

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Recolha e Análise de Dados para Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones

Bernardo Pessoa Camocho Tavares

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Professor Miguel Brito - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Engenheiro João Gomes Mota - Albatroz Engenharia

Agradecimentos

Este trabalho enquadra-se no projeto de investigação PVCITY (PTDC/EMS-ENE/4525/2014) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

A concretização desta dissertação representa a meta final de um percurso académico, que mais do que o estudo em si, é também formado por quem nos acompanha, apoia e inspira, a quem não poderia deixar de prestar o meu tributo:

Ao João Gomes Mota, orientador desta dissertação, e a toda a equipa da Albatroz, nomeadamente o André Cardeira e a Sandra Antunes, pelo acolhimento e colaboração no decorrer desta dissertação. Desde a integração, aos equipamentos disponibilizados e a uma orientação exemplar, a Albatroz constitui, a meu ver, um exemplo de como o setor empresarial se deve relacionar com o académico. Um grande obrigado pela oportunidade e votos de maior sucesso.

Ao professor Miguel Centeno Brito, também orientador desta dissertação, por toda a mentoria não só neste contexto, como ao longo de todo o curso. Assim como a todos os professores que, como ele, não se deixam ficar pelo seu trabalho, preocupam-se com desenvolver uma relação de proximidade com os alunos, própria à transmissão do seu entusiasmo, dedicação e que, por vezes, servem mesmo de pedras basilares na sua formação, tanto em termos profissionais como pessoais.

À Sara Freitas, pela abertura e entusiasmo com que, de livre vontade, se disponibilizou a colaborar, provendo conselhos e esclarecimentos essenciais à concretização desta dissertação.

A todos os meus amigos, dos mais intemporais aos criados por estas andanças, com quem os risos, momentos e frustrações partilhadas têm o maior significado, com um quê de especial a todos os que viveram comigo a maior aventura no seio académico, o Oficina das Energias, em particular ao Luís Martins e ao Duarte Santos. A todos nós, obrigado e que o futuro nos mantenha unidos!

À Raquel por acreditar, instigar e motivar todas as minhas venturas, nas quais esta dissertação é só mais um exemplo, e que sem ela não teria sido possível. Por todo o carinho e por esta espécie rara de companheirismo, para sempre obrigado.

À minha família, à qual nem numa dissertação à parte poderia abranger tudo o que tenho a agradecer. Mas a quem dirijo-me com especial afeto aos meus pais e avós pelo amor incondicional, por todos os sacrifícios para que nunca me faltasse nada e, em última análise, por me terem provido da subestimada aptidão que é sonhar.

A todos vós, e à FCUL no geral,

Até mais, e obrigado pelos peixes!

Resumo

A ideia da recolha e análise de dados para um estudo de potencial fotovoltaico com recurso a drones nasceu da cooperação entre a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e a empresa Albatroz Engenharia, com o propósito de explorar novas abordagens que promovam a aquisição/instalação conjunta e iniciativas locais de PV. Os drones, além de serem equipamentos cada vez mais acessíveis, possibilitam um levantamento aéreo relativamente descomplicado de uma área extensa, pelo que podem ser usados para analisar inclinações e orientações de vários telhados/fachadas tendo em conta a envolvente. Por conseguinte, definiu-se o objetivo de traçar uma metodologia, que inclua todo o processo desde a recolha de dados com levantamentos aéreos até à obtenção dos resultados de potencial PV.

No estado-de-arte sobre os drones, essencial para fundamentar alguns passos tomados ao longo desta dissertação, são apresentadas as características gerais desta tecnologia, o seu enquadramento legislativo em Portugal, os prós e contras dos vários sensores que neles podem ser incorporados e as diferentes ferramentas usadas na aquisição e análise dos dados.

Atendendo às regras do espaço aéreo, consultaram-se guias e mapas da campanha “Voa na Boa” num processo criterioso para a seleção de um local de estudo para ser sobrevoado, da qual a vila da Venda do Pinheiro resultou como uma opção interessante. Por sugestão da Câmara Municipal de Mafra, consultada no seguimento deste levantamento, foram considerados dois casos de estudo com características distintas: (1) um conjunto de dez moradias, com telhados inclinados, como exemplo de uma aplicação de PV de pequena escala em diversos edifícios; e (2) um complexo escolar e multidessportivo, com telhados horizontais, para testar a solução com o dimensionamento de um sistema PV num edifício de maior escala.

Foram tidos e estudados dois drones, o RS900 e o Phantom 3 Professional, e ensaiados diferentes sensores que os poderiam equipar: tecnologia LiDAR, câmaras térmicas e fotográficas. Acabou por optar-se pelo Phantom 3 Pro e respetiva câmara fotográfica, para modelação dos edifícios com recurso a fotogrametria 3D, uma vez que se considerou o conjunto mais seguro e economicamente acessível. Uma vez definidos os equipamentos e, tendo em conta a legislação relativa aos levantamentos aéreos, planeou-se a missão de voo e preparou-se a solicitação de autorização à AAN, necessária para a realização de um levantamento aéreo com recolha de imagens em Portugal.

Após o levantamento aéreo, e através das fotografias aéreas obtidas, usou-se o *software* Pix4D para a modelação de uma superfície tridimensional (*mesh*). Este modelo foi então importado para o ambiente Rhino 3D onde, com recurso à ferramenta Grasshopper e o *plugin* DIVA, se simulou a radiação solar incidente nas superfícies pretendidas. Nas moradias usou-se a superfície dos telhados, assumindo que estes têm uma inclinação apropriada à instalação de PV; no complexo escolar multidessportivo, usou-se a superfície dos painéis solares, modelados no *software*, dado o telhado horizontal.

Estimou-se o potencial PV, tendo-se chegado a uma energia anual de 90,3 *MWh* no caso das moradias, o suficiente para cobrir três vezes e meia o consumo, considerando o consumo médio no setor doméstico no município de Mafra em 2015 e sem levar em conta o desfasamento entre a produção e o consumo; e de 145 *MWh* por ano, no caso do complexo, o que representa 56,4% das necessidades de energia elétrica do edifício.

Palavras-chave: Drone; Estudo de Potencial PV; Levantamento Aéreo; Fotogrametria; Modelação 3D.

Abstract

The idea of data collection and analysis through drones technology for the study of photovoltaic potential was born from the cooperation between Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa and Albatroz Engenharia company, with the purpose of exploring new approaches that promote the PV installation and local initiatives. The drones, besides being more accessible each day, allow an easy airborne survey of large areas and can analyse inclinations and orientations of several roofs/facades taking into account the surroundings. Having said this, the goal of the present work is to draw a methodology that includes the whole process from the collection of data through airborne survey to having the PV potential results.

In the state of art about drones, essential to justify some further steps along this thesis, it was presented the general characteristics of this technology, their legal framework in Portugal, the pros and cons of different sensors as payloads and the different *software* used in data acquisition and analysis.

Accounting the airspace rules, guides and maps were consulted from the “Voa na Boa” campaign in a judicious process for the selection of a study location, from which the town Venda do Pinheiro was spotted as an interesting place. At the suggestion of Mafra’s municipality which has been consulted regarding this matter, two real cases of study were considered: (1) a set of ten houses, with sloped roofs, as an example of PV application in small scale at several buildings; and (2) a scholar complex with a flat roof, as an example of PV sizing in a building of larger scale.

Two drones were accounted and studied, RS900 and Phantom 3 Professional, and distinct types of sensors were tested: LiDAR technology, thermographic and photographic cameras. Phantom 3 Pro was chosen as well as its photographic camera for modelling buildings with 3D photogrammetry, since this set was considered to offer the most safe and economic option. Once the equipment was defined and, bearing in mind the drones’ legal framework, the flight mission was planned and a request to ANN for an airborne survey in Portugal was prepared.

After the airborne survey and through the acquired aerial photos, the Pix4D software was used for tridimensional modelling (mesh). This model was, then, imported for Rhino 3D environment where, with the help of the Grasshopper tool and the DIVA plugin, the incident solar radiation was simulated in the chosen surfaces. In the houses, the roofs’ surface was used, assuming the roofs’ inclination as appropriate for PV installation; in the school complex, the solar panels surface, modelled in the software, was used, given the fact that its roof is flat.

In the end, the PV potential was calculated, obtaining an annual energy of 90,3 *MWh* in the case of the houses, enough to cover four times their electrical needs, considering 2015’s average consumption for the domestic sector in Mafra and not accounting the time gap between supply and demand; and an annual power of 145 *MWh*, in the education complex case, which represents 56,4% of its electrical needs.

Keywords: Drone; Study of PV Potential; Airborne Survey; Photogrammetry; 3D Modeling.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xix
Abreviaturas	xxi
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Organização da Dissertação.....	3
Capítulo 2 – Estado da Arte	5
2.1. Drones.....	5
2.1.1. Definição e Terminologia	5
2.1.2. Evolução.....	6
2.1.3. Classificação	7
2.1.4. Vantagens e Limitações	8
2.2. Enquadramento Legislativo	10
2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo.....	10
2.2.2. Levantamentos Aéreos.....	11
2.2.3. Lei de Proteção de Dados Pessoais	12
2.3. Fotogrametria.....	12
2.3.1. Definição.....	12
2.3.2. Fotografia.....	13
2.3.3. LiDAR.....	13
2.3.4. Sensores Térmicos	14
2.4. Software.....	15
Capítulo 3 – Levantamento Aéreo.....	17

3.1. Seleção do Local e Objetos de Estudo.....	17
3.1.1. Critérios de seleção	17
3.1.2. Local de estudo	19
3.1.3. Objetos Seleccionados	20
3.2. Seleção do Equipamento.....	21
3.2.1. Drone.....	21
3.2.2. Sensores de Fotogrametria	25
3.2.3. Decisão Final.....	29
3.3. Aspetos Logísticos.....	29
3.4. Planeamento da Missão	30
3.4.1. Pontos de Descolagem/Aterragem	30
3.4.2. Planeamento das Missões.....	31
3.5. Recolha dos Dados	32
Capítulo 4 – Resultados.....	35
4.1. Modelo Mesh - Pix4D	35
4.1.1. Modelo 1 – Moradias	36
4.1.2. Modelo 2 – Complexo.....	40
4.2. Análise PV	43
4.2.1. Caso de Estudo 1 – Moradias.....	44
4.2.2. Caso de Estudo 2 - Complexo.....	53
Capítulo 5 – Conclusões, Metodologia Proposta e Desenvolvimentos Futuros.....	61
5.1. Conclusões.....	61
5.2. Metodologia.....	62
5.3. Desenvolvimentos Futuros	64
Referências Bibliográficas	67
Anexos.....	73
A.1. Primeiro levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados	73
A.2. Segundo levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados	76
A.3. Testes com a Câmara Térmica.....	77
A.4. Formulário – Declaração de Apoio do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.....	79

A.5. Formulário – Declaração de Apoio da Câmara Municipal de Mafra.....	80
A.6. Formulário – Autorização da AAN.....	81
A.7. Planeamento da Missão - Sobreposição de Fotografias.....	82
A.8. <i>Manual Tie Points</i> - Moradias	83
A.9. <i>Manual Tie Points</i> - Complexo.....	85
A.10. Relatório de Qualidade – Moradias	89
A.11. Relatório de Qualidade – Complexo.....	97
A.12. Modelo Grasshopper do Potencial PV em detalhe.....	109
A.13. Valores da Pós-Análise – Moradias.....	110
A.14. Valores da Pós-Análise – Seleção das Moradias	111
A.15. Valores da Pós-Análise – Complexo	112

Lista de Figuras

Figura 2.1: Popularidade das diferentes terminologias de acordo com os dados do Google Trends [16].	5
Figura 2.2: Comparação anual de referências e candidaturas de drones a nível mundial – dados do anuário “ <i>RPAS: The Global Perspective 2016/2017</i> ” [29].	7
Figura 2.3: Quantidades de drones por categoria no ano 2016-2017 a nível mundial [29].	8
Figura 2.4: Drones quadrotors são controlados variando a aceleração em cada rotor para produzir (a) aceleração na direção do <i>pitch</i> ou <i>roll axis</i> ou (b) rotação no <i>yaw axis</i> ; (c) Indicação dos eixos de controlo. Adaptado de [31], [32].	9
Figura 2.5: Exemplo de triangulação de imagens usando imagens da mesma área com perspetivas diferentes (esquerda) e a respetiva reconstrução 3D usando a intersecção dos raios de visão [41].	13
Figura 2.6: Rotação de um espelho que reflete os pulsos laser num padrão consistente de 360° graus [42].	14
Figura 3.1: Mapa Kmz, Campanha "Voa na Boa" [59] – Visão geral do Distrito de Lisboa.....	18
Figura 3.2: Mapa Kmz, Campanha "Voa na Boa" [59] – Visão com maior pormenor em Lisboa e respetivos Heliportos.....	18
Figura 3.3: Limite do Concelho de Mafra (a vermelho) desenhado sobre o Mapa Kmz da Campanha "Voa na Boa" [59] – seleção da Venda do Pinheiro entre a área militar e a zona 2..	20
Figura 3.4: Desenho no <i>Google Maps</i> das áreas de estudo apresentadas no contexto da vila da Venda do Pinheiro.....	21
Figura 3.5: Esquemática do RS900 com o trem de aterragem retraído (esquerda) e em posição de aterragem (direita) [62].	22
Figura 3.6: Diagrama do RS900, com os braços retraídos.....	22
Figura 3.7: À esquerda: montagem do Pixhawk com GPS. À direita: <i>zoom in</i> em que é possível observar a “cama” com amortecedores (a azul), o LED principal que transmite informação ao utilizador do estado do Pixhawk; e seta a estar alinhada com o GPS.....	23
Figura 3.8: À esquerda: rádio para controlo remoto direto dos ESC; À direita: módulo de telemetria para comunicação com o Pixhawk. Também é possível observar o interruptor de segurança colado à estrutura.	24
Figura 3.9: Modelo tridimensional do Trax. Componentes (da esquerda para a direita): sensor LIDAR, baterias (laranja e preto), câmaras visuais (à frente e com a 3ª no canto inferior direito), atrás a motherboard (verde) e câmara térmica (laranja, à esquerda).....	24
Figura 3.10: Diagrama do <i>Phantom 3</i> Profissional.....	25
Figura 3.11: À esquerda: controlo remoto com duas antenas [70] - tecnologia <i>lightbridge</i> ; no centro: <i>Phantom 3</i> em voo; À direita: sistema de posicionamento visual [71].	25
Figura 3.12: LiDAR PUCK VLP-16.....	26

Figura 3.13: FLIR AX8.....	27
Figura 3.14: Áreas a sobrevoar e possíveis locais de descolagem.	30
Figura 3.15: Planeamento de Missão – Área de Estudo 1 (esquerda) e 2 (direita).	32
Figura 3.16: Percurso real do drone controlado manualmente.....	32
Figura 4.1: Visualização das moradias após o processamento inicial.....	36
Figura 4.2: Projecção de um ponto de diferentes imagens (à esquerda) e criação de um MTP (à direita).	37
Figura 4.3: Distribuição dos MTPs no modelo para o caso das moradias.	37
Figura 4.4: Exemplos de pontos não desejados no modelo.....	38
Figura 4.5: Pontos removidos no modelo 1 – moradias.....	38
Figura 4.6: Área de processamento do modelo 1 – Moradias.....	39
Figura 4.7: Modelo <i>Mesh</i> resultante – Moradias.....	40
Figura 4.8: Processamento inicial com informação do trajeto da câmara.	40
Figura 4.9: Primeiro Modelo Mesh 3D, com indicação das zonas em falta.....	41
Figura 4.10: Distribuição das imagens do levantamento terrestre (à esquerda) e distribuição total das imagens (à direita).....	42
Figura 4.11: Fases de preparação para criação do <i>mesh</i> : (a) MTPs; (b) pontos não desejados; (c) área de processamento.....	43
Figura 4.12: Modelo <i>mesh</i> resultante – Complexo.....	43
Figura 4.13: Modelo de Grasshopper para visualização do trajeto do sol e respetivas sombras ao longo do ano.....	45
Figura 4.14: Diagrama do caminho do sol e simulação do sombreamento (a vermelho) a coincidir com o sombreamento real texturizado no próprio modelo.....	46
Figura 4.15: Seleção e enumeração dos telhados das moradias.	46
Figura 4.16: “Módulo de avaliação solar” - Modelo do Grasshopper para cálculo da radiação solar incidente.	47
Figura 4.17: Modelo aglomerador dos módulos de avaliação solar.....	49
Figura 4.18: Visualização dos valores de radiação solar incidente em <i>kWh/m²</i> anuais.....	50
Figura 4.19: Vista em perspetiva da moradia 10 (esquerda) e das moradias 1 e 2 (direita) com escala de 0 a 1900 <i>kWh/m²</i> da radiação solar incidente.....	51
Figura 4.20: Seleção dos melhores telhados e respetivos valores de potencial PV.	52
Figura 4.21: Seleção e enumeração dos telhados do complexo.	53
Figura 4.22: Visualização dos valores de potencial PV em <i>kWh/m²</i> anuais.....	54
Figura 4.23: Comparação de irradiação incidente com painéis com diferentes inclinações.	55

Figura 4.24: Estudo da distância entre <i>arrays</i> de painéis PV.....	56
Figura 4.25: Colocação dos painéis tendo em consideração os sombreamentos no solstício de inverno.....	57
Figura 4.26: Perspetiva do complexo e distribuição de PV.....	57
Figura 4.27: Perspetiva do telhado 11 do complexo com escala de 1000 a 1900 <i>kWh/m²</i> da radiação solar incidente nos painéis solares.	58
Figura 4.28: Sistema PV alternativo para o complexo considerando a maximização da produção PV.....	58

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Categorização de acordo com algumas características dos drones [29].	7
Tabela 2.2: <i>Softwares</i> explorados no decorrer desta dissertação	15
Tabela 3.1: Características da câmara no <i>Phantom 3 Professional</i> .	28
Tabela 4.1: Perdas consideradas para o $PR = 0,8$.	51
Tabela 4.2: Comparação entre o primeiro sistema considerado para o complexo, com foco na eficiência, e o segundo, com foco na produção.	59

Abreviaturas

AAN	Autoridade Aeronáutica Nacional
ANAC	Autoridade Nacional da Aviação Civil
ATP	<i>Automatic Tie Point</i>
BVLOS	<i>Beyond Visual Line of Sight</i>
CNPD	Comissão Nacional de Proteção de Dados
DSM	<i>Digital Surface Models</i>
ESC	<i>Electronic Speed Control</i>
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FLIR	<i>Forward Looking Infrared Cameras</i>
FOV	<i>Field of View</i>
FPV	<i>First Person View</i>
GCS	<i>Ground Control Station</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MTOW	<i>Maximum Take-Off Weight</i>
MTP	<i>Manual Tie Point</i>
NOTAM	<i>Notice to Airman</i>
PaRS	<i>Photogrammetry and Remote Sensing</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PV	Fotovoltaica
RC	<i>Radio Control</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Enquadramento

O relatório “*International Energy Outlook 2017*” apresenta algumas tendências energéticas a nível mundial entre 2015 e 2040: em primeiro lugar, a geração de energia elétrica em rede deverá continuar a crescer, a uma média anual de 1% nos países da OCDE e de 1,9% para os restantes; Por outro lado, também as energias renováveis continuarão a ganhar uma maior participação, sendo que a energia solar e eólica são as que perspetivam um maior crescimento, conforme o uso destas tecnologias se torna mais competitivo com o decurso do tempo, chegando a uma geração prevista de 2500 e 1400 TWh respetivamente [1].

Esta realidade de incremento das necessidades energéticas acompanhado por uma maior contribuição de energias renováveis advém, em parte, de esforços internacionais para dar resposta à questão das alterações climáticas. Entre elas destacam-se, por exemplo, as metas europeias “20-20-20” que definem um objetivo geral até 2020 de: (a) 20% de redução das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990; (b) 20% de quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto e (c) 20% de redução do consumo de energia primária¹. Nos mesmos termos e horizonte de 2020, foram ainda estabelecidos objetivos específicos para Portugal, nomeadamente: 25% de redução no consumo de energia primária; 60% da eletricidade produzida e 31% do consumo de energia final provenientes de fontes renováveis; e substituição de cerca de 10% da energia dos combustíveis atualmente consumidos no sector dos transportes rodoviários por eletricidade [2], [3].

A tecnologia fotovoltaica (PV), formada por células que convertem energia solar diretamente em eletricidade sem qualquer emissão direta de dióxido de carbono, é de interesse estratégico para a concretização destas metas. O PV destaca-se pelo seu ciclo de produção de eletricidade se adequar aos períodos de maior consumo de energia e, em países como Portugal, com irradiações globais anuais entre 1600 e 2200 kWh/m^2 e entre 2200 e 3100 horas de sol por ano [4], [5], pela disponibilidade de recurso [3]. Outra vantagem do PV está no seu potencial para aumentar a produção descentralizada de eletricidade, ou geração distribuída [3]. De acordo com a definição proposta por Ackermann [6], geração distribuída são fontes de geração de energia elétrica ligadas diretamente à rede de distribuição, do lado da rede ou do consumidor, em oposição a estarem ligadas à rede de transmissão de energia. Este tipo de geração tem recebido atenção crescente devido a vários motivos, incluindo as vantagens para a rede elétrica que, por exemplo, ao produzir/consumir localmente exige menos investimento para a transmissão de energia. Porém no caso do PV a principal vantagem passa provavelmente pela economia de espaço; a potência de um sistema PV é diretamente proporcional à área que ocupa, pelo que, comparativamente a outras tecnologias possui uma densidade energética por área relativamente baixa ($0,02 kW/m^2$). Todavia, o PV pode ser integrado em espaços não aproveitados em edifícios, como telhados ou fachadas, eliminando assim a necessidade de ocupação de terreno adicional, que teria um impacto/custo maior [7].

¹ Relativamente ao Baseline 2007, uma projeção do consumo para 2020 por aplicação do modelo PRIMES da Comissão Europeia.

