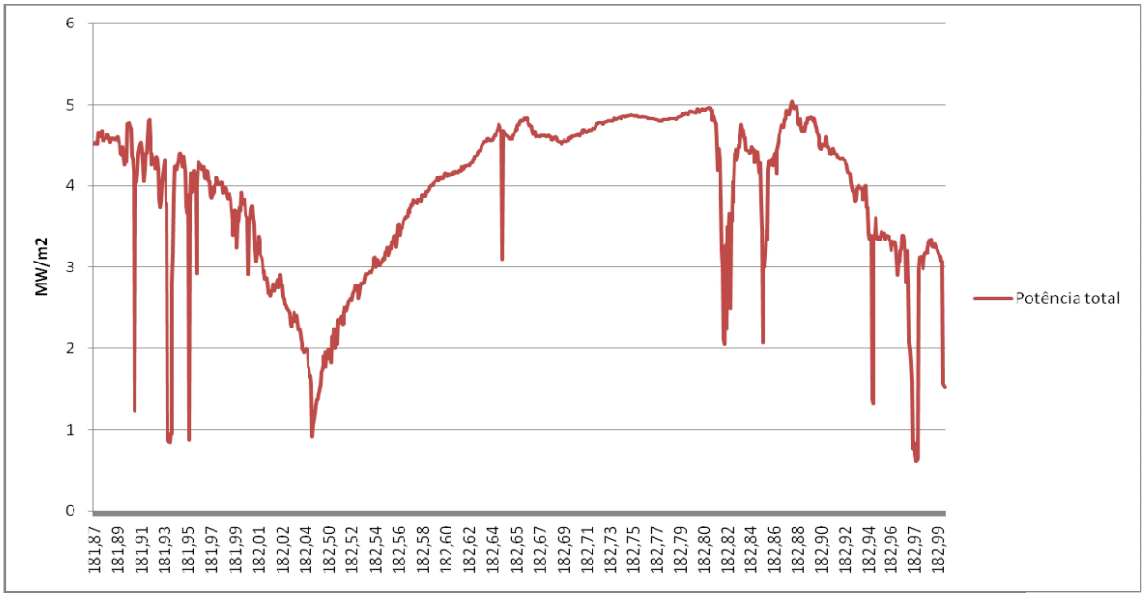


Figura 4.12 - Valor estimado de saída da central FV (Cenário 3)

Devido ao constante seguimento da posição solar, a energia total produzida neste caso será de 63,97 MWh, correspondendo a um aumento de 4,3% em relação ao cenário 2 e de 31,4% relativamente ao cenário 1. É importante referir que aqui são feitas várias simplificações, na medida em que num sistema de seguimento solar de dois eixos não se

consegue aproveitar sempre o máximo da componente directa ao longo do dia, uma vez que devido à utilização de vários módulos instalados próximos uns dos outros, associadas a uma baixa elevação solar vai resultar em sombreamentos dos módulos uns sobre os outros.

4.6 - Componente global

Observando as Figura 4.7, 4.9 e 4.11 pode-se observar que o traço que define cada curva do gráfico é caracterizado por uma certa oscilação. No entanto, se observarmos as Figuras 4.10, 4.12 e 4.13, que apresentam o resultado da simulação de potência, é visível que o nível de oscilação que se verificava na curva não é tão elevado quanto para as curvas das componentes originais da radiação. Pode-se concluir que existe aqui uma compensação entre a componente directa e a componente difusa, apesar de estas terem sido determinadas por redes diferentes, mas no entanto variáveis de entrada em comum.

A figura seguinte apresenta uma simulação de potência de saída da central fotovoltaica para o mesmo caso que é apresentado no cenário 1, ou seja, para um plano fixo.

