



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Sistema automático de baixo custo para a medição da altura da base das nuvens e da visibilidade atmosférica**

**Filipe Lagarto Carretas**

Orientação: Professor Doutor Fernando Manuel Tim  
Tim Janeiro

**Mestrado em Engenharia Mecatrónica**

Dissertação

Évora, 2014



Sistema automático de baixo custo para a medição da altura da base das nuvens e da visibilidade atmosférica



Dissertação apresentada à Universidade de Évora no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecatrónica.

**Autor: Filipe Lagarto Carretas**

**Orientador: Professor Doutor Fernando Manuel Tim Tim Janeiro**

**Évora, Setembro de 2014**



## Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado trata-se de um investimento pessoal e fruto do meu trabalho, contudo sem o contributo das pessoas que me rodeiam diariamente a mesma não seria possível, gostaria de agradecer a todas essas pessoas. Gostaria realizar um agradecimento especial pela sua relevância nesta jornada:

Ao Prof. Doutor Fernando Janeiro pelos ensinamentos que me passou sobretudo nos últimos 3 anos, pelo crescimento científico que me proporcionou e pela amizade demonstrada.

Ao Prof. João Figueiredo pela forma prática como me ensinou a encarar a engenharia e pelos conselhos sobre a vida transmitidos.

À minha namorada Raquel Caixa pelo apoio contínuo, os incentivos manifestados e a coragem que sempre me transmitiu.

Aos meus pais, Jorge e Isabel Carretas pelos valores transmitidos, pelo suporte que sempre me proporcionaram e pelo estímulo incessante manifestado.

Este trabalho teve o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através de uma bolsa de investigação para Licenciado inserida no projeto PTDC/CTE-ATM/115833/2009 e no programa COMPETE FCOMP-01-0124-FEDER-014508.





## Resumo

Nesta dissertação são apresentados e analisados dois sistemas de baixo custo que realizam medições de variáveis meteorológicas. O primeiro sistema apresentado mede a altitude da base das nuvens, velocidade e direção do vento através de imagens adquiridas por duas máquinas fotográficas. O segundo sistema aqui apresentado realiza medições da visibilidade atmosférica através de elementos naturais presentes no campo de visão de uma máquina fotográfica.

O sistema de medição de altitude das nuvens foi instalado na Universidade de Évora no Colégio Luís António Verney. Por sua vez o sistema de medição da visibilidade atmosférica foi instalado em dois locais distintos: em Évora; e em Viana do Alentejo.

As medições realizadas pelos sistemas são apresentadas nesta dissertação assim como uma análise da incerteza das mesmas.

Adicionalmente são apresentados e analisados alguns eventos registados pelos sistemas, que influenciam as variáveis meteorológicas em estudo.







# Low cost automatic system for the measurement of cloud base height and atmospheric visibility

## Abstract

In this dissertation two low cost systems which perform measurements of meteorological variables are presented and analyzed. The first system presented measures the cloud height, wind speed and direction through pictures from two digital cameras. The other system presented here performs measurements of atmospheric visibility through natural elements present in the field of view of a camera.

The system which performs cloud height measurements was installed in the Colégio Luís António Verney at Universidade de Évora. The other system which performs measurements of the atmospheric visibility was installed in two different locations: in Évora; and in Viana do Alentejo.

The measurements performed by the two systems are presented along with an uncertainty analysis.

Furthermore some events recorded by the systems that influence the meteorological variables under study are presented and analyzed.





## Índice

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS .....	17
<b>2. SISTEMA DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>19</b>
2.1 METODOLOGIA.....	19
2.2 ESTÉREO VISÃO .....	19
2.3 METODOLOGIA PARA A MEDIÇÃO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA .....	22
2.4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	27
2.4.1 Máquinas fotográficas.....	29
2.4.2 Circuito de disparo.....	31
2.4.3 Diferenças no tempo de disparo.....	33
2.4.4 Formato de fotografias.....	34
2.4.5 Sensores e Atuadores.....	35
2.4.6 Rede de dados.....	36
2.4.7 Caixas de proteção .....	36
<b>3. SOFTWARES.....</b>	<b>39</b>
3.1 DSLR REMOTE PRO .....	39
3.2 CAM2COM .....	39
3.3 PLATAFORMA ARDUINO .....	41
3.4 LABVIEW.....	41
3.5 MATLAB .....	42
<b>4. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA.....</b>	<b>43</b>
4.1 EFEITOS DOS DESALINHAMENTOS NAS MEDIÇÕES .....	44
4.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA RECORRENDO ÀS ESTRELAS .....	46
4.3 DISTRIBUIÇÃO DE MATRIZES .....	49
4.4 ERROS NO REGISTO FOTOGRÁFICO.....	50
4.5 DISTORÇÃO RADIAL.....	52
4.6 DIREÇÃO DO NORTE GEOGRÁFICO .....	54
4.7 TEORIA DAS INCERTEZAS APLICADA À MEDIÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS .....	56

4.7.1	<i>Incerteza do processo de calibração</i>	57
4.7.2	<i>Incerteza na medição da altura da base das nuvens</i>	58
4.7.3	<i>Incerteza na medição da velocidade e direção do vento</i>	60
4.8	TEORIA DAS INCERTEZAS APLICADA À VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA	61
4.8.1	<i>Incerteza no cálculo do coeficiente de extinção com alta visibilidade</i>	62
4.8.2	<i>Incerteza no cálculo do coeficiente de extinção com baixa visibilidade</i>	63
<b>5.</b>	<b>MEDIÇÃO DA ALTURA DA BASE DAS NUVENS</b>	<b>65</b>
5.1	ALTITUDE	65
5.2	CORRELAÇÃO DE IMAGENS	66
5.3	RESULTADOS	68
5.4	INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES DA ALTURA DAS NUVENS	69
5.5	VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO	71
5.6	INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO	74
<b>6.</b>	<b>VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA</b>	<b>77</b>
6.1	MEDIÇÃO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA	77
6.2	TEMPESTADE DE AREIA	80
6.3	FOGOS FLORESTAIS	83
6.4	EXPOENTE DE ÅNGSTRÖM	85
6.5	MEDIÇÕES CONTÍNUAS DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA	87
6.6	INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA	91
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>93</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>97</b>
<b>9.</b>	<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>101</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 1 – GEOMETRIA DO SISTEMA USADO NA MEDIÇÃO DA ALTURA DA BASE DAS NUVENS. ....	20
FIGURA 2 - GEOMETRIA DO SISTEMA USADO NA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO. ....	22
FIGURA 3 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA. ....	25
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO PARA SITUAÇÕES DE BAIXA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA. ....	26
FIGURA 5 - LOCAL DE INSTALAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS. ....	28
FIGURA 6 - LOCAL DE INSTALAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO DA VISIBILIDADE. ....	29
FIGURA 7 - MÁQUINA FOTOGRÁFICA CANON EOS 1000D COM OBJETIVA EF-S 18-55MM. ....	30
FIGURA 8 - MÁQUINA FOTOGRÁFICA OLYMPUS SP-500UZ. ....	30
FIGURA 9 - MÁQUINA FOTOGRÁFICA CANON REBEL XS COM OBJETIVA EF-S 18-55MM. ....	31
FIGURA 10 - SISTEMA DE DISPARO. ....	32
FIGURA 11 – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE DISPARO. ....	32
FIGURA 12 - CIRCUITO DE DISPARO. ....	33
FIGURA 13 - MONTAGEM QUE PERMITE MEDIR A DIFERENÇA DE TEMPOS DE DISPARO. ....	33
FIGURA 14 - SISTEMA DE EIXOS E DIMENSÕES CONVENCIONADAS. ....	34
FIGURA 15 - SISTEMA REMOTO PARA DESBLOQUEIO DAS MÁQUINAS FOTOGRÁFICAS. ....	35
FIGURA 16 - REDE DE DADOS DESENVOLVIDA PARA O SISTEMA DE MEDIÇÃO. ....	36
FIGURA 17 - CAIXA PROTETORA DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO. ....	37
FIGURA 18 - SOFTWARE DSLR REMOTE PRO EM FUNCIONAMENTO. ....	40
FIGURA 19 - SOFTWARE CAM2COM EM FUNCIONAMENTO. ....	40
FIGURA 20 - EXEMPLO SIMPLES DE UM ALGORITMO NO PROGRAMA ARDUINO. ....	41
FIGURA 21 – PROGRAMA DE DISPARO EM LABVIEW. ....	42
FIGURA 22 - PROCESSAMENTO DE DADOS EM MATLAB. ....	42
FIGURA 23 - POSIÇÕES E ORIENTAÇÕES DOS REFERENCIAIS DE CADA MÁQUINA FOTOGRÁFICA. ....	43
FIGURA 24 – VISTA DE CIMA DO SISTEMA COM REPRESENTAÇÃO DO DESALINHAMENTO $A_3$ NA MEDIÇÃO DA DIREÇÃO DO VENTO. ....	44

FIGURA 25 - DESALINHAMENTO CAUSADO PELA ROTAÇÃO $B_1$ .....	45
FIGURA 26 - DESALINHAMENTO CAUSADO PELA ROTAÇÃO $B_2$ .....	45
FIGURA 27 - DESALINHAMENTO CAUSADO PELA ROTAÇÃO $B_3$ .....	46
FIGURA 28 - FOTOGRAFIAS NOTURNAS ADQUIRIDAS POR AMBAS AS CÂMARAS E SELEÇÃO AUTOMÁTICA DAS ESTRELAS COMO PONTOS DE CONTROLO.....	47
FIGURA 29 - FOTOGRAFIA ESQUERDA TRANSFORMADA PELA MATRIZ T.....	48
FIGURA 30 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO QUE ENCONTRA PARES DE CONTROLO ATRAVÉS DE ESTRELAS PRESENTES EM FOTOGRAFIAS NOTURNAS. ....	49
FIGURA 31 - EFEITO CRIADO POR UM PIXEL MORTO NA FOTOGRAFIA NOTURNA. ....	51
FIGURA 32 - ERROS NO REGISTO FOTOGRÁFICO, MANCHAS VERMELHAS E MANCHAS AZUIS RESPETIVAMENTE. ....	51
FIGURA 33 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO QUE CALCULA A POSIÇÃO DOS ERROS DE REGISTO QUE PODERIAM AFETAR A CALIBRAÇÃO. ....	52
FIGURA 34 - DISTORÇÕES RADIAIS PRODUZIDAS NAS FOTOGRAFIAS PELAS LENTES DAS OBJETIVAS.....	53
FIGURA 35 - ZONA UTILIZADA DA FOTOGRAFIA PARA A REDUÇÃO DA DISTORÇÃO RADIAL.....	54
FIGURA 36 - SISTEMA DE EIXOS PARA A DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO $A_3$ .....	54
FIGURA 37 - TRAJETÓRIA DAS ESTRELAS AO LONGO DE UMA NOITE.....	55
FIGURA 38 - DETERMINAÇÃO DA ROTAÇÃO $A_3$ ATRAVÉS DA FIGURA 37. ....	56
FIGURA 39 - PAR DE FOTOGRAFIAS RECOLHIDAS PELO SISTEMA NO DIA 26 DE JANEIRO DE 2012.....	65
FIGURA 40 - PAR DE FOTOGRAFIAS COM OS DESALINHAMENTOS DO SISTEMA CORRIGIDOS.....	66
FIGURA 41 - RESULTADO DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS JANELAS REPRESENTADAS NA FIGURA 40. ....	67
FIGURA 42 - MEDIÇÕES DA ALTURA DAS NUVENS REALIZADAS NO DIA 16 DE JANEIRO 2012 PELO SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO (PONTOS PRETOS) E PELO LIDAR (GRADIENTE DE CORES). ....	68
FIGURA 43 – MEDIÇÕES DA ALTURA DAS NUVENS REALIZADAS NO DIA 26 DE JANEIRO 2012 PELO SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO (PONTOS PRETOS) E PELO LIDAR (GRADIENTE DE CORES). ....	69
FIGURA 44 - INCERTEZA DA ALTURA DAS NUVENS EM FUNÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS PARA A DISTÂNCIA ENTRE CÂMARAS $D=28,9$ M. ....	70
FIGURA 45 - INCERTEZA DA ALTURA DAS NUVENS VERSUS ALTURA DAS NUVENS E DISTÂNCIA $D$ ENTRE CÂMARAS. ....	71
FIGURA 46 - VELOCIDADE DO VENTO À ALTURA DAS NUVENS MEDIDA PELO SISTEMA DURANTE A TARDE DO DIA 16 DE JANEIRO DE 2012. A TABELA ANEXADA APRESENTA OS VALORES DA VELOCIDADE DO VENTO RESULTANTE DE UM MODELO METEOROLÓGICO.....	72

FIGURA 47 - DIREÇÃO DO VENTO À ALTURA DAS NUVENS MEDIDA PELO SISTEMA DURANTE A TARDE DO DIA 16 DE JANEIRO DE 2012. A TABELA ANEXADA APRESENTA OS VALORES DA DIREÇÃO DO VENTO RESULTANTE DE UM MODELO METEOROLÓGICO. ....	73
FIGURA 48 - VELOCIDADE DO VENTO À ALTURA DAS NUVENS MEDIDA PELO SISTEMA DURANTE A TARDE DO DIA 26 DE JANEIRO DE 2012. A TABELA ANEXADA APRESENTA OS VALORES DA VELOCIDADE DO VENTO RESULTANTE DE UM MODELO METEOROLÓGICO.....	73
FIGURA 49 - DIREÇÃO DO VENTO À ALTURA DAS NUVENS MEDIDA PELO SISTEMA DURANTE A TARDE DO DIA 26 DE JANEIRO DE 2012. A TABELA ANEXADA APRESENTA OS VALORES DA DIREÇÃO DO VENTO RESULTANTE DE UM MODELO METEOROLÓGICO. ....	74
FIGURA 50 - INCERTEZA DA VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS E DA VELOCIDADE DO VENTO.....	75
FIGURA 51 - INCERTEZA DA DIREÇÃO DO VENTO EM FUNÇÃO DA ALTURA DAS NUVENS E DA VELOCIDADE DO VENTO. ....	75
FIGURA 52 - CAMPO DE VISÃO DA MÁQUINA FOTOGRÁFICA INSTALADA EM VIANA DO ALENTEJO, ONDE ESTÃO PRESENTES OS OBJETOS NATURAIS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA.....	78
FIGURA 53 - CAMPO DE VISÃO DA MÁQUINA FOTOGRÁFICA INSTALADA EM ÉVORA, ONDE ESTÃO PRESENTES OS OBJETOS NATURAIS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA. ....	78
FIGURA 54 - COEFICIENTE DE EXTINÇÃO MEDIDO PELO SISTEMA DURANTE O DIA 18 DE AGOSTO DE 2012. 79	
FIGURA 55 - VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDO PELO SISTEMA DURANTE O DIA 18 DE AGOSTO DE 2012. ....	80
FIGURA 56 - CAMPO DE VISÃO DA MÁQUINA FOTOGRÁFICA INSTALADA EM VIANA DO ALENTEJO, ONDE DEVIDO À TEMPESTADE DE AREIA NÃO É POSSÍVEL IDENTIFICAR TODOS OS OBJETOS NATURAIS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA.....	81
FIGURA 57 - COEFICIENTE DE EXTINÇÃO MEDIDO PELO SISTEMA DURANTE O DIA 20 DE AGOSTO DE 2012. 82	
FIGURA 58 - VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDO PELO SISTEMA DURANTE O DIA 20 DE AGOSTO DE 2012. ....	83
FIGURA 59 - CAMPO DE VISÃO DA MÁQUINA FOTOGRÁFICA INSTALADA EM ÉVORA, ONDE ESTÃO PRESENTES OS OBJETOS NATURAIS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA. ....	84
FIGURA 60 - COEFICIENTE DE EXTINÇÃO MEDIDO PELO SISTEMA DURANTE O DIA 31 DE AGOSTO DE 2013. 84	
FIGURA 61 - VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDO PELO SISTEMA DURANTE O DIA 31 DE AGOSTO DE 2013. ....	85
FIGURA 62 - EXPOENTE DE ÅNGSTRÖM MEDIDO PELO SISTEMA (PONTOS PRETOS) E PELO NEFELÓMETRO (CRUZES VERMELHAS) DURANTE O DIA 18 DE AGOSTO DE 2012.....	86

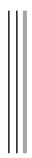
FIGURA 63 - EXPOENTE DE ANGSTRÖM MEDIDO PELO SISTEMA (PONTOS PRETOS) E PELO NEFELÓMETRO (CRUZES VERMELHAS) DURANTE O DIA 20 DE AGOSTO DE 2012.....	87
FIGURA 64 - COEFICIENTE DE EXTINÇÃO MEDIDO PELO SISTEMA DE VIANA DO ALENTEJO DURANTE OS DIAS 16 A 22 DE AGOSTO DE 2012. ....	88
FIGURA 65 - VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDO PELO SISTEMA DE VIANA DO ALENTEJO DURANTE OS DIAS 16 A 22 DE AGOSTO DE 2012. ....	89
FIGURA 66 - EXPOENTE DE ANGSTRÖM MEDIDO PELO SISTEMA DE VIANA DO ALENTEJO DURANTE OS DIAS 16 A 22 DE AGOSTO DE 2012. ....	89
FIGURA 67 - COEFICIENTE DE EXTINÇÃO MEDIDO PELO SISTEMA INSTALADO NA UNIVERSIDADE DE ÉVORA DURANTE OS DIAS 31 DE AGOSTO DE 2013 A 2 DE SETEMBRO DE 2013. ....	90
FIGURA 68 – VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDA PELO SISTEMA INSTALADO NA UNIVERSIDADE DE ÉVORA DURANTE OS DIAS 31 DE AGOSTO DE 2013 A 2 DE SETEMBRO DE 2013. ....	91
FIGURA 69 – INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDO PELO SISTEMA DE VIANA DO ALENTEJO DURANTE OS DIAS 16 A 22 DE AGOSTO DE 2012.....	92
FIGURA 70 – INCERTEZA DAS MEDIÇÕES DE VISIBILIDADE ATMOSFÉRICA MEDIDA PELO SISTEMA INSTALADO NA UNIVERSIDADE DE ÉVORA DURANTE OS DIAS 31 DE AGOSTO DE 2013 A 2 DE SETEMBRO DE 2013. ....	92



## Índice de Tabelas

TABELA 1 - VALORES MÉDIOS E DESVIOS PADRÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO CALCULADOS ATRAVÉS DE FOTOGRAFIAS NOTURNAS RECOLHIDAS NOS DIAS 16 A 30 DE JANEIRO DE 2012.....	50
TABELA 2 - DIMENSÕES DAS JANELAS USADAS NO PROCESSO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS. ....	66





## 1. Introdução

Nesta dissertação são apresentados dois sistemas que medem variáveis meteorológicas associadas às nuvens e à visibilidade atmosférica. O primeiro sistema realiza medições de variáveis associadas às nuvens. Estas influenciam o clima, a produção de energia [1], a meteorologia e os transportes entre outras. Assim o estudo destas variáveis assume um papel de extrema importância. Atualmente existem alguns serviços que medem e informam os seus utilizadores de variáveis relacionadas com as nuvens, como a percentagem de céu coberto, altura da base das nuvens, velocidade do vento e o tipo de nuvem, contudo estes serviços possuem uma resolução temporal e espacial muito limitada.

Para melhorar a precisão das previsões meteorológicas é necessário desenvolver novos modelos e aumentar a rede de aquisição de dados. Um dos parâmetros mais importantes medido pelas estações meteorológicas são a altura das nuvens [2], estas medições são habitualmente realizadas por ceilómetros [3][4], por radares [5] ou pelos LIDAR [6] sendo todos estes equipamentos extremamente dispendiosos. A aplicação numa rede de aquisição de dados dos equipamentos de medição disponíveis no mercado traduzir-se-ia em custos bastante elevados, deste modo identificou-se a necessidade de desenvolver um equipamento barato, autónomo, com fácil instalação e que possa ser integrado numa rede de aquisição de dados.

A medição da altura das nuvens assume maior importância nos transportes aéreos na ausência de instrumentos de assistência de operações. Nestas situações são utilizadas regras de voo visual e a altura das nuvens é um fator muito importante [7]. Assim o desenvolvimento de um sistema que realize medições da altura das nuvens autonomamente e com um custo reduzido é essencial para a segurança e operacionalidade de aeródromos locais.

Existem estudos [8], [9] que demonstram a viabilidade do uso da visão estéreo através de imagens digitais para a medição da altitude das nuvens, contudo estes estudos usam montagens sofisticadas e lentes de grande angular o que torna o sistema dispendioso. Os primeiros resultados de sistemas de baixo custo que medem a altitude das nuvens recorrendo a visão estéreo através de fotografias digitais são descritos em [10], contudo um estudo mais recente apresenta um sistema que recorre a esta metodologia mas mais robusto e evoluído [11].

Neste trabalho serão apresentados os processos e métodos utilizados por um sistema de medição da altura das nuvens com base em fotografias digitais, de baixo custo e calibrado automaticamente no local de operação. Os componentes de baixo custo que compõe o sistema

que mede da altura das nuvens são analisados neste trabalho assim como a forma como operam. São descritos os procedimentos que determinam a calibração do sistema e calculam a orientação do protótipo relativamente ao norte geográfico. Posteriormente serão apresentadas medições realizadas pelo sistema da altura das nuvens, da velocidade e da direção do vento.

De forma a verificar a validade dos dados obtidos pelo sistema em estudo, é feita uma comparação dos resultados de dois dias distintos com as medições realizadas por um LIDAR localizado nas mesmas instalações onde o sistema em estudo se encontra. As medições de velocidade e direção do vento obtidas são também comparadas com um modelo meteorológico. Será ainda realizada uma análise das incertezas das medições da altura das nuvens, da velocidade e direção do vento realizadas pelo sistema usando as indicações do guia para a expressão de incerteza [12].

A segunda parte desta dissertação foca-se na visibilidade atmosférica, que se trata de uma variável meteorológica e a sua monitorização é muito importante devido às implicações que tem no nosso quotidiano [13] e nos condicionamentos que podem ter nos transportes aéreos [7] e terrestres [14]. A análise da visibilidade atmosférica permite a avaliação dos níveis de poluição atmosférica nas cidades [15] e sua influência reflete-se diretamente em várias áreas do turismo, por exemplo em [16] Malm relata o impacto da visibilidade atmosférica nos Parques Nacionais Americanos, tratando-se de um estudo de grande relevo nesta área.

A quantidade de luz refletida e refratada pelas partículas suspensas na atmosfera é denominada por coeficiente de extinção das partículas [17]. Este coeficiente é diretamente responsável pelo comportamento da visibilidade atmosférica. Em 1925 Koschmieder definiu a relação entre a visibilidade atmosférica e o coeficiente de extinção [18] e definiu a visibilidade atmosférica em função do contraste entre um objeto preto e o horizonte. Atualmente o estudo desta variável meteorológica está associado também a modelos de previsão de tempestades de areia [19], medição da qualidade do ar [20] e até na criação de mapas ultravioletas [21].

A visibilidade atmosférica pode ser medida de várias formas. O método mais conhecido e primitivo consiste na observação do objeto negro mais distante, a distância desse objeto ao observador indica a visibilidade atmosférica. A visibilidade atmosférica é atualmente calculada recorrendo a transmissómetros através de métodos indiretos [22], ou de ceilómetros que medem a visibilidade atmosférica vertical [3]. Ambos os aparelhos acima citados apresentam elevados custos de aquisição tornando-os assim inacessíveis para uma grande parte das instituições, criando desta forma a necessidade de desenvolver um sistema capaz de medir corretamente a visibilidade atmosférica, cujo custo de aquisição e manutenção seja reduzido. A medição da visibilidade atmosférica através de fotografias digitais é apresentada em [23]. Uma outra

versão [24] com custo reduzido será apresentada e analisada nesta dissertação. Adicionalmente o método de avaliação da visibilidade atmosférica através de fotografias digitais permite o cálculo do Expoente de Angström como detalhado em [25]. Neste trabalho será apresentado um método inovador que recorrendo a imagens digitais permite calcular a visibilidade atmosférica mesmo quando esta assume valores muito baixos.

Foi desenvolvido um sistema com um custo reduzido que calcula a visibilidade atmosférica com base em fotografias digitais adquiridas automaticamente, através da medição do coeficiente de extinção das partículas presentes na atmosfera. Para o cálculo do coeficiente de extinção são usados os contrastes entre dois objetos com aproximadamente a mesma cor e o horizonte. Quando a visibilidade atmosférica assume valores muito baixos apenas o objeto mais próximo é usado combinado com uma constante característica dos objetos. O sistema desenvolvido estima ainda o Expoente de Angström para três comprimentos de onda distintos (RGB), dando assim indicação sobre o tipo e dimensões de aerossóis dominantes na atmosfera.

Foram construídos dois sistemas semelhantes, um colocado em Viana do Alentejo e um segundo em Évora no Colégio Luís António Verney. Nesta dissertação são apresentados resultados das medições realizadas pelos sistemas durante vários dias. Durante o período de funcionamento dos sistemas foram registados acontecimentos atmosféricos que reduzem acentuadamente a visibilidade atmosférica, como fogos florestais [26] e tempestades de areia [27]. Os efeitos desses eventos na visibilidade atmosférica serão também analisados e discutidos. Finalmente será realizada uma análise da incerteza das medições de visibilidade atmosférica realizadas com base nas indicações obtidas em [12].

## 1.1 Contribuições originais

No decorrer da investigação que resultou nesta dissertação foram produzidas algumas publicações originais: na literatura [11]; apresentadas em conferência [28]–[31]; e ainda na literatura em fase de revisões finais [32].

Em 2012, Busan (Korea do Sul) foi apresentado [28] um sistema de medição da altitude da base das nuvens. Este sistema era calibrado manualmente recorrendo às estrelas presentes em fotografias noturnas. O princípio de medição utilizado nesta publicação é usado no Capítulo 5.