1.2. Motivação

Dado o enquadramento descrito, a adoção de PV parece fazer sentido numa ótica de estratégia energética e ambiental. Contudo, quando se analisa a disseminação desta tecnologia a um nível de geração distribuída em pequena e média escala, i.e., em ambientes residenciais e comerciais, contexto em que se insere este trabalho, devem considerar-se outros fatores, nomeadamente de carácter comportamental.

A compra de um sistema PV é, tipicamente, uma decisão de alto envolvimento, ou seja, que requer que a pessoa esteja disposta a investir algum esforço consciente no processo de tomada de decisão [8]. Neste tipo de processo, as pessoas dedicam maior esforço cognitivo na decisão consoante as suas necessidades são afetadas por esta [9]. Consoante a pessoa, a instalação de um sistema PV pode corresponder a várias necessidades simultaneamente [10]: subsistência - se consideradas as alterações climáticas e a sobrevivência a longo prazo da própria humanidade; participação - existindo envolvimento social, como na colaboração, partilha de conhecimentos e opiniões entre amigos ou vizinhos que também possuam PV; criação - no que diz respeito, por exemplo, ao melhoramento da casa; identidade - ao identificar-se com alguém preocupado com o ambiente e a sustentabilidade; liberdade - ao adquirir relativa independência de empresas de energia. Relativamente aos benefícios de poupança e investimento associados à aquisição de sistemas PV, é dinheiro que os consumidores podem, eventualmente, usar para satisfazer outras necessidades [8].

Assim sendo, e para fomentar a disseminação da tecnologia PV neste ambiente, é fundamental a promoção destes pontos comportamentais. A consciencialização para a temática da sustentabilidade, embora importante, não basta, devendo ser acompanhada de estratégias que promovam a componente social e, claro, que potenciem os ganhos económicos. Estas duas vertentes podem inclusivamente ser associadas, como por exemplo, na forma de iniciativas comunitárias para a aquisição e instalação de PV conjunta, amplificando o “ganho social” e reduzindo os custos da aquisição, à partida, através da compra de maiores quantidades e da partilha de custos de engenharia comuns a todos os projetos vizinhos.

Diversas nomenclaturas e modelos de gestão já existem para iniciativas deste tipo: cooperativas, em que os membros investem conjuntamente em projetos; gestão com interesses ou filantrópicos através de associações de moradores ou outras instituições; fundos de investimento, ações ou até parte física da instalação para fazer representar interesses comunitários em grandes projetos privados. Infelizmente, existem várias barreiras à proliferação destas iniciativas: de cariz legal, financeiro, manutenção ou até a própria natureza técnica e complexidade do tema. Estas barreiras podem facilmente originar reservas em algumas comunidades em tornarem-se envolvidas [11].

Este é um desafio para o qual é interessante explorar novas abordagens. Métodos que permitam, com relativo pouco esforço, apresentar visualmente os projetos, com números concretos que permitam tirar o melhor proveito possível dos sistemas PV e que simplifiquem o processo posterior, têm maiores possibilidades de entusiasmar e cativar este tipo de iniciativas.

Foi esta a ideia que motivou o tema de dissertação de recolha e análise de dados para um estudo de potencial fotovoltaico com recurso a drones, que nasce da cooperação entre a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) e a empresa Albatroz Engenharia, pretendendo-se tirar proveito do *know-how* e recursos de ambos, desde do saber académico na área da energia da FCUL à experiência da Albatroz no uso de drones para investigação.

Os drones, para além de serem equipamentos cada vez mais acessíveis – em parte, devido ao franco crescimento do seu mercado que se prevê que ainda venha a duplicar de valor entre 2016 e 2022 [12] –, possibilitam um levantamento aéreo relativamente descomplicado de uma área extensa, pelo que podem ser usados para analisar inclinações e orientações de vários telhados/fachadas tendo em conta características circundantes: topográficas, sombreamento de outros edifícios ou estruturas como, por exemplo, chaminés, equipamentos de ar condicionado ou até parabólicas. Com isto, perspectiva-se que a utilização desta tecnologia forneça uma metodologia interessante e vantajosa para estimar o potencial fotovoltaico em comunidades, como bairros, aldeias ou vilas, desbloqueando várias das possibilidades até aqui discutidas e, podendo até, contribuir para um maior uso de PV.

Considerando as barreiras anteriormente descritas quanto ao desenvolvimento de iniciativas comunitárias, contactaram-se também várias autarquias, dado que, enquanto órgãos de interesse no desenvolvimento local, têm maiores possibilidades de tirar proveito dos resultados deste trabalho e, eventualmente, propulsionarem o desenvolvimento deste tipo de iniciativas locais. No final, acabou por ser a Câmara Municipal de Mafra a aceitar este desafio, tornando este concelho o local de escolha para um exemplo prático da aplicação da metodologia desenvolvida nesta dissertação.

1.3. Objetivos

O objetivo desta dissertação é definir uma metodologia para avaliação do potencial PV, num ou vários edifícios em simultâneo, usando drones. Esta metodologia inclui todo o processo que passa pela recolha de dados, i.e., teste e seleção das tecnologias a serem usadas, preparação da missão e levantamento aéreo em si e termina no tratamento e análise dos resultados recolhidos para um dado estudo PV.

Para a definição desta metodologia, pretende-se abordar dois casos de estudo com diferentes características: 1) a análise de potencial PV de telhados de um conjunto de casas, considerando a aplicação de PV de pequena escala em diversos edifícios; e 2) dimensionamento de um sistema PV numa escola, para um contexto de aplicação de PV de média escala num único edifício de maiores dimensões.

1.4. Organização da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. O primeiro e presente capítulo introduz a dissertação, apresentando o contexto em que se insere, fundamentando as suas motivações e definindo os objetivos que se pretendem alcançar.

O segundo capítulo serve de enquadramento teórico para a fase do planeamento de voo. Começa-se por introduzir a temática dos drones, seguindo-se de vários tipos de sensores para fotogrametria, as ferramentas disponíveis e a legislação aplicável em Portugal.

O terceiro capítulo diz respeito ao levantamento aéreo, isto é, todo o processo desde a preparação - que inclui o teste de diferentes sensores, seleção do equipamento, do local de estudo e os requisitos legais envolvidos - até as missões de recolha de dados em si.

No quarto capítulo descreve-se a metodologia empregue na análise dos dados obtidos, recorrendo principalmente aos *softwares* Pix4D e Rhino com Diva e Grasshopper, e apresentam-se os resultados obtidos.

No quinto e último capítulo, apresentam-se conclusões gerais da dissertação, propõe-se uma metodologia final para avaliação PV e, por fim, discutem-se possíveis desenvolvimentos futuros e aspetos que podem ser melhorados no trabalho apresentado.

Capítulo 2 – Estado da Arte

Os drones são uma temática extensa que apresenta várias possibilidades por onde esta dissertação poderia evoluir: a começar pela escolha do drone, dos seus sensores, *software*, local e procedimento do voo. Os conteúdos teóricos gerais sobre estas matérias são imprescindíveis para o processo de tomada de decisões, em particular numa dissertação que inclui a aquisição de dados com trabalho de campo e pretende englobar todo o processo até à análise final dos resultados. Como tal, neste Capítulo 2 apresentam-se as noções necessárias para o desenvolvimento dos próximos capítulos, não só a nível técnico, como também a nível legal, para o cumprimento da legislação referente aos drones em Portugal.

2.1. Drones

2.1.1. Definição e Terminologia

Os drones são conhecidos por diferentes nomes, empregues por entidades distintas no setor aeronáutico, entre eles: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, *Unmanned Aircraft System (UAS)* e *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)*, ou só *RPA* (que exclui a estação terrestre de controlo, ou *Ground Control Station (GCS)*, e outros componentes do sistema necessários ao voo). “*RPAS*” é o mais usado no contexto formal e internacional, sendo empregue, por exemplo, pela *International Civil Aviation Organization (ICAO)*, Eurocontrol e na própria lei portuguesa [15], [17]. Contudo, o mais popularmente usado é o “drone”, sendo possível confirmar a sua popularidade na Figura 2.1, que, recorrendo a dados da ferramenta Google Trends [16], apresenta um interesse crescente neste termo desde 2010, atingindo o maior pico em Dezembro de 2016. Embora os “drones” tenham sofrido uma conotação negativa devido à sua aplicação militar [17] – motivo que levou várias entidades a distanciarem-se desta terminologia –, a sua denominação abrange todo o tipo de aeronaves não tripuladas e, por via do seu reconhecimento, será o termo empregue nesta dissertação.

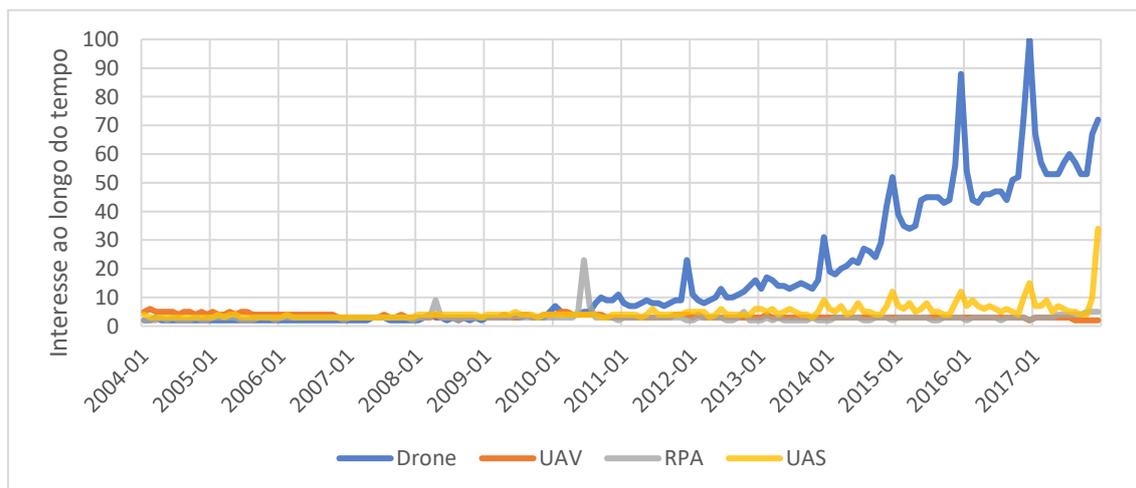


Figura 2.1: Popularidade das diferentes terminologias de acordo com os dados do Google Trends [16].

A principal característica de um drone é que o diferencia de uma aeronave convencional é o facto de não existir um piloto a bordo da aeronave. Isto não implica que, por vezes, a quantidade de responsáveis pelo seu voo não possa até ser superior ao normalmente necessário para uma

aeronave convencional. O GCS pode estar no terreno ou até tratar-se de um centro de controlo para sistemas maiores (como, por exemplo, com o protótipo de asa solar "Helios", da NASA [18]). Em sistemas mais económicos, os instrumentos podem até ser totalmente combinados num único comando remoto [19].

2.1.2. Evolução

Inicialmente, os drones nasceram e desenvolveram-se em contexto militar [20], tendo como objetivo os chamados “três Ds” – missões *dull*, *dirty* e *dangerous* (maçadoras, sujas e perigosas) em que a operação com pilotos humanos seria de alto risco. São exemplo o drone-alvo de A.M. Low em 1916, o "Avião Automático" dos irmãos Hewitt-Sperry Wright também em 1916, o drone-alvo *Queen Bee* na *Royal Navy* em 1933 e os *Firebees* na *USAF - United States Air Force* em 1972 [20].

A *US National Aeronautics and Space Administration* (NASA) desempenhou um papel importante ao atrair o interesse da comunidade científica. Ao utilizar drones para a amostragem atmosférica de alta altitude no programa “Mini-Sniffer” na década de 70-80 (embora com sucesso limitado) e, principalmente, com o programa ERAST - *Environmental Research Aircraft and Sensor Technology* – na década de 90, a NASA estimulou o desenvolvimento e miniaturização de sensores mais acessíveis que, por sua vez, viria a tornar o setor mais atraente e viável para o envolvimento civil e comercial. Inspiraram-se então os esforços de numerosas organizações para desenvolver e modificar drones para as suas próprias necessidades, conduzindo rapidamente a uma “era do drone ‘do-it-yourself’ (DIY)” com soluções e modelos cada vez mais *low-cost* [21].

As versões *Open Source* dos drones proliferaram após o aparecimento em 2009 do controlador de voo *ArduPilot*, pela empresa americana de desenho e fabrico de drones 3DR (*3D Robotics*), baseado na plataforma *open source Arduino* [22]. O *Arduino* é uma plataforma de prototipagem e das principais “ferramentas” que impulsionaram o Movimento *Maker*, uma extensão mais tecnológica da cultura DIY, que teve origem em janeiro de 2005 com o lançamento da revista “*Maker*” nos EUA [23], pelo que se pode dizer que este desenvolvimento com os drones se deveu, em parte, ao dito movimento.

O *ArduPilot* é um módulo de autopiloto, ou o controlador de voo, que recebe informações de diversos sensores/*inputs* (como GPS ou acelerómetros) e, após processamento, envia informação para os *outputs* (como os motores). É, por isso, o “cérebro” do drone. É constituído por PCB com processador *ATMega*, é completamente programável, possui um circuito de *switch* para alternar entre o controlo RC e o autopiloto e permite, por exemplo, definir vários pontos GPS de passagem (incluindo a altitude) para controlar a navegação (através de leme e aceleração), ativar a câmara ou outros sensores. A placa foi ainda sucedida pelos APMs e o Pixhawk em 2013 [24]–[26]. O Pixhawk, por sua vez, é um projeto independente de *open-hardware* que teve início em 2009 no *Computer Vision and Geometry Lab of ETH Zurich* (Instituto Federal da Tecnologia Suíço). O *hardware* foi lançado em 2013 em colaboração com a 3DR [22], [27].

Por serem *user-friendly* e *open-hardware*, controladores deste tipo possibilitaram o fabrico por outras empresas, aumentando a oferta e diminuindo o preço, ajudando à disseminação destes controladores e dos drones em si [22], [28].

Esta explosão no desenvolvimento dos drones pode ser observada na Figura 2.2, traçada com base nos dados apresentados no anuário “*RPAS: The Global Perspective 2016/2017*” da *UVS International* [29], que representa os fabricantes de drones, subsistemas, componentes críticos e

equipamento associado, assim como serviços, centros académicos e de investigação associados. Através destes dados, verifica-se a tendência contínua de crescimento no número de produtores e investigadores de drones; de drones referenciados, com apenas 544 em 2005 para um pico de 2115 em 2015; e do total de pedidos de registo face aos militares: enquanto em 2005 as candidaturas militares representavam 53% do total, em 2016 já só representam 28%.

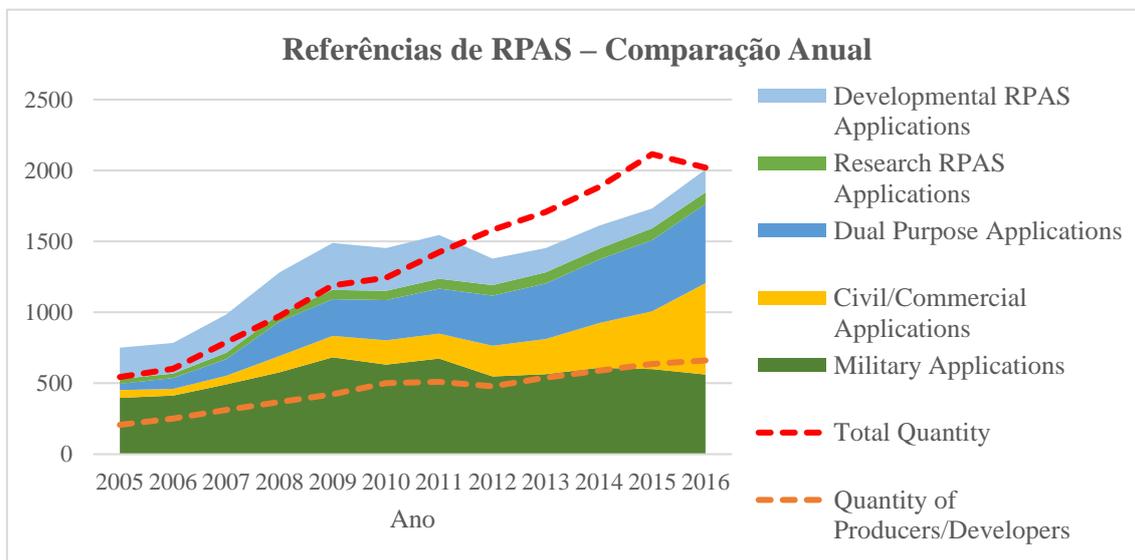


Figura 2.2: Comparação anual de referências e candidaturas de drones a nível mundial – dados do anuário “RPAS: The Global Perspective 2016/2017” [29].

Em termos do desenvolvimento de drones por país, estão identificados 59 países produtores de drones, sendo que os EUA lideram com quase 500 drones referenciados, seguidos da China, com menos de metade, e pela França, Israel e Rússia em, aproximadamente, pé de igualdade. Portugal possui 16 drones referenciados no universo de 652 na Europa, cerca de 2,45% em comparação.

2.1.3. Classificação

Existem diversas formas de classificar RAPS. Uma forma é, por exemplo, pelo tipo de asa: fixa ou rotativa. As asas fixas descolam/aterram horizontalmente e as rotativas verticalmente. As asas rotativas podem ser classificadas de acordo com a quantidade de rotores, como: *single rotors*, *coaxial*, *quadrotors* e *multi-rotors*. Contudo, não existindo categorização *standard* para todos os RAPS entre países e diferentes tipos de entidade, optou-se neste trabalho por usar a classificação usada por *van Blyenburgh* [30], que é também usada nos anuários da *UVS International* [29]. Esta classificação encontra-se especificada na Tabela 2.1. e funciona em função do alcance, altitude de voo, duração e do *Maximum Take-Off Weight* (MTOW).

Tabela 2.1: Categorização de acordo com algumas características dos drones [29].

	Acrónimo	Alcance [km]	Altitude de Voo [m]	Duração [horas]	MTOW [kg]
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,025
Micro	μ	< 10	250	1	> 5

Mini	Mini	< 10	300	< 2	< 30
Close Range	CR	10 - 30	3000	2 - 4	150
Short Range	SR	30 - 70	3000	3 - 6	200
Medium Range	MR	70 - 200	5000	6 - 10	1250
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8000	10 - 18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 - 9000	0,5 - 1	350
Long Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14000	24 - 48	1500
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2000	20000	24 - 48	12000
Unmanned Combat Air Vehicle	UCAV	aprox. 1500	10000	aprox. 2	10000
Stratospheric	STRA	> 2000	20000 - 30000	> 48	250
Exospheric	EXO	TBD ²	> 30000	TBD ³	TBD ³
Optionally Piloted Aircraft	OPA	-	-	-	

Para uma melhor compreensão das quantidades de drones referenciados por cada categoria, a UVS Internacional também disponibiliza o gráfico da Figura 2.3, onde se pode observar a predominância dos Micro e Mini, presumivelmente na sequência da disseminação *open source* e pelo menor custo associado a estes drones.

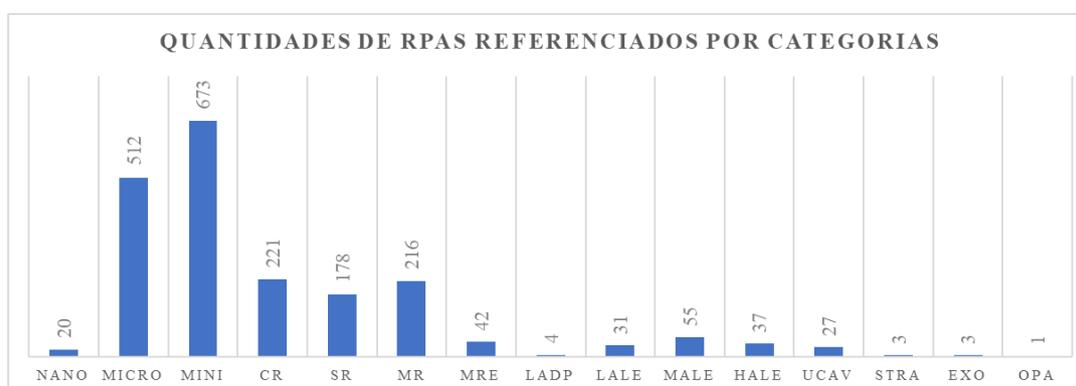


Figura 2.3: Quantidades de drones por categoria no ano 2016-2017 a nível mundial [29].

2.1.4. Vantagens e Limitações

Os drones têm bastantes vantagens relativamente a voos tripulados, que começam pela sua principal característica de não possuírem ninguém a bordo: não comprometem a vidas em situações de alto risco, por exemplo, em situações de desastre natural, montanhosas ou vulcânicas; permitem voar em zonas de outra maneira inacessíveis, como de baixa altitude ou perto de objetos/edifícios; e é possível reduzir problemas derivados de limitações psicológicas de pilotos humanos.

² TBD = To Be Defined

Dependendo da aplicação, mas principalmente em aplicações de pequena escala, outra grande vantagem pode ser o custo comparativamente aos custos associados à manutenção e voo de uma aeronave. Permite também uma recolha de dados em tempo real, como transmissão de imagem e vídeo para o GCS. Usando autopiloto através de GPS, também é possível o planeamento prévio de voos precisos para garantir uma cobertura e sobreposição de imagens otimizada às necessidades pretendidas.

Os drones de asas rotativas, por descolarem/aterrarem verticalmente, não requerem uma pista de decolagem. Entre os vários drones de asa rotativa, os *quadrotors* (Figura 2.4) têm obtido maior interesse por (1) permitirem o controlo direto da velocidade dos motores, para cada rotor, para controlo do veículo, simplificando o *design* e manutenção ao eliminar sistemas de controlo mecânicos³, (2) o uso de quatro motores, individualmente mais pequenos, evita o uso de um único motor principal maior. Motores pequenos reservam menos energia cinética durante o voo – permitindo maior controlo e tempo de recuperação após incidentes - e podem ser protegidas com molduras protetoras, evitando impacto das hélices em voo *indoors* e outros ambientes com obstáculos [31].