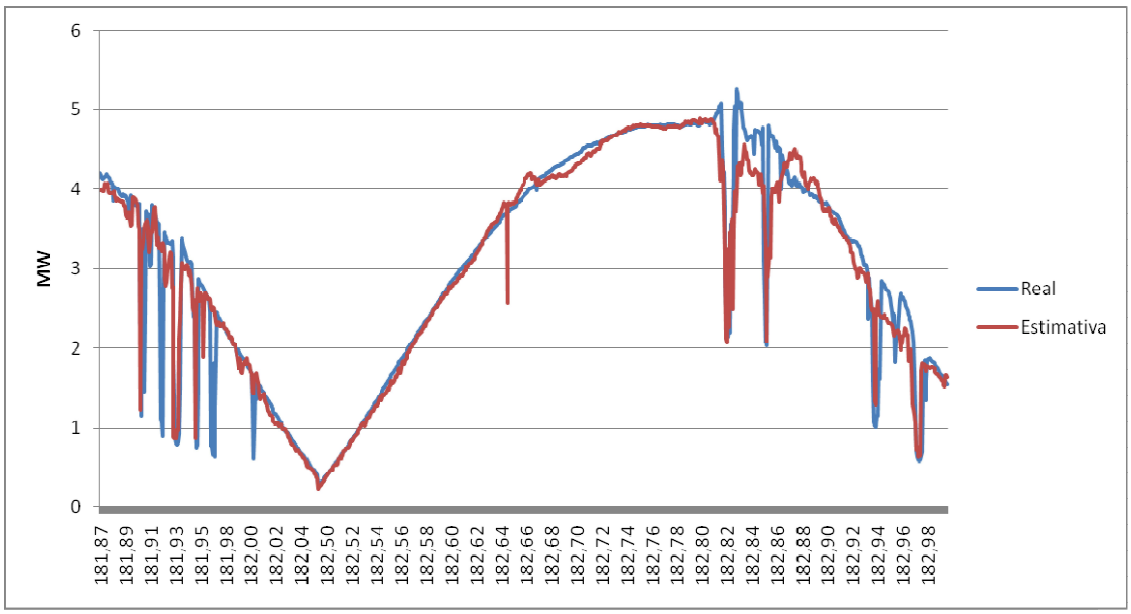


Figura 4.13 - Potência de saída da central FV

A indicação de real no gráfico significa que a curva corresponde ao resultado da potência de saída utilizando como dados de cálculo os valores medidos da irradiância. Para a curva vermelha, são usados os valores estimados através do uso das redes neuronais. Este gráfico podia ser substituído por um em que tivesse representado a componente global dos valores medidos e estimados, tendo então como única diferença a amplitude do valor de escala do gráfico.

Como se pode observar pela Figura 4.13, existe uma boa sobreposição da curva real pela curva estimada. A curva estimada resulta da série de dados correspondentes aos melhores valores obtidos para a componente directa e difusa, ou seja, valores que tem um MAPE de 8,9% e 6,09% respectivamente. Fazendo uma análise de erro para a curva estimada na Figura

4.13 obteve-se um MAPE de 6,08%, ou seja, um erro que é ligeiramente inferior ao obtido pela componente difusa, mas significativamente menor quando em comparação com a componente directa. Tendo a componente directa uma amplitude maior que a componente difusa e um erro percentual também maior, leva a que o erro absoluto desta componente seja ainda maior quando em comparação com o erro absoluto da componente difusa. Ter um MAPE de $6{,}08\%$ para a curva de simulação de potência obtida através das redes neuronais é a mesma coisa que ter um MAPE de $6{,}08\%$ para a componente global estimada. Pode-se com isto concluir que parte do erro apresentado nos valores de irradiância da componente directa é compensada pelo erro obtido pela componente difusa e vice-versa, levando então a que o valor da componente global apresente um valor ainda mais próximo dos valores reais. Isto pode parecer um pouco estranho à partida, uma vez que cada componente é estimada por redes neuronais diferentes, mas é necessário relembrar que a rede neuronal que permite estimar a componente difusa possui todas as variáveis de entrada da rede que estima a componente directa à excepção da variável que modeliza a componente directa para a condição de céu limpo, permitindo assim explicar o facto de existir compensação de erro na determinação da componente global.