Na conferência da ConfTele 2013 [29] foi apresentada uma publicação sobre o sistema que mede a altitude das nuvens. Nesta publicação foi apresentado o método que permite

determinar automaticamente a calibração do sistema recorrendo a estrelas presentes em fotografias noturnas (Capítulo 4. ).

Na conferência EGU 2014, realizada em Viena (Áustria) foi apresentado [31] um método inovador de medir a altitude das nuvens. Esta medição é realizada recorrendo apenas a uma máquina fotográfica e a redes neuronais previamente treinadas.

A apresentação [30] decorreu em São Francisco (EUA) em 2013. Nesta conferência foi introduzido um novo sistema capaz de medir a visibilidade atmosférica e a altitude das nuvens utilizando apenas duas câmaras. Este sistema encontra-se instalado no Aeródromo Municipal de Évora e as máquinas fotográficas que o compõe estão separadas por 200 m.

Em [11] foi apresentada a versão final do sistema que mede a altitude das nuvens instalado na Universidade de Évora. Nesta publicação na revista Measurement foram ainda apresentadas medições realizadas pelo sistema relativas à velocidade e direção do vento. Os resultados apresentados neste artigo estão presentes no Capítulo 5. desta dissertação.

A publicação [32] encontra-se submetida na revista Measurement, numa fase de revisões finais. Este artigo apresenta o sistema de medição da visibilidade atmosférica de Viana do Alentejo e as medições realizadas durante uma tempestade de areia. O conteúdo desta publicação está presente nesta dissertação no Capítulo 6.

## 2. Sistema de Medição

### 2.1 Metodologia

Neste capítulo é descrita a metodologia usada na medição da altura da base das nuvens, os princípios empregues na medição da direção e velocidade do vento à altura das nuvens, utilizando fotografias digitais. Serão ainda detalhados neste capítulo os métodos utilizados para o cálculo da visibilidade atmosférica recorrendo a elementos naturais presentes no campo de visão da máquina fotográfica.

Na segunda parte deste capítulo são abordados os componentes que constituem o sistema de medição, assim como seu funcionamento. Será ainda detalhada a rede de dados desenvolvida para o funcionamento do sistema e os testes realizados ao *hardware* que o compõe.

### 2.2 Estéreo Visão

A estéreo visão é o processo que visa a aquisição de informação sobre o espaço tridimensional através de duas imagens captadas em posições diferentes no mesmo instante. Esta técnica é utilizada pelos animais através da utilização dos 2 olhos para terem a noção da profundidade espacial. Para calcular distâncias através de imagens é necessário realizar operações trigonométricas. A técnica de usar triângulos para calcular distância é uma metodologia há muito usada pelo Homem, sendo o grego Thales de Mileto o primeiro a usá-la para medir a altura das pirâmides. Desde o século V AC até aos dias de hoje, as operações trigonométricas tem tido várias aplicações em distintas áreas e atualmente são uma importante ferramenta na topografia, navegação, astronomia entre outros.

O modelo apresentado neste trabalho [28] recorre à triangulação para medir a altura da base das nuvens. Para tal são apontadas verticalmente duas máquinas fotográficas digitais separadas uma da outra pela distância  $d$  como mostra a Figura 1. Através das coordenadas de uma determinada característica  $C$  presente em ambas as fotografias e centrada na fotografia da esquerda é possível determinar o ângulo  $\alpha$  e assim calcular a altura da base das nuvens através da seguinte equação:

$$h = \frac{d}{\tan(\alpha)} \quad (1)$$

sendo  $\alpha$  o ângulo horizontal descrito pela característica C registrada nas imagens e pode ser obtido através da seguinte equação

$$\alpha = -\alpha_{x_{pp}} \Delta x \quad (2)$$

onde  $\Delta x$  é a distância horizontal em píxeis entre a posição de C na fotografia esquerda e na fotografia direita. A constante  $\alpha_{x_{pp}}$  é o ângulo por pixel horizontal e trata-se de uma característica da máquina fotográfica que será abordado com maior cuidado na secção 3.4.1.

Devido ao comportamento altamente dinâmico das nuvens que estão em constante movimento e as suas características sofrem mutações, é importante assegurar o sincronismo na aquisição das imagens para o correto funcionamento do modelo.

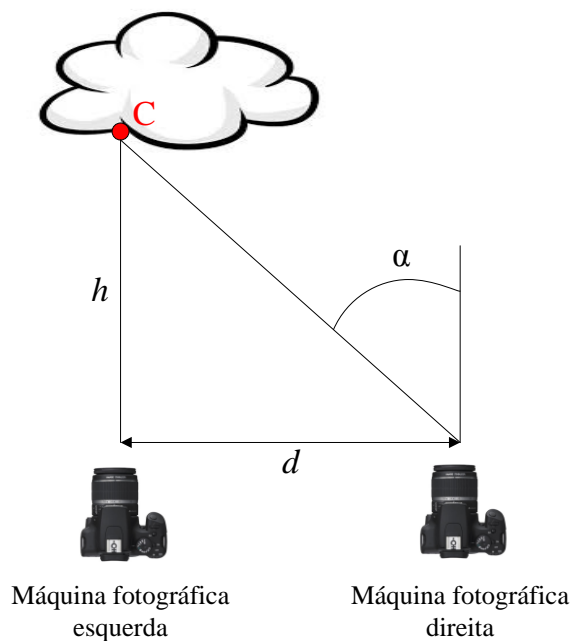


Figura 1 – Geometria do sistema usado na medição da altura da base das nuvens.



O deslocamento das nuvens é originado por um fluxo de gases, o vento presente no mesmo espaço que as nuvens é o responsável pelo deslocamento das mesmas. Através da medição do deslocamento de uma característica  $C$  de uma nuvem, registada em imagens sequenciais obtidas pela mesma máquina fotográfica com um espaçamento temporal  $\Delta t$ , é possível medir a velocidade e direção do vento à altura das nuvens. Na Figura 2 esta representada a metodologia que permite a medição dos parâmetros relacionadas com o vento. A velocidade é obtida através de

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (3)$$

sendo  $v_x$  e  $v_y$  as componentes horizontais e verticais do vento respetivamente. A componente horizontal da velocidade do vento é obtida através da seguinte equação

$$v_x = \left( \alpha_{x_{pp}} \Delta x_v \right) \frac{h}{\Delta t} \quad (4)$$

onde  $h$  é a altura das nuvens e  $\Delta x_v$  é o deslocamento horizontal em píxeis provocado na nuvem devido ao vento. Homologamente, a componente vertical do vento é calculada recorrendo à equação

$$v_y = \left( \alpha_{y_{pp}} \Delta y_v \right) \frac{h}{\Delta t} \quad (5)$$

onde  $\alpha_{y_{pp}}$  é o ângulo por pixel característico da câmara, detalhado na secção 2.4.1 e  $\Delta y_v$  é o deslocamento vertical provocado nas nuvens pelo vento.

Esta análise de fotografias sequenciais obtidas na mesma máquina fotográfica, permite ainda a determinação da direção do vento presente à altura das nuvens através da seguinte equação

$$dir_v = \text{atan} 2(v_y, v_x) - \alpha_3 \quad (6)$$

onde  $\alpha_3$  é a inclinação do sistema no plano terrestre, a representação deste ângulo e o seu cálculo são detalhados no Capítulo 4.

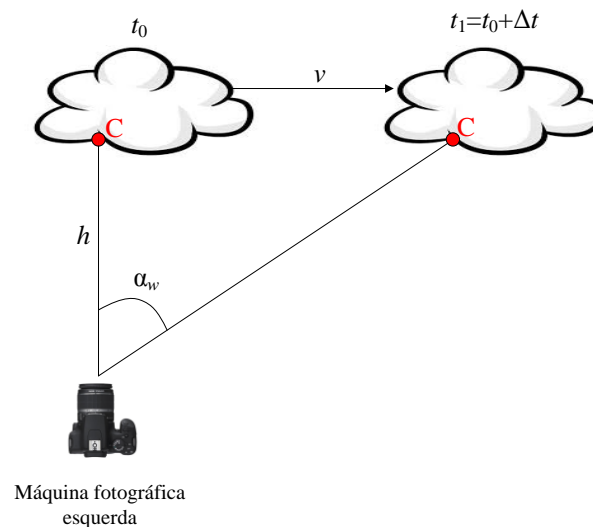


Figura 2 - Geometria do sistema usado na medição da velocidade e direção do vento.

### 2.3 Metodologia para a medição da visibilidade atmosférica

A visibilidade atmosférica é a percepção que o sistema visual humano tem da interação das partículas atmosféricas com a luz. Este sistema é essencialmente composto pelos olhos que adquirem a luz visível, os nervos óticos que conduzem a informação adquirida e o cérebro que com base na informação recebida cria uma representação do ambiente envolvente [33]. O olho humano deteta o espectro visível com comprimentos de onda convencionados entre os 400 nm (violeta) e os 700 nm (vermelho), sendo assim capaz de reconhecer aproximadamente 10 milhões de cores num campo de visão de aproximadamente 180° [33].

Uma das técnicas mais antigas para a averiguação da visibilidade atmosférica passa pela identificação da maior distância a que consegue ser observado um objeto negro na direção do horizonte por um observador [34]. Devido ao sistema visual de cada indivíduo ser único, diferentes percepções de visibilidade são registadas entre indivíduos nas mesmas condições

atmosféricas. Como tal tornou-se necessária a criação de instrumentos independentes do utilizador para a medição da visibilidade tais como o transmissómetro ou o ceilómetro [16].

Neste trabalho é apresentado um modelo de medição da visibilidade atmosférica [30] que usa fotografias digitais da paisagem e os objetos naturais incluídos na mesma. Esta metodologia assenta na medição de contrastes entre os objetos naturais e o fundo da fotografia, sendo o contraste de um objeto à distancia  $x$  obtido através de

$$C(x) = \frac{I_F - I(x)}{I_F} \quad (7)$$

onde  $I_F$  é a intensidade do fundo e  $I(x)$  a intensidade do objeto localizado a  $x$  km.

A lei de Beer-Lambert [22] relaciona a quantidade de luz absorvida por um objeto com o material que o constitui. Tal relação é dada por

$$C(x) = C_0 \exp(-b_{ext}x) \quad (8)$$

sendo  $C_0$  a constante do material constituinte do objeto. À quantidade de luz que é absorvida e desviada pelas moléculas da atmosfera dá-se o nome coeficiente de extinção e é representado por  $b_{ext}$ .

A visibilidade atmosférica é calculada através da maior distância a que um objeto negro pode ser avistado na direção do horizonte. Contudo verificou-se que na paisagem fotografada pelo sistema não existem objetos totalmente negros. Esta ausência poderia ser resolvida pela colocação de um painel negro no campo de visão da máquina fotográfica ou através de uma combinação de objetos naturais presentes na paisagem. As dimensões de um painel negro capaz de ser utilizado com elevada precisão nas medições da visibilidade atmosférica seriam muito grandes, de tal forma que levantaria problemas ao nível da estrutura do painel, de custos e a nível ecológico. O contraste de dois objetos naturais presentes na paisagem localizados a diferentes distâncias é obtido através de

$$\begin{aligned} C_1 &= C(x_1) = C_0 \exp(-b_{ext} x_1) \\ C_2 &= C(x_2) = C_0 \exp(-b_{ext} x_2) \end{aligned} \quad (9)$$

se os objetos possuírem  $C_0$  iguais a relação entre os contrastes pode ser escrita como

$$\frac{C_2}{C_1} = \exp[-b_{ext} (x_2 - x_1)] \quad (10)$$

onde  $C_2$  é o contraste do objeto à distância  $x_2$  da maquina e  $C_1$  é o contraste do objeto à distância  $x_1$ . Esta formulação apenas é valida para objetos com a mesma constante  $C_0$ . Os objetos escolhidos foram árvores do mesmo tipo com distâncias distintas à câmara como representado na Figura 3. Com esta configuração o coeficiente de extinção é obtido através de

$$b_{ext} = \frac{\log(C_1) - \log(C_2)}{(x_2 - x_1)} . \quad (11)$$

Uma vez calculado o  $b_{ext}$  pode ser determinada a constante característica do objeto  $C_0$  pela seguinte equação

$$C_0 = \frac{C_1}{\exp(-b_{ext} x_1)} . \quad (12)$$

Através do coeficiente de extinção, obtido na equação (11), pode-se calcular a visibilidade atmosférica  $vis_{atm}$  com base na formulação de Middleton [34]

$$vis_{atm} = \frac{3}{b_{ext}} . \quad (13)$$

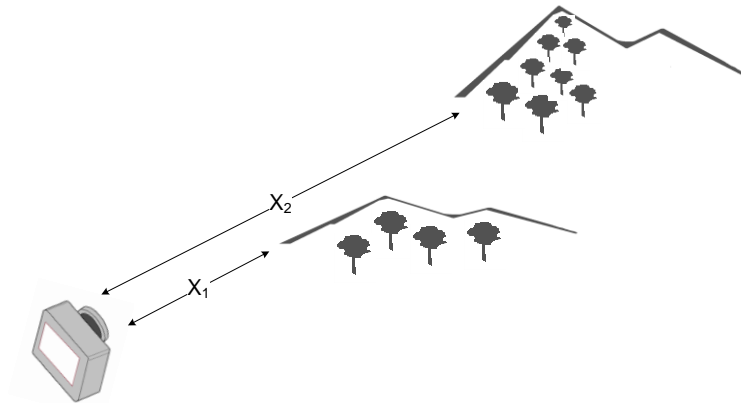


Figura 3 - Princípio de medição da visibilidade atmosférica.

O cálculo da visibilidade atmosférica usando a metodologia anteriormente descrita apenas é aplicável quando os valores de visibilidade atmosférica são superiores a  $x_2$ . Quando a visibilidade atmosférica é inferior, o conjunto de árvores mais distantes não é observável e assim o uso da equação (7) no cálculo do contraste dessas árvores não pode ser utilizado. As situações que produzem baixa visibilidade tais como a chuva, o nevoeiro, as tempestades de areia ou os incêndios florestais representam um período crítico para a visibilidade atmosférica não podendo ser o seu cálculo negligenciado. Durante estes períodos onde apenas o conjunto de árvores mais próximas é visível, como representado na Figura 4, o coeficiente de extinção pode ser obtido através de

$$b_{ext} = \frac{\log(C_0) - \log(C_1)}{x_1} \quad (14)$$

sendo a constante  $C_0$  obtida através da equação (12).

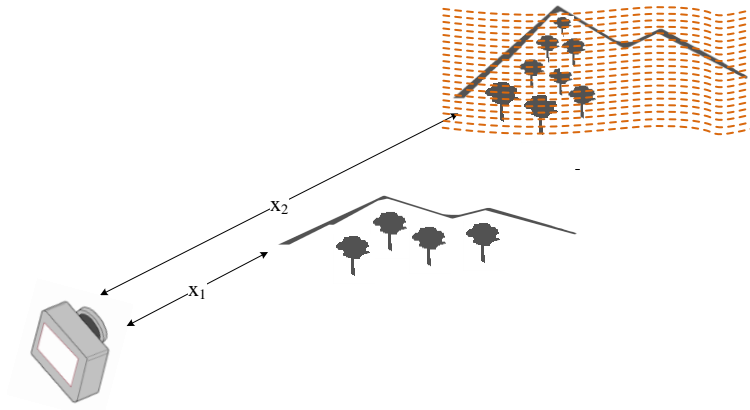


Figura 4 - Princípio de medição para situações de baixa visibilidade atmosférica.

Assim quando o contraste do conjunto de árvores mais distantes  $C_2$  é superior a 5% , o coeficiente de extinção é calculado através da equação (11), caso contrário para situações de baixa visibilidade (i.e.  $C_2 < 5\%$  ) o coeficiente de extinção deve ser calculado recorrendo à equação (14). Um contraste inferior a 5% significa que a intensidade do objeto é muito semelhante ao fundo, o processo de medição do contraste do objeto é mais simples e eficaz do que um processamento de imagem capaz de reconhecer a presença das árvores, sendo assim o método utilizado para escolher a equação mais apropriada para a medição do  $C_0$ . Assim o coeficiente de extinção é calculado através de

$$b_{ext} = \begin{cases} -\frac{\log\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{(x_2 - x_1)}, & C_2 > 5\% \\ -\frac{\log\left(\frac{C_1}{C_0}\right)}{x_1}, & C_2 \leq 5\% \end{cases} \quad (15)$$

A relação entre o comprimento de onda e o coeficiente de extinção pode ser obtida em [35] e pode ser aproximada pela seguinte equação

$$\frac{b_{ext}(\lambda_1)}{b_{ext}(\lambda_2)} = \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-\alpha_e} \quad (16)$$

onde  $\alpha_e$  é o Expoente de Angström,  $\lambda_1, \lambda_2$  são os comprimentos de onda de cada canal de medição e  $b_{ext}(\lambda_i)$  é o coeficiente de extinção do canal com comprimento de onda  $\lambda_i$ .

O Expoente de Angström é um indicador do tamanho das partículas na atmosfera e o seu valor aumenta para partículas cada vez menores. Assim o estudo do Expoente de Angström assume especial importância na caracterização de aerossóis e é frequentemente medido [36]. Para cada combinação de comprimentos de ondas, o Expoente de Angstrom é obtido através da seguinte equação

$$\alpha_e = - \frac{\ln \left( \frac{b_{ext}(\lambda_1)}{b_{ext}(\lambda_2)} \right)}{\ln \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)}. \quad (17)$$

## 2.4 Características do sistema

O sistema que realiza a medição da altura das nuvens, da velocidade e direção do vento está instalado no telhado do edifício da fase III, no Colégio Luís António Verney na Universidade de Évora. O protótipo aí instalado é composto por duas máquinas fotográficas digitais monobjectiva *Reflex* (DSLR), dois computadores portáteis de ASUS EeePC X101H, três Arduíno UNO e um computador central responsável pelo controlo do sistema e processamento dos dados. O esquema representado na Figura 1 foi instalado com uma distância entre máquinas fotográficas  $d = 28.9$  m. Na Figura 5 pode-se observar essa distância assim como as caixas concebidas para proteger os componentes.



*Figura 5 - Local de instalação do protótipo de medição da altura das nuvens.*

O computador responsável pelo processamento das imagens encontra-se numa posição central e fornece energia através de uma porta USB ao Arduino UNO que é responsável pelo disparo simultâneo das câmaras. Cada computador portátil encontra-se ligado a um Arduino UNO que desliga a energia das máquinas fotográficas através de um relé em caso de bloqueio das mesmas.

A câmara responsável pela aquisição de imagens que permite a medição da visibilidade atmosférica também foi instalada no telhado do edifício da fase III, no Colégio Luís António Verney na Universidade de Évora perto do computador central. Na Figura 6 é possível observar a sua instalação. Em adição aos procedimentos relacionados com a medição da altura das nuvens, o computador central é também responsável pelo controlo da máquina fotográfica do sistema de visibilidade e pelo processamento das fotos adquiridas pelo mesmo.





Figura 6 - Local de instalação do protótipo de medição da visibilidade.

Foi ainda colocado um computador portátil com uma máquina fotográfica DSLR, Canon Rebel XS EF-S 18-55mm, em Viana do Alentejo que se encontra a aproximadamente 30 km de Évora. A sua instalação permite medir a visibilidade atmosférica naquela zona aumentando assim o número de dados adquiridos, levando a uma melhor compreensão do funcionamento do sistema de medição.

#### 2.4.1 Máquinas fotográficas

##### 2.4.1.1 Canon EOS 1000D

A máquina fotográfica Canon EOS 1000D é do tipo DSLR, está equipada com uma objetiva EF-S 18-55mm e tem uma resolução de  $L \times W = 3888 \times 2592$  pixéis. Esta câmara é dotada de um sensor CMOS com  $22.2 \times 14.8$  mm [37] e opera com uma distância focal de 18mm, permitindo assim um campo de visão alargado. Nesta configuração a máquina fotográfica possui um ângulo de visão horizontal de  $\alpha_x = 64.5^\circ$  e um ângulo de visão vertical de  $\alpha_y = 45.5^\circ$ , sendo que o ângulo horizontal por pixel é de  $\alpha_{x_{pp}} = \alpha_x / 3888 = 0.0166^\circ/\text{pixel}$  e o ângulo vertical por pixel é de  $\alpha_{y_{pp}} = \alpha_y / 2592 = 0.0176^\circ/\text{pixel}$ . À data da realização desta dissertação o preço comercial desta máquina fotográfica, ilustrada na Figura 7, são 400€.





*Figura 7 - Máquina fotográfica Canon EOS 1000D com objetiva EF-S 18-55mm.*

#### 2.4.1.2 Olympus SP-500Uz

A máquina fotográfica Olympus SP-500Uz [38] é do tipo compacta digital e tem uma objetiva que permite um zoom ótico até 10x. Este modelo, ilustrado na Figura 8, possui uma resolução de 2048 x 1536 pixels e é utilizada com a distância focal máxima 63 mm para se obter a resolução máxima dos objetos que servirão para o cálculo da visibilidade atmosférica. O sensor é do tipo dispositivo de carga acoplada CCD. Para o tipo de medições realizadas nas fotografias adquiridas por esta câmara as dimensões do sensor e os ângulos de visão não são relevantes.



*Figura 8 - Máquina fotográfica Olympus SP-500Uz.*

#### 2.4.1.3 Canon EOS Rebel

A Canon EOS Rebel, representada na Figura 9, é a máquina fotográfica instalada em Viana do Alentejo responsável pela aquisição de imagens que possibilitam o cálculo da visibilidade atmosférica através do processo ilustrado na Figura 3. Este modelo possui as mesmas características [39] que as câmaras utilizadas para a medição da altitude das nuvens Canon EOS 1000D, optando o produtor por esta nomenclatura nos Estados Unidos da América. Opera na sua resolução máxima 3888 x 2592 pixéis e com a distância focal máxima de 55 mm para uma máxima definição dos objetos usados na medição da visibilidade atmosférica.



*Figura 9 - Máquina fotográfica Canon Rebel XS com objetiva EF-S 18-55mm.*

#### 2.4.2 Circuito de disparo

O sincronismo na aquisição das imagens, que são utilizadas na medição da altura das nuvens, é um fator chave devido ao constante movimento e alteração de forma das nuvens. Para assegurar esta simultaneidade no disparo das máquinas fotográficas foi desenvolvido um sistema de disparo representado na Figura 10. É composto por um computador central, um Arduino UNO, um circuito de disparo e duas máquinas fotográficas Canon 1000D.

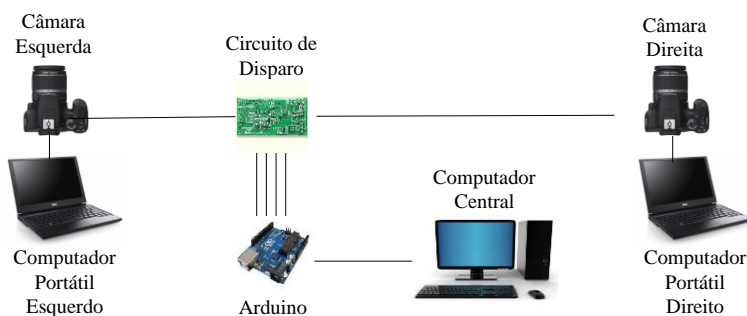


Figura 10 - Sistema de disparo.

As câmaras fotográficas estão equipadas com um dispositivo que permite ativar a focagem ou disparo remotamente. Estes processos são realizados através de um curto-circuito dos pinos associados a cada operação. Na Figura 11 está representado o circuito que em combinação com um Arduino UNO, permite a focagem ou disparo das câmaras. Para uma focagem de ambas as máquinas fotográficas a Saída 2 do Arduino deve ser colocada a 5 V. Para um disparo simultâneo em ambas as câmaras a Saída 1 deve ser 5 V. A mudança de estado de 0 V para 5 V é obtida através de uma função degrau durante 100 ms gerada pelo Arduino UNO.

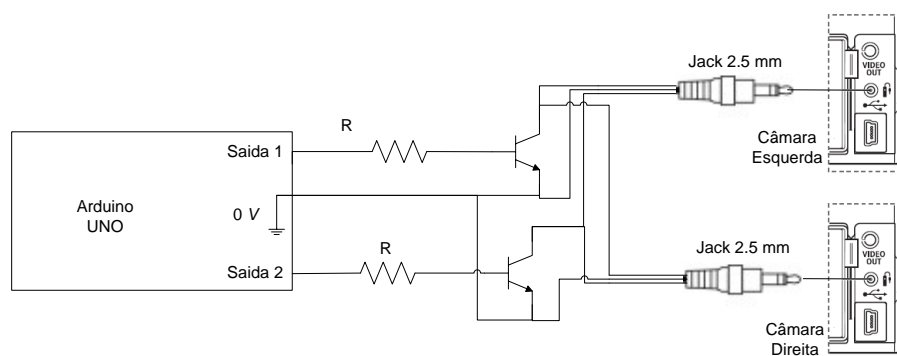


Figura 11 – Esquemático do circuito de disparo.

A Figura 12 é uma fotografia do circuito de disparo construído com base no esquema apresentado na Figura 11, que permite a focagem e disparo simultâneos das máquinas fotográficas.

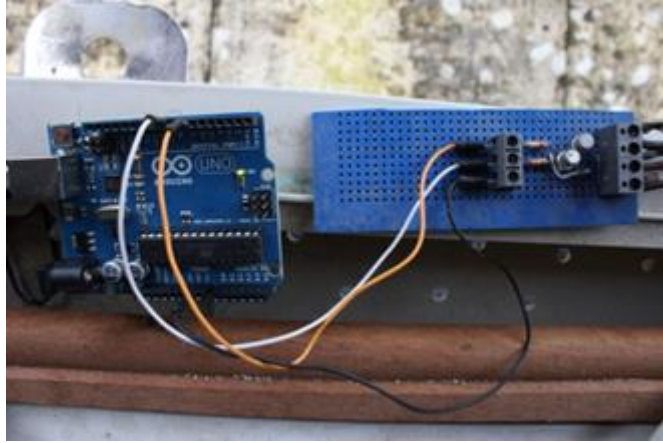


Figura 12 - Circuito de disparo.