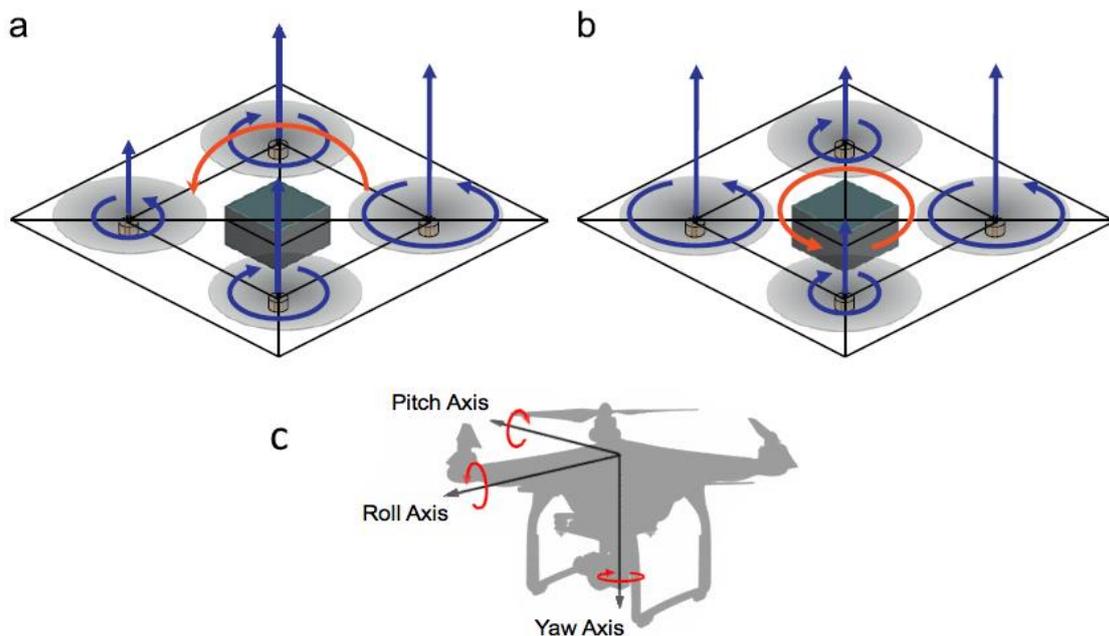


Figura 2.4: Drones quadrotors são controlados variando a aceleração em cada rotor para produzir (a) aceleração na direção do *pitch* ou *roll axis* ou (b) rotação no *yaw axis*; (c) Indicação dos eixos de controlo. Adaptado de [31], [32].

Tal como existem vantagens por os drones não serem tripulados, também existem desvantagens. A principal preocupação é em cenários imprevisíveis, como falhas no sistema ou aparecimento inesperado de um obstáculo, que requerem a sensibilidade e inteligência de um piloto. Esta preocupação agrava-se mais quando, em muitos locais, existe escassez de regulamentação que

³ Os sistemas com um motor requerem um rotor principal e um na cauda, enquanto os de dois rotores (ou *coaxial*) têm de ser ambos montados no mesmo eixo e têm de rodar em direções opostas, aumentando assim a complexidade mecânica.

evite a ocorrência de incidentes, como pela definição de regras para a operação de drones e do tipo de espaços aéreos que admitam o seu voo.

2.2. Enquadramento Legislativo

2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo

Dada a realidade do crescimento no uso substancial de drones, tem-se vindo a tornar urgente a sua regulamentação, dado que a sua operação massiva desregulada pode afetar negativamente a segurança operacional da navegação aérea, permitir a sua utilização para a prática de atos de interferência ilícita e ainda pôr em causa a segurança de pessoas e bens à superfície. Nesse sentido, em Portugal, foi publicado no Diário de República a 14 de dezembro de 2016 o novo regulamento de condições de operação aplicáveis à utilização do espaço aéreo por drones, que entrou em vigor em 23 de Janeiro de 2017 [15].

Não existindo ainda, a nível internacional ou europeu, legislação harmonizada especificamente aplicável para a utilização e operação de drones, torna-se necessária esta regulamentação por parte dos Estados que, como estabelecido na Convenção de Chicago de 7 de dezembro de 1944, possuem soberania completa e exclusiva sobre o espaço aéreo, e que refere ainda, no artigo 8.º, que *“As aeronaves suscetíveis de ser comandadas sem piloto só poderão sobrevoar sem piloto o território de um Estado contratante mediante uma autorização especial desse Estado e nas condições estipuladas nessa autorização. Cada Estado contratante compromete-se a tomar medidas necessárias para que o voo das aeronaves sem piloto sobre regiões abertas às aeronaves civis seja regulado de modo a evitar qualquer perigo para as aeronaves civis.”* [33].

Uma das regras gerais deste regulamento é a que confere liberdade para efetuar voos diurnos, à linha de vista, até uma altura de 120 m (400 pés) sem necessidade de emissão de um *Notice To Airman* (NOTAM), nos casos em que as aeronaves não se encontram a voar em áreas sujeitas às restrições ou na proximidade de infraestruturas aeroportuárias, ou seja, em espaço aéreo não controlado (Classe “G”) [15]. Esta limitação vertical é concordante com o Regulamento de Execução (UE) n.º 923/2012, da Comissão, de 26 de setembro de 2012, e justifica-se pelo facto de as aeronaves tripuladas voarem a uma altura mínima de 150 m (500 pés) acima do nível do solo nos espaços de Classe G, exceto em manobras de aterragem e descolagem, ou quando especificamente autorizadas pela autoridade competente [34]. Os drones podem, no entanto, evoluir verticalmente até à altura máxima/topo de um obstáculo, mesmo se acima dos 120 metros, caso se encontrem a voar em áreas cujas características e limites laterais constem nas publicações de informação aeronáutica nacionais. Desta maneira podia-se, por exemplo, superar uma ravina praticamente vertical. Contudo não deve afastar-se, horizontalmente, mais de 75 metros do obstáculo [15].

A esta regra geral, juntam-se várias restrições que dependem de caso para caso. Por exemplo [33]:

- As consideradas “aeronaves brinquedo” estão sujeitas a limites de altura mais restritos, não devendo exceder os 30 metros de altura (100 pés).
- O voo das aeronaves é proibido nos seguintes espaços aéreos de dimensões definidas: onde se encontrem sedeados órgãos de soberania, embaixadas e representações consulares, instalações militares, instalações de força e serviços de segurança, locais onde decorram missões policiais, estabelecimentos prisionais e centros educativos da Direção-Geral de Reinserção e Serviços Prisionais, exceto quando devidamente autorizadas pelas entidades representativas desses órgãos.

- Nas Áreas de Proteção Operacional⁴ - delimitadas consoante a sua distância ao aeródromo - não são permitidos voos de drones acima de 30, 60 e 80 metros, respetivamente, para as áreas 1, 2 e 3. Com a mesma condição à anteriormente descrita, no caso de um obstáculo com altura máxima/topo superior. As operações acima das alturas mencionadas anteriormente carecem da autorização da Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC). O voo não é permitido de todo no caso da Área Proibida, que abrange o aeródromo, exceto outorgado/sob responsabilidade do operador de aeródromo.
- Carecem ainda de autorização da ANAC: voos noturnos; de operações BVLOS (além da linha de vista); o sobrevoo de concentrações de mais de 12 pessoas; drones com máxima operacional superior a 25kg; voos em que, no raio de 1 km, se encontrem heliportos (utilizados em missões de proteção civil; de entidades públicas com funções de ordem pública, segurança, fiscalização e investigação criminal; e hospitalares utilizados exclusivamente em missões de emergência médica).
- Excepcionalmente não carecem de necessidade de autorização os drones que, cumulativamente, possuam massa máxima operacional igual ou inferior a 1kg; operem em BVLOS; não excedam a altura de 5 metros (16 pés) acima da superfície; estejam munidos de equipamento FPV; o voo se situe num círculo de raio de 100 metros, com centro no piloto remoto; voe afastado de pessoas e bens; e seja realizado em espaço delimitado que evite o risco de colisão com pessoas e bens de terceiros. Esta exceção parece destinar-se à atividade de corridas de drones.

O regulamento remete a violação como uma contraordenação aeronáutica civil grave ou muito grave, que podem ir de 250 euros de mínima para uma contraordenação grave, no caso de negligência de uma pessoa singular, até 250 mil euros de máxima se para uma contraordenação muito grave praticada por uma grande empresa, em caso de dolo.

Este regulamento, apelidado de “Lei dos drones” pelos meios de comunicação social, trouxe alguma relutância pelo facto de não obrigar ao registo de propriedade, tornando mais difícil responsabilizar alguém em casos que se justifique. Outra crítica passa pela omissão de qualquer idade mínima legal para a operação destes aparelhos [35].

Para finalizar, e como referido no início deste regulamento, realça-se que este não afasta a necessidade de cumprimento de outros regimes jurídicos aplicáveis. O melhor exemplo passa pela utilização massiva de equipamentos, associados aos drones, destinados à recolha de imagens e outros dados. Neste caso, o regulamento menciona a Lei de Proteção de Dados Pessoais e a necessidade de autorização da Autoridade Aeronáutica Nacional (AAN), que são tratados ainda nesta secção.

2.2.2. Levantamentos Aéreos

A execução de fotografia ou filmagem sobre território nacional, através de plataformas aéreas, bem como a sua divulgação, carece de autorização da AAN. Os levantamentos aéreos não são apenas por fotografia e filmagens aéreas tradicionais, mas também por outros sensores, com ou sem impressão de movimento, para produção de conteúdos audiovisuais, independentemente da

⁴ As Áreas de Proteção Operacional destinam-se a garantir os voos de RPA dentro das zonas de Controlo de Tráfego Aéreo (CTR) - áreas delimitadas que têm como principal objetivo proteger as aeronaves nas duas fases de voo mais perigosas: a descolagem e aterragem - sem comprometer a segurança operacional do tráfego aéreo a chegar e a partir dos aeródromos.

tecnologia utilizada, obtida através de um equipamento instalado ou transportado em plataforma aérea, devidamente preparada e homologada para o efeito [36].

2.2.3. Lei de Proteção de Dados Pessoais

A Lei de Proteção de Dados Pessoais tem como objetivo a proteção das pessoas singulares quanto ao tratamento e circulação transparente de dados pessoais e defende o estrito respeito pela reserva da vida privada [37]. A responsabilidade de intervenção desta lei cabe à Comissão Nacional de Proteção de Dados (CNPd), uma entidade administrativa independente com poderes de autoridade, que funciona junto da Assembleia da República [38].

Para efeitos desta lei, entende-se por:

- **Dados pessoais:** qualquer informação, de qualquer natureza e independentemente do respetivo suporte, incluindo som e imagem, relativa a uma pessoa singular identificada ou identificável («titular dos dados»); é considerada identificável a pessoa que possa ser identificada direta ou indiretamente, designadamente por referência a um número de identificação ou a um ou mais elementos específicos da sua identidade física, fisiológica, psíquica, económica, cultural ou social.
- **Tratamento de dados pessoais:** qualquer operação ou conjunto de operações sobre dados pessoais, efetuadas com ou sem meios automatizados, tais como a recolha, o registo, a organização, a conservação, a adaptação ou alteração, a recuperação, a consulta, a utilização, a comunicação por transmissão, por difusão ou por qualquer outra forma de colocação à disposição, com comparação ou interconexão, bem como o bloqueio, apagamento ou destruição.

Entre os vários requisitos colocados à recolha e tratamento de dados destaca-se, no contexto dos drones na recolha de dados pessoais diretamente do titular, o direito à informação (art. 10.º), nomeadamente quanto: à identidade do responsável pelo tratamento e as finalidades do tratamento. Porém, é apontado que a obrigação de informação pode ser dispensada, mediante disposição legal ou deliberação da CNPD, (entre outros) em casos em que o tratamento de dados tem finalidades estatísticas, históricas ou de investigação científica ou em casos que a informação do titular dos dados se revele impossível ou implicar esforços desproporcionados [37].

2.3. Fotogrametria

2.3.1. Definição

A fotogrametria pode ser definida como a ciência de obter, medir e interpretar informação confiável sobre as propriedades das superfícies e objetos sem contacto físico com os mesmos [39].

Relacionando-se com a deteção remota, a principal diferença entre ambas reside na sua aplicação: enquanto a primeira produz mapas e posições tridimensionais precisas, a deteção remota especializa-se na interpretação de imagens para extração de informação sobre superfícies terrestres e marítimas. Ambas as áreas se associam e fornecem informação essencial para os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) [39].

Com novas aplicações de curta distância, combinações de fotogrametria aérea com terrestre, aplicações em tempo real e com o surgimento de soluções *low-cost*, o uso de plataformas de medição de fotogrametria montadas em drones tem-se tornado uma ferramenta cada vez mais

relevante. Embora, à partida, qualquer sensor possa ser acoplado a um drone, os mais recorrentes são câmaras de vídeo, térmicas, infravermelhos, sistemas LiDAR, ou uma combinação das anteriores [40].

2.3.2. Fotografia

A fotografia aérea é uma área central da fotogrametria, produzindo imagens que podem ser interpretadas diretamente. Já a integração destas em mapas não é tão direta, sendo necessários alguns passos de processamento prévio para a georreferenciação dos dados. Com mais do que uma imagem é também possível obter informações 3D, recorrendo a um método de triangulação (*stereo*) que permite a triangulação de diferentes perspetivas do mesmo ponto (Figura 2.5).

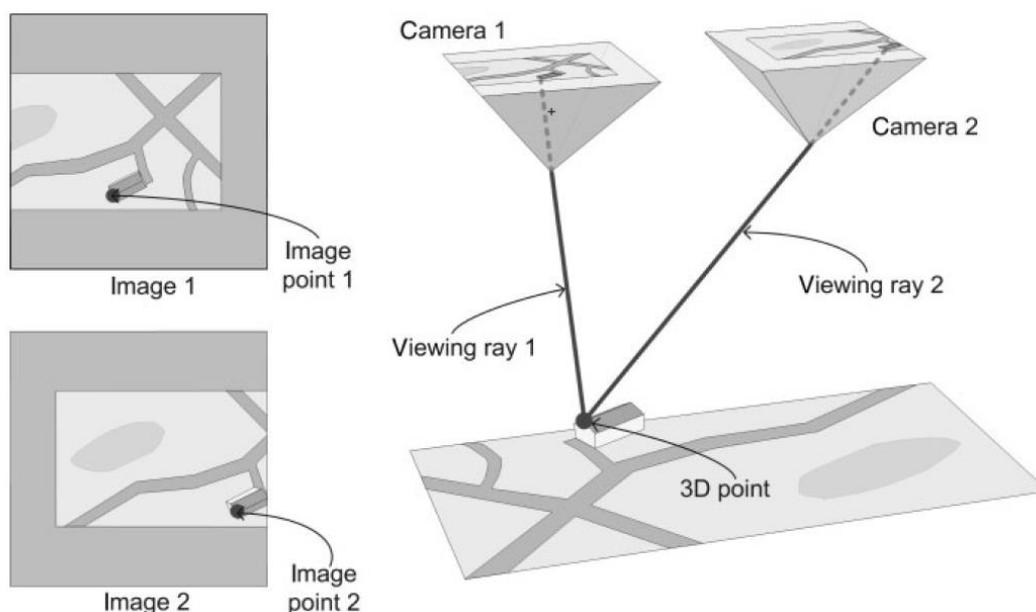


Figura 2.5: Exemplo de triangulação de imagens usando imagens da mesma área com perspetivas diferentes (esquerda) e a respetiva reconstrução 3D usando a intersecção dos raios de visão [41].

Tipicamente, as câmaras usadas para fotografia aérea têm uma geometria interna altamente calibrada e muito pouca distorção de lente, de forma a ser possível extrair informação confiável do mundo real. Para se poder proceder a mapeamentos, é também importante georreferenciação da câmara na altura da fotografia, ou seja, a posição e altitude da câmara. Uma das formas mais simples de se fazer esta aquisição é pela inclusão de *hardware* na câmara para GPS e IMU (*Inertial Measurement Unit*, usualmente composto por acelerómetros e giroscópios) [41].

Outra metodologia relevante passa pela definição de pontos terrestres de controlo (*ground control points*), pontos assinalados no terreno e com a localização/coordenadas conhecidas, permitindo uma maior relação entre as imagens e o mundo real. Também é possível o recurso a vídeo para mapeamento, sendo particularmente útil em situações mais dinâmicas.

2.3.3. LiDAR

Os sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*) emitem pulsos laser próximos dos infravermelhos com alta frequência - tipicamente entre 10 e 100 mil pontos por segundo - através

da rotação de um espelho, ou prisma, que reflete estes pulsos num padrão consistente (Figura 2.6). A distância (d) entre o LiDAR o objeto refletor é então computacionalmente calculado através do tempo que o pulso demora a retornar do objeto desde que é emitido ($\frac{\Delta t}{2}$) e a velocidade da luz (c):

$$d = c \frac{\Delta t}{2} \quad (2.1)$$

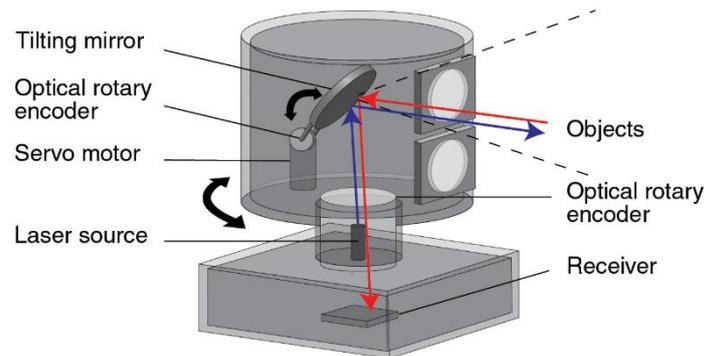


Figura 2.6: Rotação de um espelho que reflete os pulsos laser num padrão consistente de 360° graus [42].

Desta forma, é possível uma medição direta e eficiente de coordenadas 3D (x , y , z) de superfícies de pontos em terrenos, edifícios, vegetação e até linhas elétricas. É também possível georreferenciar cada um destes pontos recorrendo, tal como na fotogrametria, a um conjunto de GPS/IMU, e extrair outro tipo de informação, como a refletividade da superfície em cada ponto [41], [43].

Associados aos drones, estes sistemas são capazes de sondar grandes áreas com varrimentos, tipicamente, com sobreposição igual ou superior a 20%, gerando nuvens com vários milhões de pontos 3D por quilómetro quadrado [43].

Em comparação com o uso de câmaras convencionais em fotogrametria, e embora não produza imagens que ajudem na identificação visual, o uso de LiDAR em drones possui outras vantagens, como: (i) a penetração na vegetação, permitindo captar, por exemplo, a superfície do terreno por entre a vegetação, (ii) um campo de visão elevado, que permite obter em detalhe grandes áreas de terreno num único varrimento, (iii) a qualidade das medições não é dependente da iluminação, pois ao contrário da fotogrametria os sensores LiDAR produzem a sua própria fonte de luz (os pulsos de laser), pelo que é indiferente aos levantamentos noturnos ou à existência de sombras e (iv) permite o estudo de grandes áreas sem textura (como neve), em que a fotogrametria tem dificuldade em correlacionar as imagens [41].

2.3.4. Sensores Térmicos

Os sensores de deteção remota térmicos aproximam-se das câmaras convencionais no sentido em que também produzem imagens, porém estas são usadas na radiação emitida em vez da refletida, ao focarem-se em duas faixas do espectro eletromagnético: Mid-Infrared (MIR) dos 3-5 μm ; e Thermal Infrared (TIR) dos 8-14 μm . Corpos a temperaturas mais elevadas emitem mais energia

e estão associadas a menores comprimentos de onda [41]. Para servir de referência: um objeto a 50°C (323 K) teria uma emissão pico nos 9 μm de comprimento de onda, enquanto um fogo a 500°C (773K) estaria na ordem dos 3,7 μm.

Existem dois principais tipos de sensores térmicos: as FLIR - *Forward Looking Infrared Cameras*, também chamadas câmaras térmicas, assemelham-se a câmaras de vídeo que gravam imagens numa faixa espectral específica e apenas apresentam as variações relativas de temperatura, ou seja, não se conhece a temperatura absoluta da superfície a não ser que se recorra a calibrações e cálculos à parte; já as câmaras multiespectrais com radiometria filmam em diferentes canais espectrais e possuem a informação de temperatura absoluta em cada pixel, graças à radiometria que permite conhecer a condutividade térmica de cada material [41].

2.4. Software

No decorrer deste trabalho foram explorados diversos *softwares* com o objetivo de definir os melhores processos para alcançar a finalidade desta dissertação. A Tabela 2.2 sintetiza estes *softwares*, especificando a função para qual cada um foi usado.

Tabela 2.2: *Softwares* explorados no decorrer desta dissertação

Software	Copyright	Função	Referências
 PLMI 2.0	<i>Closed Proprietary Software</i>	Importação do LiDAR através de <i>firmware</i> da Albatroz para conversão em formato .LAS	[25]
 QTReader	<i>Freeware</i>	Visualização de nuvem de pontos LiDAR em formato .LAS	[44][45]
 CloudCompare	<i>Free, open source software</i>	Visualização, tratamento e manipulação de nuvem de pontos LiDAR em formato .LAS	[46][47]
 Google Earth	<i>Freeware</i>	Visualização das zonas aéreas e auxílio no planeamento do levantamento aéreo	[48]
 Mission Planner	<i>Free, open source software</i>	Auxílio no planeamento da missão e fotogrametria, para estimar a resolução	[49]
 DJI Go (Android, iOS)	<i>Freeware</i>	Controlo e monitorização de drones DJI e respetiva fotogrametria durante o voo	[50]
 Pix4D Capture (Android, iOS)	<i>Shareware</i> (requer licença do Pix4D)	Automatização e otimização do voo de drones para aquisição de fotogrametria	[51]
 Ctrl+DJI (Android)	<i>Freeware</i>	<i>Plugin</i> para compatibilização do Pix4Dcapture com o controlo de drones DJI	[52]
 Pix4D	<i>Shareware</i> (licença adquirida)	Conversão de imagens de fotogrametria em mapas 2D e modelos 3D georreferenciados	[53]

		pela Albatroz)		
	OpenDroneMap	<i>Free, open source software</i>	Conversão de imagens de fotogrametria em mapas 2D e modelos 3D georreferenciados (mas gratuito)	[54]
	Rhinoceros 5.0 (ou Rhino)	<i>Shareware</i> (trial de 3 meses)	Modelagem tridimensional, para divisão e recorte dos telhados no modelo 3D	[55][56]
	Grasshopper	<i>Shareware</i> (junto com o Rhino)	Ambiente de programação visual incorporado no Rhino para análise lógica do modelo 3D	[57]
	DIVA	<i>Shareware</i> (licença de estudante)	<i>Plugin</i> para Rhino que adiciona instrumentos de modelação energética, como, por exemplo, para cálculo do potencial PV	[58]

Enquanto alguns destes *softwares* selecionados exigiram um uso extensivo para o cumprimento dos objetivos propostos (p.e. Pix4D e DIVA), outros foram apenas explorados superficialmente porque se acabou por optar por outra tecnologia ou software alternativo. Estas abordagens são discutidas e fundamentadas ao longo da dissertação, consoante o contexto em que se inserem.