4.7 - Análise de erro

Para os vários cenários apresentados no ponto anterior é possível verificar a amplitude que a potência de saída da central fotovoltaica pode tomar. Por exemplo, para os momentos 182,82 e 182,85 dos vários cenários apresentados, as variações de potência são superiores a $2\ \mathrm{MW}$. Esta amplitude só não é maior devido à compensação que existe devido à componente difusa, ficando também visível que a variação de potência será maior para centrais de concentração solar fotovoltaica, já que nestas a componente difusa não é aproveitada.

Relativamente aos erros de estimativa de irradiância, a maior parte terá origem no processamento de imagens, devido a erros na identificação de sol visível. Este erro não permite que a rede neuronal se adapte as características contidas nos dados de treino. Estes erros de classificação do sol visível, devem-se também ao facto dos parâmetros associados à identificação terem sido optimizados com base nas imagens do inicio do conjunto de dados de treino. Com o avançar do tempo, o reflexo da faixa preta vai se alterando, levando a que os parâmetros antes estimados para detecção de sol visível, deixem de estar optimizados com o decorrer do tempo.

Existem outros factores que influenciam o erro, como por exemplo, a utilização da faixa negra que oculta o Sol e ocupa parte da imagem classificada, ocultando informação relativa a condição atmosférica. Na Tabela 4.6 tem-se as dimensões dos vários objectos que ocultam a imagem, referentes à Figura 4.14.

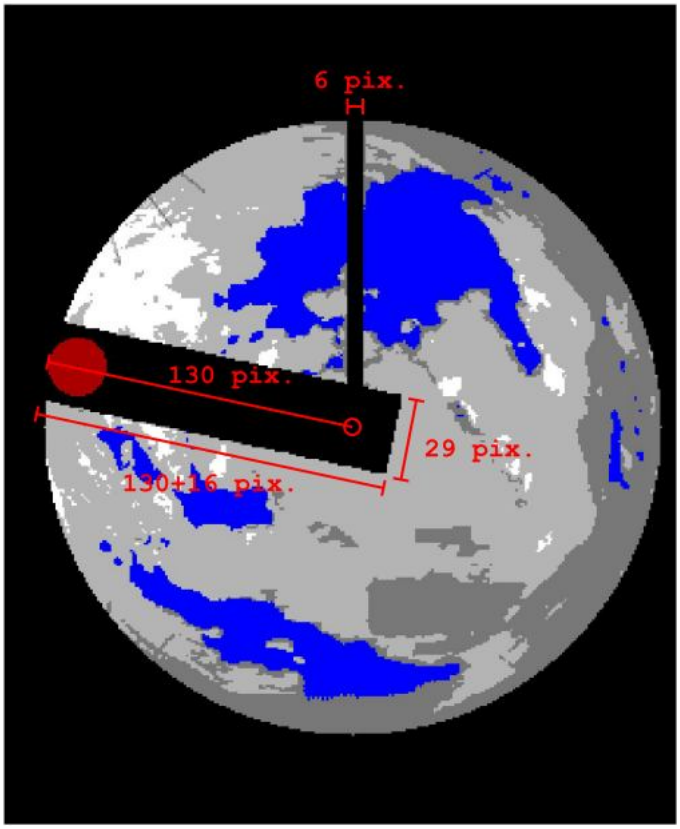


Figura 4.14 – Indicação das dimensões da imagem em pixéis

Tabela 4.6 – Quantificação de pixéis úteis por imagem classificada

Componente/Região	Pixéis
Raio útil da imagem	130
Área útil de imagem	$\pi \times 130^2 = 53093$
Faixa preta rotativa	$29 \times (130 + 16) = 4234$
Braço de suporte da câmara	$6 \times 130 = 780$
Área útil ocultada	$5014 \approx 9{,}44\%$

Como se pode verificar na Tabela 4.6, cerca de $9{,}44\%$ da área útil da imagem que contém informação sobre a condição atmosférica não é visível. Obviamente que o desconhecimento do real valor das variáveis na zona oculta da imagem leva a erros de estimativa de irradiância.