#### 2.4.3 Diferenças no tempo de disparo

Para avaliar a simultaneidade do disparo do sistema apresentado na Figura 10, realizou-se uma montagem que permite medir as diferenças nos tempos de disparo (ilustrada na Figura 13). Foi criado um relógio digital com precisão do milésimo de segundo em LabVIEW. Este é apresentado num ecrã para o qual apontam as duas máquinas fotográficas. As câmaras são disparadas várias vezes simultaneamente e as imagens obtidas guardadas. Posteriormente é realizada uma comparação entre os valores do relógio registado na fotografia direita e na fotografia esquerda. Após esta análise verificou-se que a maior diferença entre disparos foi inferior a 1 ms.

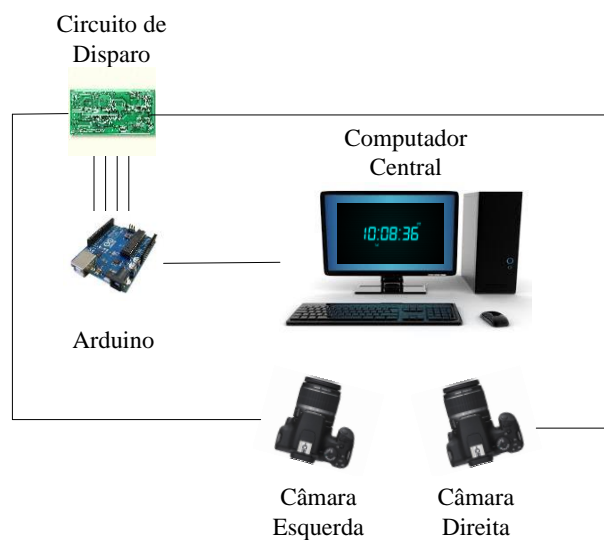


Figura 13 - Montagem que permite medir a diferença de tempos de disparo.

#### 2.4.4 Formato de fotografias

Para que a localização de objetos nas imagens obtidas não seja um processo ambíguo ou com diferentes interpretações é necessário definir um sistema de eixos universal que permita uma fácil e correta localização. O sistema de eixos padrão das fotografias está representado na Figura 14. É centrado no canto superior esquerdo e o eixo do  $xx$  aponta para a esquerda enquanto que o eixo dos  $yy$  aponta para baixo. No seguimento deste trabalho, todas as localizações serão realizadas segundo este sistema de eixos.

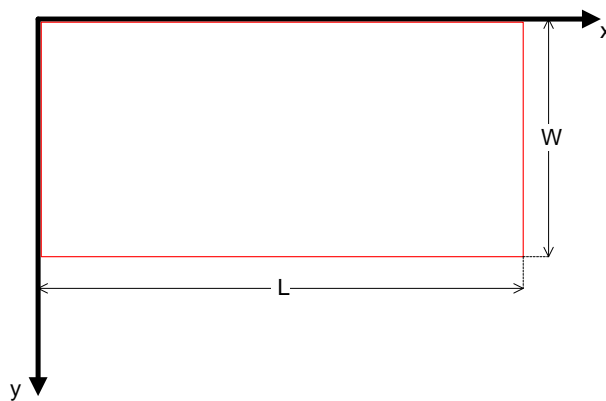


Figura 14 - Sistema de eixos e dimensões convencionadas.

As fotografias são adquiridas num sistema aditivo de cores, composto pelo Vermelho, Verde e Azul, este sistema de cores é abreviado por RGB e a sua aplicação é bastante vasta nos dispositivos de imagem eletrónicos. As medições relacionadas com a perceção do olho humano, como a visibilidade atmosférica, devem ser realizadas apenas num canal para assegurar a máxima semelhança entre processos. De forma a manter as características de uma fotografia RGB num só canal é gerada uma nova fotografia em escala de cinzento [40] através da seguinte equação

$$Y = 0.299I_R + 0.587I_G + 0.114I_B \quad (18)$$

onde  $I_R$ ,  $I_G$  e  $I_B$  são os valores de intensidade de cada cor respetivamente vermelho, verde e azul.

As fotografias obtidas pelas máquinas fotográficas são submetidas a um processo de compressão. O tamanho original das imagens é elevado e na ausência de um método de compressão os tempos de processamento das imagens seriam maiores. O método de compressão utilizado é JPEG com 8 bits de resolução em cada cor, permitindo assim um equilíbrio entre a resolução da imagem e tempos de processamento, sendo assim possível medições em tempo real. A compressão resulta em cores com intensidades entre 0 e 255 e as fotografias com tamanhos médios de 3 MB.

#### 2.4.5 Sensores e Atuadores

Durante longos períodos de funcionamento ou quando o tempo de aquisição entre fotografias é reduzido podem surgir bloqueios nas máquinas fotográficas. Estes bloqueios podem ser resolvidos facilmente através de um *reset* na fonte de tensão da respetiva câmara. O *reset* na alimentação pode ser feito manualmente mas este procedimento pode gerar desalinhamentos nas máquinas fotográficas. Assim desenvolveu-se um processo que permite o desbloqueio das câmaras remotamente e sem modificar a sua orientação. A Figura 15 ilustra o sistema que desbloqueia as câmaras, recorrendo a um relé, um Arduino UNO e um computador portátil.

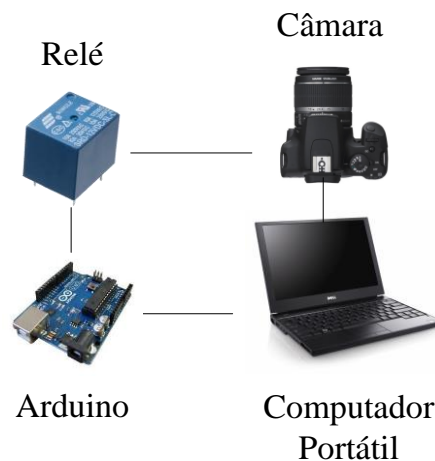


Figura 15 - Sistema remoto para desbloqueio das máquinas fotográficas.

Quando a máquina fotográfica bloqueia, o Arduino UNO comanda o relé provocando uma ausência de alimentação momentaneamente. Posteriormente a tensão na máquina fotográfica é reposta ficando a mesma desbloqueada.

#### 2.4.6 Rede de dados

Como referido anteriormente todo o processamento de imagens é realizado pelo computador central. Assim, foi montada uma rede de dados, ilustrada na Figura 16, que permite o armazenamento das fotografias adquiridas pelas câmaras num *NAS* (Network Storage Server). Os computadores que constituem o sistema e o *NAS* encontram-se conectados a um *Switch* através de ligações Ethernet. Desta forma ambos os computadores podem escrever e ler dados na unidade de armazenamento. A ligação à internet com que o sistema foi habilitado permite uma monitorização do sistema, visualização das medidas realizadas e atualização de algoritmos caso seja necessário.

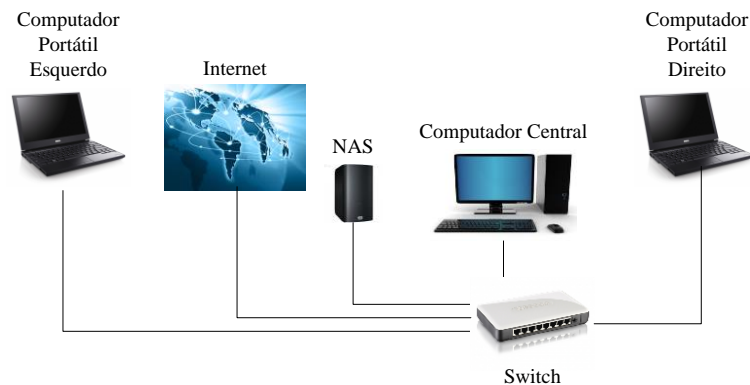


Figura 16 - Rede de dados desenvolvida para o sistema de medição.

#### 2.4.7 Caixas de proteção

De forma a alojar e proteger os componentes ilustrados na Figura 15 foram desenvolvidas caixas protetoras, como a que está representada na Figura 17. As caixas proporcionam proteção de poeiras e da humidade atmosférica. Permitem ainda o isolamento do sistema de aranhas e outros insetos que poderiam limitar o campo de visão das máquinas. Adicionalmente estas caixas reduzem a variação de temperaturas a que o sistema seria exposto, prolongando assim o tempo de vida dos componentes.





*Figura 17 - Caixa protetora dos componentes do sistema de medição.*





### 3. Software

Nesta secção são detalhados os programas utilizados ao longo deste trabalho. Estes programas podem ser divididos em três grupos de acordo com as funções que desempenham: programas de aquisição; programas de controlo; e programas de processamento. Nos sistemas de medição que são apresentados neste trabalho os programas de aquisição são responsáveis pela aquisição das fotografias das máquinas fotográficas e pelo reencaminhamento das mesmas até à pasta destino. São deste género de programa o DSLR Remote Pro e o Cam2Com. Os programas de controlo são responsáveis pela gestão dos Arduinos Uno utilizados, fazendo atuar relés ou circuitos de disparo. Desempenham este papel a plataforma Arduino e o Labview. Como *software* de processamento só foi utilizado o Matlab e a sua função é realizar cálculos e tratar as fotografias adquiridas.

#### 3.1 DSLR Remote Pro

Este *software* permite controlar até 16 máquinas fotográficas Canon ao mesmo tempo. No sistema que mede a altura das nuvens, cada computador portátil associado a uma câmara tem este software instalado. Uma vez disparadas as câmaras pelo circuito representado na Figura 10 este programa é responsável pela aquisição das imagens e pelo reencaminhamento das mesmas pela rede até ao NAS. Nos menus disponíveis são escolhidas as definições de funcionamento para cada situação (dia e noite), assim como a pasta destino das fotografias adquiridas. A empresa que o desenvolve [41] permite testes gratuitos ao *software* mas também pode ser adquirido online por aproximadamente 100€. Um exemplo da interface gráfica deste *software* encontra-se na Figura 18.

#### 3.2 Cam2Com

Este *software* é utilizado para controlar e adquirir fotografias da câmara Olympus SP-500Uz, o programa é idêntico ao DSLR Remote Pro mas destinado a máquinas fotográficas da marca Olympus. No sistema que mede a visibilidade atmosférica não existe um circuito que dispare a câmara, sendo essa função realizada pelo *software* que posteriormente é responsável também pelo reencaminhamento das fotografias adquiridas pela rede até ao NAS. Devido às características da máquina fotográfica Olympus, o *software* permite ainda o controlo de zoom remotamente. O fabricante disponibiliza no seu site [42] uma versão gratuita. Um exemplo da interface gráfica deste *software* encontra-se na Figura 19.

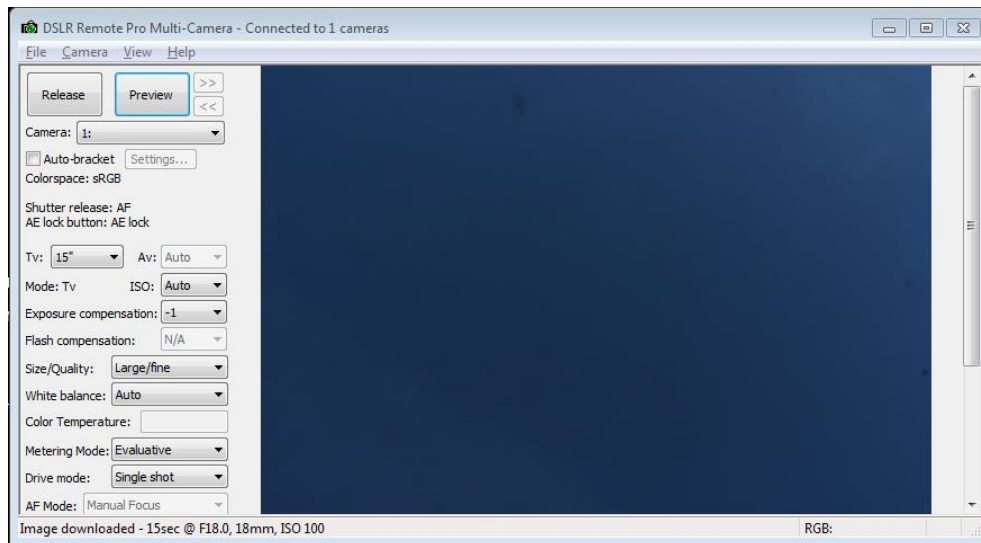


Figura 18 - Software DSLR Remote Pro em funcionamento.

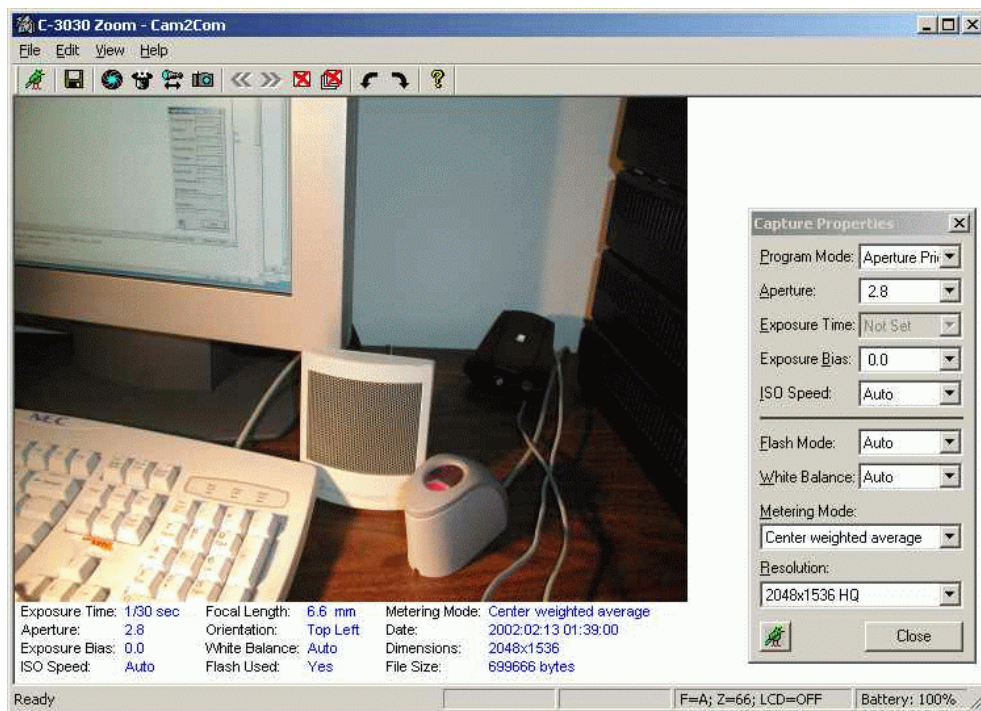
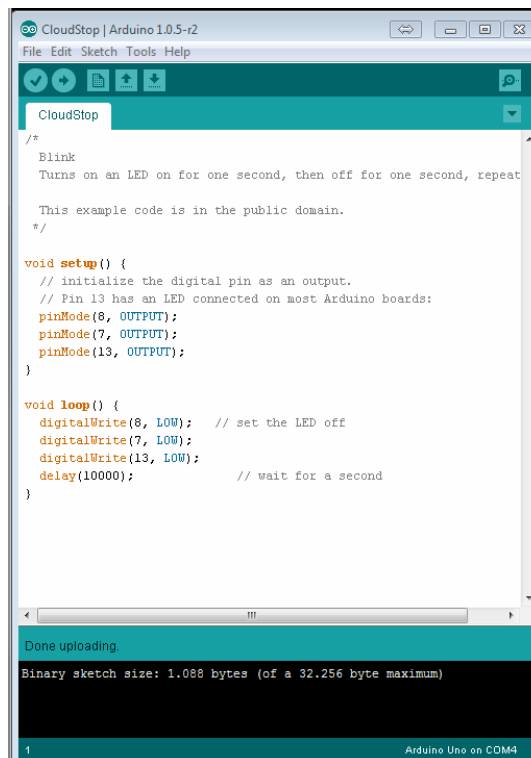


Figura 19 - Software Cam2com em funcionamento.

### 3.3 Plataforma Arduino

O Arduino Uno que controla o circuito de disparo representado na Figura 10 pode ser programado recorrendo a várias plataformas. Um dos *softwares* utilizados para gerir este controlador foi o *software* Arduino. Este programa está disponível na página [43], podendo ser descarregado gratuitamente juntamente com vários exemplos úteis.



```
CloudStop | Arduino 1.0.5-r2
File Edit Sketch Tools Help

CloudStop

/*
 * Blink
 * Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeat
 *
 * This example code is in the public domain.
 */

void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  // Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards:
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(8, LOW); // set the LED off
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(10000); // wait for a second
}

Done uploading.
Binary sketch size: 1.088 bytes (of a 32.256 byte maximum)

1 Arduino Uno on COM4
```

Figura 20 - Exemplo simples de um algoritmo no programa Arduino.

### 3.4 LabVIEW

O LabVIEW [44] é um programa com variadas aplicações e utilizado no desenvolvimento de sistemas de medição e controlo. Neste trabalho foi utilizado para gerar um relógio digital de alta precisão que permite avaliar o sincronismo do disparo das câmaras representado na Figura 13. Foi ainda utilizado para controlar o Arduino UNO devido à sua maior robustez e possibilidade de leitura de pastas em rede, algo que o *software* Arduino UNO não permite. Foi utilizada uma versão estudante que produz executáveis que operam sem a necessidade de instalação do programa. Na Figura 21 está representado um executável produzido em LabVIEW que é responsável pelo controlo do circuito de disparo através do Arduino.

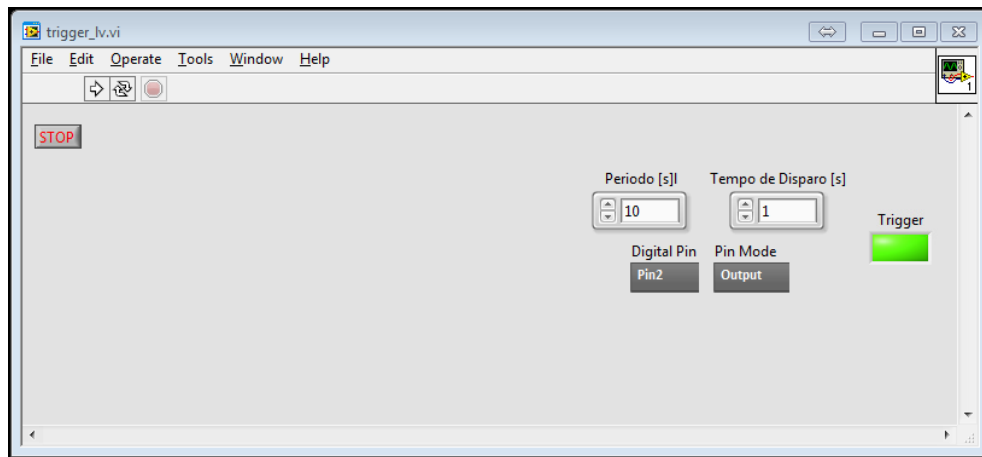


Figura 21 – Programa de disparo em Labview.

### 3.5 MATLAB

O processamento de todos os dados apresentados neste trabalho foi realizado em Matlab. Trata-se de uma linguagem de alto nível usada para a análise de dados, desenvolvimento de aplicações e a criação de modelos [45]. Para além das funções incluídas no pacote base do Matlab foram usadas as *toolbox* de *Image Processing* [46] e *Statistics* [47] no processamento de dados. O custo de cada *toolbox* para fins académicos são 200€ e o programa Matlab para aplicações académicas custa 500€. A Figura 22 ilustra o ambiente de trabalho do *software*.

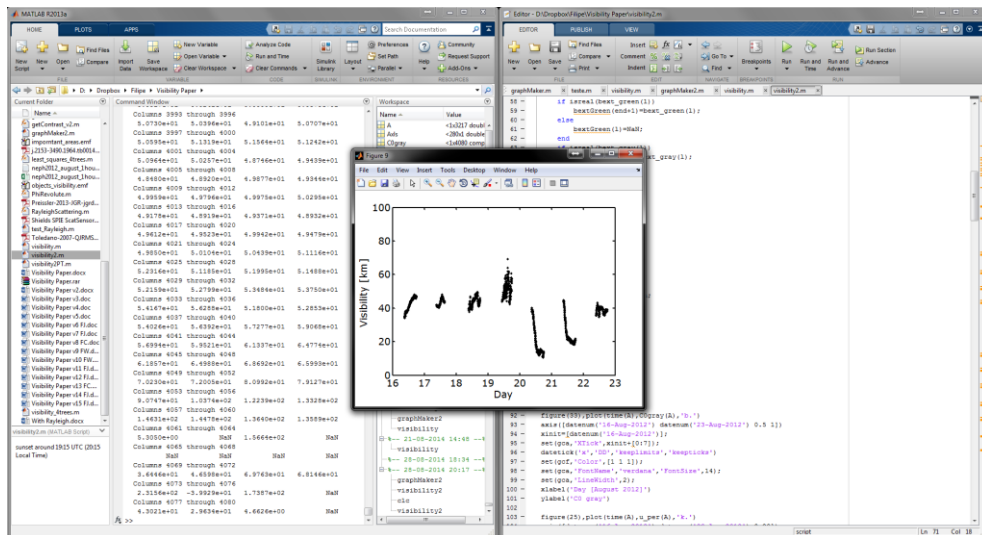


Figura 22 - Processamento de dados em Matlab.

## 4. Calibração do sistema

A estereofotogrametria é um dos métodos utilizados na medição da altitude da base das nuvens. Para um correto funcionamento deste princípio é necessário conhecer a orientação e posição exata de cada máquina fotográfica. O sistema possui duas câmaras que distam uma da outra 28.9 m, devido à distância que separa as máquinas fotográficas é difícil montar o conjunto num laboratório onde se possa determinar as orientações de cada máquina fotográfica e posteriormente proceder à instalação final do sistema, mantendo desta forma as configurações obtidas em laboratório. De forma a ultrapassar esta limitação, foi necessário desenvolver um procedimento de calibração que possa ser executado com as câmaras montadas no local de funcionamento e que determine com precisão a orientação das mesmas. Na Figura 23 estão representadas as possíveis orientações e posições que cada máquina fotográfica pode assumir. Cada câmara possui 3 graus de liberdade de rotação e existem adicionalmente 3 graus de liberdade de translação entre os referenciais de cada máquina fotográfica.

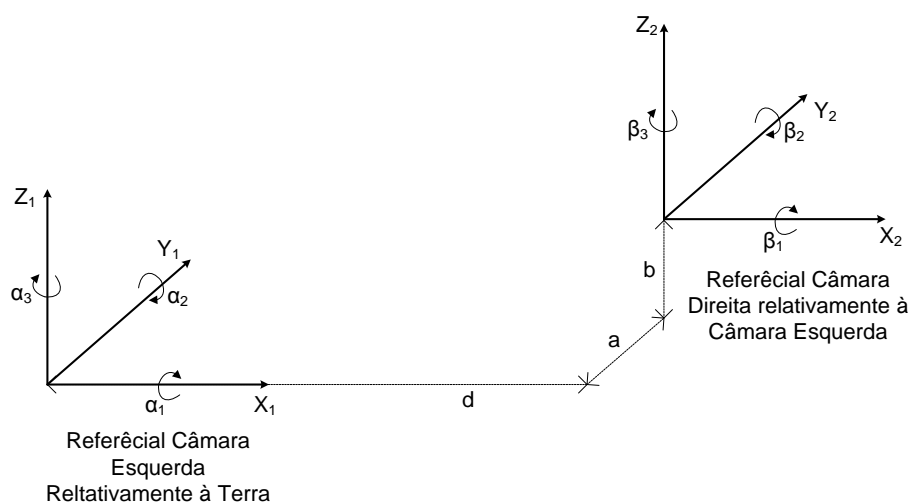


Figura 23 - Posições e orientações dos referenciais de cada máquina fotográfica.

Os graus de liberdade de translação ilustrados na Figura 1 são mensuráveis com boa precisão,  $d = 28.9\text{ m}$ ,  $a \approx 0\text{ m}$  e  $b \approx 0\text{ m}$ , relativamente aos graus de liberdade de rotação apenas dois são determináveis antes do processo de calibração,  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 0^\circ$ . Para a determinação de todas as variáveis associadas ao sistema, desenvolveu-se um processo de calibração capaz de determinar as rotações  $\alpha_3$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  que é descrito posteriormente.

#### 4.1 Efeitos dos desalinhamentos nas medições

A análise dos desalinhamentos do sistema e a forma como influenciam as fotografias obtidas será detalhado nesta secção. Este estudo é essencial para a correção dos desalinhamentos. Existe um desalinhamento que é gerado pela orientação do sistema relativamente ao referencial Terra,  $\alpha_3$  é a rotação entre estes referenciais e apenas se assume importância no cálculo da direção do vento como ilustrado na Figura 24.

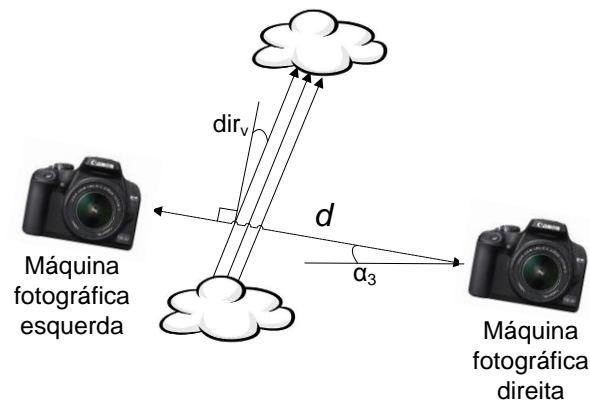


Figura 24 – Vista de cima do sistema com representação do desalinhamento  $\alpha_3$  na medição da direção do vento.

Os restantes desalinhamentos são originados pelas diferentes orientações de cada máquina fotográfica, a rotação  $\beta_1$  representada na Figura 25 provoca uma translação dos elementos presentes nas fotografias segundo o eixo do y. Este desalinhamento será representado por  $t_y$  e pode ser obtido recorrendo à equação

$$t_y = \frac{\beta_1}{\alpha_{y_{pp}}} . \quad (19)$$





Figura 25 - Desalinhamento causado pela rotação  $\beta_1$ .