A fase de estudos e consulta bibliográfica que constam neste capítulo foi fundamental para traçar o estado da arte dos drones. Foram apresentadas as suas características, os limites e possibilidades legais relativos aos levantamentos aéreos usando esta tecnologia em Portugal, os prós e contras de diferentes sensores e, através da prospeção de diferentes softwares, deu-se uma ideia geral das ferramentas de aquisição e análise de dados disponíveis hoje em dia. Estes conhecimentos ajudarão a justificar os passos tomados a posteriori para o cumprimento dos objetivos propostos nesta dissertação.

Capítulo 3 – Levantamento Aéreo

O terceiro capítulo aborda uma das etapas fulcrais deste trabalho, o levantamento aéreo. É das opções do levantamento que dependerá a qualidade dos dados adquiridos e, conseqüentemente, dos resultados deste trabalho. Importa, por isso, fazer um planeamento extensivo que, por um lado, permita uma aquisição de dados qualitativa e quantitativamente suficiente e que, por outro, assegure todos os cuidados possíveis com o equipamento e estruturas sobrevoadas, de forma a minimizar o risco de incidentes. Neste capítulo são apresentados: os objetos de estudo, o Complexo escolar JI/EB da Venda do Pinheiro e algumas moradias nas suas imediações, bem como os critérios que levaram à escolha do local; o equipamento selecionado; os aspetos logísticos, resultantes do pedido à AAN para a execução de levantamento aéreo em território nacional; e, ainda, o planeamento da missão e a recolha de dados, onde é possível comparar o percurso aéreo pré-programado e o percurso real.

3.1. Seleção do Local e Objetos de Estudo

3.1.1. Critérios de seleção

A seleção do objeto de estudo trata-se de um ponto relevante para esta dissertação. O objeto de estudo remete para o uso de espaço aéreo associado que, por sua vez, se encontra intrinsecamente dependente das regras de utilização de espaço aéreo já discutidas. Acabam por ser estas regras que ditam a seleção e os parâmetros possíveis da recolha de dados.

Para melhor compreender os limites das zonas de voo mencionadas no regulamento, recorre-se ao ficheiro Kmz disponibilizado pela campanha da ANAC, "Voa na Boa", que visa divulgar as novas regras e promover a utilização de drones de forma segura e responsável [59]. Uma vez aberto no Google Earth, este mapa mostra as áreas onde existem restrições, nomeadamente os aeroportos e respetivas áreas de proteção operacional, com todos os aeródromos certificados nacionais, com as áreas proibidas e com as áreas restritas ou temporariamente reservadas de natureza militar. Um segundo mapa indica também áreas específicas na cidade de Lisboa onde o sobrevoos não é permitido, por razões que se prendem com a segurança interna e a proteção dos órgãos de soberania e património.

No mapa reproduzido na Figura 3.1 distinguem-se:

- Áreas restritas sob jurisdição militar (azul)
- Áreas perigosas e sob jurisdição militar (a vermelho, no canto direito);
- Pistas de ultraleves da Tojeira e Lezírias (a castanho)
- Áreas proibidas do aeroporto de Lisboa e o aeródromo de Cascais (vermelho)
- Zona de controlo de tráfego aéreo do aeroporto que inclui área 1 (laranja), área 2 (amarelo) e área 3 (verde).

De forma a explorar mais opções na zona de Lisboa, inclui-se também o mapa da Figura 3.2 com:

- Heliportos e Aeródromos sem CTR associada (de cima para baixo: circunferências do Heliporto das Salemas, Alfragide e Algés)
- Heliportos de emergência (circunferências do Heliporto hospitalar de Loures e Santa Maria)
- Áreas sensíveis (vermelho claro, em particular na zona baixa de Lisboa)

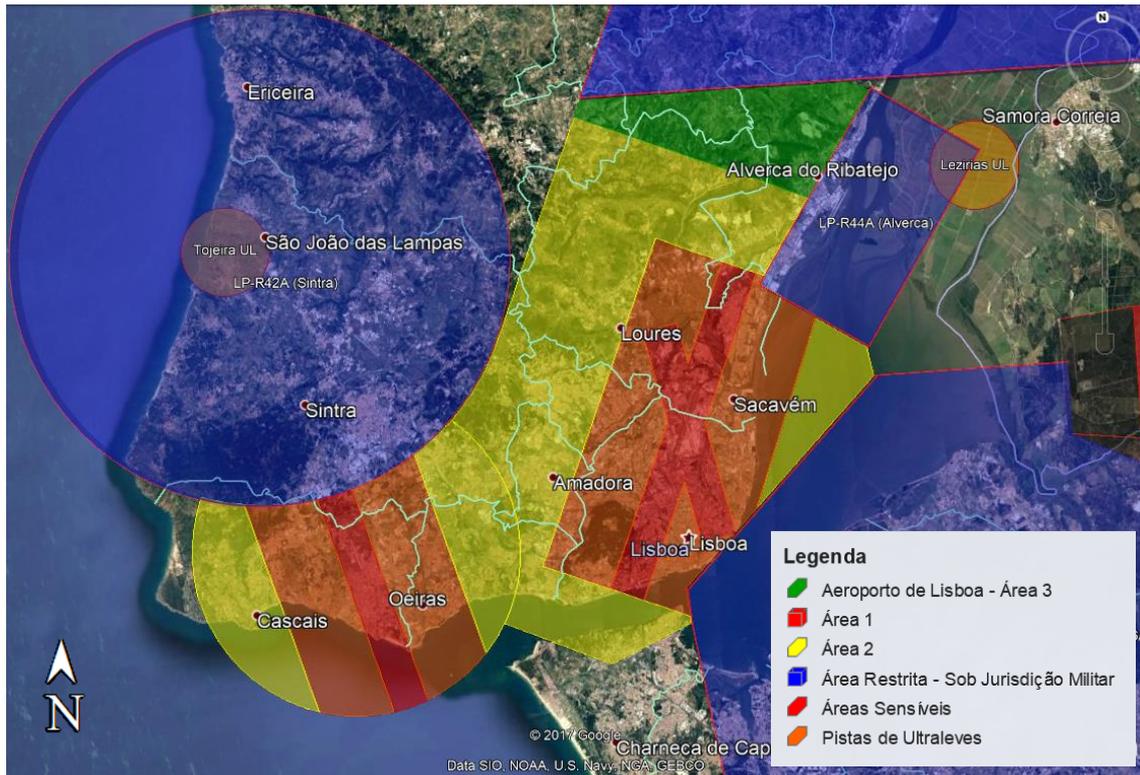


Figura 3.1: Mapa Kmz, Campanha "Voa na Boa" [59] – Visão geral do Distrito de Lisboa.

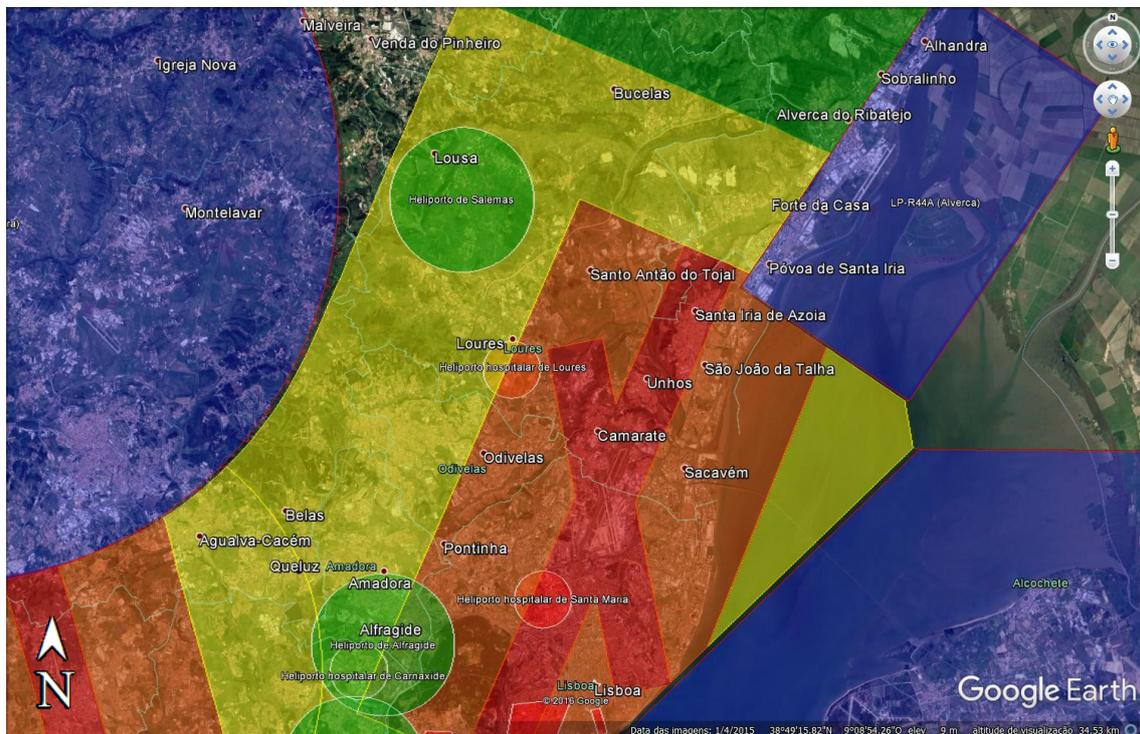


Figura 3.2: Mapa Kmz, Campanha "Voa na Boa" [59] – Visão com maior pormenor em Lisboa e respetivos Heliportos.

Embora, na teoria, qualquer uma destas zonas possa ser suscetível da prática desta metodologia, são as restrições e limitações de cada uma, abordadas no subcapítulo 2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo, que definem o nível de complexidade para obtenção da autorização. Como regra geral, para a simplificação deste processo, recomenda-se a seleção de um local que não requeira a autorização da ANAC associada à coordenação do voo com a aviação tripulada, como a área 2, a área 3 ou uma área não zoneada, que permitem o voo até, respetivamente, 60, 80 e 120 metros.

Também no caso deste estudo, pretende-se que o local seja o mais favorável possível no que diz respeito às suas restrições, em particular, a possibilidade de se poder voar até aos 120m. Mesmo que, na verdade, o mais provável será a preferência por missões de voo mais baixas, de forma a garantir maior resolução. Seria também vantajoso alguma familiaridade com o terreno para assistir na fase de planeamento da missão. Sobre o local em si, pretenda-se que seja uma comunidade/aldeia/condomínio com dimensão suficiente para tornar interessante o estudo conjunto PV mas que não implique um peso excessivo de dados para ser analisado nesta fase experimental.

3.1.2. Local de estudo

O espaço não abrangido por nenhuma das zonas a cores da Figura 3.3, destacada por setas de ambos os lados, destaca-se como um dos primeiros espaços no distrito de Lisboa a não ser abrangido nem pela zona 2 do Aeroporto de Lisboa (a amarelo), nem pela área LP-R42A sob jurisdição militar (a azul), e apresenta-se como um local favorável para o desenvolvimento do caso de estudo por permitir o voo até 120 metros sem necessidade de pedido de autorização à ANAC (se dentro dos restantes moldes da legislação, conforme mencionado no subcapítulo 2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo). Por estar incluída neste espaço, a vila da Venda do Pinheiro (assinalado a branco), no concelho de Mafra (delimitado a vermelho) é uma das localidades mais próximas de Lisboa com estas características.

Também a aldeia de Lousa poderia constituir um local de estudo interessante. Dentro da área do Heliporto de Salemas, sem CTR ou ATZ associada (não é prestado o serviço de controlo de tráfego de aeródromo, nem o serviço de informação de voo de aeródromo), o voo até 120 metros poderia ser autorizado pelo Diretor de Operações do Heliporto, de acordo com o Artigo 7.º do regulamento dos drones [15].

Tratando-se de uma zona residencial relativamente próxima de Lisboa, se fosse concedida aprovação, poderia permitir o sobrevoamento até um máximo de 120 metros sem necessidade de autorização à ANAC, em vez de um limite máximo de 60 metros imposto na área 2 nas vizinhanças, uma vez que este heliporto está dentro da CTR do Aeroporto de Lisboa.

Posto isto, foram feitas várias chamadas na tentativa de se obter a referida autorização, mas não se conseguiu entrar em contacto com o responsável. Assim sendo, decidiu-se prosseguir o estudo na vila da Venda do Pinheiro, deixando Lousa como segunda opção.

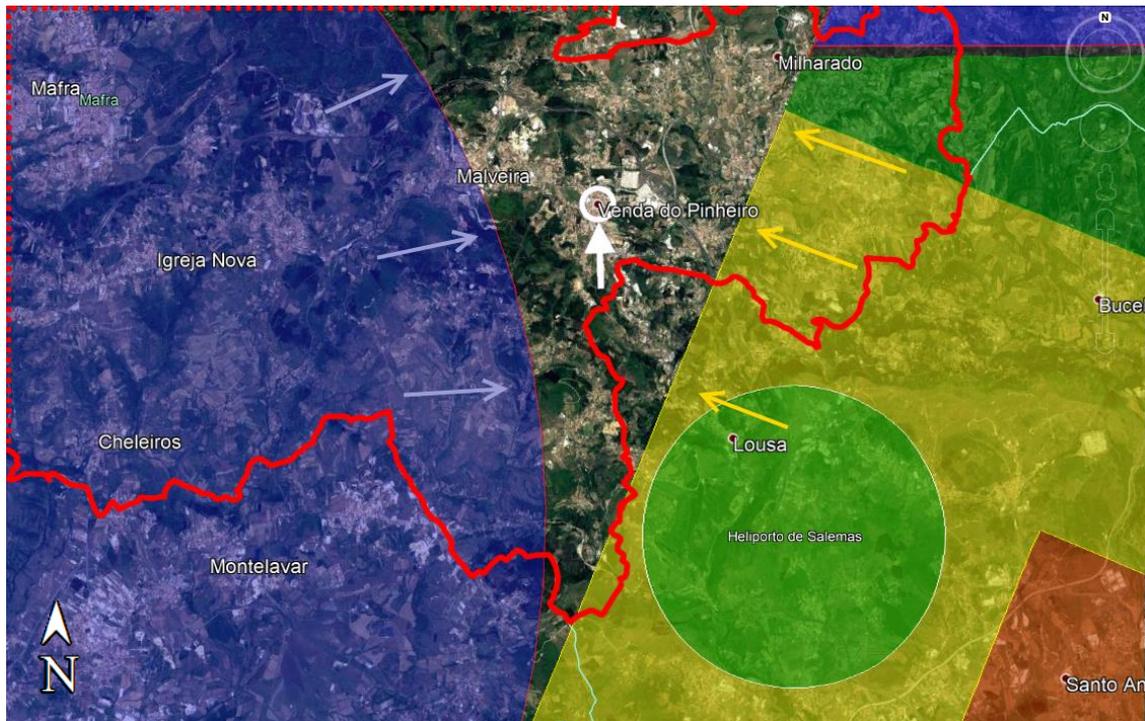


Figura 3.3: Limite do Concelho de Mafra (a vermelho) desenhado sobre o Mapa Kmz da Campanha "Voa na Boa" [59] – seleção da Venda do Pinheiro entre a área militar e a zona 2.

3.1.3. Objetos Seleccionados

Escolhida a Venda do Pinheiro, falta delinear o(s) objeto(s) de estudo em particular, uma vez as dimensões da vila são bastante superiores ao pretendido e envolveriam um esforço desproporcionado face ao pretendido nesta fase de experimentação.

Fica assim uma margem muito grande de opções do estudo sem nenhuma ordem de preferência específica. Este foi um dos motivos que levou ao contacto com a Câmara Municipal de Mafra, para averiguação de lugares de interesse para um estudo por parte da autarquia, que valorizasse a dissertação e trouxesse maiores perspetivas de aplicação futura dos dados recolhidos durante o levantamento.

Fruto deste contacto foi proposto um objeto de interesse para Câmara Municipal de Mafra e sugerida uma possível área de estudo circundante em que este se inclui, delimitados a roxo e a azul respetivamente, na Figura 3.4. O local de interesse trata-se do “Complexo escolar de JI/EB da Venda do Pinheiro”. Construído em 2005, inclui uma escola, uma piscina, salão multidesportos (para estudantes e cidadãos) e ainda um infantário no segundo edifício. Ambos os edifícios estão ligados ao mesmo sistema de aquecimento. O complexo usa um *mix* de eletricidade e gás, consumindo cerca de 257MWh de eletricidade e 760MWh de gás natural por ano [60]. O interesse justifica-se por o complexo constituir uma das instalações-piloto para avaliação e validação da *framework Modelling Optimization of Energy Efficiency in Buildings for Urban Sustainability* (MOEEBIUS), um projeto para análise de situações de potencial economia de recursos de eficiência energética, com fundos do programa *Horizon 2020* da União Europeia [61].

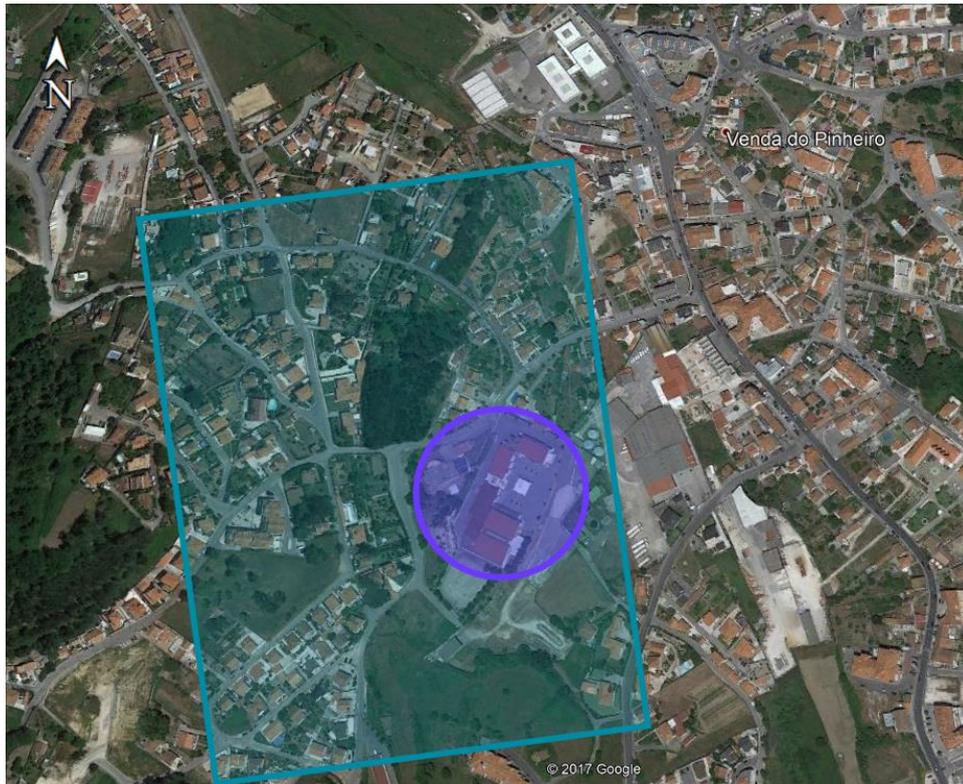


Figura 3.4: Desenho no *Google Maps* das áreas de estudo apresentadas no contexto da vila da Venda do Pinheiro.

Definiu-se então este complexo escolar e de instalações públicas, ou só “complexo” como será identificado doravante, um dos objetos de estudo. Quanto à restante área, e uma vez que ainda é relativamente ampla para o pretendido, a seleção de um segundo local de estudo que exemplifique a metodologia desta dissertação num conjunto de moradias, ficou dependente da escolha de um ponto de aterragem/descolagem (c.f. subcapítulo 3.4.1. Pontos de Descolagem/Aterragem). Este segundo local de estudo será designado apenas por “moradias” e, uma vez terminado o estudo, poderia ser estudada a hipótese de ser integrado numa iniciativa municipal de “bairro sustentável”.

3.2. Seleção do Equipamento

Os parâmetros do levantamento aéreo estão intrinsecamente ligados ao equipamento utilizado, que terá repercussões em todas as fases consequentes deste trabalho. Com diferentes equipamentos da Albatroz à disposição, tanto a nível de drones como de sensores de fotogrametria, um dos objetivos desta dissertação passa pela exploração destas tecnologias, para uma tomada de decisão quanto aos mais adequados aos objetivos desta dissertação.

3.2.1. Drone

- *Drone – RS900*

Um dos drones com potencial para ser usado no contexto deste trabalho é o RS900, desenhado para fotografia e cinematografia aérea profissional. Trata-se de um drone com uma distribuição de energia patenteada, controlado por um PixHawk, seis motores ESC (*electronic speed control*)

de alta velocidade e hélices eficientes, que maximizam a eficiência energética e asseguram uma estabilização dinâmica. O trem de aterragem retráctil, amortecedores de vibração e braços ligeiramente angulados permitem uma visão das câmaras de 360 graus sem obstáculos (Figura 3.5) [62].