Erros na estimativa da irradiância também podem resultar da própria metodologia utilizada, pois a técnica aqui apresentada usa um baixo número de variáveis, fazendo a estimativa dos valores de irradiância de uma forma muito simples. De qualquer forma, os valores obtidos e aqui apresentados demonstram que esta metodologia é bastante eficaz.

4.8 - Requisitos de processamento

Uma parte importante num projecto como o que é aqui apresentado, são os requisitos de hardware necessários para processamento da informação. No processamento de imagens efectuado nesta dissertação foi usado um computador com processador Intel Centrino a 1,86GHz com 2MB de cache nível 2 com 2 GB de memória RAM. Os requisitos principais são a nível de processamento, não sendo a quantidade de memória RAM o mais importante.

Nesta dissertação foram processados aproximadamente trinta mil arquivos fotográficos, sendo estes arquivos referentes unicamente a um mês de captura de imagens. O tempo necessário para processamento e organização de informação destes arquivos foi de aproximadamente 56 horas o que corresponde a uma duração de aproximadamente sete segundos por imagem. Devido ao tempo necessário para processar a informação o conjunto de dados usado nesta dissertação foi limitado a um mês de dados. Quanto ao tempo necessário por imagem pode-se verificar que sete segundos é um tempo suficientemente curto para permitir o processamento de todas as restantes tarefas apresentadas na metodologia desta dissertação de modo a permitir repetir o processo a cada minuto e assim ajustar o horizonte de previsão bem como ajustes da dinâmica e movimento de nuvens.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 - Conclusões gerais

O principal objectivo deste trabalho passou pelo desenvolvimento de uma metodologia que permita obter uma previsão de irradiação solar em intervalos de um minuto, de modo a poder com estes valores simular a potência de saída de uma central fotovoltaica. No trabalho desenvolvido criou-se uma ferramenta que baseada em imagens de todo o hemisfério celeste, permite obter valores de irradiância nas componentes directa e difusa. De salientar que esta ferramenta é importantíssima na medida em que permite em certa parte validar a metodologia apresentada nesta dissertação,

Os valores obtidos com o uso das redes neuronais, demonstraram que as ferramentas desenvolvidas permitem estimar os valores de irradiância com bastante precisão, permitindo desta forma serem uma base para o restante desenvolvimento, que é necessário fazer para como produto final se consiga obter uma previsão de uma qualquer central fotovoltaica, trazendo consigo todos os benefícios que uma previsão deste tipo pode proporcionar.

Identificou-se também que os maiores factores que causam o aumentam do erro na estimativa dos valores de irradiância são a má identificação do sol visível, bem como a área significativa ocupada pela faixa preta sobre o espelho que não permite conhecer a verdadeira condição atmosférica.

O erro apresentado nas etapas desenvolvidas nesta dissertação podem ser ainda alvo de melhoramento pelos motivos já indicados, no entanto é preciso relembrar que isto se trata de uma etapa intermédia, na medida em que vai existir erros associados à etapa inicial onde sé faz a previsão de movimento e dinâmica de nuvens. Por fim, há que ter em conta ainda o erro associado a modelização da central solar.

Por fim é de realçar que todos os objectivos que foram inicialmente propostos para esta dissertação foram atingidos, tendo-se obtido resultados incentivadores, de tal forma que se espera um desenvolvimento do trabalho aqui apresentado, tendo em vista a sua aplicação prática.