A rotação  $\beta_2$  de uma câmara relativamente à outra está ilustrada na Figura 26. Esta reflete-se numa rotação  $\theta$  entre ambas as fotografias, sendo que

$$\theta = \beta_2 . \quad (20)$$

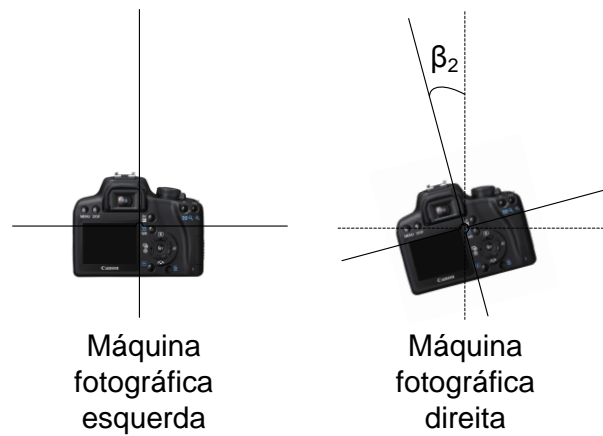


Figura 26 - Desalinhamento causado pela rotação  $\beta_2$ .

O desalinhamento provocado pelo ângulo  $\beta_3$  está representado na Figura 27 e traduz-se numa translação no eixo do x entre ambas as fotografias. Este deslocamento é designado por  $t_x$  e pode ser calculado através de

$$t_x = \frac{\beta_3}{\alpha_{y_{pp}}} . \quad (21)$$

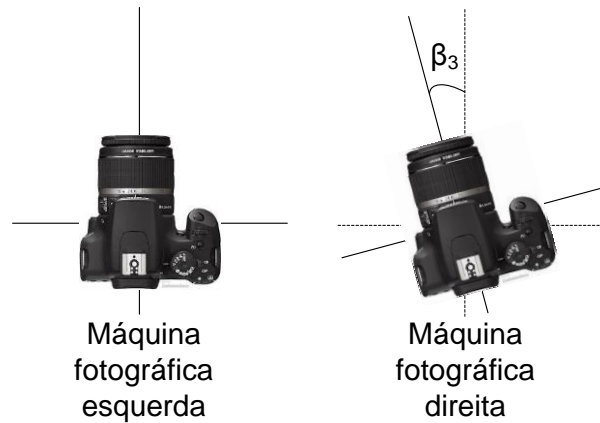


Figura 27 - Desalinhamento causado pela rotação  $\beta_3$ .

As rotações  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  tem influência direta na medição da altitude da nuvens e influência indireta na medição da velocidade do vento. Como será demonstrado posteriormente esta depende da altura das nuvens.

## 4.2 Calibração do sistema recorrendo às estrelas

Os desalinhamentos ilustrados nas três figuras apresentadas anteriormente podem ser determinados através da combinação de pontos de referência com posições espaciais conhecidas. Nas imagens obtidas em noites de céu limpo e com um tempo de exposição superiores a 10 segundos é possível identificar vários conjuntos de estrelas, devido à distância que as separa do sistema podem ser utilizadas como pontos de referência para o processo de calibração.

A estrela mais próxima do sistema solar é a *Proxima Centauri* situada a  $4.01 \times 10^{13}$  km do nosso planeta. Devido à grande distância que separa as estrelas do nosso sistema o erro de paralaxe nas fotografias noturnas é praticamente nulo. Este erro é originado por desvios nos ângulos de visão ou erros na graduação da escala, aumentando consideravelmente com a proximidade do objeto observado. Para os objetos muito afastados do observador o erro de paralaxe é aproximadamente zero e assim as diferenças entre as posições das estrelas nas

fotografias noturnas são resultado apenas dos desalinhamentos do sistema. Recorrendo às posições das estrelas, foi criada uma transformação que permite a supressão dos desalinhamentos do sistema através de translações nos eixos x e y e da rotação do sistema de eixos da fotografia. A combinação de transformações do tipo afim permite operações de mudança de escala, translação (x e y), espelhamento e rotação, assim este tipo de transformação corrige os desalinhamentos identificados no sistema. A transformação afim utilizada é aplicada através da matriz.

$$T = \begin{bmatrix} s \cos(\theta) & -s \sin(\theta) & 0 \\ s \sin(\theta) & s \cos(\theta) & 0 \\ t_x & t_y & s \end{bmatrix}. \quad (22)$$

onde  $t_x$  é o parâmetro responsável pela correção do desalinhamento ilustrado na Figura 27,  $t_y$  corrige o desalinhamento apresentado na Figura 25, a variável  $\theta$  é a rotação identificada na Figura 26 e o parâmetro  $s$  corrige possíveis diferenças na focagem utilizada em cada máquina fotográfica.

Na Figura 28 estão representadas as fotografias noturnas com tempos de exposição de 10 s obtidas pelo sistema na noite de 16 de Janeiro de 2012 pelas 20:56. É identificável pela posição das estrelas a translação em x e y e uma pequena rotação no sentido anti-horário.

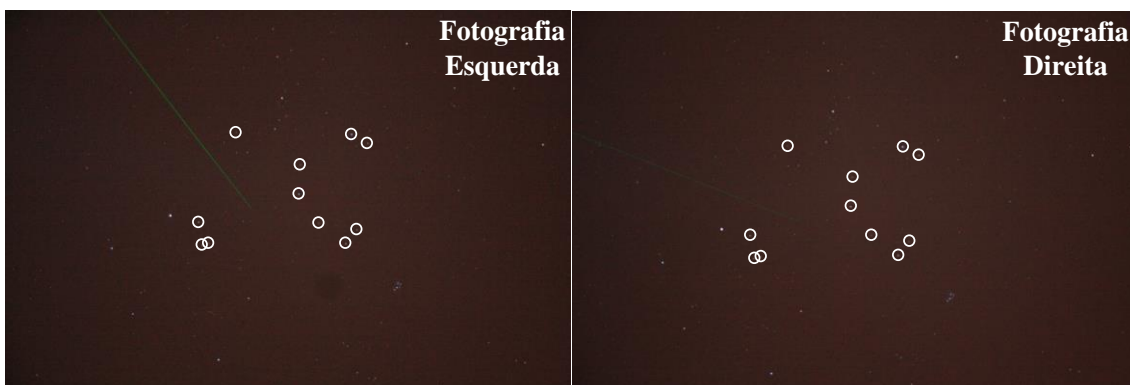


Figura 28 - Fotografias noturnas adquiridas por ambas as câmaras e seleção automática das estrelas como pontos de controlo.

Os onze pares de estrelas identificados na Figura 28 foram obtidos através de um algoritmo de processamento automático de fotografias noturnas que identifica a estrela mais brilhante na fotografia da esquerda e a correspondente na fotografia da direita. O procedimento efetuado pelo algoritmo que obtém os pares de controlo através de fotografias noturnas está representado no fluxograma da Figura 30, sendo assim obtidos os parâmetros  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $\theta$  e  $s$ . Com base nas estrelas identificadas na Figura 28 foram determinados os seguintes parâmetros  $t_x = -120.05$  *pixéis*,  $t_y = 100.92$  *pixéis*,  $\theta = -0.5352^\circ$  e  $s = 0.9850$  resultando na matriz

$$T = \begin{bmatrix} 0.9984 & -0.0093 & 0 \\ 0.0093 & 0.9984 & 0 \\ -120.05 & 100.92 & 0.9850 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

A Figura 29 é o resultado da transformação produzida pela matriz T aplicada à fotografia esquerda representada na Figura 28. É possível identificar uma translação negativa no eixo dos x, uma translação positiva segundo o eixo dos y e uma pequena rotação no sentido anti-horário.

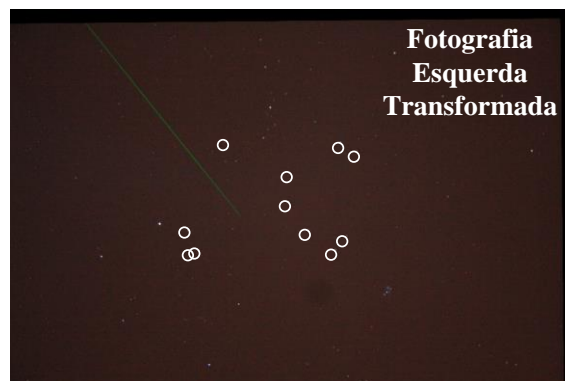


Figura 29 - Fotografia esquerda transformada pela matriz T.

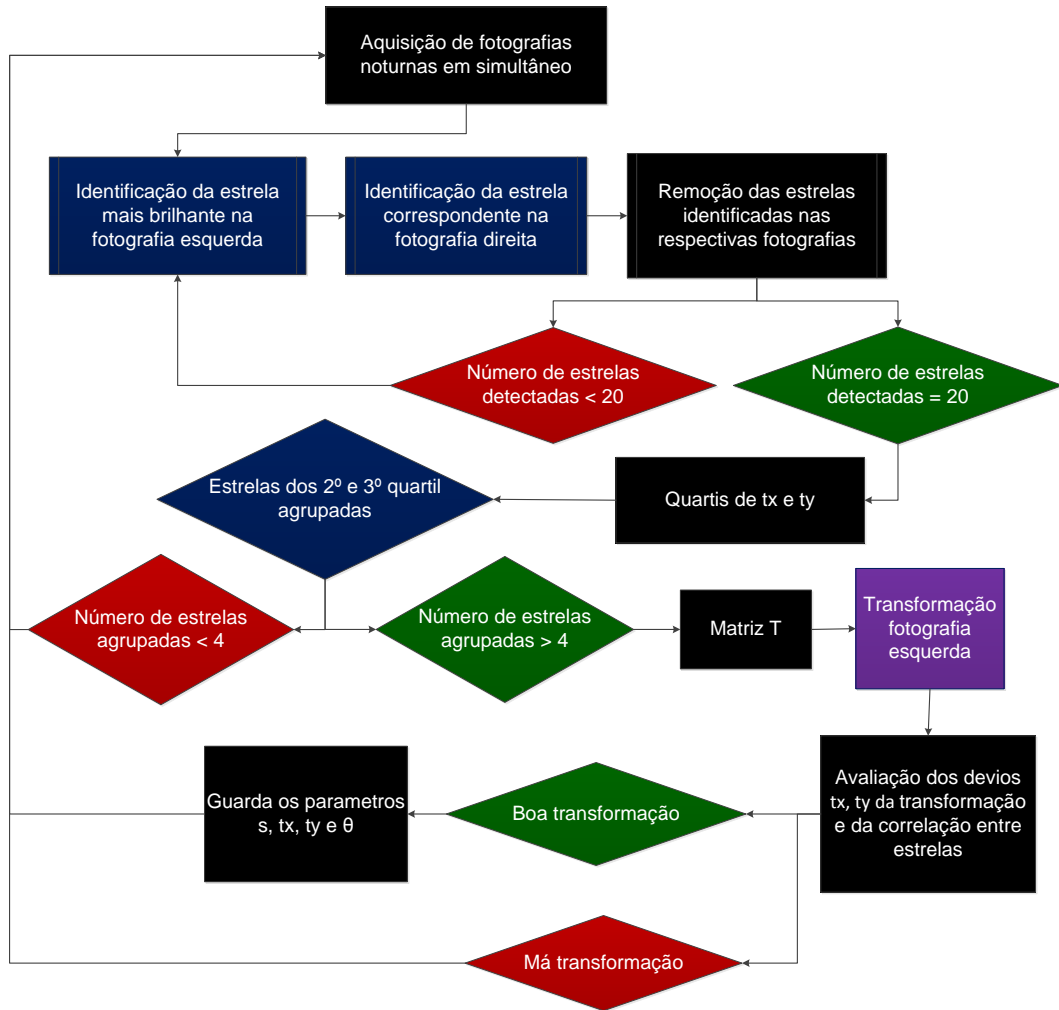


Figura 30 - Fluxograma do algoritmo que encontra pares de controlo através de estrelas presentes em fotografias noturnas.

### 4.3 Distribuição de matrizes

De forma a obter uma matriz  $T$  independente das posições das estrelas, da combinação de estrelas escolhidas e de forma a aumentar a precisão, o processo ilustrado na Figura 30 foi aplicado a todas as fotografias noturnas obtidas entre 16 a 30 de Janeiro de 2012. O processamento das fotografias recolhidas nessas noites teve como resultado os valores médios e desvios padrão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios e desvios padrão dos parâmetros de calibração calculados através de fotografias noturnas recolhidas nos dias 16 a 30 de Janeiro de 2012.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
$t_x$ [pixel]	-119.95	1.07
$t_y$ [pixel]	101.66	0.93
$\theta$ [°]	-0.5547	0.0172
$s$	0.9982	0.0005

Com base nos valores apresentados na Tabela 1 e na equação (22), foi obtida a matriz

$$T = \begin{bmatrix} 0.9982 & -0.0097 & 0 \\ 0.0097 & 0.9982 & 0 \\ -119.95 & 101.66 & 0.9982 \end{bmatrix} \quad (24)$$

que corrige os desalinhamentos.

#### 4.4 Erros no Registo Fotográfico

Durante o tempo de vida de um sensor CMOS é comum a perda de pixéis que devido ao mau funcionamento dos mesmos. Um pixel que entra neste estado de funcionamento vai permanecer apagado criando um pixel morto. As câmaras utilizadas neste projeto captam imagens através de sensores CMOS. Durante a montagem e ao longo do seu funcionamento vão obtendo pixéis mortos, que vão resultar num ponto branco, onde a intensidade é máxima e com o aspeto característico representado na Figura 31.



*Figura 31 - Efeito criado por um pixel morto na fotografia noturna.*

Devido a processos de homogeneização de cor que são realizados pela máquina fotográfica e à forma como o sensor CMOS é construído, o aparecimento de um pixel morto muda a intensidade na posição onde este se manifesta e os nos pixéis adjacentes criando o aspeto ilustrado na Figura 31.

Adicionalmente existem outros dois tipos de erros no registo fotográfico que devem ser tratados cuidadosamente, manchas azuis e manchas vermelhas são resultado de reflexos internos nas lentes ou no sensor. À semelhança do pixel morto estas manchas provocam um erro no registo em mais que um pixel e encontram-se respetivamente ilustrados na Figura 32.



*Figura 32 - Erros no registo fotográfico, manchas vermelhas e manchas azuis respetivamente.*

Os erros no registo fotográfico apresentados anteriormente são desprezáveis nas fotografias das nuvens ou da paisagem uma vez que o número de pixéis afetados é muito



pequeno relativamente às dimensões da fotografia. Contudo quando se trata de identificação automática das estrelas, estes constituem um possível foco de erro. A posição dos erros no registo fotográfico apresentados anteriormente não varia ao longo do tempo, assim foi desenvolvido um algoritmo que permite a identificação da posição destes erros e o seu fluxograma está representado na Figura 33. As coordenadas obtidas por este algoritmo vão ser utilizadas para remover os erros presentes nas fotografias antes de realizar o processamento ilustrado na Figura 30. Adicionalmente este algoritmo deve ser executado ciclicamente para detetar o aparecimento de novos erros.

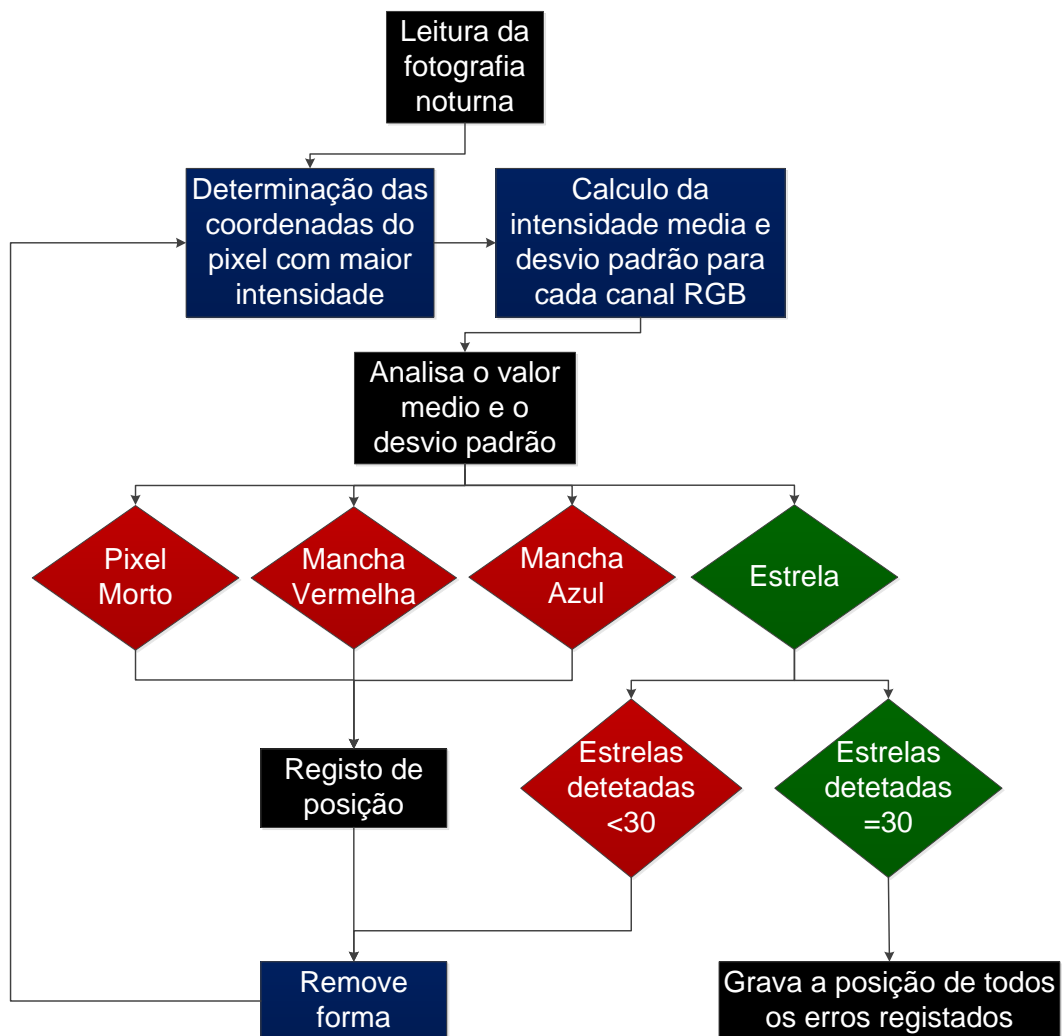


Figura 33 - Fluxograma do algoritmo que calcula a posição dos erros de registo que poderiam afetar a calibração.

#### 4.5 Distorção Radial

A utilização de objetivas ampliadoras ou de grandes angulares pode gerar distorções nas fotografias adquiridas. Na maior parte das objetivas utilizadas a distorção aumenta com o *zoom*



utilizado ou com o incremento do ângulo de visão. Na Figura 34 estão representados dois tipos de distorção que podem ser provocados pelas lentes das objetivas nas fotografias.



Figura 34 - Distorções Radiais produzidas nas fotografias pelas lentes das objetivas

As objetivas utilizadas no sistema que mede a altitude das nuvens apresentam distorções do tipo barril para distâncias focais de 18 mm e distorções do tipo afunilamento para distâncias focais de 55 mm [48]. A transição de distorção do tipo barril para o tipo afunilamento com o aumento da distância focal revela que existe uma distância focal onde a distorção é mínima. As distorções radiais provocadas pelas objetivas depende diretamente das lentes da objetiva e da sua excentricidade em relação ao centro do sensor, provocando assim distorções únicas para cada conjunto máquina e objetiva. Para as objetivas utilizadas neste projeto alguns estudos realizados [48], [49] revelam que as distâncias focais ideais para a minimização das distorções se situam no intervalo [28–35] mm. Contudo esta gama de distâncias focais revela-se contraproducente para o sistema, uma vez que o número de estrelas detetadas durante a noite é inferior e a superfície de nuvem observada é reduzida. Devido às limitações encontradas, decidiu-se utilizar a distância focal de 18 mm e reduzir-se a área de fotografia em 600 pixels segundo a direção do eixo dos x e em 400 pixels segundo cada direção do eixo dos y. Esta redução da área utilizada de cada fotografia está ilustrada na Figura 35 e permite um bom compromisso entre a distorção (uma vez que no centro é praticamente nula), o número de estrelas detetadas e a área de nuvem observada.



Figura 35 - Zona utilizada da fotografia para a redução da distorção radial.

#### 4.6 Direção do Norte Geográfico

No início deste capítulo foram deduzidos 4 desalinhamentos que influenciam as medições que o sistema realiza, os desalinhamentos  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são determinados pelo processo de calibração automático descrito anteriormente. Falta assim determinar o desalinhamento  $\alpha_3$ . Sendo  $\alpha_3$  uma rotação do sistema sobre o plano terrestre é útil definir um sistema de eixos no plano. Na Figura 36 está representado o referencial das fotografias ( $x$  e  $y$ ), a distância  $d$  entre câmaras e o desalinhamento  $\alpha_3$  medido relativamente ao norte geográfico  $N$ .

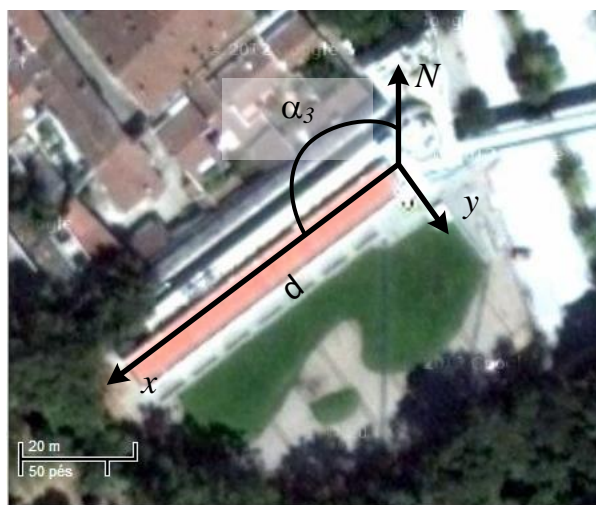
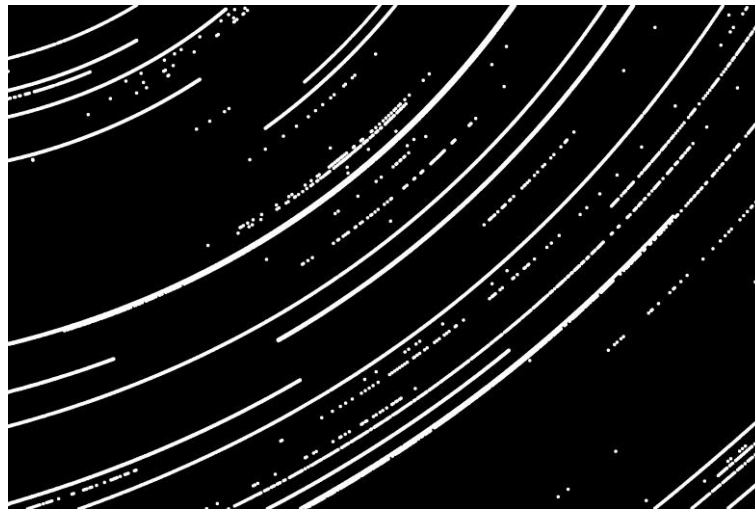


Figura 36 - Sistema de eixos para a determinação do parâmetro  $\alpha_3$ .

Utilizando imagens satélite e programas associados às mesmas é possível determinar a rotação do sistema relativamente ao norte geográfico. Recorrendo ao Google Earth [50] determinou-se que  $\alpha_3 = 128^\circ$

De forma a dotar o sistema com uma maior autonomia e uma vez que a medição de ângulos através de imagens satélite tem uma precisão reduzida, a rotação  $\alpha_3$  foi medida recorrendo à trajetória das estrelas. O norte geográfico é o centro da trajetória circular realizada pelas estrelas em torno da estrela Polar. Como tal configurou-se o sistema para que a posição das estrelas fosse registada sequencialmente. Durante 18 noites foram recolhidas fotografias a cada 30 s e com um tempo de exposição de 10 s. Em cada fotografia obtida foram aplicados processos de erosão e dilatação de forma a eliminar todos os elementos presentes exceto as estrelas. Utilizando as fotografias de uma noite e recorrendo ao processamento anteriormente descrito obteve-se a Figura 37 onde é possível identificar a trajetória circular das estrelas centrada no norte geográfico.



*Figura 37 - Trajetória das estrelas ao longo de uma noite.*

Na Figura 38 está ilustrado a metodologia que determina a posição do norte geográfico  $(x_c, y_c)$ , a partir das trajetórias ilustradas na Figura 37 .

Assim, a rotação do sistema no plano terrestre é dada por

$$\alpha_3 = 90^\circ + \operatorname{atan} 2\left(\frac{L}{2} - x_c, \frac{W}{2} - y_c\right). \quad (25)$$

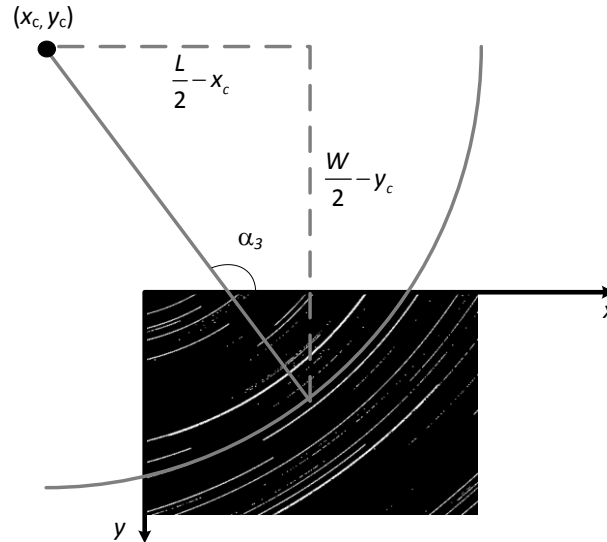


Figura 38 - Determinação da rotação  $\alpha_3$  através da Figura 37.