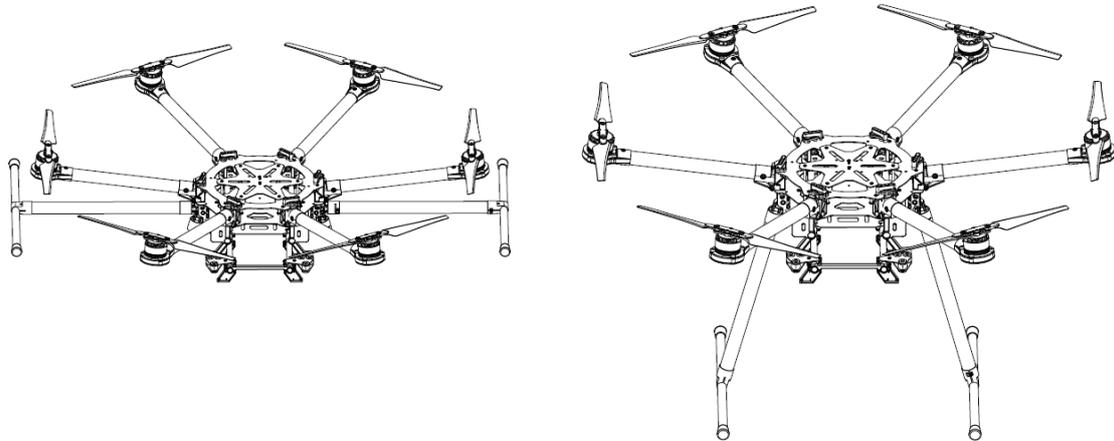


Figura 3.5: Esquemática do RS900 com o trem de aterragem retraído (esquerda) e em posição de aterragem (direita) [62].

O RS900 pesa cerca de 3kg e suporta uma massa à descolagem até 9kg. Cada motor pode consumir até 600W, pelo que, excluindo sensores e outros equipamentos, o consumo máximo do drone é de 3600W; para um peso de 7kg requer apenas 1200W para manter sobrevoos. Com uma bateria de 15000mAh, isto significaria cerca de 22 minutos de voo.

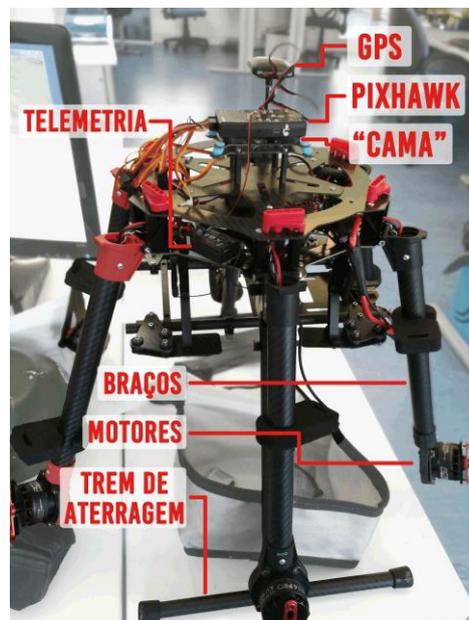


Figura 3.6: Diagrama do RS900, com os braços retraídos.

Do ponto de vista técnico, o Pixhawk tem um processador de 32-bit ARM Cortex M4 core, com 168 Mhz, 256KB de RAM e 2MB de Flash. Inclui os seguintes sensores: acelerómetros, giroscópios e magnetómetros, que devem ser calibrados através de *software* (como o *Mission Planner*, descrito no subcapítulo 3.4.2. Planeamento das Missões) antes do voo. Possui também uma entrada *SD card* para armazenamento de dados e um botão de *reset*. O modo mais simples de fornecer energia passa pela ligação de um cabo com 6 pins na entrada “*Power*”. A grelha de pins (várias entradas com 3 pins cada) no lado superior é característica deste tipo de controladores e a lógica é a mesma em todas as entradas: 1º pin – *ground*; 2º pin - *power* até 9.9V; 3º pin – *signal*. Estas ligações são usadas, por exemplo, para os diferentes motores ESC do RS900 [63].

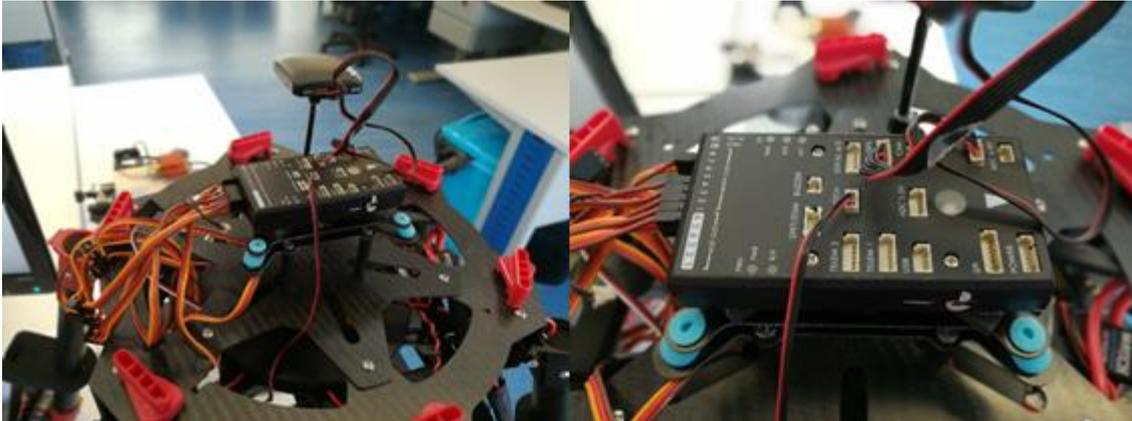


Figura 3.7: À esquerda: montagem do Pixhawk com GPS. À direita: *zoom in* em que é possível observar a “cama” com amortecedores (a azul), o LED principal que transmite informação ao utilizador do estado do Pixhawk; e seta a estar alinhada com o GPS.

Ao Pixhawk estão ainda tipicamente associados a [64]:

- GPS + Bússola (obrigatório) - normalmente distanciado em forma de antena, para evitar interferências da eletrónica. A configuração conjunta através de *software* passa pelo alinhamento das duas setas - a do Pixhawk e a do GPS - na mesma direção, de forma ao *input* ser concordante com o sensor interno.
- *Buzzer* (obrigatório) - dispositivo de áudio que serve como output do Pixhawk para o piloto remoto. Este deve ser disposto a pelo menos 5cm dos acelerómetros para evitar que os perturbe.
- Interruptor de Segurança (obrigatório) – para “armar” o drone, deixando-o pronto a voar.
- Antena de Rádio (opcional) - para receção de dados e comunicação com o controlador durante o voo.
- Módulo de Energia (obrigatório) - para regulação da energia proveniente das baterias lítio.
- Expansor (opcional) - para adicionar componentes adicionais, como magnetómetros, LEDs ou sensores de velocidade do ar.



Figura 3.8: À esquerda: rádio para controlo remoto direto dos ESC; À direita: módulo de telemetria para comunicação com o Pixhawk. Também é possível observar o interruptor de segurança colado à estrutura.

Trax é o nome estabelecido pela Albatroz para o módulo que reúne os sensores - o sensor LIDAR, o sensor térmico e 3 câmaras visuais - uma motherboard, uma bateria de 16000mAh para o drone e outra de 2200mAh para o Trax e os seus elementos (Figura 3.9).

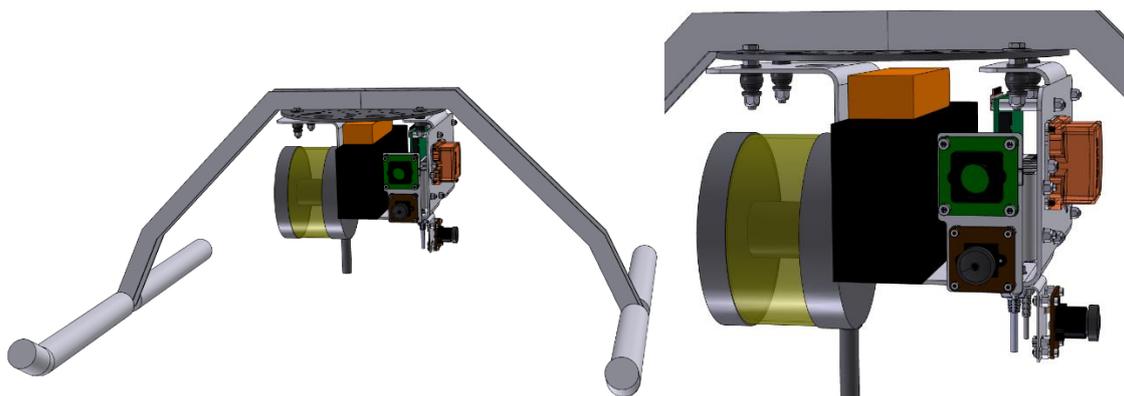


Figura 3.9: Modelo tridimensional do Trax. Componentes (da esquerda para a direita): sensor LIDAR, baterias (laranja e preto), câmaras visuais (à frente e com a 3ª no canto inferior direito), atrás a motherboard (verde) e câmara térmica (laranja, à esquerda).

- *Phantom 3 Professional*

A empresa chinesa DJI é conhecida pelos *Phantom*, uma série de drones bastante competitivos face aos seus preços, tendo propulsionado o domínio da empresa neste mercado [65], [66]. O *Phantom 3* foi lançado em abril de 2015, trazendo novas características como o sistema de posição visual, que lhe permite manter melhor a sua posição onde o sinal de GPS pode ser fraco ou indisponível. A variação *Phantom 3 Professional* (Figura 3.10) é superior em vários sentidos: possui vídeo 4K (em vez de 2,7K); ao comprimir sinais de vídeo através de frequências radio, alternando entre diferentes canais, o sistema *lightbridge* embebido permite o controlo remoto do drone até 2 km de distância com transmissão HD em tempo real do vídeo da câmara (Figura 3.11); e o carregador de 100W (em vez de 57W) permite um carregamento mais rápido da bateria [67], [68], [69].

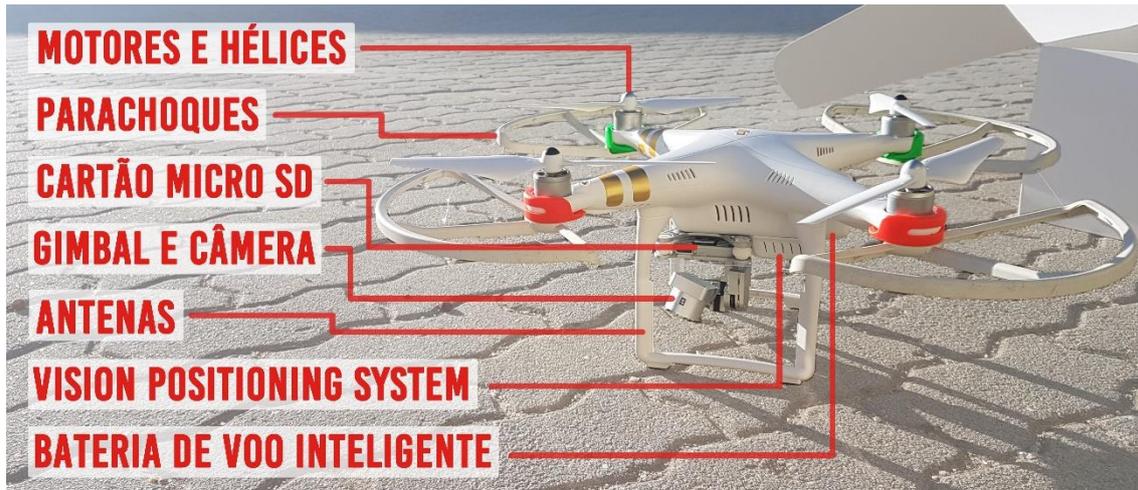


Figura 3.10: Diagrama do *Phantom 3 Profissional*.



Figura 3.11: À esquerda: controlo remoto com duas antenas [70] - tecnologia *lightbridge*; no centro: *Phantom 3* em voo; À direita: sistema de posicionamento visual [71].

3.2.2. Sensores de Fotogrametria

- *LiDAR – PUCK VLP-1*

Um dos equipamentos considerados para este trabalho é o sensor LiDAR PUCK™ VLP-16 (Figura 3.12). Como detalhado no subcapítulo 2.3.3. LiDAR, estes sensores emitem pulsos laser próximos dos infravermelhos com alta frequência, normalmente, entre 10 e 100 mil pontos por segundo, mas o VLP-16 atinge os 300 mil pontos por segundo, tem um campo de visão (FOV) horizontal de 360° e uma margem vertical de cerca de 15°. Os pulsos laser têm cerca de 100 metros de alcance e uma resolução (independente da distância) de 256 bits. [43], [72].

O objetivo do uso do LiDAR seria o de traçar modelos tridimensionais da zona em estudo para análise de inclinações e orientações de vários telhados/fachadas, conforme exposto na no Capítulo 1. Porém, é importante notar a dimensão e custo deste equipamento, existindo complicações técnicas - devido ao peso do Trax estar próximo do máximo de *payload* (ou carga útil), que é a capacidade de carga do veículo, do RS900) - e legais - devido ao voo em ambiente urbano - no

seu uso com um drone, devendo ser evitado se possível. Assim, e com o objetivo de testar o funcionamento deste equipamento, procedeu-se a um primeiro levantamento terrestre na Rua Maria na freguesia dos Anjos, em Lisboa, que teve apenas a duração de 4 minutos (3:55) mas gerou cerca de 18 milhões de pontos com uma densidade aproximada de 417 pontos por metro quadrado (Anexo A.1. Primeiro levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados).

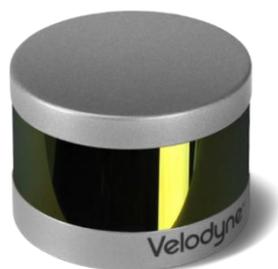


Figura 3.12: LiDAR PUCK VLP-16

Para o tratamento dos dados recorreu-se à solução própria da Albatroz PLMI 2.0 (*Power Line Maintenance Inspection*) que, entre outros atributos, permite a georreferenciação e exportação da nuvem de pontos em formato .LAS [25]. Este tornou-se um formato habitual para o armazenamento de dados LiDAR, sendo mais apropriado que o originalmente usado, o ASCII, por conter mais informação e ser mais eficiente [73]. Exploraram-se ainda outros *softwares*, gratuitos e disponíveis ao público, para visualização e manipulação dos dados .LAS, como o Quick Terrain Reader [45] e o CloudCompare [47].

Neste ensaio foi possível observar-se a existência de vários erros de precisão nos pontos, em alguns momentos, leva à existência de “duplas fachadas”, em que a mesma fachada é sondada duas vezes em localizações diferentes (Figura A. 4 e Figura A. 5 no Anexo A.1. Primeiro levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados). Estes erros podem dever-se a um fraco sinal de GPS, dado que a zona urbana, numa posição estreita entre prédios, dificulta a aquisição da quantidade de satélites que o nível de precisão que o LiDAR requer. É também possível existirem outras fontes de acumulação de erro, como calibração deficiente do IMU ou falta de linearidade no trajeto, devido ao facto do percurso ter sido pedonal. Tratando-se de um levantamento pedonal, a velocidade também não foi a mais indicada, resultando numa densidade excessiva de pontos.

Tendo em conta as limitações do levantamento anterior e os erros mencionados, procedeu-se a um segundo levantamento já na zona da Venda do Pinheiro em Mafra, desta vez de automóvel na perspetiva de melhorar a linearidade e velocidade do trajeto, para uma melhor qualidade de dados. Uniu-se também, à nuvem de pontos, um levantamento pedonal no recinto do complexo. A nuvem de pontos resultante possuía uma densidade de pontos considerada demasiado densa e extensa para análise posterior, considerando o poder computacional disponível. Recorrendo ao *software* CloudCompare começou-se por remover os pontos duplicados, definindo uma distância mínima entre os pontos de 0,1m, e usou-se a ferramenta “*SOR filter*” para a remoção estatística de pontos *outlier*. Este passo permitiu remover cerca de 100 milhões de pontos, restando cerca de 8 milhões.

Foi ainda utiliza outra ferramenta do CloudCompare que permite *renderizar*, i.e. tratar digitalmente, a oclusão ambiental: um cálculo que consiste na distribuição de raios em várias direções para determinar a probabilidade de incidirem em determinadas superfícies, e daí obter uma visualização mais realista do modelo com luz ambiente, por exemplo, com cantos mais escuros e zonas expostas mais claras.

No Anexo A.2. Segundo levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados apresentam-se algumas imagens dos resultados deste levantamento, nomeadamente: a sobreposição dos dados LiDAR no mapa (Figura A. 6: Sobreposição de levantamento terrestre LiDAR com mapa da Venda do Pinheiro. As cores dizem respeito à classificação de ângulo incidente.; uma imagem da nuvem de pontos onde é possível observar a maior nitidez deste levantamento, que permite até a identificação de cabos elétricos (Figura A. 7: Moradias e linha elétrica num segundo levantamento terrestre.); e o recinto do complexo com a oclusão ambiental renderizada (Figura A. 8: Recinto do complexo com oclusão ambiental renderizada..

- *Câmara Térmica - FLIR AX8*

A câmara térmica FLIR AX8 é outro sensor à disposição que foi considerado para o estudo. O AX8 combina uma câmara térmica com uma resolução de 80x60 pixéis e uma câmara convencional de 640x480, e destina-se à monitorização contínua de equipamentos elétricos e mecânicos, como quadros elétricos, *data centers*, refrigeração ou motores, para prevenção de falhas críticas e de segurança. O *web server* incluído, acessível através de *ethernet/IP*, dá acesso à AX8 WEB interface, que permite o controlo e *setup* da câmara, incluindo, por exemplo, a possibilidade de configurar alarmes automáticos, caso determinados pontos ultrapassem uma temperatura definida [74].



Figura 3.13: FLIR AX8

Procederam-se a alguns ensaios com esta câmara para explorar o interesse da sua aplicação neste trabalho, partindo-se, no entanto, da suspeita de que o sensor poderia não ser ideal para estar associado a um drone, dado que se destina à monitorização de equipamentos, é pensado para estar fixo, não possuindo, por exemplo, radiometria. Isto implica que, para obter valores de temperatura fiáveis para determinado ponto, a câmara IR já deve estar configurada com o valor de emissividade do material deste ponto. Como tal, e visto que não é praticável a sua configuração durante o voo, as diferentes cores nas imagens fornecidas pela câmara IR representarão diferenças de temperatura relativas e não uma matriz com valores de temperatura associados a cada *pixel*.

Seria possível associar este sensor com uma função complementar se, associado a ferramentas de análise de imagem, servisse apenas para detetar zonas cuja diferença de temperaturas indique que podem tratar-se de pontes térmicas prejudiciais ao isolamento dos edifícios (*hot spots*) e que, por isso, careçam de um *retrofit* energético. Isto poderia enquadrar-se nos objetivos da tese se considerarmos que a instalação de PV deve estar associada a medidas para uma melhor eficiência energética.

Imagens dos resultados destes testes são apresentados no Anexo A.3. Testes com a Câmara Térmica e demonstraram um dos principais problemas antecipados: a irradiação solar impede a deteção destes *hot spots* uma vez que a superfície aquecida e refletora ofusca qualquer outra fonte de calor menor (Figura A. 9). Porém, mesmo com a ausência de irradiação direta observou-se que, às 20h15 (horário de Verão) com uma temperatura ambiente de 22°C, as fachadas que tinham estado anteriormente expostas ao sol continuavam a irradiar calor. Às 21h, embora já se verificasse algum arrefecimento, a tendência manteve-se. Embora outros fatores como nuvens e temperaturas mais baixas possam assistir neste aspeto, tornou-se evidente que, para que os dados térmicos sejam relevantes com a câmara térmica em questão, seria necessário um voo noturno a uma hora mais tardia. Como visto anteriormente no subcapítulo 2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo sobre a utilização do espaço aéreo, isto implicaria a autorização da ANAC. Este tipo de observação poderia ser interessante para avaliar efeitos de ilha de calor em ambiente urbano.

- *Câmara Fotográfica - Phantom 3 Professional*

No caso do uso de fotografia o mais indicado seria o sistema embebido no *Phantom 3 Professional*, que já foi abordado e cujas características se encontram especificadas na Tabela 3.1. Trata-se de uma câmara calibrada, para eliminar distorção não desejada na fotogrametria, usa um sensor Sony EXMOR 1/2.3”, possui uma abertura de lente f/2.8, um campo de visão de 94°, 20mm de distância focal (equivalente no formato 35mm), é capaz de filmar vídeo 4K a 30 *frames* por segundo e de capturar fotos com 12,4 de megapixéis úteis [67].

Tabela 3.1: Características da câmara no *Phantom 3 Professional*.

Focal Length	3,6 mm
Image Width	4000 Pixels
Image Weight	3000 Pixels
Sensor Width	6,16 mm
Sensor Height	4,62 mm

O uso deste sistema é também benéfico pelo tipo de controlo e estabilização assegurado pelo sistema gimbal de três eixos, as dimensões e outras características do *Phantom 3 Pro* que o tornam mais indicado para ser manuseado em meio urbano. Por outro lado, o uso deste sistema impede a inclusão do Trax com o LiDAR e FLIR, cujo peso não é compatível com este drone.

3.2.3. Decisão Final

Para a seleção do drone e do(s) sensor(es), um fator fundamental a ter em conta é a segurança, devendo-se considerar abordagens que minimizem probabilidade, severidade e duração de exposição de risco, para assim evitar eventuais incidentes durante a fase de voo que possam pôr em risco tanto o equipamento como danos causados a terceiros ao nível do solo. Outra consideração relevante é a acessibilidade do método desenvolvido em termos técnicos e de recursos, para que possa ser eventualmente usado por entidades que procurem soluções para implementação de PV, com ou sem fins lucrativos.