5.2 - Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros o mais importante prende-se com a necessidade de concluir as etapas apresentadas na metodologia desenvolvida nesta dissertação. A partir do momento em que a ferramenta que permite simular a dinâmica das nuvens esteja concluída e que permita reconstruir as imagens aqui utilizadas para estimativa de irradiância solar, obtêm-se finalmente um produto final. Outros trabalhos importantes prendem-se com o desenvolvimento de um protótipo de recolha de imagens e com o local da sua instalação, bem como o local de processamento de toda a informação. Neste caso algo semelhante com o que é feito no caso do TSI pode ser importante, uma vez que toda a informação recolhida por este equipamento pode ser acedida remotamente, permitindo também fazer um processamento remoto da informação. No que respeita ao próprio sistema de capturas de imagem, é necessário que o sistema tenha melhores características que o TSI, nomeadamente uma maior resolução de imagem, de modo a permitir um melhor reconhecimento das condições atmosféricas junto ao horizonte e assim permitir simular a dinâmica das condições atmosféricas. Este aumento de resolução não é no entanto necessário para as etapas desenvolvidas nesta dissertação, já que a resolução dos arquivos fotográficos é suficiente para estimar os valores de radiação com suficiente precisão. Outro requisito no sistema de captura de imagens é a ausência da faixa preta que existe no TSI, que oculta informação que é útil para a estimativa da irradiância.

Outro aspecto importante que é necessário resolver, é a necessidade de conhecer como determinada central responde em potência de saída gerada, para a irradiância solar que recebe sobre os painéis. Assim é necessário conhecer a modelização da central, algo que será relativamente fácil de fazer. O uso de redes neuronais artificiais deve ser suficiente, bastando para tal, ter dados medidos de irradiância da central e os valores correspondentes para o mesmo momento de potência gerada. Desta forma, obtêm-se o modelo de resposta da central, sendo que no entanto outras variáveis para além dos valores medidos possam ser necessárias, de modo a obter melhores resultados.

Referências

[1] EWEA, "Large scale integration of wind energy into the European power supply: analysis, issues and recommendations," 2005.

[2] M. Lopez-Martinez and F. R. Rubio, "Cloud detection system for a solar power tower plant," in *Proceedings of the 2002 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 5, 2002 - November 8, 2002*, Sevilla, Spain, 2002, pp. 2560-2565.

[3] D. Lenardič, "Large-Scale Photovoltaic Power Plants," May 2009.

[4] S. Nowak, "Annual report 2008," IEA PVPSApril 2009.

[5] EPIA, "Set For 2020," 2009.

[6] EPIA, "Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2013," 2009.

[7] E. L. D. Heinemann, and M. Girodo, "Forecasting of solar radiation," *Solar Energy Resource Management for Electricity Generation From Local Level to Global Scale,* 2005.

[8] J. H. Elke Lorenz, Detlev Heinemann and Hans Georg Beyer, "Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,* vol. Vol. 2, No.1, March 2009.

[9] ARM, "*The Atmospheric Radiation Measurement Program*" Disponível em: http://www.arm.gov/. Acesso em 16 de Novembro de 2009.

[10] J. F. Oliveira, "Utilização do SOLVER do EXCEL " *Apontamentos da disciplina Investigação Operacional 1, LEEC - FEUP, Maio 1998*.

[11] S. Makridakis, *et al.*, *Forecasting methods and applications* vol. 3rd ed. New York [etc]: John Wiley & Sons, 1998.

[12] A. Hammer, *et al.*, "Short-term Forecasting of Solar Radiation: A Statistical Approach Using Satellite Data," *Solar Energy,* vol. 67, pp. 139-150, 1999.

[13] M. Chaabene and M. Ben Ammar, "Neuro-fuzzy dynamic model with Kalman filter to forecast irradiance and temperature for solar energy systems," *Renewable Energy,* vol. 33, pp. 1435-1443, 2008.

[14] T. R. Karl, "Critical issues for long-term climate monitoring," *Climatic change,* vol. 31, p. 185, 1995.

[15] I. Yucel, *et al.*, "Short-Term Performance of MM5 with Cloud-Cover Assimilation from Satellite Observations," *Monthly Weather Review,* vol. 131, pp. 1797-1810, 2003.

[16] D. Heinemann, *et al.*, "Forecasting of solar radiation," *Solar Energy Resource Management for Electricity Generation From Local Level to Global Scale,* 2005.