Com base nas fotografias recolhidas ao longo das 18 noites e aplicando a metodologia ilustrada na Figura 38 obteve-se  $\bar{\alpha}_3 = 125.68^\circ$  com um  $\sigma(\alpha_3) = 3.85^\circ$ . O desvio padrão relativamente alto pode ser explicado pela interferência da distorção radial uma vez que foi utilizada toda área da fotografia.

#### 4.7 Teoria das incertezas aplicada à medição da altura das nuvens

Nesta secção são estudadas as incertezas associadas aos resultados da altura da base das nuvens, a velocidade e a direção do vento. A determinação da incerteza das medições foi deduzida com base nos passos descritos em [12] a partir das incertezas das grandezas de entrada, que podem ser do Tipo A ou Tipo B. As incertezas do Tipo A são obtidas por métodos estatísticos, enquanto que as do Tipo B são obtidas por outros métodos.. Ao longo da secção são analisadas as incertezas na mesma ordem que surge durante o processamento dos dados. Inicialmente será determinada a incerteza da calibração, seguida da análise da incerteza na medição da altura das nuvens e finalmente serão obtidas as equações referentes à incerteza da velocidade e direção do vento.

#### 4.7.1 Incerteza do processo de calibração

O processo de calibração utiliza as estrelas para a obtenção da matriz (22), esta transformação será aplicada a cada pixel da fotografia esquerda corrigindo os desalinhamentos do sistema. A aplicação da matriz  $T$  a cada pixel da fotografia é realizada através da equação

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \cos(\theta) & -s \sin(\theta) & 0 \\ s \sin(\theta) & s \cos(\theta) & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

onde  $(x, y)$  são as coordenadas iniciais e  $(x', y')$  são as coordenadas do ponto após a transformação. O processo de calibração é realizado para corrigir a medição da altura das nuvens, sendo esta obtida pela equação (1) em que a variável  $\alpha$  é obtida através da equação (2). A variável  $\Delta x$  é a distância em pixéis, entre fotografias, que a mesma nuvem tem segundo o eixo dos  $x$ , e a variável  $\alpha_{x_{pp}}$  é o ângulo por pixel horizontal, deduzido na secção 2.4.1. Uma vez que a medição da altura das nuvens é realizada com base nas posições nos eixos do  $x$ , é importante estudar o impacto da calibração nessas medições sendo obtido por

$$\Delta x_{cal} = (x' - x) = x s \cos(\theta) + y s \sin(\theta) + t_x - x \quad (27)$$

A incerteza associada ao cálculo do  $\Delta x_{cal}$  é deduzida através da Lei da propagação das incertezas documentada em [12], aplicada à equação (27) e obtida através da seguinte equação

$$u^2(\Delta x_{cal}) = \left( \frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial x} \right)^2 u^2(x) + \left( \frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial y} \right)^2 u^2(y) + \left( \frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial s} \right)^2 u^2(s) + \left( \frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial \theta} \right)^2 u^2(\theta) + \left( \frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial t_x} \right)^2 u^2(t_x) \quad (28)$$

As medições nos eixos  $x$  e  $y$  possuem uma distribuição uniforme (Tipo B) com uma incerteza máxima de 0.5 píxeis, sendo a incerteza desta medição  $u(x) = u(y) = 0.5/\sqrt{3}$ . As incertezas relacionadas com a escala  $u(s)$ , com a rotação  $u(\theta)$  e com a translação  $u(t_x)$  da transformação são do tipo A e foram determinadas experimentalmente. Os valores de desvio padrão apresentados na Tabela 1 são as incertezas experimentais relacionadas com a escala, rotação e translação sendo respetivamente  $u(s) = 5.38 \times 10^{-4}$ ,  $u(\theta) = 0.0172^\circ$  e  $u(t_x) = 1.07$  píxeis. As derivadas parciais em (28) são obtidas através das seguintes equações

$$\frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial x} = s \cos(\theta) - 1 \quad (29)$$

$$\frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial y} = s \sin(\theta) \quad (30)$$

$$\frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial \theta} = s [y \cos(\theta) - x \sin(\theta)] \quad (31)$$

$$\frac{\partial \Delta x_{cal}}{\partial s} = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) . \quad (32)$$

Com base nos valores obtidos na Tabela 1 e aplicando a equação (28) ao centro da fotografia obteve-se uma incerteza do processo de calibração no eixo  $x$  de  $u(\Delta x_{cal}) = 1.55$  píxeis.

#### 4.7.2 Incerteza na medição da altura da base das nuvens

A altura da base das nuvens é obtida através da equação (1). Com base nos procedimentos enunciados em [12] deduziu-se a equação da incerteza da altura das nuvens, que é dada por

$$u^2(h) = \frac{d^2}{\sin^4(\alpha)} u^2(d) + \frac{1}{\tan^2(\alpha)} u^2(\alpha) \quad (33)$$

sendo  $d = 28.9$  m. Esta distância foi medida recorrendo a uma fita métrica com 3 m que tem um erro máximo de 0.5 mm. A fita métrica foi usada 10 vezes para medir a totalidade do comprimento  $d$ . Assumindo que esta medição possui uma distribuição uniforme, a incerteza associada a esta medida é  $u(d) = \sqrt{10} \frac{5 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}}$  m.

O ângulo  $\alpha$  é obtido recorrendo à equação (2) e a sua incerteza é dada por

$$u^2(\alpha) = \alpha_{x_{pp}}^2 u^2(\Delta x) + (\Delta x)^2 u^2(\alpha_{x_{pp}}) \quad (34)$$

sendo  $\Delta x$  a distância em píxeis da característica C segundo  $x$  entre fotografias e pode ser decomposto em

$$\Delta x = \Delta x_{corr} + \Delta x_{cal} \quad (35)$$

onde  $\Delta x_{cal}$  é a translação resultante do processo de calibração e  $\Delta x_{corr}$  é a componente resultante do processo de correlação, que será descrito no Capítulo 5. A incerteza da equação (35) é calculada através de

$$u^2(\Delta x) = u^2(\Delta x_{corr}) + u^2(\Delta x_{cal}) \quad (36)$$

sendo a componente  $u(\Delta x_{cal})$  obtida através da equação (28). Assumindo que a incerteza do processo de correlação tem uma distribuição uniforme com valor máximo de 0.5 píxeis então a incerteza deste processo é  $u(\Delta x_{corr}) = 0.5/\sqrt{3}$  píxeis. Na equação (34) existe uma variável que é a incerteza do ângulo por pixel horizontal  $u(\alpha_{x_{pp}})$  da máquina fotográfica, essa incerteza pode ser obtida através de

$$u^2(\alpha_{x_{pp}}) = \frac{1}{L^2} u^2(\alpha_x) . \quad (37)$$

A incerteza do ângulo horizontal da câmara é obtida através das especificações fornecidas pelo construtor da máquina fotográfica em [37] que define um erro máximo de 0.05 °. Considerando que esta medição tem uma distribuição uniforme a incerteza associada é  $u(\alpha_x) = 0.05^\circ/\sqrt{3}$  .

#### 4.7.3 Incerteza na medição da velocidade e direção do vento

A metodologia que permite a medição da velocidade do vento utilizando uma máquina fotográfica, encontra-se ilustrada na Figura 2 e é realizada recorrendo à equação (3). Este processo tem uma incerteza associada que pode ser calculada recorrendo a

$$u^2(v) = \left(\frac{v_x}{v}\right)^2 u^2(v_x) + \left(\frac{v_y}{v}\right)^2 u^2(v_y) \quad (38)$$

onde  $\Delta t$  é o tempo entre a aquisição das fotografias. Os parâmetros  $\Delta x_v$  e  $\Delta y_v$  são resultado de um processo de correlação entre as duas imagens descrito com maior detalhe no capítulo 5. Recorrendo à equação (4) e às indicações em [12] a incerteza da componente horizontal da velocidade do vento é dada por

$$u^2(v_x) = \left(\frac{\alpha_{x_{pp}} h}{\Delta t}\right)^2 u^2(\Delta x_v) + \left(\frac{\Delta x_v h}{\Delta t}\right)^2 u^2(\alpha_{x_{pp}}) + \left(\frac{\Delta x_v \alpha_{x_{pp}}}{\Delta t}\right)^2 u^2(h) + \left(\frac{\Delta x_v \alpha_{x_{pp}} h}{(\Delta t)^2}\right)^2 u^2(\Delta t) . \quad (39)$$

Devido ao facto de  $\Delta x_v$  resultar de um processo de correlação, então  $u(\Delta x_v) = u(\Delta x_{corr}) = 0.5/\sqrt{3}$  píxeis. A incerteza  $u(h)$  é obtida através da equação (33) e



$u(\alpha_{x_{pp}})$  é calculada recorrendo à equação (37). A incerteza associada ao tempo entre fotografias  $\Delta t$  deriva da resolução do Arduino Uno que controla o sistema e possui uma resolução de 1 ms. Assim assumindo uma distribuição uniforme com um erro máximo de 0.5 ms a incerteza no tempo entre imagens é  $u(\Delta t) = 5 \times 10^{-4} / \sqrt{3}$  s.

Com base na equação (5) e aplicando o procedimento detalhado em [12], obtém-se a incerteza da componente vertical do vento através da seguinte equação

$$u^2(v_y) = \left( \frac{\alpha_{v_{pp}} h}{\Delta t} \right)^2 u^2(\Delta y_{wind}) + \left( \frac{\Delta y_{wind} h}{\Delta t} \right)^2 u^2(\alpha_{v_{pp}}) + \left( \frac{\Delta y_{wind} \alpha_{v_{pp}}}{\Delta t} \right)^2 u^2(h) + \left( \frac{\Delta y_{wind} \alpha_{v_{pp}} h}{(\Delta t)^2} \right)^2 u^2(\Delta t). \quad (40)$$

A direção do vento é obtida recorrendo à equação (6) e a incerteza da mesma é dada por

$$u^2(\alpha_3) = \left( \frac{v_y}{v^2} \right)^2 u^2(v_x) + \left( \frac{v_x}{v^2} \right)^2 u^2(v_y) + u^2(\alpha_3) \quad (41)$$

onde  $u(v_x)$  pode ser calculada utilizando a equação (39),  $u(v_y)$  através da equação (40) e  $u(\alpha_3)$  é o desvio padrão do processo experimental que determina a direção do norte geográfico recorrendo às estrelas  $u(\alpha_3) = \sigma(\alpha_3) = 3.85^\circ$ .

#### 4.8 Teoria das incertezas aplicada à visibilidade atmosférica

Nesta secção será analisada a incerteza nas medições realizadas pelo sistema que mede a visibilidade atmosférica. Tal como na secção anterior a análise da incerteza será realizada com base em [12] e serão assumidas incertezas do Tipo A e Tipo B. O cálculo da visibilidade atmosférica é realizado através de (13) e de acordo com a lei da propagação das incertezas obtém-se

$$u^2(vis_{atm}) = \left( \frac{\partial vis_{atm}}{\partial b_{ext}} \right)^2 u^2(b_{ext}) \quad (42)$$

sendo a incerteza do cálculo da visibilidade atmosférica dada por

$$u(vis_{atm}) = \frac{3}{b_{ext}^2} u(b_{ext}) \quad (43)$$

onde  $u(b_{ext})$  é a incerteza na medição do coeficiente de extinção. No Capítulo 2. foram enunciados duas metodologias que permitem a medição do coeficiente de extinção. O método utilizado em condições de alta visibilidade está ilustrado na Figura 3 e recorre à equação (11). Para condições de baixa visibilidade o coeficiente de extinção é calculado usando a equação (14). O cálculo de  $b_{ext}$  pode ser realizado através de (15) onde  $C_2$  representa o contraste do conjunto de árvores mais distantes em relação ao fundo da imagem.

#### 4.8.1 Incerteza no cálculo do coeficiente de extinção com alta visibilidade

A incerteza  $u(b_{ext})$  para condições de alta visibilidade atmosférica é obtida através de

$$u^2(b_{ext}) = \left[ -\frac{1}{C_2(x_2 - x_1)} \right]^2 u^2(C_2) + \left[ -\frac{1}{C_1(x_2 - x_1)} \right]^2 u^2(C_1) + \left[ \frac{\log\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{(x_2 - x_1)^2} \right]^2 u^2(x_2) + \left[ -\frac{\log\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{(x_2 - x_1)^2} \right]^2 u^2(x_1). \quad (44)$$

A medição da distância de cada grupo de árvores, à máquina fotográfica, possui um erro máximo de 0.5 km e como se tratam de incertezas do Tipo B, tem-se  $u(x_2) = u(x_1) = \frac{0.5}{\sqrt{3}}$  km .

O cálculo do contraste de um objeto relativamente ao fundo é realizado através da equação (7) e a incerteza do cálculo de  $C_1$  é dada por

$$u^2(C_1) = \left(\frac{I_1}{I_B^2}\right)^2 u^2(I_B) + \left(-\frac{1}{I_B}\right)^2 u^2(I_1) . \quad (45)$$

Homologamente a incerteza  $u(C_2)$  é obtida através de

$$u^2(C_2) = \left(\frac{I_2}{I_B^2}\right)^2 u^2(I_B) + \left(-\frac{1}{I_B}\right)^2 u^2(I_2) \quad (46)$$

As incertezas  $u(I_1)$ ,  $u(I_2)$  e  $u(I_B)$  são do Tipo A e os respetivos valores são obtidos através do valor de desvio padrão das intensidades associadas a cada conjunto de árvores. Assim as incertezas podem ser calculadas da seguinte forma

$$u(I_1) = \sigma(I_1) \quad (47)$$

$$u(I_2) = \sigma(I_2) \quad (48)$$

$$u(I_B) = \sigma(I_B) \quad (49)$$

#### 4.8.2 Incerteza no cálculo do coeficiente de extinção com baixa visibilidade

Para o sistema desenvolvido, considera-se que a visibilidade atmosférica é baixa quando o contraste  $C_2$  é inferior a 5%. Nestas condições o coeficiente de extinção é obtido através de (14) e a incerteza na medição do  $b_{ext}$  em condições de baixa visibilidade atmosférica é calculada recorrendo a

$$u^2(b_{ext}) = \left(-\frac{1}{C_1 x_1}\right)^2 u^2(C_1) + \left(\frac{1}{C_0 x_1}\right)^2 u^2(C_0) + \left[\frac{\log\left(\frac{C_1}{C_0}\right)}{x_1^2}\right]^2 u^2(x_1) \quad (50)$$

onde  $C_0$  é o contraste intrínseco do objeto. A distância  $x_1$  tem uma incerteza Tipo B e com um erro máximo de 0.5 km. Assim a incerteza associada a essa medição é  $u(x_1) = \frac{0.5}{\sqrt{3}}$  km. A incerteza  $u(C_1)$  pode ser obtida através da equação (45) e a incerteza  $u(C_0)$  foi obtida através do desvio padrão máximo dos valores  $C_0$  medidos entre cada hora. O cálculo do desvio padrão de  $C_0$  foi realizado a cada hora para que as condições de iluminação não interfiram no cálculo da incerteza do contraste intrínseco do objeto. O valor máximo de desvio padrão horário obtido foi 0.04, logo a incerteza do contraste intrínseco é  $u(C_0) = 0.04$ .

## 5. Medição da altura da base das nuvens

Neste capítulo são apresentadas as medições da altitude da base das nuvens realizadas pelo protótipo instalado no telhado do edifício fase III da Universidade de Évora, previamente descrito na secção 2.2 . Os resultados obtidos são analisados e comparados com as medições realizadas por um LIDAR presente nas mesmas instalações que o protótipo. Adicionalmente será realizada uma análise da incerteza dos resultados obtidos pelo sistema de medição da altura das nuvens.

Na segunda parte deste capítulo são apresentados os valores de velocidade e direção do vento medidos pelo sistema e é realizada uma análise sobre a incerteza das medições da direção e velocidade do vento à altura das nuvens.

### 5.1 Altitude

A medição da altura das nuvens é realizada recorrendo à equação (1), sendo o ângulo  $\alpha$  ilustrado na Figura 1 determinado através de um par de fotografias recolhidas em cada máquina fotográfica. Devido aos desalinhamentos verificados no sistema foi necessário determinar uma matriz transformação que será aplicada à imagem esquerda de forma a corrigir os desalinhamentos. Tal como foi descrito no Capítulo 4, onde foi determinada a matriz transformação (24). Na Figura 39 estão representadas um par de fotografias adquiridas pelo sistema onde será medida a altura das nuvens.



Figura 39 - Par de fotografias recolhidas pelo sistema no dia 26 de Janeiro de 2012.

Na Figura 40 está representada a fotografia esquerda transformada pela matriz  $T$  (24) e a fotografia direita original. A transformação afim aplicada garante que o deslocamento horizontal relativo entre fotografias é apenas provocado pela altura das nuvens. O deslocamento horizontal registrado entre fotografias pode ser medido através de um processo de correlação de imagens.

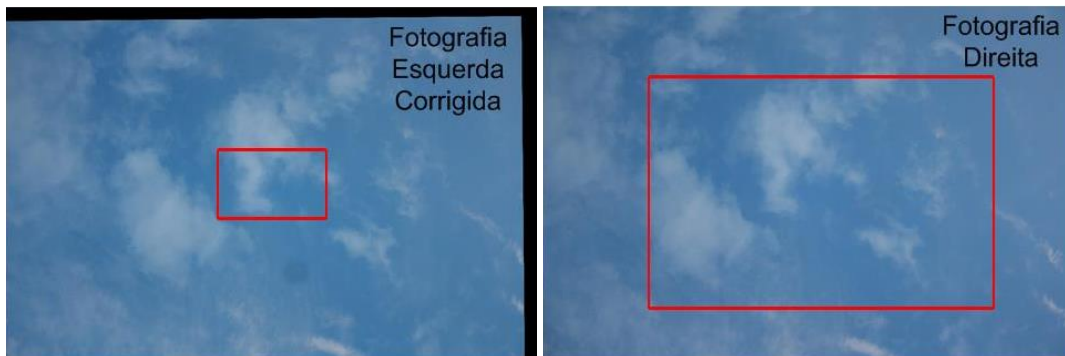


Figura 40 - Par de fotografias com os desalinhamentos do sistema corrigidos.

## 5.2 Correlação de imagens

A correlação de imagens é um algoritmo matemático que tem como objetivo a determinação dos deslocamentos verticais e horizontais entre fotografias semelhantes. Esta determinação é realizada através pesquisa de semelhanças entre uma parte da imagem esquerda e a imagem direita. A janela (retângulo vermelho) da Fotografia Esquerda Corrigida presente na Figura 40 é correlacionada com o retângulo vermelho da Fotografia Direita determinando-se assim o deslocamento horizontal  $\Delta x$  entre fotografias. O algoritmo de correlação requer que a janela pesquisada (esquerda) seja menor que a janela base (direita). Estas janelas são centradas nas respectivas fotografias e dimensionadas com os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões das janelas usadas no processo de correlação de imagens.

Janela	Largura ( $x$ ) [píxeis]	Altura ( $y$ ) [píxeis]
Pesquisada	800	500
Base	2500	1700

Na Secção 4.5 e com base em [49] concluiu-se que a distorção radial era minimizada no centro da fotografia, como tal as janelas da Figura 40 encontram-se centradas e as dimensões da janela pesquisada são reduzidas. A janela Base utilizada no processo de correlação é mais pequena que a totalidade da Fotografia Direita para minimizar o tempo de processamento. Esta redução de dimensões da janela Base é limitada pela mínima altitude das nuvens que devem continuar presentes em ambas as fotografias.

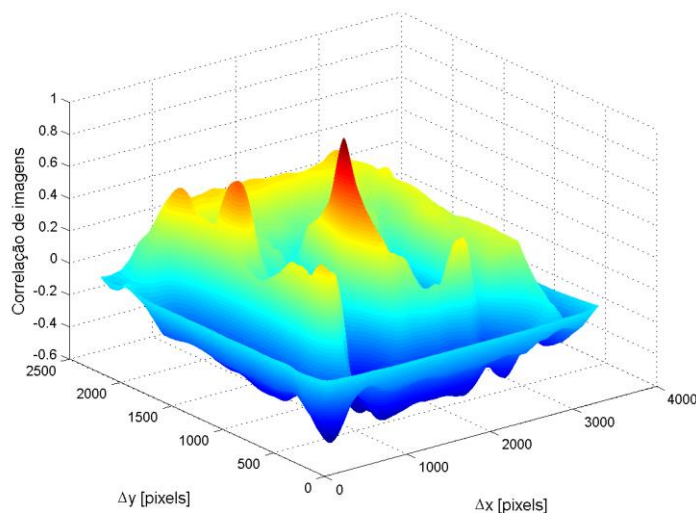


Figura 41 - Resultado do processo de correlação entre as janelas representadas na Figura 40.

Na Figura 41 está representada a superfície resultante do processo de correlação entre as fotografias da Figura 40. O cálculo do ponto máximo da superfície permite a determinação do deslocamento horizontal  $\Delta x = -65$  píxeis, do deslocamento vertical  $\Delta y = 3$  píxeis e o valor máximo da correlação  $\max_c = 0.93$ . A variável que indica a qualidade da correlação entre as fotografias é obtida através de  $\max_c$ . Valores próximos de 1 indicam uma boa correlação e valores próximos de zero revelam uma má correlação.

Determinado o deslocamento horizontal  $\Delta x$  entre as fotografias, é possível recorrendo à equação (2) calcular o ângulo  $\alpha = -65 \times 0.0166 = -1.079^\circ$  e consequentemente determinar a altura das nuvens através da equação (1),  $h = \frac{28.9}{\tan(-1.079)} = 1537$  m.

### 5.3 Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos através de um vasto conjunto de fotografias obtidas pelo sistema e comparados com as medições realizadas com um LIDAR instalado próximo do protótipo. O LIDAR é um sistema que mede as propriedades da luz refletida pelas partículas, permitindo assim o cálculo de distâncias em particular, foi configurado para medir a altitude das nuvens. O LIDAR utilizado é do tipo Polly<sup>XT</sup> e opera em vários comprimentos de onda. Foi configurado com uma resolução vertical de 30 m e tempos de aquisição de dados de 30 s.

Na Figura 42 estão representadas as medições da altura da base das nuvens realizadas pelos dois sistemas. O protótipo recorre à visão estéreo de duas câmaras e tem as suas medições representadas com pontos negros e as medições realizadas pelo LIDAR encontram-se representadas por um gradiente de cores onde as cores quentes representam as nuvens detetadas. Na Figura 42 são apresentadas as medidas realizadas durante a tarde do dia 16 de Janeiro de 2012. Durante esse período verificou-se uma falha no funcionamento do LIDAR durante alguns minutos resultando na banda branca com início às 14:45 UTC. Foram medidos dois conjuntos de nuvens com alturas distintas por ambos os sistemas, o primeiro conjunto foi detetado às 14:25 UTC com uma altura aproximada de 900 m, o segundo conjunto foi detetado às 16:00 UTC e possuía uma altura superior a 1300 m. As medições realizadas pelo sistema de visão estéreo são confirmadas pelas medições realizadas pelo LIDAR na maior parte dos dados. Foi ainda registada pelo sistema de visão estéreo uma nuvem que o LIDAR não detetou. A falta de medidas do LIDAR pode ser originada pelas pequenas dimensões da nuvem ou pela localização da nuvem foram da zona de medição do LIDAR enquanto era visível à câmara.

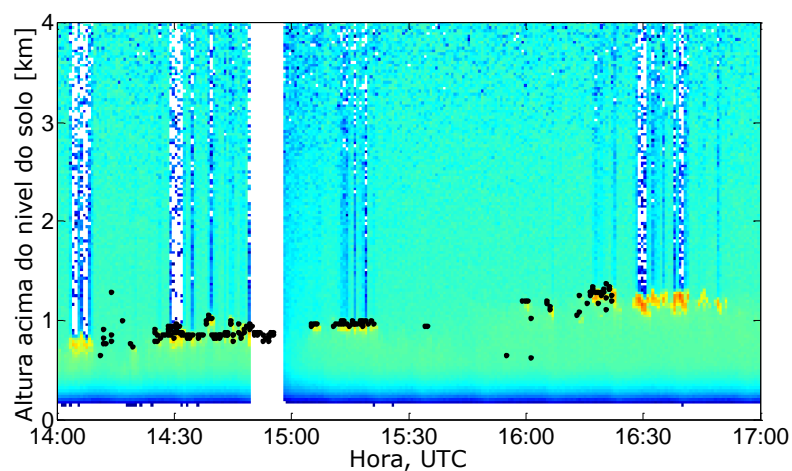


Figura 42 - Medições da altura das nuvens realizadas no dia 16 de Janeiro 2012 pelo sistema de visão estéreo (pontos pretos) e pelo LIDAR (gradiente de cores).



A Figura 43 é homóloga à Figura 42 mas relativamente ao dia 26 de Janeiro de 2012. Foram detetados dois conjuntos de nuvens durante as medições: um conjunto com altura média de 6000 m; e outro conjunto de nuvens com altura aproximada de 1500 m. As diferentes camadas de nuvens foram corretamente registadas por ambos os sistemas, sendo que as medições da camada mais alta realizadas pelo sistema de visão estéreo são um valor médio da altura das nuvens presentes. Este valor médio nas medições é resultado do processo de correlação de imagens, que tenta encontrar um compromisso entre todas as nuvens presentes, sendo o deslocamento resultante uma média de todas as nuvens presentes no campo de visão das máquinas fotográficas. Observa-se uma redução na resolução das medidas das alturas das nuvens medidas a alturas elevadas. Este facto deve-se aos pequenos ângulos que resultam em grandes alturas, contudo este problema não é relevante para a aplicação proposta uma vez que no aeródromo o interesse na altura das nuvens incide sobretudo em nuvens baixas até 1200 m. A resolução das medições do sistema de estéreo visão para alturas elevadas pode ser melhorada através de uma maior distância entre máquinas fotográficas ou através da reorientação das mesmas de forma a assegurar que a zona de máxima resolução seja a de nuvens altas.