Seguindo esta lógica e tendo em conta os resultados dos ensaios, optou-se pelo uso conjunto do drone *Phantom 3 Professional* e a respetiva câmara fotográfica para modelação tridimensional dos edifícios com recurso a fotogrametria uma vez que, entre as opções apresentadas, se considerou o conjunto mais economicamente acessível e também o mais seguro, em sequência das menores dimensões e peso do sistema quando comparado, por exemplo, ao uso do RS900 com o Trax, e também devido a dificuldades técnicas associadas a um dos motores na altura do planeamento de voo, que diminuía a confiança no uso do RS900 num contexto de sobrevoo de zona edificada e, provavelmente, povoada.

3.3. Aspetos Logísticos

Uma vez definidas as áreas de estudo, passou-se à averiguação dos aspetos legalmente exigidos tendo em mente o enquadramento dado no subcapítulo 2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo Face aos objetivos propostos, revelou-se apenas necessário prosseguir com o pedido à AAN para a execução de levantamento aéreo em território nacional. Nesse sentido, foi necessário o preenchimento do formulário disponibilizado por esta entidade [75], com:

- **A identificação do requerente e do piloto:** Ambos da Albatroz, por uma questão de responsabilização pelo próprio drone;
- **Especificações do drone incluindo a indicação de características aplicáveis:** O *Phantom 3* inclui altímetro GPS, capacidade de voo automático, sistema de bloqueio (*geofencing*), sistema de regresso à origem e luzes de identificação.
- **Tipo de operação requerida** (voo em espaço aéreo sob jurisdição militar, BVLOS, noturno ou sobre concentração de pessoas ao ar livre): nenhum dos anteriores, tendo sido especificado em “Outro”.
- **Identificação da área e hora onde irá decorrer a operação do drone**, com a definição de uma área circular, poligonal ou uma rota (percurso), altura máxima, início/fim/período e tipo (BVLOS ou VLOS): para abranger diversas opções na fase de planeamento de voo mais detalhado que se seguiu, procurou-se definir parâmetros superiores aos necessários, mas dentro do razoável, como uma altura de 60 metros e um período diurno de 18 de julho a 1 de agosto de 2017.
- **Informações relativas ao levantamento aéreo** como o tipo de recolha (neste caso fotografia, filmagem e ortofotos), equipamento de recolha a usar, propósito do trabalho, onde foi especificado que seria para fins de utilização em dissertação de mestrado, e plataformas de divulgação onde se indicou a dissertação de mestrado e comunicação da Albatroz, FCUL e Câmara Municipal de Maфра. Mesmo não sendo obrigatório, mas para autenticar o propósito do levantamento com fins académicos, anexou-se também a declaração de apoio do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Anexo

- A.4. Formulário – Declaração de Apoio do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa) e da Câmara Municipal de Mafra (Anexo A.5. Formulário – Declaração de Apoio da Câmara Municipal de Mafra).

Autorização feita à AAN foi autorizada (Anexo A.6. Formulário – Autorização da AAN chamando, contudo, à atenção para o cumprimento do Artigo 11º do Regulamento da ANAC que define restrições à operação ou voo de drones como, entre outras, a questão da concentração de mais que 12 pessoas ao ar livre, sem expressa autorização da ANAC; e que os produtos visuais obtidos sejam divulgados, exclusivamente, no contexto autorizado.

3.4. Planeamento da Missão

3.4.1. Pontos de Descolagem/Aterragem

Para planear a missão é necessário, numa primeira instância, definir o ponto de descolagem/aterragem, devendo considerar-se os seguintes critérios:

- (1) a área circundante deve ser desafogada e sem obstáculos para uma descolagem/aterragem sem incidentes;
- (2) uma boa linha de vista sob o drone durante todo o percurso de voo;
- (3) e evitar zonas movimentadas (tanto na descolagem/aterragem como no percurso de voo), de forma a não comprometer a norma de não sobrevoar um espaço com mais do que doze pessoas, conforme mencionado na utilização do espaço aéreo no subcapítulo 2.2.1. Utilização do Espaço Aéreo.

Com base nestes critérios e recorrendo ao Google Earth, consideraram-se várias opções na área de interesse, tendo-se chegado aos seguintes locais de estudo e locais de descolagem/aterragem indicados com uma cruz na Figura 3.14.

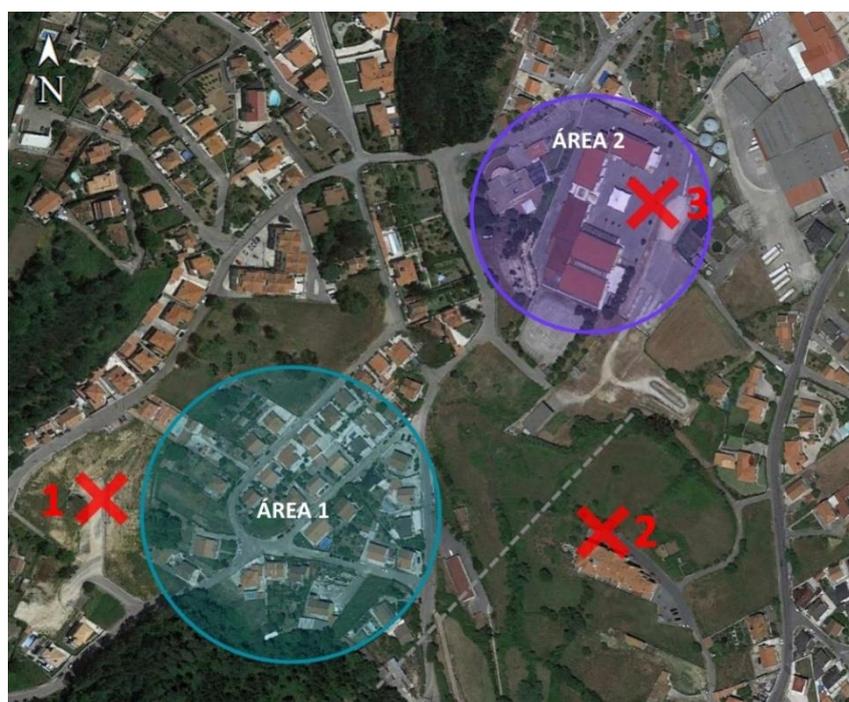


Figura 3.14: Áreas a sobrevoar e possíveis locais de descolagem.

1º ponto – Esta zona não possui nenhum edifício e encontra-se elevada em cerca de 10 metros relativamente à área de estudo 1, resultando numa boa linha de vista para o drone. Porém, a nível do terreno, só permite ver as primeiras moradias pelo que, não ajudando à compreensão direta do que o drone se encontra a sobrevoar.

2º ponto – Esta zona situa-se no vale oposto e, após algum distanciamento do edifício, também permite uma boa linha de vista e com uma melhor noção do terreno das moradias (área 1). Contudo, após visita de averiguação do terreno, constatou-se a existência de uma linha elétrica de média tensão alta no caminho para a área de estudo (a tracejado cinzento), o que tornava o voo mais arriscado e podia comprometer o drone no caso de retorno automático. Pelo que se excluiu esta possibilidade.

3º ponto – Dentro do recinto do complexo escolar, considerou-se este o ponto com melhores condições de espaço e linha de vista para a área 2. Existiram, porém, contrapartidas: o acesso ao recinto, que poderia ser condicionado foi facilitado pela declaração de apoio da Câmara Municipal de Mafra, conforme explicado mais à frente; e o facto de se encontrarem a decorrer atividades com crianças no local durante o dia, que só tornou possível o levantamento ao final da tarde.

Conforme adiantado no subcapítulo

3.1.3. Objetos Seleccionado, a área para o estudo das moradias viria a ser definida com base nos pontos de descolagem/aterragem. Foi assim que, com base no 1º e o 2º ponto, que se seleccionou a área 1 como a zona mais propícia para esta parte do estudo.

3.4.2. Planeamento das Missões

Recorreu-se ao *software Mission Planner*, uma aplicação gratuita e *open-source* que permite pré-programar a missão e monitorizar um drone, que neste caso será útil para estimar a altura do drone em função da resolução desejável da fotogrametria. A Figura 3.15 apresenta o cálculo do trajeto (a amarelo) pelo *software*, em função do ponto de partida “H”, da área que se pretende estudar (polígono definido a vermelho), da altura (que se definiu a 30m de altura após alguma experimentação), dos 50% definidos de sobreposição entre as fotografias e das características da câmara do *Phantom 3 Pro* (especificadas na Tabela 3.1). As características da câmara foram ainda confirmadas, através do próprio *software*, através de uma imagem-exemplo capturada pela mesma.

Uma vez que se usarão a mesma câmara e a mesma altura acima do solo nos dois voos, ambas as missões têm em comum uma distância de 19 metros entre cada foto, uma distância de 20,48 metros entre as linhas de trajeto e uma resolução das fotografias no terreno que seria de 1,28 cm por *pixel* (distância linear de um pixel no chão, ou o equivalente em área a $1,28 * 1,28 = 1,62cm^2$ por pixel). Prevê-se que a missão na área 1 necessite de cerca de 4 minutos para fotografar a área total de 1,66 hectares, e a área 2 de 3 minutos e meio para uma área de 1,44 hectares. Podem ainda ser encontradas sobreposições de fotografias estimadas no mapa no Anexo A.7. Planeamento da Missão - Sobreposição de Fotografias.

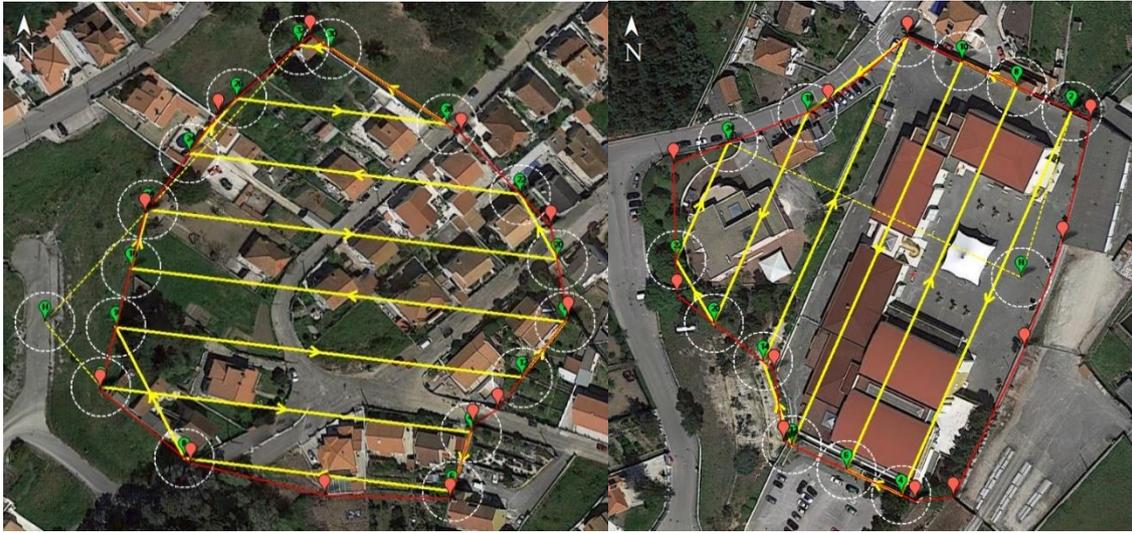


Figura 3.15: Planeamento de Missão – Área de Estudo 1 (esquerda) e 2 (direita).

3.5. Recolha dos Dados

Após algumas idas à área de estudo para averiguação das condições no terreno, que permitiram um planeamento mais realista do levantamento, o voo realizou-se no dia 27 de julho de 2017 ao final da tarde. A escolha da hora do voo foi condicionada pelas atividades que decorreram no recinto do complexo durante o dia.

Pretendia-se a automatização do voo através do *app* do Pix4Dcapture mas, na sequência de problemas técnicos de acesso à internet, tal não foi possível, tendo o drone sido controlado manualmente. Como tal, o percurso do drone não correspondeu exatamente ao definido no planeamento, como se pode observar comparando o percurso real, na Figura 3.16, com o percurso idealizado, na Figura 3.15. Este é um dos aspetos que poderia ter otimizado a qualidade dos dados obtidos.



Figura 3.16: Percurso real do drone controlado manualmente.

Apesar de algumas circunstâncias levarem a situações menos ideais – como o horário da aquisição, ao final da tarde, que resultou em sombreamentos desnecessários na textura do modelo, ou a questão do percurso que poderia ter sido otimizado –, o levantamento aéreo foi bem-sucedido no sentido em que decorreu sem incidentes e foram adquiridos os dados necessários à continuação da dissertação, tendo em conta a missão inicialmente planeada. Posto isto, é possível passar ao tratamento dos dados e prosseguir na construção da metodologia proposta.

Capítulo 4 – Resultados

Este capítulo apresenta o tratamento dos dados adquiridos no levantamento aéreo e encontra-se dividido em duas etapas principais: a transformação das fotografias aéreas num modelo tridimensional e a estimação do potencial solar das superfícies mais relevantes deste modelo. Cada uma destas etapas divide-se ainda nos dois casos de estudo, o das moradias e o do complexo.

4.1. Modelo Mesh - Pix4D

O objetivo desta fase é a extração de um modelo *mesh*, isto é, um conjunto de vértices, arestas e superfícies que definem um objeto em 3D. É tipicamente constituído por triângulos (como será o caso nesta dissertação) ou quadriláteros que formam uma “malha” em torno do objeto.

Para a representação 3D dos dois modelos - das moradias e do complexo - recorreu-se ao *software* Pix4D, que usa algoritmos de fotogrametria e de visão computacional para transformar imagens em mapas e modelos 3D [53]. Tratando-se de *shareware*, usou-se o *trial* e uma licença temporária adquirida pela empresa Albatroz. Para a criação do *mesh*, são necessárias as primeiras duas fases, das três fases de processamento em que o *software* se divide [76]:

1. *Initial Processing*

O processo começa com a importação e processamento das imagens. Este processamento inicial inclui: a identificação das características nas imagens, ou *keypoints*, e procura por imagens com *keypoints* coincidentes; a otimização do modelo da câmara pela calibração de parâmetros internos, como a distância focal, e externos, como a sua orientação; e localização do modelo, se este tiver informação para geolocalização. São então criados os primeiros *Automatic Tie Points* (ATPs), pontos 3D computados automaticamente pela correspondência de *keypoints* 2D nas imagens.

2. *Point Cloud and Mesh*

Novos *Automatic Tie Points* são criados, dando-se a densificação da nuvem de pontos e, com base nesta, um *mesh* 3D texturizado pode ser criado.

3. *DSM, Orthomosaic and Index*

Esta etapa de processamento permite a criação de:

- **Digital Surface Models (DSM)**, um modelo que representa a elevação da superfície da terra, incluindo a topografia e todas as características naturais e humanas.
- **Ortomosaicos**, para a criação de um mapa com escala uniforme e sem distorção de perspetiva através do processo de correção digital intitulado ortoretificação.
- **Mapa de Refletância**, em que o valor de cada *pixel* indica a refletância do objeto.
- **Mapa de Index**, permite computar valores para cada *pixel* de acordo com fórmula que usa diferentes propriedades do mapa de refletância.

Os próximos subcapítulos descrevem o processo com maior detalhe para o modelo das moradias e do complexo escolar, para os quais existiram passos intermédios diferentes.

4.1.2. Modelo 1 – Moradias

A importação das imagens capturadas durante o voo e o processamento inicial dão origem à visualização dos primeiros ATPs, já georreferenciados (Figura 4.1), com indicação das imagens e respetiva localização/orientação das câmaras que lhes deram origem. Distinguem-se aqui as câmaras que foram identificadas como calibradas, a azul, e a otimização computacional destas câmaras, a verde. A diferença média relativa entre os parâmetros iniciais das câmaras e as otimizadas foi de 1,38% (valor obtido do Anexo A.10. Relatório de Qualidade – Moradias). Aquelas para as quais não foi possível otimizar a posição e que são descartadas apareceriam a vermelho, mas não ocorreram neste modelo.

O relatório de qualidade gerado pelo Pix4D, que pode ser encontrado no Anexo A.10. Relatório de Qualidade – Moradias, aponta que, das 48 imagens processadas, a mediana de *keypoints* identificados foi 36 652, mais do que 10 mil, o que indica que as imagens têm suficiente conteúdo visual para ser processado (tal poderia não ser verdade em zonas com pouco textura, como por exemplo, na neve). Já a mediana dos *keypoints* coincidentes encontrados foi de 14 399, sendo que só eram necessários mil para assegurar alta qualidade (de acordo com a métrica imposta no relatório), o que também sugere uma sobreposição de imagens superior à necessária. A resolução média foi de 1,98 cm por *pixel*, em vez dos 1,28 cm da fase de planeamento no subcapítulo 3.4.2. Planeamento das Missões.

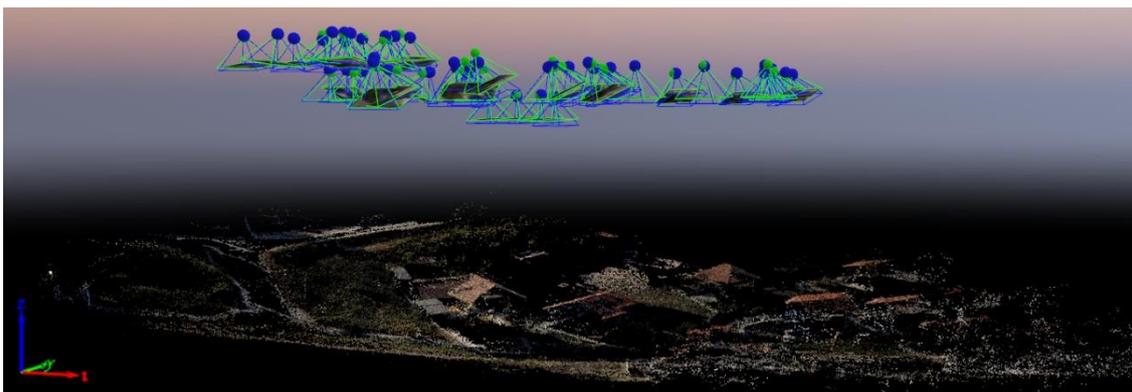


Figura 4.1: Visualização das moradias após o processamento inicial.

O Pix4D permite a calibração manual pela indicação de pontos comuns em, pelo menos, três imagens. Estes são chamados os *Manual Tie Points* (MTPs) e, uma vez definidos, permitem a otimização do modelo [77]. A Figura 4.2 ilustra este processo, em que o *software* tenta apresentar a mesma zona em diferentes imagens e o utilizador indica o mesmo ponto em várias delas.



Figura 4.2: Projeção de um ponto de diferentes imagens (à esquerda) e criação de um MTP (à direita).

A escolha de um ponto que se destaque e que seja facilmente identificável em várias imagens ajuda à sua seleção pelo usuário. É também importante ter em conta que, quanto mais abrangente for a distribuição dos MTPs, melhor afinará a totalidade do modelo. No total, foram marcados seis MTPs para as moradias, cuja distribuição é apresentada na Figura 4.3, numa nuvem densificada de pontos, já após a segunda etapa de processamento, em que foram gerados 3 650 066 pontos, com uma média de 319 por metro cúbico (valores do relatório de qualidade no Anexo A.10. Relatório de Qualidade – Moradias).

No Anexo A.8. *Manual Tie Points - Moradias* apresentam-se várias imagens que ilustram os MTPs criados, assim como uma tabela que apresenta a projeção de erro para cada MTP - a média da distância (em *pixels*) entre as imagens onde o MTP foi marcado e onde foi reprojetoado - e o número de imagens onde o MTP foi marcado face às que foram efetivamente consideradas na otimização (verificadas).



Figura 4.3: Distribuição dos MTPs no modelo para o caso das moradias.

Este tipo de processamento de pontos, com base na identificação de características comuns em fotografias 2D, não é perfeito, estando dependente de uma textura nítida em várias imagens para associá-las corretamente. Como tal, surgem alguns ATP não desejados, como por exemplo, pela consideração de *pixels* no céu ou em sombras. Embora o processamento do modelo *mesh* leve em consideração *outliers*, uma grande densidade destes pontos pode prejudicar o *mesh* e, como tal, devem ser removidos.

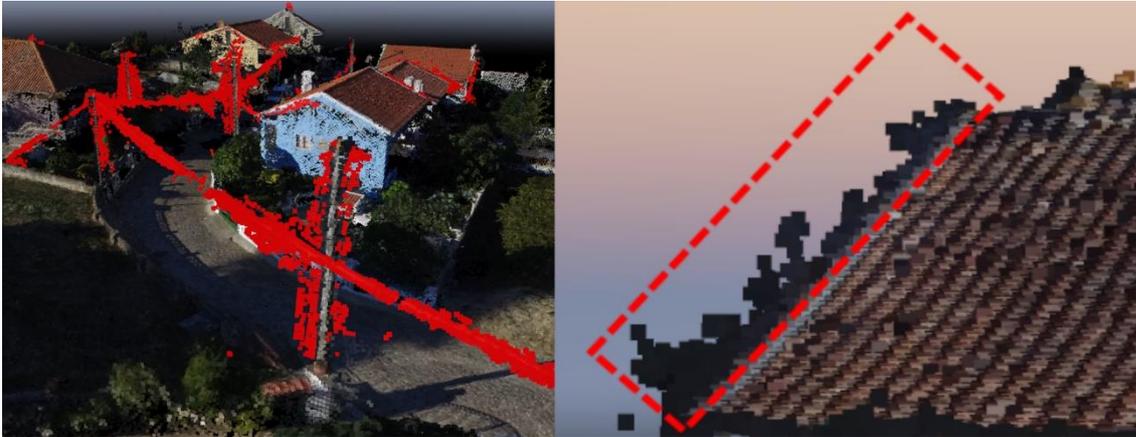


Figura 4.4: Exemplos de pontos não desejados no modelo.

Alguns exemplos destes pontos não desejados encontram-se representados na Figura 4.4, onde se incluiu também os cabos elétricos que, por não serem demasiado significativos e por serem calculados com uma dimensão desproporcionalmente excessiva enquanto *mesh*, se decidiu não ter em conta. A Figura 4.5 indica a vermelho todos os pontos que serão removidos para o próximo passo do processamento.