[17] M. Muselli, *et al.*, "Improved procedure for stand-alone photovoltaic systems sizing using METEOSAT satellite images," *Solar Energy,* p. 429, 1998.

[18] G. Reikard, "Predicting solar radiation at high resolutions: A comparison of time series forecasts," *Solar Energy,* vol. 83, pp. 342-349, 2009.

[19] A. Sfetsos and A. H. Coonick, "Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques," *Solar Energy,* vol. 68, pp. 169-178, 2000.
[20] E. G. Rossini, "Caracterização da distribuição de Intensidade da Radiação Solar Difusa," Doutor em Engenharia, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2002.
[21] A. Arking, "The radiative effects of clouds and their impact on climate," *Bulletin American Meteorological Society,* vol. 71, No. 6, pp. 795-813, 1991.
[22] *AllSky camera*. Disponível em: http://www.sbig.com/sbwhtmls/announce_allsky-340.htm. Acesso em 12 de Outubro de 2009.
[23] R. A. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition*: CRC Press, 2003.
[24] V. Quaschning, *Understanding renewable energy systems*. London: Earthscan, 2005.
[25] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2003.
[26] C. D. M. Monteiro, "Energia Solar Fotovoltaica," *Apontamentos da disciplina de Energia Eólica e Solar do MIEEC, FEUP, Setembro de 2008*.
[27] M. Collares-Pereira and A. Rabl, "The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values," *Solar Energy,* vol. 22, pp. 155-164, 1979.
[28] M. F. C. Pereira, "Estimativa da Produção de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edifícios ", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro de 2009.
[29] E. Vartiainen, "A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces," *Renewable Energy,* vol. 20, pp. 45-64, 2000.
[30] J. V. Dave, "Isotropic distribution approximation in solar energy estimations," *Solar Energy,* vol. 22, pp. 15-19, 1979.
[31] A. J. Arnfield, "Estimation of diffuse irradiance on sloping, obstructed surfaces: An error analysis," *Theoretical and Applied Climatology,* vol. 30, Number 4 / April, 1982, pp. 303-320.
[32] R. C. Temps and K. L. Coulson, "Solar radiation incident upon slopes of different orientations," *Solar Energy,* vol. 19, no. 2, 1977, p. 179-184.
[33] R. Perez and R. Stewart, "Solar irradiance conversion models," *Solar Cells,* vol. 18, pp. 213-222.
[34] O. M. Essenwanger and A. Mims, *Synthetic solar radiation statistics on cloudy and sunny days*, 1985.
[35] W. Moeser and E. Raschke, "Mapping of global radiation and cloudiness from Meteosat image data - Theory and ground truth comparisons," *Meteorologische Rundschau,* vol. 36, April 1983, p. 33-41.
[36] Forgan, "Absorption of Solar Radiation by Clouds: Observations Versus Models," *Science,* vol. 267.
[37] C. D. M. Monteiro, "Redes Neuronais," *Apontamentos da disciplina de Técnicas de Previsão do MIEEC, FEUP, Setembro de 2008*.
[38] R. Aggarwal and Y. Song, "Artificial neural networks in power systems. I. General introduction to neural computing," *Power Engineering Journal,* vol. 11, pp. 129-134, 1997.
[39] V. Miranda, "Redes Neuronais – treino por retropropagação " *Texto de apoio para a disciplina de Controlo Difuso e Redes Neuronais, LEEC, FEUP, Junho de 2007*.
[40] M. T. Hagan and M. B. Menhaj, "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm," *Neural Networks, IEEE Transactions on,* vol. 5, pp. 989-993, 1994.
[41] C. D. M. Monteiro, "Modelos de Regressão," *Apontamentos da disciplina de Técnicas de Previsão do MIEEC, FEUP, Setembro de 2008*.
[42] C. Z. F. Blaabjerg and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions,* vol. vol. 19, pp. 1184-1194, 2004.