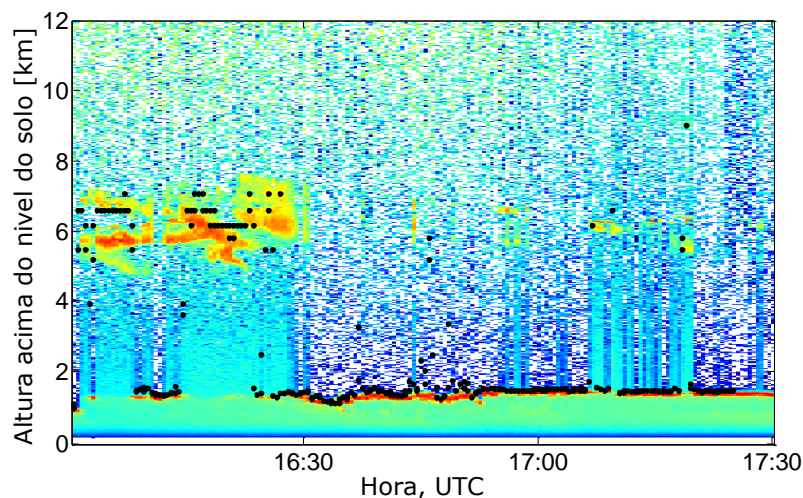


Figura 43 – Medições da altura das nuvens realizadas no dia 26 de Janeiro 2012 pelo sistema de visão estéreo (pontos pretos) e pelo LIDAR (gradiente de cores).

#### 5.4 Incertezas das medições da altura das nuvens

Na secção 4.7 foram deduzidas as equações referentes às incertezas nas medições da altura das nuvens. Na Figura 44 está ilustrada essa incerteza para o sistema de visão estéreo instalado com uma distância entre câmaras de  $d = 28.9$  m. Como era expectável a incerteza da altura das nuvens aumenta com sua altura. Para nuvens a  $h = 10$  km de altura existe uma

incerteza na medição da altura de 1579 m que representa uma incerteza percentual de 15.8%. Para alturas de 6000 m, existe uma incerteza associada de 568 m, que corresponde a uma incerteza percentual de 9.47%. Para a utilização a que se destina este sistema, a altura das nuvens é relevante até os 1200 m, para esta gama de altitudes a incerteza máxima verificada é de 23 m correspondendo a uma incerteza relativa de 1.9%.

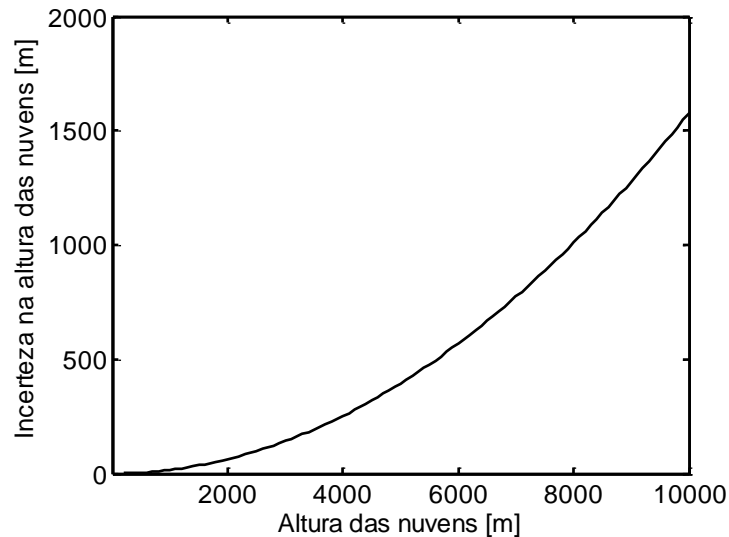


Figura 44 - Incerteza da altura das nuvens em função da altura das nuvens para a distância entre câmaras  $d=28.9$  m.

De forma a avaliar a influência da distância  $d$  entre câmaras na incerteza, foi realizada a Figura 45 que apresenta o comportamento da incerteza na medição da altura das nuvens relativamente à distância entre as máquinas fotográficas e a altura das nuvens. Transversalmente a todas as distâncias entre câmaras verifica-se que a incerteza das nuvens cresce com o aumento da altitude das nuvens, tal como verificado na Figura 44. Com base na Figura 45 é perceptível que a incertza associada à altura das nuvens diminui com o aumento da distância entre câmaras, sobretudo para nuvens altas. As grandes distâncias entre câmaras diminuem drasticamente a incerteza em nuvens muito altas, contudo limitam a altura de nuvens mínima que pode ser medida pelo sistema. Por exemplo para uma distância  $d = 200$  m a altura mínima que pode ser medida são 797 m, valor que não é interessante para a aplicação deste sistema.

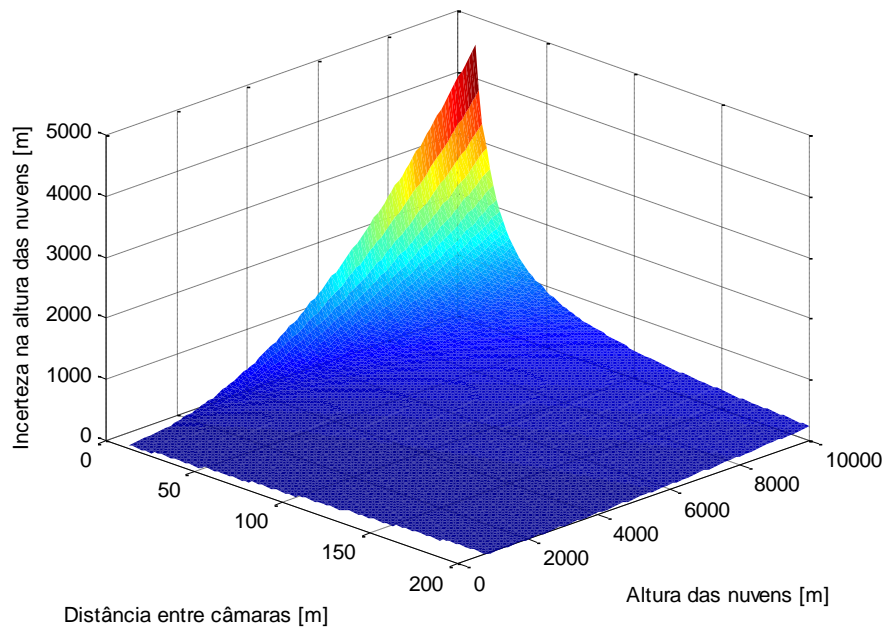


Figura 45 - Incerteza da altura das nuvens versus altura das nuvens e distância  $d$  entre câmaras.

## 5.5 Velocidade e direção do vento

Na secção 5.2 foi descrito o processamento de imagens que permite calcular os deslocamentos horizontais e verticais entre fotografias obtidas por duas máquinas fotográficas. A aplicação do processo de correlação a fotografias obtidas sequencialmente por uma máquina fotográfica, permite o cálculo do deslocamento  $\Delta x_v$  e  $\Delta y_v$ , descrito por uma nuvem durante o período de tempo  $\Delta t = 9 \text{ s}$ . Recorrendo às equações (4) e (5) é possível calcular as componentes  $\Delta x_v$  e  $\Delta y_v$  do vento respetivamente, permitindo assim o cálculo da velocidade do vento à altura das nuvens.

A Figura 46 apresenta as medições da velocidade do vento realizadas pelo sistema utilizando a metodologia anteriormente descrita. Foi anexada uma tabela com valores obtidos através de um modelo meteorológico [51] simulados a cada 3 horas e apenas para valores de altitude discretos. Os valores registados na Figura 46 variam entre os 9 m/s e os 15 m/s apresentam uma boa aproximação aos resultados do modelo meteorológico.

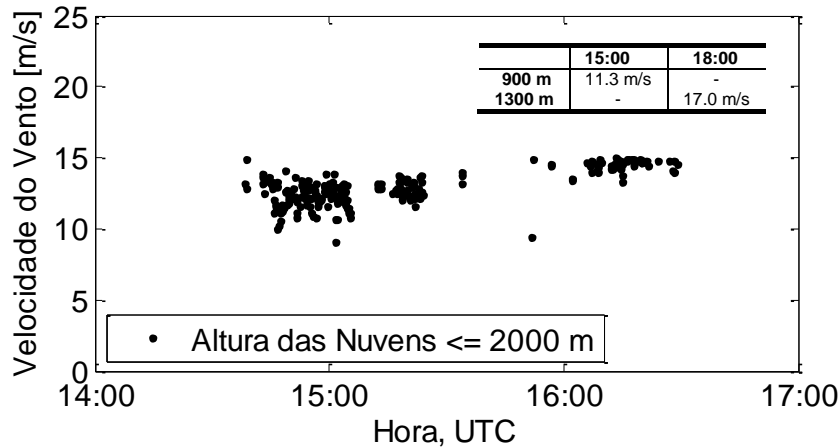


Figura 46 - Velocidade do vento à altura das nuvens medida pelo sistema durante a tarde do dia 16 de Janeiro de 2012. A Tabela anexada apresenta os valores da velocidade do vento resultante de um modelo meteorológico.

A direção do vento à altura das nuvens é obtida recorrendo à equação (6). Na Figura 47 são apresentadas medições da direção do vento realizadas pelo sistema durante a tarde do dia 16 de Janeiro de 2012. Nesse período a direção do vento à altura das nuvens varia entre os 270° e os 315°. O modelo meteorológico usado como comparação durante o mesmo período de tempo indica que a direção do vento variou entre os 352° e os 29°, a diferença entre os valores medidos pelo sistema e o modelo meteorológico é justificada pelas diferentes alturas a que a direção do vento é medida. O sistema em estudo mede a direção à altura das nuvens enquanto que o modelo meteorológico indica valores de direção a baixas altitudes relativamente próximas do solo. A baixas altitudes o vento apresenta um grande variabilidade nas suas propriedades devido à orografia do terreno. Adicionalmente os resultados do sistema meteorológico resultam de uma média espacial e temporal o que introduz uma elevada incerteza nas medições do sistema e a comparação dos resultados com os resultados calculados pelo sistema descrito neste trabalho apenas servem como orientação.

A Figura 48 apresenta os resultados da velocidade do vento medidos no dia 26 de Janeiro entre as 16:00 e as 17:30. Devido à existência de nuvens a alturas distintas (altas e baixas), na Figura 48 são representadas a vermelho as velocidades de nuvens altas e a preto a velocidade do vento à altura de nuvens baixas. A baixas altitudes o vento varia entre os 5 m/s e os 7 m/s enquanto que os valores estimados pelo modelo meteorológico variam entre os 3.7 m/s e os 4.5 m/s. A velocidade do vento medida pelo sistema a elevadas altitudes oscila entre os 6 m/s e os 14 m/s e as estimativas do modelo utilizado para comparação são aproximadamente 9 m/s.

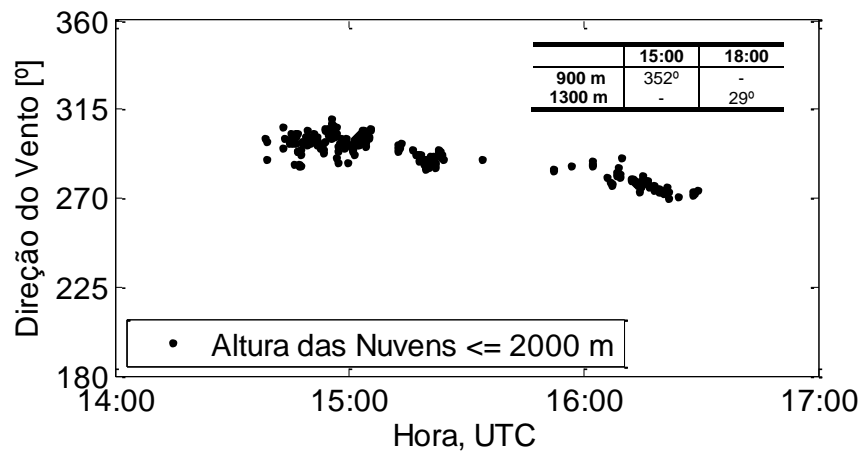


Figura 47 - Direção do vento à altura das nuvens medida pelo sistema durante a tarde do dia 16 de Janeiro de 2012. A Tabela anexada apresenta os valores da direção do vento resultante de um modelo meteorológico.

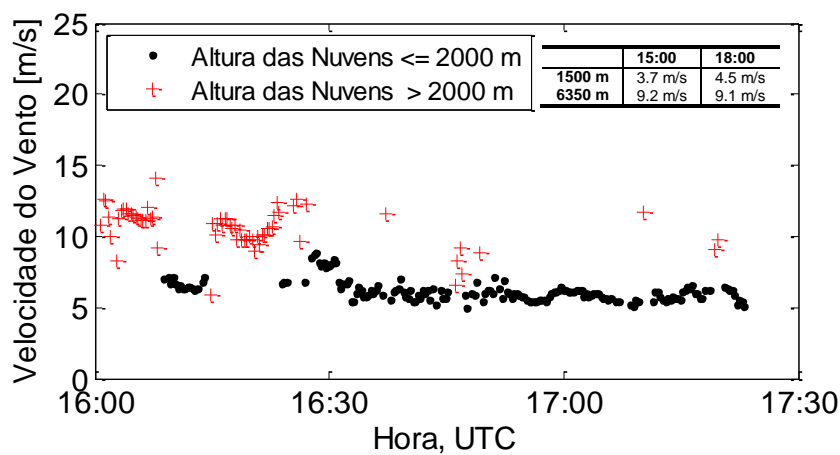


Figura 48 - Velocidade do vento à altura das nuvens medida pelo sistema durante a tarde do dia 26 de Janeiro de 2012. A Tabela anexada apresenta os valores da velocidade do vento resultante de um modelo meteorológico.

A direção do vento à altura das nuvens durante a tarde do dia 26 de Janeiro de 2012 está representada na Figura 49. De forma semelhante ao realizado na Figura 48 procedeu-se a uma divisão entre nuvens altas e nuvens baixas. As nuvens altas apresentam uma direção que varia entre os 300° e os 320°, enquanto que o modelo meteorológico apresenta direções para essas altitudes entre os 323° e os 338°. Para os ventos presentes a baixas altitudes (1500 m) o sistema mediu direções entre os 300° e os 350° e o modelo apresentam valores entre 310° e 335°, confirmando assim uma boa relação entre as medidas ao longo da tarde do dia 26 de Janeiro de 2012.

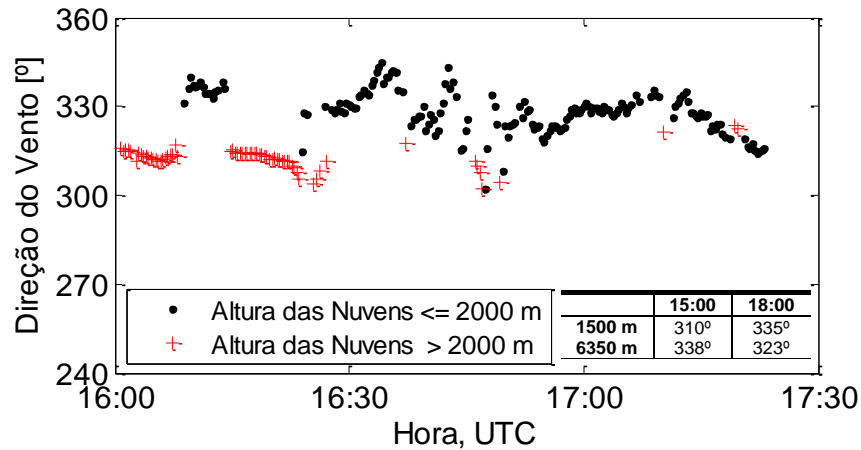


Figura 49 - Direção do vento à altura das nuvens medida pelo sistema durante a tarde do dia 26 de Janeiro de 2012. A Tabela anexada apresenta os valores da direção do vento resultante de um modelo meteorológico.

## 5.6 Incertezas das medições da velocidade e direção do vento

As equações que permitem o cálculo da incerteza na medição da velocidade e direção do vento foram deduzidas na secção 4.7.3. Nesta secção serão apresentados os resultados das incertezas relacionadas com as medições do vento.

Na Figura 50 está representada a incerteza associada às medições da velocidade do vento realizadas pelo sistema com uma distância entre câmaras de  $d = 28.9$  m em função da altura das nuvens e da velocidade do vento. Como esperado a incerteza da velocidade do vento aumenta com a velocidade do vento e com a altitude das nuvens, sendo o valor máximo de incerteza verificado na Figura 50 de 2.3 m/s.

A incerteza da direção da velocidade do vento presente à altura das nuvens em função da altura das nuvens e da velocidade do vento está representada na Figura 51. Como esperado esta aumenta com a altura das nuvens e cresce muito com velocidades próximas de 0. Para valores de velocidade do vento superiores a 5 m/s a incerteza na direção do vento é sempre inferior a 7°, sendo um valor aceitável para a aplicação do protótipo.

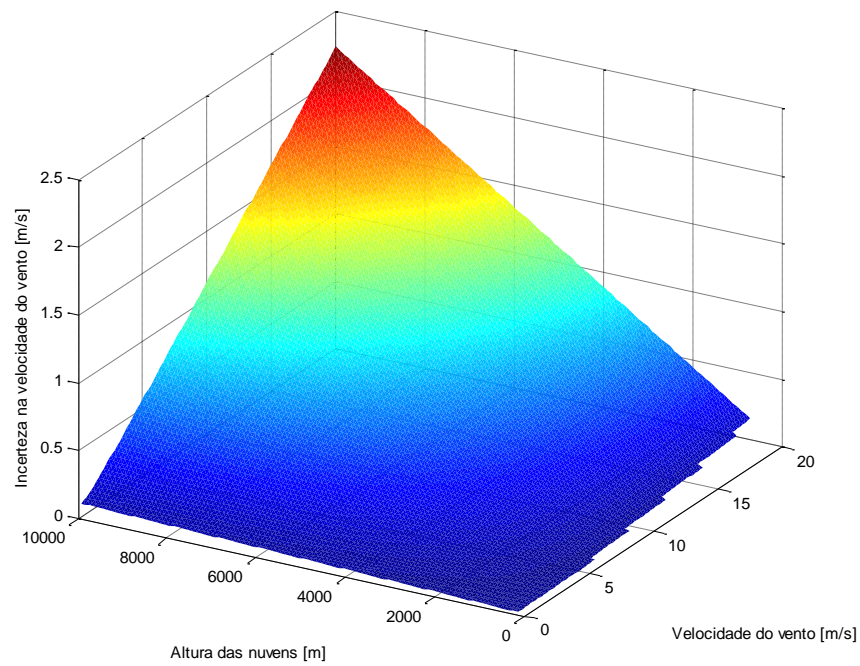


Figura 50 - Incerteza da velocidade do vento em função da altura das nuvens e da velocidade do vento.

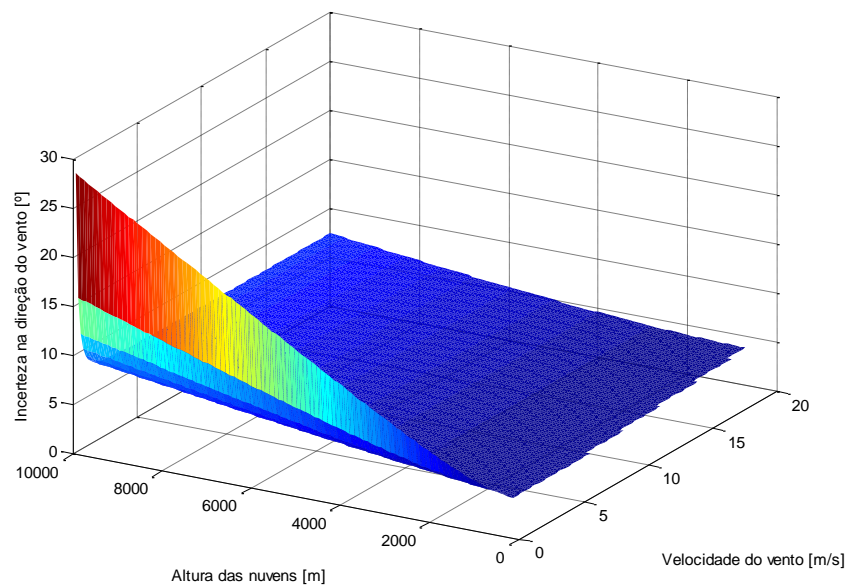
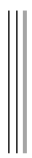


Figura 51 - Incerteza da direção do vento em função da altura das nuvens e da velocidade do vento.







## 6. Visibilidade Atmosférica

Neste capítulo são apresentadas as medições de visibilidade atmosférica realizadas pelo sistema instalado em Évora, no edifício Fase III e pelo sistema localizado em Viana do Alentejo. Durante as medições foram registados eventos que produzem uma redução acentuada da visibilidade atmosférica. Estes fenómenos são apresentados no decorrer deste capítulo e é estudada a razão da diminuição da visibilidade atmosférica em cada situação.

Adicionalmente é apresentado uma análise da incerteza das medições da visibilidade atmosférica realizadas por ambos os sistemas com base no estudo realizado na secção 4.8

### 6.1 Medição da visibilidade atmosférica

A metodologia utilizada para medir a visibilidade atmosférica nos sistemas descritos neste trabalho foi detalhada na secção 2.3 , Foi apresentado o cálculo da visibilidade através dos valores médios de intensidade de objetos do mesmo tipo na paisagem. Na Figura 52 e Figura 53 estão representados os campos de visão das máquinas fotográficas instaladas em Viana do Alentejo e em Évora respetivamente. Em ambas as imagens estão ilustrados um conjunto de retângulos vermelhos que representam as áreas da fotografia onde são obtidos os valores médios de intensidade. Os objetos naturais utilizados, tem um retângulo associado que permite o cálculo do valor médio de intensidade. Cada retângulo possui uma distância associada  $x_1$  e  $x_2$  que corresponde à distância do objeto natural à máquina fotográfica. O retângulo que representa a intensidade média do fundo não possui qualquer distância.





Figura 52 - Campo de visão da máquina fotográfica instalada em Viana do Alentejo, onde estão presentes os objetos naturais utilizados para o cálculo da visibilidade atmosférica.

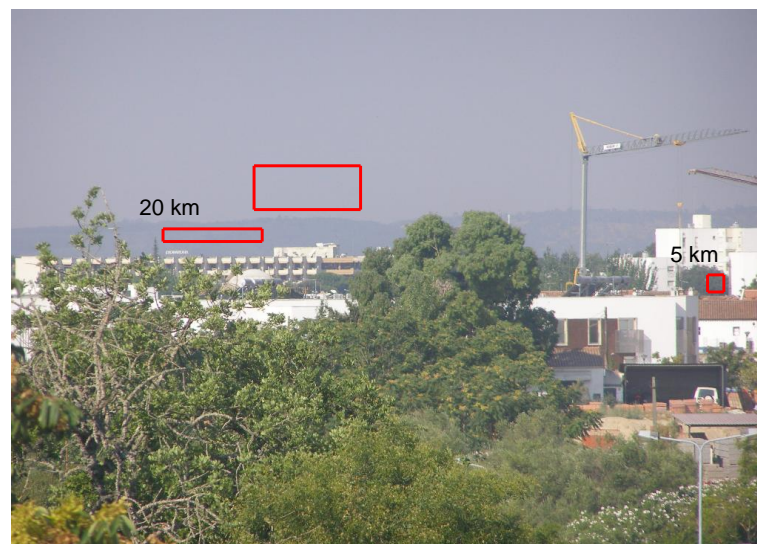


Figura 53 - Campo de visão da máquina fotográfica instalada em Évora, onde estão presentes os objetos naturais utilizados para o cálculo da visibilidade atmosférica.

Recorrendo aos valores de intensidade média obtidos, são calculados os contrastes de cada objeto relativamente ao fundo, através da equação (7) e com base na equação (11) é calculado o coeficiente de extinção. A Figura 54 representa a variação do coeficiente de extinção ao longo do dia 18 de Agosto de 2012 calculado através de fotografias obtidas automaticamente pelo sistema instalado em Viana do Alentejo, como a que está ilustrada na Figura 52. Ao longo do dia 18 de Agosto de 2012 o coeficiente de extinção de cada canal é aproximadamente constante, sendo o canal azul o que possui o coeficiente de extinção mais elevado, o canal verde possui valores intermédios e o canal vermelho apresenta o coeficiente de extinção mais baixo. Durante

o dia representado na Figura 54 o coeficiente de extinção de cada canal é inversamente proporcional aos seus comprimentos de onda. Este fenómeno é comum em condições climatéricas normais, onde a difusão de luz pelos aerossóis é superior para comprimentos de onda mais baixos, originando coeficientes de extinção inversamente proporcionais ao comprimento de onda.

A determinação do coeficiente de extinção permite o cálculo da visibilidade atmosférica recorrendo à equação (13), a aplicação direta desta equação aos resultados apresentados na Figura 54 resultaria em três visibilidades atmosféricas distintas, uma para cada canal RGB. A visibilidade atmosférica é definida como “a perceção que o sistema visual humano tem da interação das partículas atmosféricas com a luz”, assim deve ser única e idêntica ao observado pelo olho humano, como tal para uma correta medição da visibilidade atmosférica o sistema transforma as fotografias obtidas em escala de cinzentos através da equação (18) e posteriormente calcula a visibilidade atmosférica com a metodologia apresentada.