Figura 4.5: Pontos removidos no modelo 1 – moradias.

Estes passos implicam algum poder computacional que, face ao disponível, podem conduzir a tempos de processamento relativamente elevados (ultrapassando facilmente os 30 minutos para uma etapa de processamento). Uma ferramenta do Pix4D permite a criação de uma “fronteira” de processamento, i.e., apenas considera os pontos dentro da área definida, o que pode ser útil para excluir algumas zonas que não são relevantes ao objeto de estudo. A área definida na Figura 4.6 (que pode ser comparada com a Figura 4.3) descarta, então, zonas que não são relevantes ao estudo do potencial PV, como terrenos desocupados e algumas casas que não apresentavam pontos suficientes para serem razoavelmente reconstruídas. Contudo, mantiveram-se algumas das áreas mais subjacentes que poderiam sombrear os telhados e, desta forma, influenciar os resultados, como o declive no terreno à esquerda e algumas paredes à direita na Figura 4.6.



Figura 4.6: Área de processamento do modelo 1 – Moradias.

O modelo mesh 3D foi então criado: o resultado pode ser observado na

Figura 4.7. De notar que nem todas as paredes puderam ser reconstruídas, presumivelmente como resultado de estarem menos expostas e à sombra e, por isso, gerarem menos ATPs. Contudo isto não representa um impedimento uma vez que o foco do estudo do potencial PV será nos telhados e as paredes em causa não parecem causar sombreamentos significantes ao resto do modelo. Também existe uma falha no conjunto de árvores (não visível nesta perspetiva) que será abordado mais à frente, no subcapítulo 4.2.1. Caso de Estudo 1 – Moradias



Figura 4.7: Modelo *Mesh* resultante – Moradias.

4.1.2. Modelo 2 – Complexo

Como se pode verificar na Figura 4.8, e ao contrário do primeiro, o segundo modelo gerou imagens que foram classificadas como não calibradas, ou seja, não foi possível corresponder suficientes *keypoints* nestas imagens para interpretar com sucesso a colocação relativa entre elas.

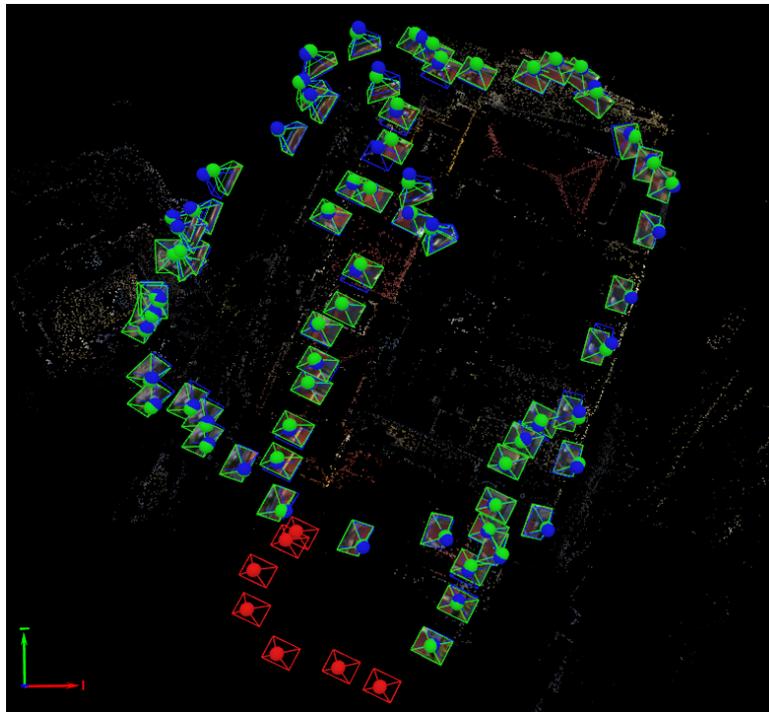


Figura 4.8: Processamento inicial com informação do trajeto da câmara.

Além disso, e como é possível observar na Figura 4.9, a reconstrução do *mesh* resultou num modelo não satisfatório, com várias zonas em falta, assinaladas a vermelho. Isto pode ter sido consequência, por um lado, do trajeto que poderia ter sido melhor (como abordado no subcapítulo 3.5. Recolha dos Dados) e da hora em que foi realizado o levantamento aéreo, uma vez que este tipo de fotogrametria está dependente da luz visível para que os *keypoints* possam ser facilmente encontrados e comparados.



Figura 4.9: Primeiro Modelo Mesh 3D, com indicação das zonas em falta.

Face a esta situação, optou-se por proceder a um levantamento terrestre adicional no dia 10 de agosto de 2017, por volta do meio-dia para minimizar os sombreamentos (uma vez que não se trata do voo de um drone, não existem problemas com o horário das atividades, podendo o levantamento ser feito com pessoas no local), com o objetivo de colmatar o modelo com as zonas em falta. Utilizou-se, para isso, uma máquina fotográfica NIKON D90 com um módulo adicional de GPS que permite juntar informações de localização a cada fotografia tirada. A distribuição das imagens obtidas é descrita pela Figura 4.10.

De um conjunto de 543 imagens, apenas 336 (61%) foram consideradas pelo *software* Pix4D como calibradas e foram usadas. A média relativa entre os parâmetros iniciais da câmara e as otimizadas foi de 10,19% (relatório de qualidade do Anexo A.11. Relatório de Qualidade – Complexo), um número bastante superior ao sugerido pelo *software* (5%), o que pode indicar um problema de má sobreposição, fraca qualidade da imagem ou geolocalização imprecisa.



Figura 4.10: Distribuição das imagens do levantamento terrestre (à esquerda) e distribuição total das imagens (à direita).

O Pix4D possibilita a união de vários projetos, contando que existam pelo menos três MTPs comuns em ambos [78]. Porém esta união introduziu erro e inconsistências entre os modelos, revelando-se necessário marcar vinte MTPs no total para garantir resultados satisfatórios. No Anexo A.9. *Manual Tie Points* - Complexo podem ser encontradas mais informações sobre os MTPs criados neste modelo, assim como várias imagens que os exemplificam.

De acordo com o relatório gerado neste modelo (Anexo A.11. Relatório de Qualidade – Complexo), e possivelmente decorrente das fotografias terrestres com uma distância menor do edifício que as aéreas, a resolução média foi de 1,06 cm por *pixel*, melhor que os 1,98 cm do primeiro modelo e que os 1,28 da fase de planeamento no subcapítulo 3.4.2. Planeamento das Missões. As medianas foram de 20 857 *keypoints* (mais do que os 10 mil sugeridos pela métrica do relatório) e de 4 213 correspondências por imagem (mais do que os mil indicados).

A Figura 4.11 representa os vários passos, que já foram descritos no primeiro modelo, antes de prosseguir para o processamento do modelo mesh 3D:

- (a) A criação dos MTPs para a otimização e união dos modelos aéreo e terrestre, como já foi abordado;
- (b) A remoção manual de pontos não desejados, que devido ao erro introduzido de ambos os modelos, ao sombreamento excessivo do levantamento aéreo e do céu estar visível nas imagens do levantamento terrestre, envolveu um grande número de pontos ATPs incorretos; e
- (c) A definição da área de processamento.

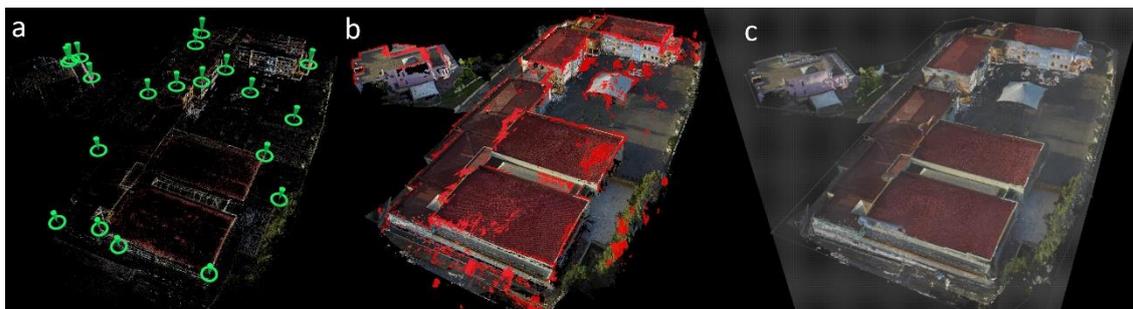


Figura 4.11: Fases de preparação para criação do *mesh*: (a) MTPs; (b) pontos não desejados; (c) área de processamento.

No total foram gerados 16 216 003 pontos neste modelo com uma média de 2 832 pontos por metro cúbico (valores do relatório de qualidade no Anexo A.11. Relatório de Qualidade – Complexo), um número bastante superior aos 3 milhões e meio pontos com uma média de apenas 319 por metro cúbico do primeiro modelo. Este número excessivo não é de todo algo positivo, pois torna o processamento bastante mais lento e não apresenta necessariamente melhores resultados, devendo-se, por um lado, ao método de correção utilizado de união de dois modelos, em que um deles apresenta uma resolução relativamente alta (a terrestre) e, por outro, ao facto do trajeto não ter sido devidamente otimizado na aquisição dos dados como já foi referido. O *mesh* resultante pode ser observado na Figura 4.12, onde se consegue facilmente identificar a sobreposição do modelo terrestre com o aéreo (imagem no canto superior direito).



Figura 4.12: Modelo *mesh* resultante – Complexo.

Com os modelos *mesh* devidamente produzidos para ambos os modelos, é possível prosseguir para a avaliação do potencial PV.

4.2. Análise PV

O *software* escolhido para a componente de análise PV nesta dissertação foi a versão 5 do Rhinoceros 3D, ou Rhino 5, usado para modelação tridimensional com base na tecnologia

NURBS⁵ [56]. O Rhino vem acompanhado pelo Grasshopper 3D, um ambiente para programação visual integrado com as ferramentas de modelação 3D do Rhino. Esta combinação possibilita a programação lógica com o *mesh* 3D, mas ainda não possui ferramentas que permitam a simulação com luz e energia. Nesse sentido, incrementa-se o *software* com o DIVA-for-Rhino, um plug-in que permite estimar valores de radiação, renderizações foto-realistas, iluminação natural e outras, quer de edifícios individuais como de paisagens urbanas, baseando-se em outros softwares de simulação como o EnergyPlus, Radiance e Daysim [58].

Tanto o Rhino como o DIVA são *shareware* pelo que, para efeitos desta dissertação, foi usado o *trial* de três meses do Rhino e solicitada uma licença de estudante temporária para o DIVA.

4.2.1. Caso de Estudo 1 – Moradias

O Pix4D permite exportar o modelo *mesh* criado no subcapítulo 4.1.2. Modelo 1 – Moradias em formato .obj, que pode ser importado para o Rhino juntamente com a textura, em formato .jpg, que adiciona a camada “fotográfica” no modelo tridimensional.

Após a importação, e antes de prosseguir para a análise PV em si, são necessários alguns passos intermédios tendo em vista a adaptação do modelo à simulação solar. Isto implica:

- (1) a simplificação do modelo, dentro do aconselhável, para diminuição do poder computacional necessário à simulação;
- (2) a verificação de que os sombreamentos do modelo irão corresponder à realidade;
- (3) a seleção e, se necessário, recorte das áreas de estudo para simulação (neste caso, os telhados), numa tentativa de diminuir os requisitos computacionais para as simulações.

Para a simplificação do modelo usou-se ao comando *ReduceMesh* [79], que tenta reduzir o número de superfícies do *mesh* com o mínimo de distorção geométrica e da textura possível, para reduzir em 10% o número de superfícies no modelo (de 66 369 para 59 993).

Para efeitos da verificação dos sombreamentos no modelo utilizou-se o *Sun Path*, uma das ferramentas do DIVA que simula um diagrama com o caminho do sol e exhibe as sombras correspondentes. O modelo desenvolvido no Grasshopper, que é exibido na Figura 4.13, mostra alguns dos inputs necessários, como:

- i) **Loc:** informações relativas à localização do modelo. Não estando incluído nos ficheiros de origem, é necessária a importação de ficheiros relativos à localização de Lisboa, com informações como a latitude, longitude, clima (humidade, temperatura, velocidade do vento, etc). Estes ficheiros nos formatos .ddy, .epw e .stat são equivalentes aos usados no *software* EnergyPlus e puderam ser adquiridos no sítio do mesmo [80].
- ii) **Pt:** introdução do modelo em que se deseja projetar o sombreamento. A figura geométrica (input) é obtida através da seleção de múltiplos *meshes* no Rhino.
- iii) **R:** o raio do diagrama solar, neste caso definido em 72 metros.

⁵ A tecnologia *Non Uniform Rational Basis Spline* (NURBS), é um modelo matemático usado para representar curvas e superfícies, estando bastante presente em softwares gráficos de desenho assistido por computador.

- iv) **M, D e H:** mês, dia e hora. Cada um destes parâmetros está definido num grupo em que é possível selecionar um dia único (nos *sliders*) ou uma série, o que resultaria na sobreposição de várias sombras ao longo dos intervalos escolhidos.

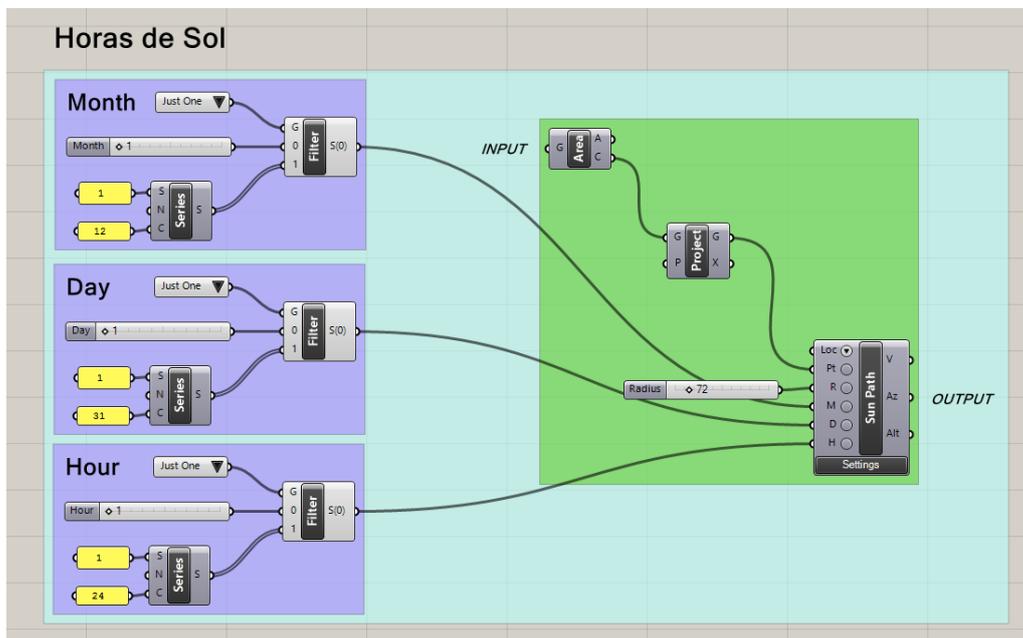


Figura 4.13: Modelo de Grasshopper para visualização do trajeto do sol e respetivas sombras ao longo do ano.

Este modelo não só foi útil para compreender o movimento do sol no modelo e validar visualmente os sombreamentos, como ajudou ao preenchimento de uma falha existente entre as árvores, de modo a garantir que não existiriam penetrações de luz irrealistas durante a simulação. Uma vez que a própria textura do modelo já apresentava sombras provenientes do dia do levantamento, simularam-se as sombras a vermelho para o mesmo mês, dia e hora do levantamento, com o objetivo de distinguir ambas. Assim, foi possível construir as formas geométricas nas árvores (a verde) de modo a que ambas as sombras coincidissem (Figura 4.14).

Para os telhados poderem ser seleccionados, o primeiro passo é usar o comando *Explode* do Rhino para separar o modelo. Tratando-se de um único mesh unificado, o *software* irá automaticamente identificar as arestas com mais do que um determinado ângulo (os *unwelded edges*) e separar o modelo em vários *mesh* relativamente planos. De forma geral, os telhados podem ser assim seleccionados e separados num *layer* diferente, *mesh a mesh*. Porém, em muitas ocasiões, o *mesh* seleccionado sai do limite pretendido do telhado, sendo necessário recortá-lo. Para tal, usa-se o *MeshSplit*, um comando que nos pergunta o objeto a ser cortado - o *mesh* em questão - e o objeto cortante, para o qual se cria uma *polyline* sob o local onde se pretende realizar o corte.

A Figura 4.15 apresenta o resultado final da seleção dos telhados e a sua divisão por *layers*, correspondente ao número atribuído a cada moradia.

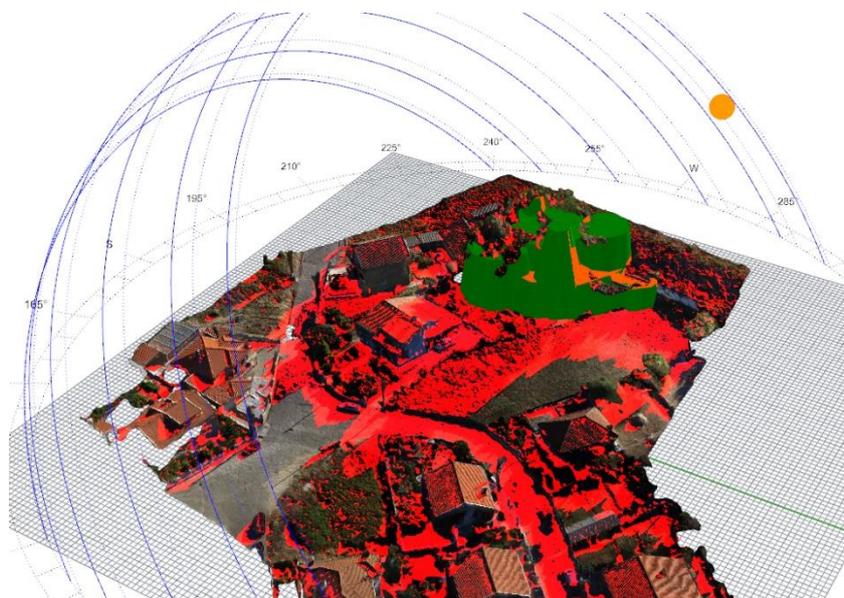


Figura 4.14: Diagrama do caminho do sol e simulação do sombreamento (a vermelho) a coincidir com o sombreamento real texturizado no próprio modelo.

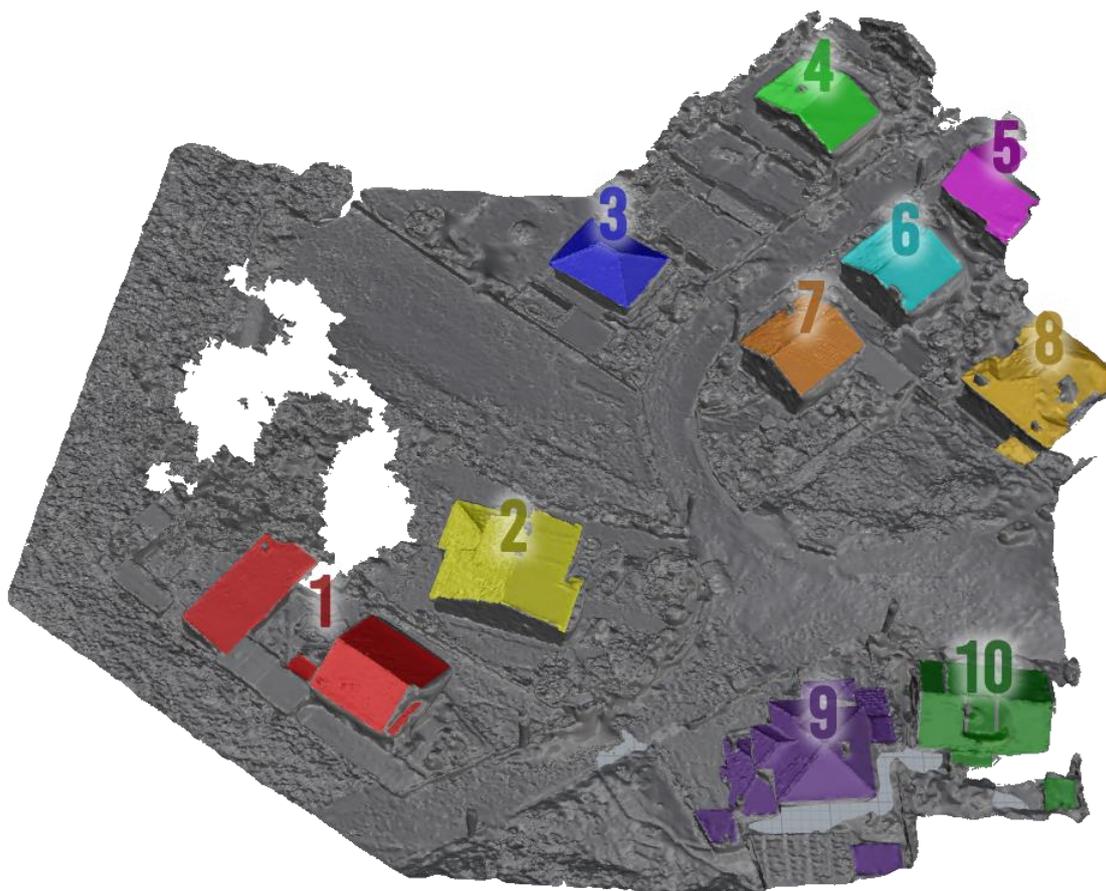


Figura 4.15: Seleção e enumeração dos telhados das moradias.

A Figura 4.16, que pode ser observada em maior detalho no Anexo A.12. Modelo Grasshopper do Potencial PV em detalhe, mostra o modelo desenvolvido no Grasshopper para avaliação da radiação solar incidente, e que será doravante designado de “módulo de avaliação solar”.