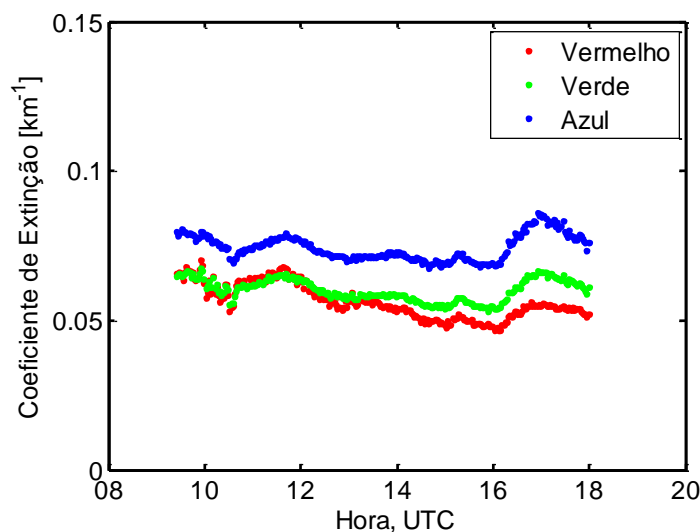


Figura 54 - Coeficiente de extinção medido pelo sistema durante o dia 18 de Agosto de 2012.

Na Figura 55 está ilustrada a visibilidade atmosférica medida pelo sistema no dia 18 de Agosto de 2012. Estas medições foram obtidas através de fotografias em escala de cinzentos, de onde foram calculadas as intensidades médias de um par de objetos semelhantes e do fundo da imagem. Através dos valores de intensidade média, foi determinado o contraste de cada

elemento relativamente ao fundo e assim foi obtido um único coeficiente de extinção, que utilizando a formulação de Middleton [34] permite o cálculo da visibilidade atmosférica.

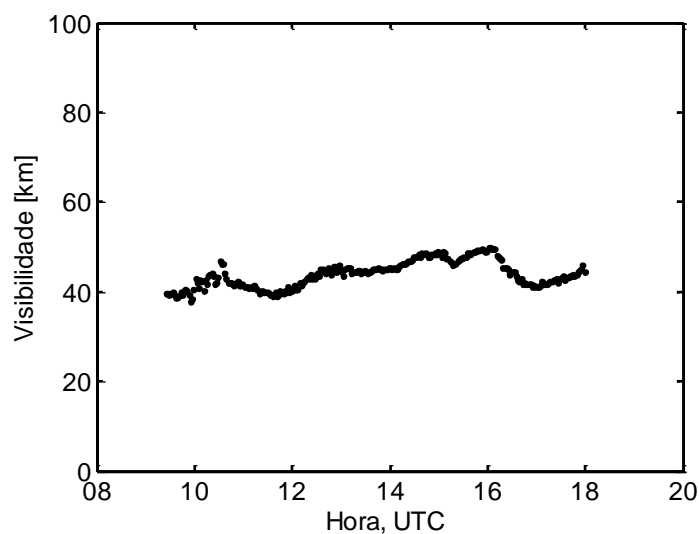


Figura 55 - Visibilidade atmosférica medido pelo sistema durante o dia 18 de Agosto de 2012.

## 6.2 Tempestade de Areia

Durante as medições realizadas pelos sistemas, foram detetados alguns eventos que reduzem a visibilidade atmosférica. Nesta secção serão apresentados os efeitos de um desses fenómenos detetado em Viana do Alentejo. Na Figura 56 é apresentado o campo de visão da máquina fotográfica durante uma tempestade de areia. Durante o período em que se verifica este evento alguns objetos naturais não são identificáveis não sendo possível utilizá-los no cálculo da visibilidade atmosférica. Nestas condições a visibilidade atmosférica é medida através da metodologia apresentada na Secção 2.3 , para situações em que o contraste entre os objetos naturais e o fundo é inferior a 5% .



*Figura 56 - Campo de visão da máquina fotográfica instalada em Viana do Alentejo, onde devido à tempestade de areia não é possível identificar todos os objetos naturais utilizados para o cálculo da visibilidade atmosférica.*

Recorrendo à equação (14), ao contraste do objeto mais próximo da câmara e à última constante característica do objeto  $C_0$  calculada quando dois objetos são identificáveis, determina-se o coeficiente de extinção. Na Figura 57 é apresentado o comportamento do coeficiente de extinção ao longo do dia 20 de Agosto de 2012. Verifica-se que as primeiras medições do dia apresentam valores na mesma ordem de grandeza de um dia normal como apresentado na Figura 54. Para esses valores iniciais verificou-se ainda que a ordem dos canais RGB era a mesma que se obtém num dia com alta visibilidade, com azul mais alto, seguido do verde e o vermelho com o valor mais baixo. Ao longo do dia os valores do coeficiente de extinção aumentam consideravelmente e a ordem dos canais sofre uma inversão, passando o vermelho a ser o valor mais elevado, seguido do verde e o azul apresenta o valor mais baixo. Desta forma os valores do coeficiente de extinção são proporcionais aos seus comprimentos de onda. O fenómeno de inversão da ordem dos canais deve-se às dimensões e formas das partículas que compõe a tempestade de areia, que implicam maiores coeficientes de extinção para maiores comprimentos de onda [52].



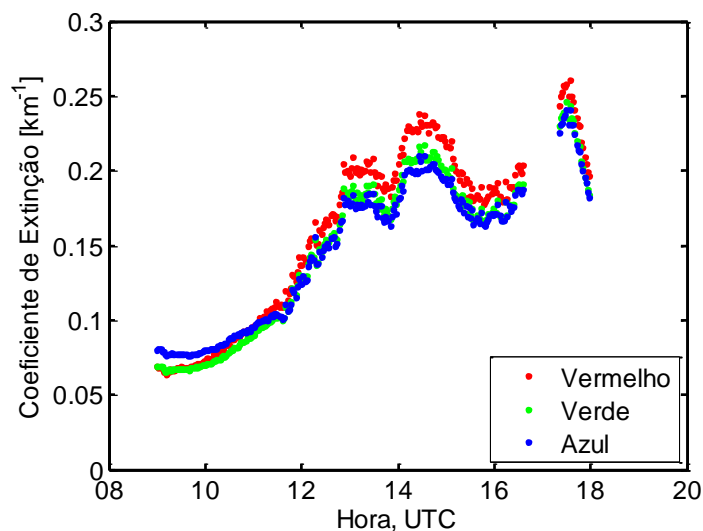


Figura 57 - Coeficiente de extinção medido pelo sistema durante o dia 20 de Agosto de 2012.

Com base nas fotografias recolhidas durante o dia 20 de Agosto de 2012 calculou-se a visibilidade atmosférica. A evolução desta ao longo do dia está representada na Figura 58. Analisando o comportamento da visibilidade atmosférica ao longo deste dia verificou-se que no início da manhã os valores apresentam-se normais para a época do ano e à medida que a tempestade de areia chega a visibilidade decresce rapidamente, mantendo-se constante durante o período da tarde com valores próximos de 15 km. Na Figura 57 e na Figura 58 verifica-se a ausência de medições por volta das 17:00. Esse facto deveu-se a uma falha de energia e durante esse período o sistema não esteve operacional.

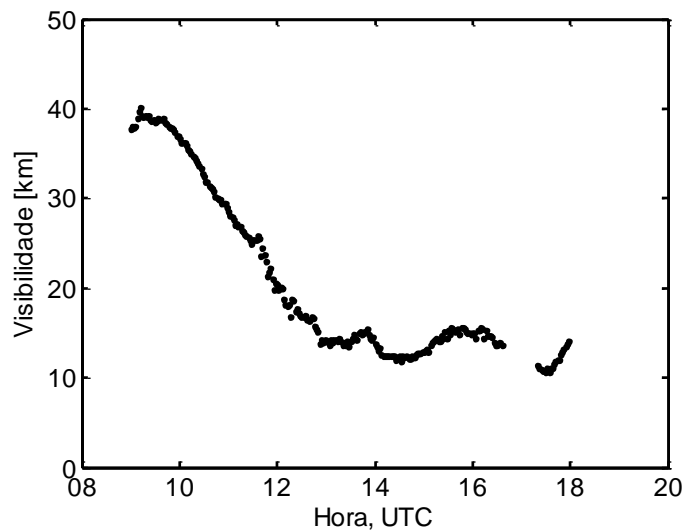


Figura 58 - Visibilidade atmosférica medido pelo sistema durante o dia 20 de Agosto de 2012.

### 6.3 Fogos Florestais

Nos últimos dias de Agosto de 2013 e nos primeiros dias de Setembro de 2013, deflagrou no distrito de Évora um incêndio florestal, que resultou na libertação de fumos e de cinzas para a atmosfera. Durante estes dias o sistema instalado na Universidade de Évora, no Colégio Luís António Verney, recolheu fotografias da paisagem permitindo assim avaliar o efeito dos fogos florestais na visibilidade atmosférica. A Figura 59 apresenta o campo de visão da máquina ali instalada, sendo os objetos naturais utilizados para a medição da visibilidade atmosférica assinalados com retângulos vermelhos, com a indicação da respetiva distância à máquina fotográfica. Esta imagem foi recolhida dia 1 de Setembro de 2013 pelas 16:29, num período em que as partículas libertadas pelo incêndio reduziram bastante a visibilidade atmosférica, fazendo com que o conjunto de árvores mais afastadas seja praticamente indistinguível, indicando assim visibilidade atmosférica inferior a 20 km.



Figura 59 - Campo de visão da máquina fotográfica instalada em Évora, onde estão presentes os objetos naturais utilizados para o cálculo da visibilidade atmosférica.

A Figura 60 mostra o comportamento dos coeficientes de extinção de cada canal ao longo do dia 31 de Agosto de 2013. Estes resultados foram obtidos recorrendo as fotografias obtidas pelo sistema instalado no CLAV e usando a metodologia descrita na Secção 2.3 . Até cerca das 14:00 os coeficientes de extinção permanecem constantes, seguindo-se uma subida contínua dos valores até ao final do dia. Verifica-se ainda que a ordem de grandeza dos coeficientes de extinção permanecem inversamente proporcionais ao comprimento de onda de cada canal.

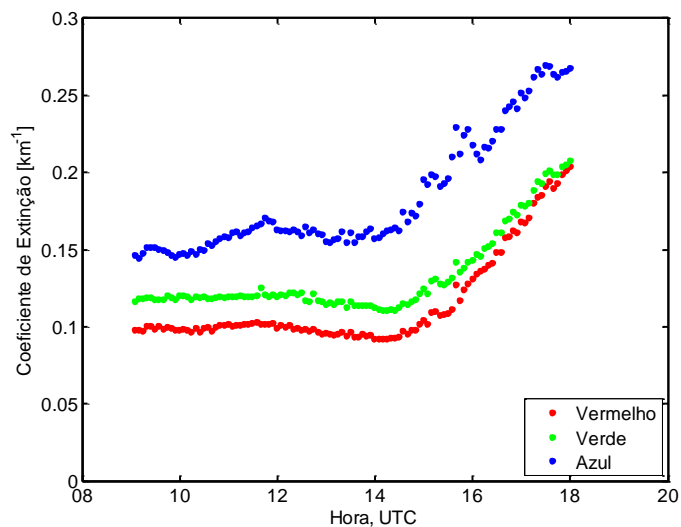


Figura 60 - Coeficiente de extinção medido pelo sistema durante o dia 31 de Agosto de 2013.



Utilizando a metodologia previamente descrita foi medida a visibilidade ao longo do dia 31 de Agosto de 2013. Os resultados obtidos para a visibilidade atmosférica estão representados na Figura 61. Durante a manhã é possível observar uma visibilidade constante e mais baixa que o normal para esta região nesta época do ano, que habitualmente se situa em valores próximos de 60 km. Durante a tarde a visibilidade atmosférica é diminuída continuamente até ao fim do dia devido às partículas libertadas pelos fogos.

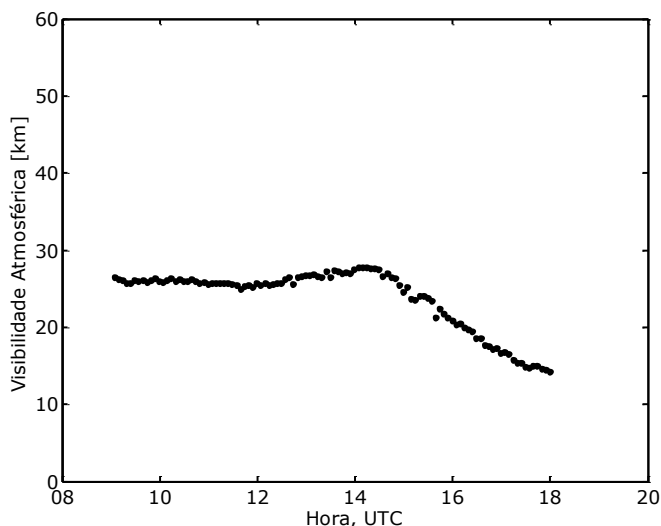


Figura 61 - Visibilidade atmosférica medido pelo sistema durante o dia 31 de Agosto de 2013.

#### 6.4 Expoente de Angström

Na secção 2.3 foi demonstrado que o estudo do Expoente de Angström permite estimar as dimensões das partículas atmosféricas através das razões entre coeficientes de extinção e comprimentos de onda. Com a finalidade de estudar e caracterizar os aerossóis, existe no edifício da Fase 3 do Colégio Luís António Verney um nefelómetro. Este aparelho mede as partículas suspensas num fluido (atmosfera) permitindo assim o cálculo do Expoente de Angström. Na Figura 62 estão representadas as medições do Expoente de Angström pelo sistema instalado em Viana do Alentejo no dia 18 de Agosto de 2012 com pontos pretos e pelo Nefelómetro com pontos vermelhos. Apesar de na Figura 57 estarem representados os 3 coeficientes de extinção calculados, estes resultariam em 3 Expoentes de Angström distintos. Contudo na Figura 62 só é apresentado um Expoente de Angström resultado da combinação do canal verde e do canal azul ( $\lambda_1 = 550\text{nm}$  e  $\lambda_2 = 450\text{nm}$ ), uma vez que o Nefelómetro possuía alguns erros no canal vermelho.

As medições da Figura 62 apresentam-se contantes ao longo do dia 18 de Agosto de 2012, contudo existe um deslocamento vertical entre as medições dos dois instrumentos. Esta diferença entre medições pode ser explicado pelo facto de o nefelómetro possuir um filtro que impede a entrada de partículas de maiores dimensões e que são medidos pelo sistema com câmara aqui apresentado. Além disso as medições realizadas pelo sistema com câmara fotográfica são realizadas ao longo de uma linha enquanto que as medições do nefelómetro são realizadas apenas num ponto.

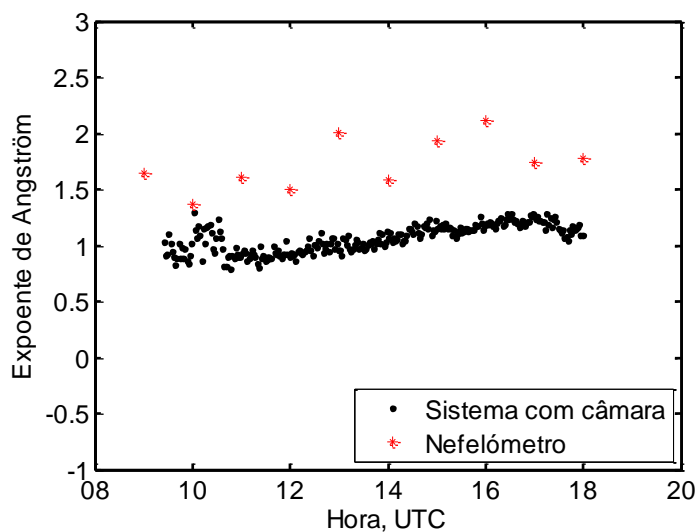


Figura 62 - Exponente de Angström medido pelo sistema (pontos pretos) e pelo nefelómetro (cruzes vermelhas) durante o dia 18 de Agosto de 2012.

A Figura 63 é idêntica à Figura 62 mas para as medições realizadas no dia 20 de Agosto de 2012, pode-se observar que o comportamento das medições realizadas pelo sistema em estudo e as medições do nefelómetro é semelhante. No início do dia o valor é máximo e decresce ao longo do dia em ambas as medições. Tal como na Figura 62 também na Figura 63 existe um deslocamento vertical entre as medições, sendo originado pelas mesmas razões. Como esperado, o Exponente de Angström decresce ao longo do dia. Pela manhã não existiam partículas de areia na atmosfera, resultado num expoente elevado, mas ao longo do dia a tempestade de areia tornou-se mais intensa e assim as dimensões das partículas na atmosfera aumentaram, resultando num decréscimo do Exponente de Angström.

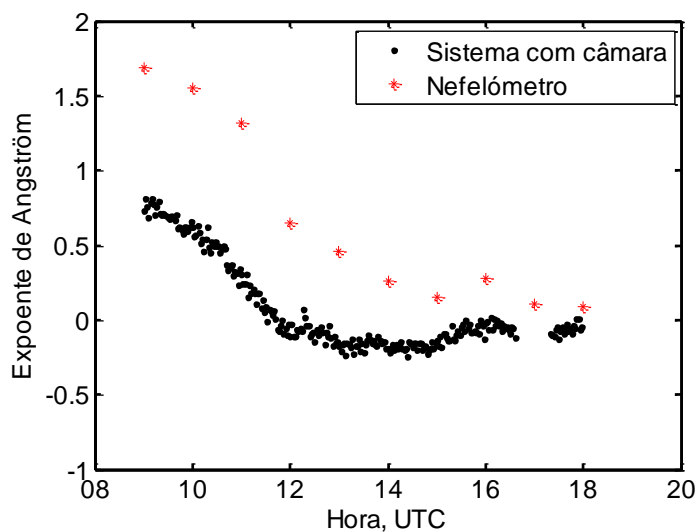


Figura 63 - Exponente de Angström medido pelo sistema (pontos pretos) e pelo nefelómetro (cruzes vermelhas) durante o dia 20 de Agosto de 2012.

## 6.5 Medições contínuas da visibilidade atmosférica

Nesta secção são apresentadas medições contínuas realizadas pelos sistemas, permitindo comparar os resultados de dias típicos com os dias em que foram registados eventos que modificam a visibilidade atmosférica. Na Figura 64 são apresentados os coeficientes de extinção medidos durante os dias 16 a 22 de Agosto de 2012 pelo sistema instalado em Viana do Alentejo para os diferentes comprimentos de onda. De dia 16 até dia 19 de Agosto verificaram-se valores inferiores a  $0.1\text{km}^{-1}$  para todos os comprimentos de onda. Durante esse período manteve-se a relação de proporcionalidade inversa entre os coeficientes de extinção e os comprimentos de onda. Este comportamento é característico desta época do ano na região, indicando assim ausência da tempestade de areia. Nos dias 20 e 21 de Agosto o coeficiente de extinção de cada canal assume valores mais elevados e a relação entre o coeficiente de extinção e o comprimento de onda inverte-se indicando a presença da tempestade de areia. No dia 22 de Agosto de 2012 voltam-se a verificar valores típicos e a ordem normal de comprimentos de onda para a época do ano indicando que a tempestade de areia já se dissipou.

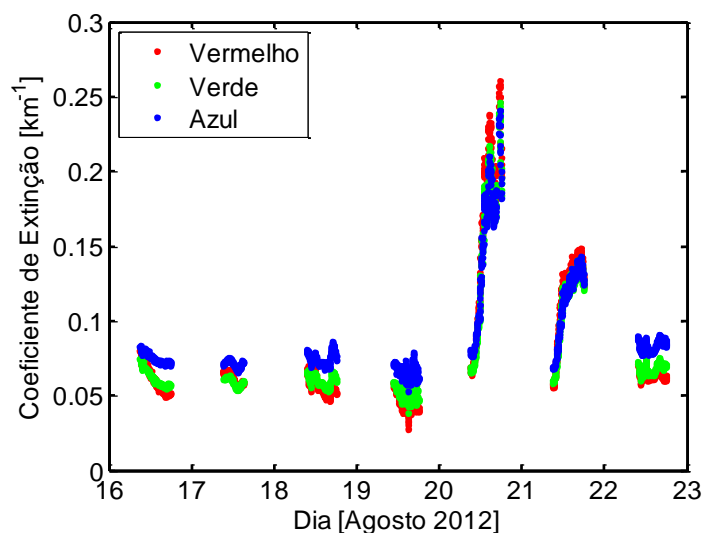


Figura 64 - Coeficiente de extinção medido pelo sistema de Viana do Alentejo durante os dias 16 a 22 de Agosto de 2012.

Na Figura 65 está representado o comportamento da visibilidade atmosférica ao longo dos dias 16 a 22 de Agosto de 2012. Ao longo desta semana existem dias com visibilidade típica para a época do ano nesta região e existem também dias onde foi detetada uma tempestade de areia. De dia 16 a dia 19 as visibilidades atmosféricas apresentam-se entre os 40 e 60 km, valores típicos nesta época do ano. Nos dias 20 e 21 registaram-se visibilidades atmosféricas baixas provocadas pela tempestade de areia presente no sul de Portugal. No dia 22 de Agosto de 2012 os valores de visibilidade atmosféricos voltaram ao normal indicando assim o fim da tempestade de areia.

É de salientar que nas manhãs dos dias com tempestades de areias os valores de visibilidade atmosférica são típicos. Este fenómeno deve-se à diminuição da temperatura durante a noite, provocando assim um aumento da humidade atmosférica. Esse aumento faz com que as partículas de areia fiquem mais pesadas reduzindo assim o efeito que produzem na visibilidade. Durante o resto do dia os ventos continuam a trazer poeiras mas como a temperatura é mais alta as mesmas permanecem no ar reduzindo a visibilidade atmosférica como se pode observar na Figura 65.

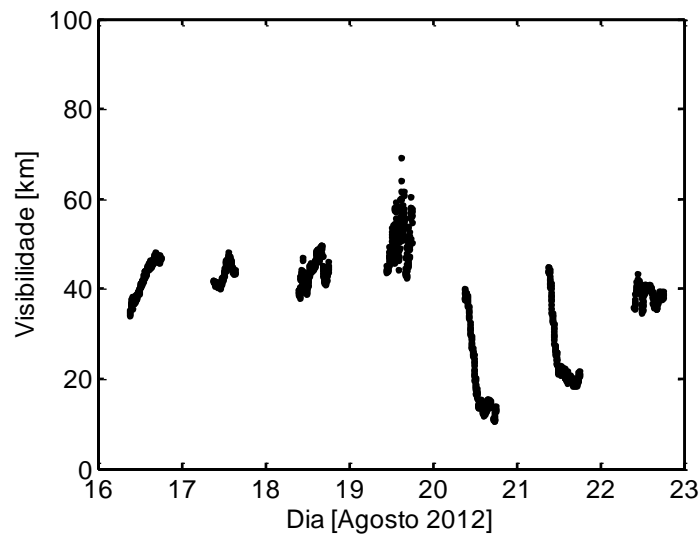


Figura 65 - Visibilidade atmosférica medido pelo sistema de Viana do Alentejo durante os dias 16 a 22 de Agosto de 2012.

A Figura 66 representa o comportamento do Expoente de Angström de 16 a 22 de Agosto de 2012. Analogamente às figuras anteriores são facilmente identificáveis os dias em que se manifestou a tempestade de areia, sendo o comportamento do Expoente de Angström explicado previamente.

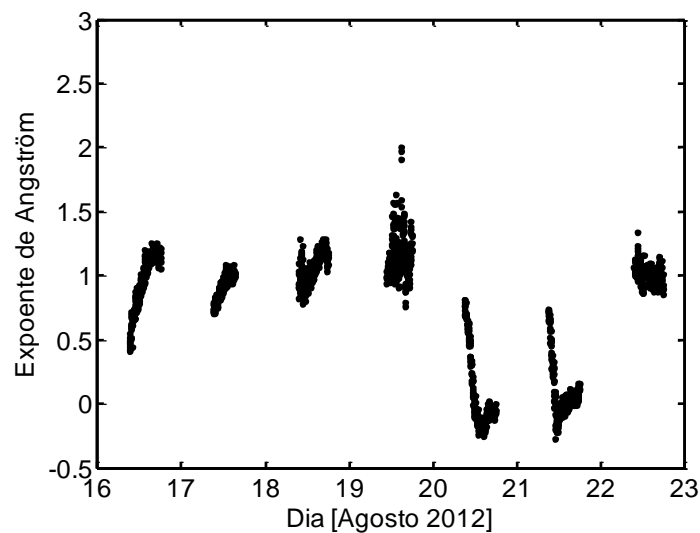


Figura 66 - Expoente de Angström medido pelo sistema de Viana do Alentejo durante os dias 16 a 22 de Agosto de 2012.

A Figura 67 representa os coeficientes de extinção de cada canal ao longo de 3 dias com início a 31 de Agosto de 2013. Nos dois primeiros dias ao início da tarde foi detetado um incêndio florestal e os efeitos desse evento são visíveis no gráfico. No dia 2 de Setembro os coeficientes de extinção mantêm-se contantes ao longo do dia indicando a ausência de fogos. A proporcionalidade inversa entre os coeficientes de extinção e os comprimentos de onda mantém-se em todas as situações, o que difere do comportamento da tempestade de areia.

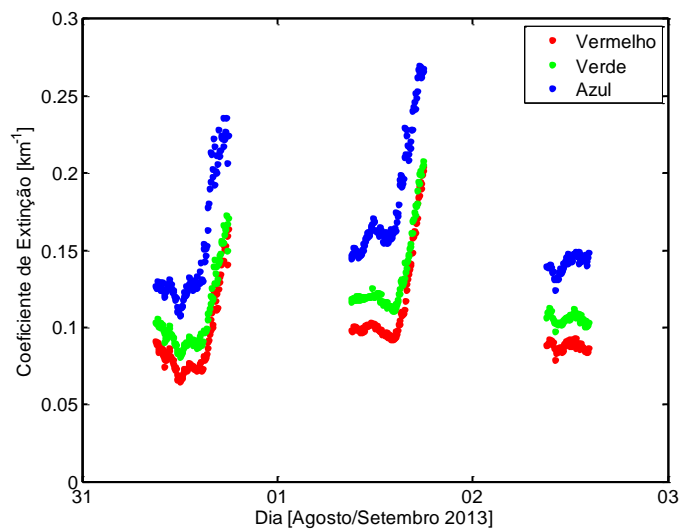


Figura 67 - Coeficiente de extinção medido pelo sistema instalado na Universidade de Évora durante os dias 31 de Agosto de 2013 a 2 de Setembro de 2013.

A Figura 68 ilustra a evolução da visibilidade atmosférica durante os dias 31 de Agosto de 2013 a 2 de Setembro de 2013, nos dois primeiros dias durante o período da tarde a visibilidade decresce, enquanto que no terceiro devido à ausência de atividade no incêndio esta manteve-se constante. Durante o verão no Alentejo, os valores de visibilidade tendem a ser superiores ao registado no 2 de Setembro de 2013, contudo este valor inferior ao tipicamente registado pode ser explicado pelo facto que algumas partículas geradas pelo fogo continuarem no ar.

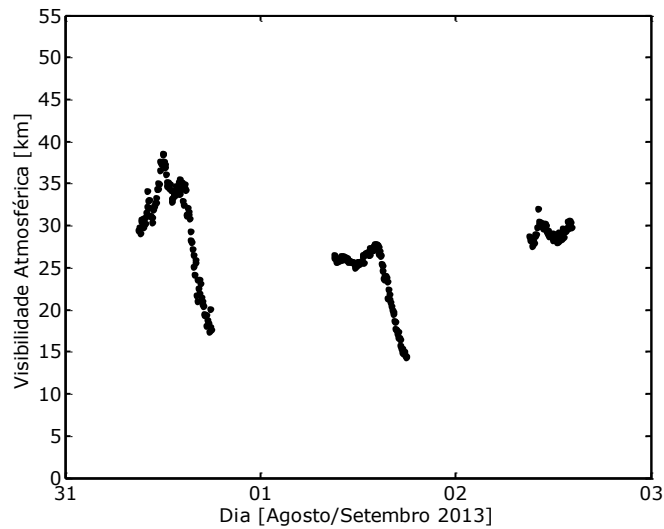
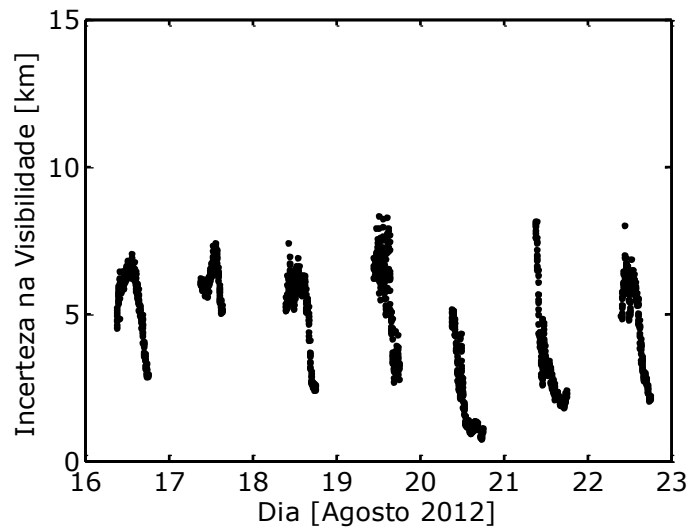


Figura 68 – Visibilidade atmosférica medida pelo sistema instalado na Universidade de Évora durante os dias 31 de Agosto de 2013 a 2 de Setembro de 2013.

## 6.6 Incertezas na medição da visibilidade atmosférica

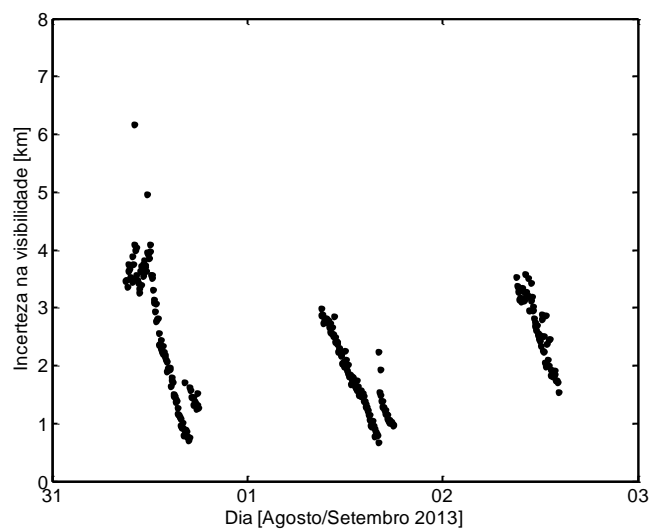
Na secção 4.8 foram deduzidas as equações que permitem o cálculo das incertezas associadas à visibilidade atmosférica, para situações de alta e baixa visibilidade.

A Figura 65 representa as medições de visibilidade atmosférica ao longo de vários dias. Durante esse período de tempo foram registadas altas e baixas visibilidades, assim recorrendo às equações deduzidas nas secções 4.8.1 e 4.8.2 obteve-se a Figura 69 que representa a incerteza na medição da visibilidade atmosférica de 16 a 22 de Agosto de 2012. Verifica-se que o valor da incerteza da visibilidade atmosférica na Figura 69 é sempre inferior a 10 km, sendo este sistema de baixo custo e produzido com componentes comerciais os valores de incerteza são bastante aceitáveis.



*Figura 69 – Incerteza na medição da visibilidade atmosférica medido pelo sistema de Viana do Alentejo durante os dias 16 a 22 de Agosto de 2012.*

Analogamente na Figura 70 são apresentadas as incertezas das medições de visibilidade atmosféricas realizadas pelo sistema instalado em Évora, novamente os valores de incerteza são baixos relativamente às medições apresentadas na Figura 68.



*Figura 70 – Incerteza das medições de visibilidade atmosférica medida pelo sistema instalado na Universidade de Évora durante os dias 31 de Agosto de 2013 a 2 de Setembro de 2013.*



## 7. Conclusões

Nesta Dissertação de Mestrado foram apresentadas duas metodologias que permitem medir variáveis atmosféricas distintas. Ambos os métodos são realizados por sistemas de baixo custo que utilizam componentes comerciais.

O primeiro método exposto foi implementado num protótipo composto por duas máquinas fotográficas, que através de algoritmos matemáticos realiza medições da altitude da base das nuvens. Este sistema destina-se a aplicações no Aeródromo Municipal de Évora e usa como princípio a triangulação através de fotografias para realizar as medições. As câmaras fotográficas são orientadas verticalmente e são disparadas simultaneamente por um circuito eletrónico desenvolvido para esse fim. Uma vez disparadas a câmaras, as fotografias adquiridas são enviadas para um computador central onde são processadas sendo calculada a altura das nuvens. Adicionalmente o sistema mede a direção e a velocidade do vento à altura das nuvens com base no deslocamento registado em imagens obtidas sequencialmente pela mesma máquina fotográfica.

Para uma correta medição dos parâmetros relacionados com as nuvens é necessário conhecer com exatidão a orientação de cada máquina fotográfica para esse efeito. Implementou-se um processamento de fotografias noturnas que recorrendo às estrelas permite determinar a orientação de cada câmara. Com base nas fotografias noturnas adquiridas pelo sistema e através de um algoritmo que regista o trajeto realizado pelas estrelas ao longo de uma noite, determinou-se a posição da estrela polar permitindo assim conhecer a orientação do sistema relativamente ao norte geográfico. Esta orientação é essencial para uma correta medição da direção do vento.

O sistema realizou medições contínuas durante vários dias e neste trabalho foram apresentadas duas medições de dias diferentes e comparadas com os resultados obtidos por um LIDAR localizado próximo do protótipo. Os resultados obtidos apresentam boa concordância com os resultados do LIDAR sobretudo em nuvens mais baixas, Para nuvens mais altas o resultados são bons mas carecem de maior resolução. A comparação entre resultados permitiu validar a forma como o sistema é calibrado e a metodologia de medição do mesmo.

Para os dias em que a altura das nuvens foi apresentada, foi também medida a velocidade e direção do vento. As medições foram ainda comparadas com um modelo meteorológico

devido à falta de um instrumento que realizasse este tipo de medições. Os resultados são semelhantes e aceitáveis tendo em conta a resolução temporal e espacial do modelo.

A primeira parte do trabalho foi concluída com uma análise da incerteza das medições da altura das nuvens. Verificou-se que para maiores distâncias entre câmaras a incerteza nas medições era reduzida, contudo a altitude mínima mensurável aumentava. Analogamente realizou-se um estudo das incertezas para as medições relacionadas com o vento. Verificou-se que as mesmas eram inferiores a 7% na velocidade e 6% na direção, sendo estes valores adequados para um sistema de baixo custo.

Este sistema tem como potenciais evoluções o aumento da distância entre câmaras de forma a aumentar a resolução do sistema e mantendo a altura mínima de nuvens mensurável em valores aceitáveis para aplicações aeronáuticas. Os computadores portáteis associados a cada máquina fotográfica podem ser substituídos por microcontroladores do tipo Raspberry Pi, que permitirão uma redução dos custos do sistema, tornando-se assim ainda mais acessível a pequenos aeródromos e outras aplicações. Poderá ser implementado uma metodologia que permita medir a altura das nuvens em vários pontos obtendo-se assim um mapeamento do perfil das nuvens.

Na segunda parte deste trabalho foi descrita a metodologia utilizada para a medição de visibilidade atmosférica recorrendo a um par de objetos naturais presentes na paisagem e a uma máquina fotográfica comercial. Foram instalados dois sistemas com estas características: um em Viana do Alentejo; e o outro no Colégio Luís António Verney em Évora. Durante o processo de desenvolvimento foi detetada a necessidade de usar formulações distintas para a medição de alta visibilidade e baixa visibilidade, tendo sido deduzidas as formulações para cada situação neste trabalho.

A visibilidade atmosférica é medida através de uma adaptação da formulação de Lambert-Beer, que usa o contraste de um objeto preto relativamente ao horizonte, enquanto que neste trabalho são utilizados os contrastes de dois conjuntos de objetos naturais relativamente ao fundo da imagem. Quando a visibilidade atmosférica baixa bastante, apenas um dos conjuntos usados para a medição da visibilidade é identificável. Para estas situações foi desenvolvido um método que usa a última constante característica calculada com ambos os objetos visíveis e o conjunto visível para calcular a visibilidade atmosférica.

Foram realizadas medições da visibilidade atmosférica durante vários conjuntos de dias e neste trabalho foram apresentados dois conjuntos distintos que contêm dias com visibilidade normal e dias em que ocorreram fenómenos que reduziram bastante a visibilidade. O primeiro

caso de estudo foi realizado com fotografias obtidas pelo sistema de Viana do Alentejo, no final do mês de Agosto. Nesta época na região alentejana são comuns visibilidades atmosféricas na ordem dos 60 km. Foram obtidos valores semelhantes nos primeiros dias. Posteriormente devido a uma tempestade de areia proveniente de África, verificou-se uma acentuada descida da visibilidade atmosférica devido às partículas que estavam no ar. Neste caso, o método que usa apenas um objeto natural e a última constante característica conhecida dos objetos foi usado, verificando-se visibilidades atmosféricas mínimas na ordem dos 11 km. No seguimento deste trabalho foi apresentado um segundo conjunto de medições, resultado das imagens obtidas pelo sistema instalado em Évora durante os dias 31 de Agosto a 2 de Setembro de 2013. Durante este período deflagrou na região um incêndio florestal que reduziu a visibilidade atmosférica devido às partículas expelidas para atmosfera. Essa redução é visível nos resultados obtidos chegando a visibilidade atmosférica a atingir valores inferiores a 15 km.

Foram analisados os comportamentos e variações dos coeficientes de extinção de cada canal RGB e através de uma combinação de dois desses coeficientes (verde e azul) calculou-se o Expoente de Angström que comparado com os resultados obtidos por um nefelómetro. O nefelómetro usado realiza medições do Expoente de Angström num único ponto e possui um filtro que limita a dimensão máxima das partículas que afetam as medições, enquanto que o sistema apresentado realiza medições ao longo de uma linha e todas as partículas influenciam a medição do Expoente. Verificou-se que o comportamento do Expoente de Angström era idêntico em ambas as medições existindo um deslocamento vertical entre as medições, fruto das diferenças dos sistemas de medição.

Finalmente foi realizado um estudo sobre as incertezas das medições da visibilidade atmosférica, verificando-se bons resultados para um sistema de baixo custo como este. A incerteza máxima verificada para o sistema de Viana do Alentejo foi inferior a 18% e no sistema de Évora para as medições apresentadas foi inferior a 13%.

Como potencial evolução, a visibilidade atmosférica poderá ser estimada através da combinação de vários pares de objetos semelhantes presentes na paisagem, método que não foi aplicado nos resultados apresentados pois na paisagem não estavam disponíveis outras árvores do mesmo tipo a distâncias diferentes.

Uma evolução que é transversal a todos os sistemas consiste na implementação do processamento dos dados através de uma plataforma gratuita como por exemplo Python. Este melhoramento consiste em replicar os algoritmos Matlab em Python possibilitando assim uma redução de custos dos sistemas. Contudo esta implementação deve ser cuidada assegurando um tempo de processamento baixo para que o sistema continue a realizar medições em tempo real.



## 8. Referências bibliográficas

- [1] R. Tapakis and a. G. Charalambides, “Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review,” *Sol. Energy*, vol. 95, pp. 392–430, Sep. 2013.
- [2] Kuo-Nan Liou, “Influence of Cirrus Clouds on Weather and Climate Processes: A Global Perspective,” *Mon. Weather Rev.*, vol. 114, pp. 1167–1199, 1986.
- [3] G. Martucci, C. Milroy, and C. D. O’Dowd, “Detection of Cloud-Base Height Using Jenoptik CHM15K and Vaisala CL31 Ceilometers,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 27, no. 2, pp. 305–318, Feb. 2010.
- [4] G. Martucci, C. Milroy, and C. D. O’Dowd, “Detection of cloud-base height using Jenoptik CHM15K and Vaisala CL31 ceilometers,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 27, pp. 305–318, 2010.
- [5] J. H. Hand, “Cloud layer detection by WSR-57 radar,” *J. Appl. Meteorol.*, vol. 3, pp. 58–64, 1964.
- [6] W. L. Eberhard, “Cloud signals from lidar and rotating beam ceilometer compared with pilot ceiling,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 3, pp. 499–512, 1986.
- [7] F. A. Regulations, “Basic VFR weather minimums.” 14 CFR 91.155, pp. 721–722, 2010.
- [8] J. N. Porter and G. X. Cao, “Using ground-based stereo cameras to derive cloud-level wind fields,” *Opt. Lett.* 34, pp. 2384–2386, 2009.
- [9] G. Seiz, E. P. Baltsavias, and A. Gruen, “Cloud Mapping from the Ground : Use of Photogrammetric Methods,” *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 68, no. 9, pp. 941–951, 2002.
- [10] F. M. Janeiro, F. Wagner, and P. M. R. A. M. Silva, “CLOUD BASE HEIGHT ESTIMATION USING A LOW-COST DIGITAL CAMERA,” *XIX IMEKO World Congr.*, pp. 2270–2273, 2009.
- [11] F. M. Janeiro, F. Carretas, K. Kandler, F. Wagner, and P. M. Ramos, “Advances in cloud base height and wind speed measurement through stereophotogrammetry with low cost consumer cameras,” *Measurement*, pp. 1–12, Feb. 2014.
- [12] “Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement,” *JCGM 100*, 2008.
- [13] R. Babari, N. Hautière, É. Dumont, N. Paparoditis, and J. Misener, “Visibility monitoring using conventional roadside cameras – Emerging applications,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 22, pp. 17–28, Jun. 2012.
- [14] J. Andrey, “Relationships Between Weather and Road Safety : Past and Future Research Directions,” *Climatol. Bull.*, vol. 24, no. 3, 1990.

- [15] M. a Delucchi, J. J. Murphy, and D. R. McCubbin, "The health and visibility cost of air pollution: a comparison of estimation methods," *J. Environ. Manage.*, vol. 64, no. 2, pp. 139–152, Feb. 2002.
- [16] W. C. Malm, "Introduction to Visibility," *Color. State Univ.*, 1999.
- [17] H. C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*. Dover, New York: Dover Books on Physics, 1981, p. 470.
- [18] H. Koschmieder, "Theorie der horizontalen Sichtweite." *Beitr. Phys. freien Atm*, vol. 12, pp. 33–53, 1925.
- [19] R. B. Husar, D. M. Tratt, B. A. Schichtel, S. R. Falke, F. Li, D. Jaffe, T. Gill, N. S. Laulainen, F. Lu, M. C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B. N. Holben, C. Gueymard, I. Mckendry, N. Kuring, G. C. Feldman, R. J. Frouin, J. Merrill, D. Dubois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W. E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto, and W. C. Malm, "Asian dust events of April 1998," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, no. 2000, pp. 317–330, 2001.
- [20] C. Seigneur, B. Pun, P. Pai, J.-F. Louis, P. Solomon, C. Emery, R. Morris, M. Zahniser, D. Worsnop, P. Koutrakis, W. White, and I. Tombach, "Guidance for the Performance Evaluation of Three-Dimensional Air Quality Modeling Systems for Particulate Matter and Visibility," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 50, no. 4, pp. 588–599, Apr. 2000.
- [21] B. Schallhart, M. Blumthaler, J. Schreder, and J. Verdebout, "A method to generate near real time UV-Index maps of Austria," *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 8, no. 1, pp. 2143–2161, Feb. 2008.
- [22] W. C. Hinds, *Aerosol Technology*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [23] J. E. Shields, R. W. Johnson, J. G. Baker, M. E. Karr, and A. R. Burden, "Multispectral scattering measurements along extended paths over the ocean surface using an imaging system," *Proc. SPIE 6303, Atmos. Opt. Model. Meas. Simul. II*, 2006.
- [24] F. M. Janeiro, F. Wagner, P. M. Ramos, and A. M. Silva, "Automated Atmospheric Visibility Measurements using a Digital Camera and Image Registration," in *1st IMEKO TC19 International Symposium on Measurements and Instrumentation for Environmental Monitoring*, 2007.
- [25] F. Wagner, F. Janeiro, and A. S. Silva, "Derivation of the Ångström Exponent Using Images Provided by a Low-Cost Digital Consumer Camera," in *EAC 2008 – European Aerosol Conference*, 2008.
- [26] J. Preißler, F. Wagner, J. L. Guerrero-Rascado, and a. M. Silva, "Two years of free-tropospheric aerosol layers observed over Portugal by lidar," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 9, pp. 3676–3686, May 2013.
- [27] D. Rosenfeld, Y. Rudich, and R. Lahav, "Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop," *PNAS Online*, vol. 98, no. 11, pp. 5975–5980, 2001.

- [28] F. M. Janeiro, F. Carretas, K. Kandler, P. M. Ramos, and F. Wagner, "AUTOMATED CLOUD BASE HEIGHT AND WIND SPEED MEASUREMENT USING CONSUMER DIGITAL CAMERAS," *XX IMEKO World Congr.*, no. 1, 2012.
- [29] F. L. Carretas, F. Wagner, P. M. Ramos, and F. M. Janeiro, "Cloud Height Measurement System Based on Stereo Vision with Automated Alignment Correction," in *ConfTele*, 2013, no. 1.
- [30] F. M. Janeiro, F. Carretas, N. Palma, P. M. Ramos, and F. Wagner, "New Stereo Vision Digital Camera System for Simultaneous Measurement of Cloud Base Height and Atmospheric Visibility," in *AGU*, 2013.
- [31] F. Carretas and F. M. Janeiro, "Cloud Height Estimation with a Single Digital Camera and Artificial Neural Networks," in *EGU*, 2014, vol. 16.
- [32] F. Carretas, F. Wagner, and F. M. Janeiro, "ATMOSPHERIC VISIBILITY AND ANGSTROM EXPONENT MEASUREMENTS THROUGH DIGITAL PHOTOGRAPHY," *Measurement*, 2014.
- [33] P. H. Schiller, "The central visual system," *Vision Res.*, vol. 26, no. 9, pp. 1351–1386, Jan. 1986.
- [34] W. E. K. Middleton, *Vision Through the Atmosphere*. Toronto: University of Toronto, 1968.
- [35] B. A. Angstrom and T. Eppley, "The parameters of atmospheric turbidity," *Tellus*, vol. 16, pp. 64–75, 1964.
- [36] G. L. Schuster, O. Dubovik, and B. N. Holben, "Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions," *J. Geophys. Res.*, vol. 111, no. D7, p. D07207, 2006.
- [37] Canon, "Canon 1000D - Manual de Instruções."
- [38] OLYMPUS, "OLYMPUS SP-500 UZ / Manual de instruções."
- [39] Canon, "Canon Rebel XS - Instruction manual," p. xi, 2013.
- [40] *Recommendation ITU-R BT.601-7*. 2011.
- [41] Breeze Systems, "DSLR Remote Pro," [Http://www.breezesys.com/index.htm](http://www.breezesys.com/index.htm). .
- [42] Sabsik, "Cam2Com - Digital Camera Control Software," [Http://sabsik.com/](http://sabsik.com/). .
- [43] Arduino, "Arduino Web Page," [Http://arduino.cc/](http://arduino.cc/). .
- [44] N. Instruments, "Labview," [Http://www.ni.com/labview/pt/](http://www.ni.com/labview/pt/). .
- [45] [Http://www.mathworks.com/products/matlab/](http://www.mathworks.com/products/matlab/), "Matlab - The Language of Technical Computing." .
- [46] MathWorks, "Image Processing Toolbox - Matlab," [Http://www.mathworks.com/products/image/](http://www.mathworks.com/products/image/). .

- [47] Mathworks, “Statistics Toolbox - Matlab,” [Http://www.mathworks.com/products/statistics/](http://www.mathworks.com/products/statistics/). .
- [48] Photozone, “Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS - Retest @ 15MP / Review - Analysis,” [http://www.photozone.de/Reviews/404-canon\\_1855\\_355](http://www.photozone.de/Reviews/404-canon_1855_355). .
- [49] ComputerPhysicsLab, “Canon EF-S 18-55mm barrel distortion analysis,” <http://computerphysicslab.wordpress.com/2009/05/19/canon-ef-s-18-55mm-barrel-distortion/>. .
- [50] Google, “Google Earth,” <https://www.google.com/earth/>. .
- [51] N. A. R. Laboratory, “READY (HYSPLIT),” <Http://www.arl.noaa.gov/notfound.php>. .
- [52] O. Dubovik, A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Muñoz, B. Veihelmann, W. J. van der Zande, J.-F. Leon, M. Sorokin, and I. Slutsker, “Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust,” *J. Geophys. Res.*, vol. 111, no. D11, p. D11208, 2006.



## 9. Lista de Símbolos

$h$	Altura da base das nuvens
$d$	Distância entre câmaras
$\alpha$	Ângulo horizontal descrito pela característica C
$\Delta x$	Deslocamento segundo $x$ da característica C
$\alpha_{x_{pp}}$	Ângulo por <i>pixel</i> segundo $x$ característico da câmara
$C$	Característica da nuvem
$v$	Velocidade do vento à altura das nuvens
$v_x$	Velocidade segundo $x$ do vento à altura das nuvens
$v_y$	Velocidade segundo $y$ do vento à altura das nuvens
$\Delta x_v$	Deslocamento segundo $x$ da nuvem provocado pelo vento
$\Delta t$	Tempo entre fotografias sequenciais
$\alpha_{y_{pp}}$	Ângulo por <i>pixel</i> segundo $y$ característico da câmara
$\Delta y_v$	Deslocamento segundo $y$ da nuvem provocado pelo vento
$dir_v$	Direção do vento à altura das nuvens
$C(x)$	Contraste do objeto à distância $x$ da câmara relativamente ao fundo
$I_F$	Intensidade do fundo da imagem
$I(x)$	Intensidade do objeto à distância $x$ da câmara



$C_0$	Constante do material constituinte do objecto
$C_1$	Contraste do objeto à distância $x_1$ da câmara
$C_2$	Contraste do objeto à distância $x_2$ da câmara
$b_{ext}$	Coefficiente de extinção
$b_{ext}(\lambda_i)$	Coefficiente de extinção no canal com comprimento de onda $i$
$x$	Distância de um objeto genérico
$x_1$	Distância do objeto 1
$x_2$	Distância do objeto 2
$vis_{atm}$	Visibilidade atmosférica
$\lambda$	Comprimento de onda
$\alpha_e$	Expoente de Angström
$L$	Largura da imagem
$W$	Altura da imagem
$\alpha_x$	Ângulo de visão horizontal
$\alpha_y$	Ângulo de visão vertical
$Y$	Intensidade em escala de cinzas
$I_R$	Intensidade do canal vermelho
$I_G$	Intensidade do canal verde
$I_B$	Intensidade do canal azul
$\alpha_1$	Rotação em torno do eixo $X_1$ representado na Figura 23
$\alpha_2$	Rotação em torno do eixo $Y_1$ representado na Figura 23

$\alpha_3$  Rotação em torno do eixo  $Z_1$  representado na Figura 23

$a$  Distância do referencial da câmara direita relativamente ao referencial da câmara esquerda segundo  $Y_1$

$b$  Distância do referencial da câmara direita relativamente ao referencial da câmara esquerda segundo  $Z_1$

$\beta_1$  Rotação em torno do eixo  $X_2$  representado na Figura 23

$\beta_2$  Rotação em torno do eixo  $Y_2$  representado na Figura 23

$\beta_3$  Rotação em torno do eixo  $Z_2$  representado na Figura 23

$t_x$  Parâmetro da matriz  $T$  que corrige a translação segundo  $x$

$t_y$  Parâmetro da matriz  $T$  que corrige a translação segundo  $y$

$\theta$  Parâmetro da matriz  $T$  que corrige a rotação

$T$  Matriz afim que corrige os desalinhamentos

$s$  Parâmetro da matriz  $T$  que corrige a diferenças na escala das câmaras

$x_c$  Posição na fotografia da estrela polar no eixo  $x$

$y_c$  Posição na fotografia da estrela polar no eixo  $y$

$u(i)$  Incerteza na medição de  $i$

$\max_c$  Indicador da qualidade de correlação