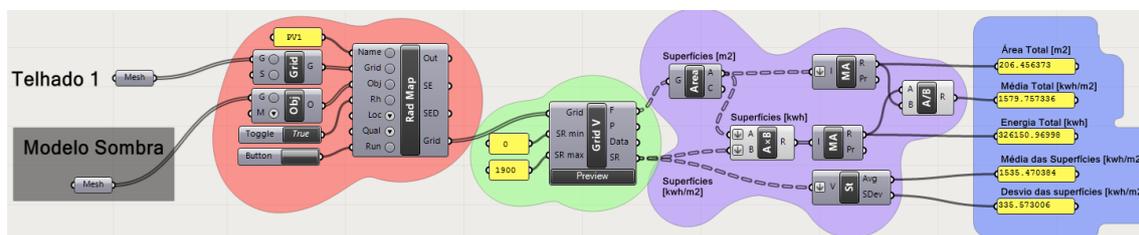


Figura 4.16: “Módulo de avaliação solar” - Modelo do Grasshopper para cálculo da radiação solar incidente.

O módulo de avaliação solar divide-se em quatro partes:

- 1. Radiation Map (a vermelho):** ferramenta do DIVA que irá simular a incidência solar em determinada superfície para o ano todo. Tem como principais parâmetros:
 - a. A superfície a ser estudada, neste caso, o telhado da moradia 1.
 - b. O modelo 3D restante a ser considerado para efeitos de sombreamento. Embora se possa simplesmente considerar todos os *layers* atualmente visíveis, através do *Toggle “True”* no input “Rh”, preferiu-se a introdução de todo o modelo como objeto adicional para evitar eventuais lapsos, uma vez que a visibilidade dos *layers* está recorrentemente a ser alterada no decorrer do trabalho com o Rhino.
 - c. Nome: para efeitos de memória interna do *software*.
 - d. Localização: em que se utiliza os mesmos ficheiros de Lisboa que os anteriormente descritos neste subcapítulo.
 - e. Qualidade: uma maior qualidade implica um menor desvio de erro nos cálculos, mas também um tempo de processamento muito maior. Uma vez que o modelo 3D a ser estudado tem uma dimensão e complexidade considerável, optou-se pela qualidade *low* (entre as opções *lowest*, *low*, *medium* e *high*) para evitar grandes tempos de espera.
 - f. Botão para correr a simulação.
- 2. Grid Viewer (a verde):** ferramenta do DIVA que exhibe a informação de *grid*, isto é, informação em grelha sobre as superfícies, que é um dos outputs da ferramenta *Radiation Map*. Apenas para efeitos de visualização, também é possível inserir um valor mínimo e máximo de irradiância solar. Neste caso, optou-se por definir o máximo de 1900 kwh/m^2 , uniformizando assim a cor para qualquer área com uma irradiância igual ou superior a este valor, para uma identificação mais fácil destas zonas ideais.
- 3. Pós-Análise (a roxo):** conjunto de cálculos e ferramentas com o objetivo de estimar alguns valores básicos que caracterizam a amostra, como: pela multiplicação das áreas com as irradiâncias para calcular a energia total incidente; pela divisão desta pela área total para obtenção de uma média total; ou pelo uso do plugin para Grasshopper “*KT tools*” para obtenção do desvio entre as irradiâncias de todas as superfícies.

- 4. Valores da Pós-Análise (a azul):** valores resultantes como a área total [m^2], média total [kwh/m^2], energia total [kwh], média e desvio de todas as superfícies individuais [kwh/m^2].

Enquanto o módulo de avaliação solar apresentado na Figura 4.16 diz apenas respeito ao telhado da moradia 1, a Figura 4.17 aglomera os módulos de todos os telhados e une todos os valores da pós-análise em listas (a laranja), possibilitando o cálculo dos somatórios, médias e desvios entre os dez telhados. A divisão dos telhados nestes “módulos” no Grasshopper, em vez de simular todos num só, permite um processamento mais faseado que ajuda à simulação de modelos com grandes dimensões num computador normal. De outra forma, o processamento poderia demorar bastante tempo e, teria de ser repetido na totalidade na eventualidade de algum lapso na configuração dos parâmetros e opções.

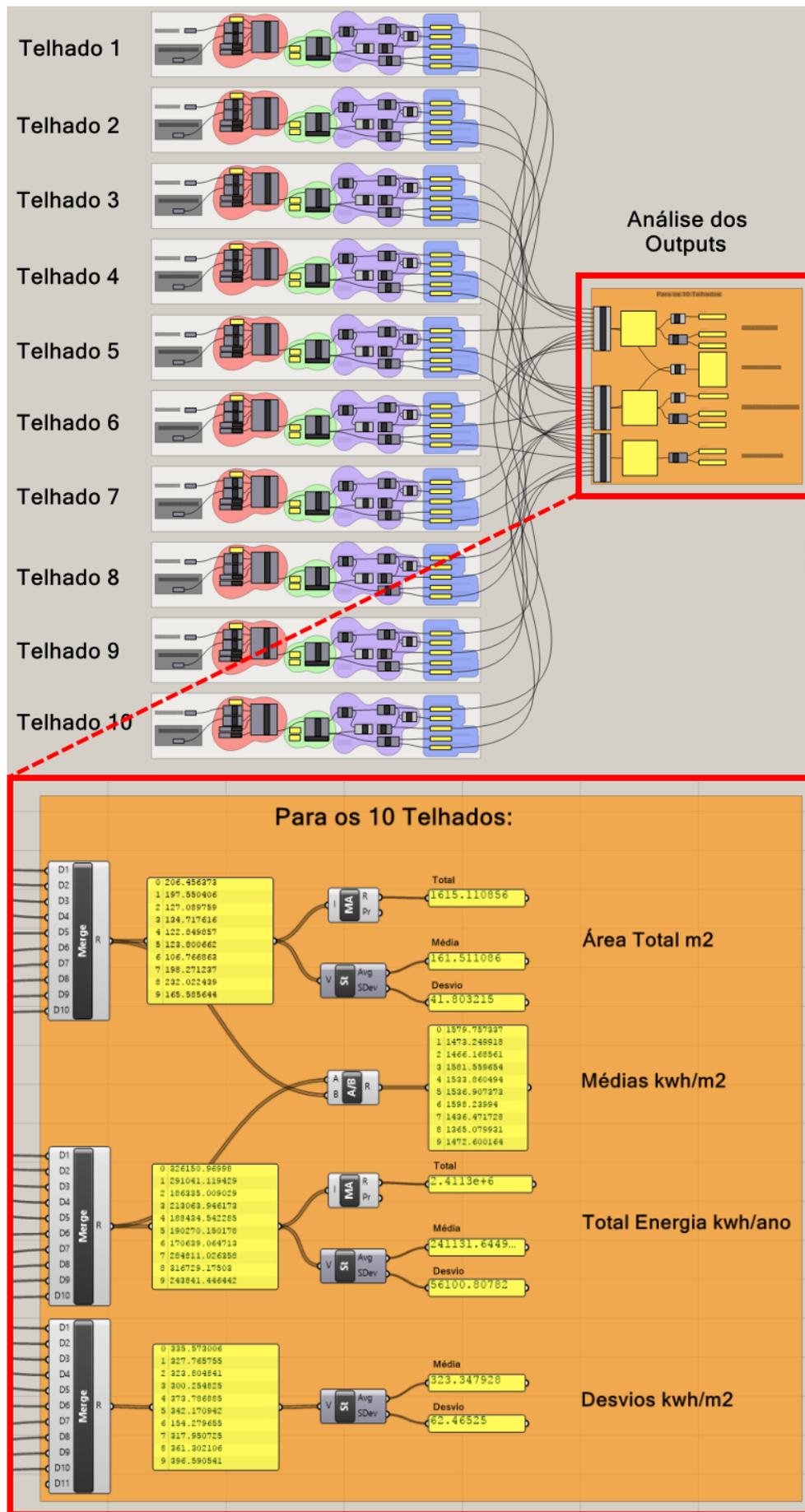


Figura 4.17: Modelo aglomerador dos módulos de avaliação solar.

A Figura 4.18 exibe a vista de cima do modelo 3D com a apresentação dos resultados, em escala de cores, da radiação solar [kWh/m^2] anual do modelo das moradias. Sob esta área de $1615 m^2$ de telhados incidem, no total, $2412 MWh$ de radiação solar por ano, ou uma média de $1493 kWh/m^2$ por ano.

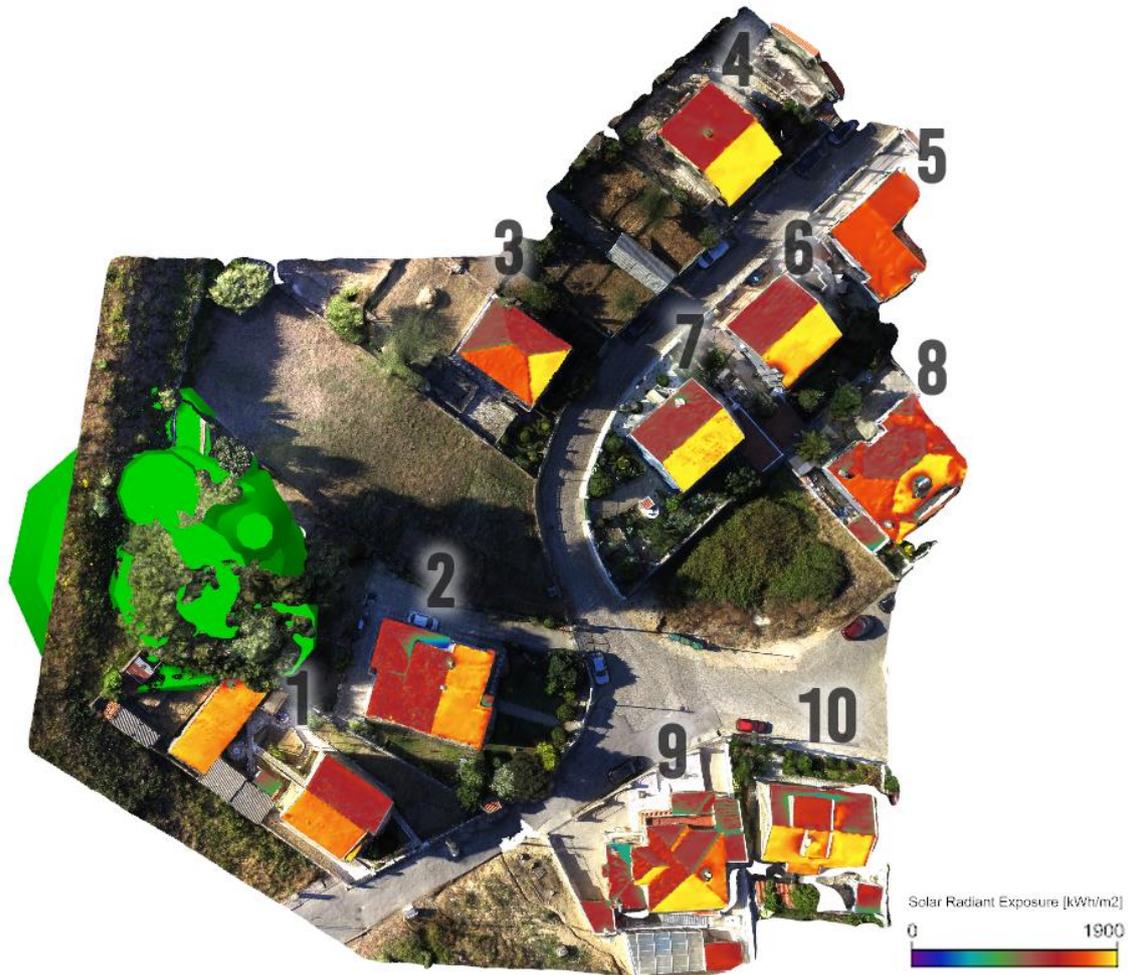


Figura 4.18: Visualização dos valores de radiação solar incidente em kWh/m^2 anuais.

Valores complementares sobre a área, radiação incidente, médias por metro quadrado e desvios para cada telhado podem ser encontrados no Anexo A.13. Valores da Pós-Análise – Moradias, juntamente com a figura que relaciona a área com a radiação incidente, para uma melhor caracterização desta amostra de moradias e os seus telhados. De acordo com esta análise, o telhado 1 é o que possui uma maior radiação incidente (326 MWh) e o telhado 7 o que possui menor (171 MWh).

Na Figura 4.19 é possível observar, com maior pormenor, a radiação solar incidente e os efeitos de sombreamento ao longo do ano nos telhados das moradias 1, 2 e 10.

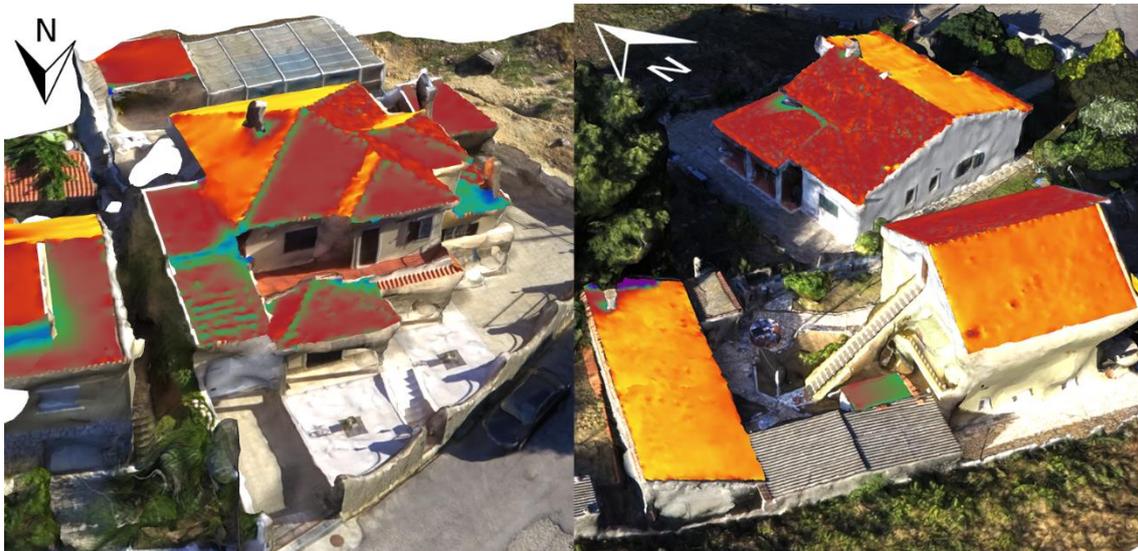


Figura 4.19: Vista em perspetiva da moradia 10 (esquerda) e das moradias 1 e 2 (direita) com escala de 0 a 1900 kWh/m^2 da radiação solar incidente.

Destes valores, pode-se estimar o output de um sistema fotovoltaico através da equação (4.1):

$$E_{PV} [MWh] = A [m^2] r [\%] H \left[\frac{MWh}{m^2} \right] PR \quad (4.1)$$

em que A é a área dos painéis solares, r a sua eficiência, H a radiação incidente ao longo de um ano num painel perfeitamente inclinado (2170 kWh/m^2 para Portugal de acordo com o PVGIS [81]) e PR é o *performance ratio*, que pode incluir, por exemplo, perdas do inversor (4 a 10%), de temperatura (5 a 20%), de cabos DC e AC (ambos de 1 a 3%), sombreamentos (de acordo com o local), perdas associadas a uma irradiação demasiado fraca e acumulação de poeiras e outras partículas nos painéis [82]. Pressupõe-se uma eficiência dos painéis de 15% (um valor típico para um painel de silício [83]) e um $PR = 0,8$, por acumulação das perdas descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Perdas consideradas para o $PR = 0,8$.

Perdas	%
Inversor	8%
Temperatura	8%
Cabos DC	1%
Cabos AC	1%
Irradiação Fraca	3%

De notar que não foram consideradas as perdas por sombreamento, uma vez que estas já se encontram incluídas na simulação, entrando na equação através da $Energia_{incidente} [MWh]$. Temos então, para a totalidade dos telhados das moradias consideradas:

$$\begin{aligned} E_{PV} [MWh] &= E_{incidente} [MWh] r [\%] PR \\ &= 2412 \text{ MWh} \times 0,15 \times 0,8 = 289,4 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Contudo, esta ainda não é uma aproximação realista uma vez que, na prática, o mais normal é a instalação de painéis PV apenas nos telhados com melhor orientação, o que aumentará a energia incidente face ao investimento e diminuirá o *payback*⁶.

Neste sentido, e para exemplificar com maior realismo a aplicação desta metodologia no planeamento de sistemas fotovoltaicos num grupo de moradias, foram selecionadas as melhores áreas do conjunto dos dez telhados com base na Figura 4.18, tendo em conta a radiação solar incidente. Excluídas desta seleção ficaram as moradias 7 e 8, a primeira pelo facto do telhado ter uma orientação menos ideal à instalação de PV quando comparada com as restantes, e a moradia 8 pelo facto de já possuir um sistema solar térmico na orientação mais interessante do seu telhado. Desconsideraram-se também algumas áreas para evitar sobreamentos causados por árvores (moradia 1), ou por características do próprio telhado (moradia 10).

A Figura 4.20 exhibe as áreas selecionadas assim como as radiações solares incidentes em cada uma. Este cenário com a seleção dos melhores telhados constitui apenas 25% da área total dos telhados, mas recebe 31% da mesma radiação solar, resultando numa média de 1834 kWh/m^2 (mais 23% que a média do total, 1493 kWh/m^2). Este valor é concordante com estudos anteriores que indicam que os melhores 10% dos telhados colhem cerca de 13% da energia disponível [84]. Outros valores provenientes da pós-análise do Grasshoper podem ser consultados no Anexo A.14. Valores da Pós-Análise – Seleção das Moradias.

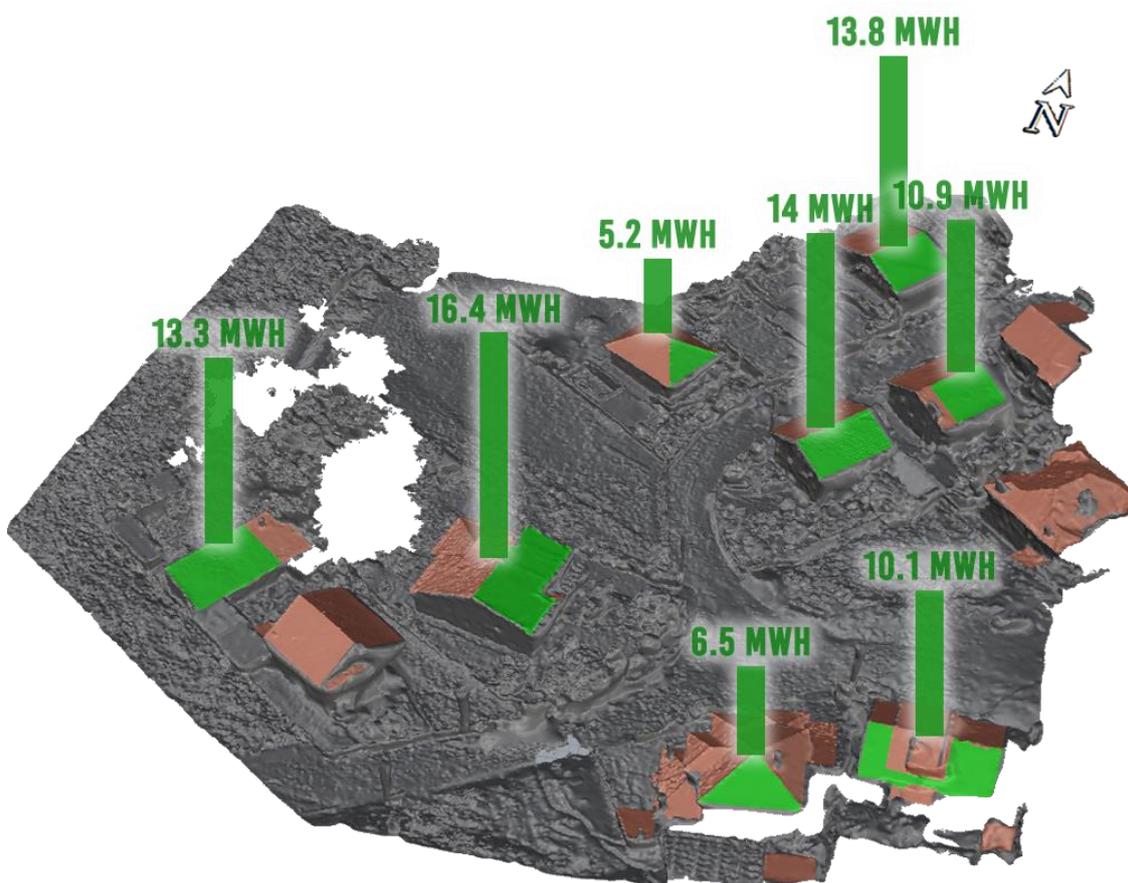


Figura 4.20: Seleção dos melhores telhados e respetivos valores de potencial PV.

⁶ Tempo para o rendimento gerado pela produção de eletricidade amortizar o investimento do sistema PV.

Recorrendo à mesma equação para o cálculo da energia que é possível gerar com sistemas PV nestas zonas, obtemos 90,3 *MWh*. Se dividirmos pela área usada obtemos 220 *kWh/m²*, face aos 179 *kWh/m²* quando considerada a totalidade dos telhados.

Para comparação, podemos considerar o consumo médio anual de eletricidade por alojamento no setor doméstico no concelho de Mafra no ano de 2015 [85] de 2,505 *MWh*. Se fosse este o caso, todas as moradias (exceto as moradias 7 e 8, sem PV) iriam produzir mais do que a energia elétrica que consomem. Considerando o conjunto das dez moradias num regime de partilha de energia, a produção anual seria 3,6 vezes superior ao consumo.

4.2.2. Caso de Estudo 2 - Complexo

Começou-se pelo mesmo procedimento de corte e distribuição dos telhados em *layers* das moradias, resultando na divisão apresentada na Figura 4.21.

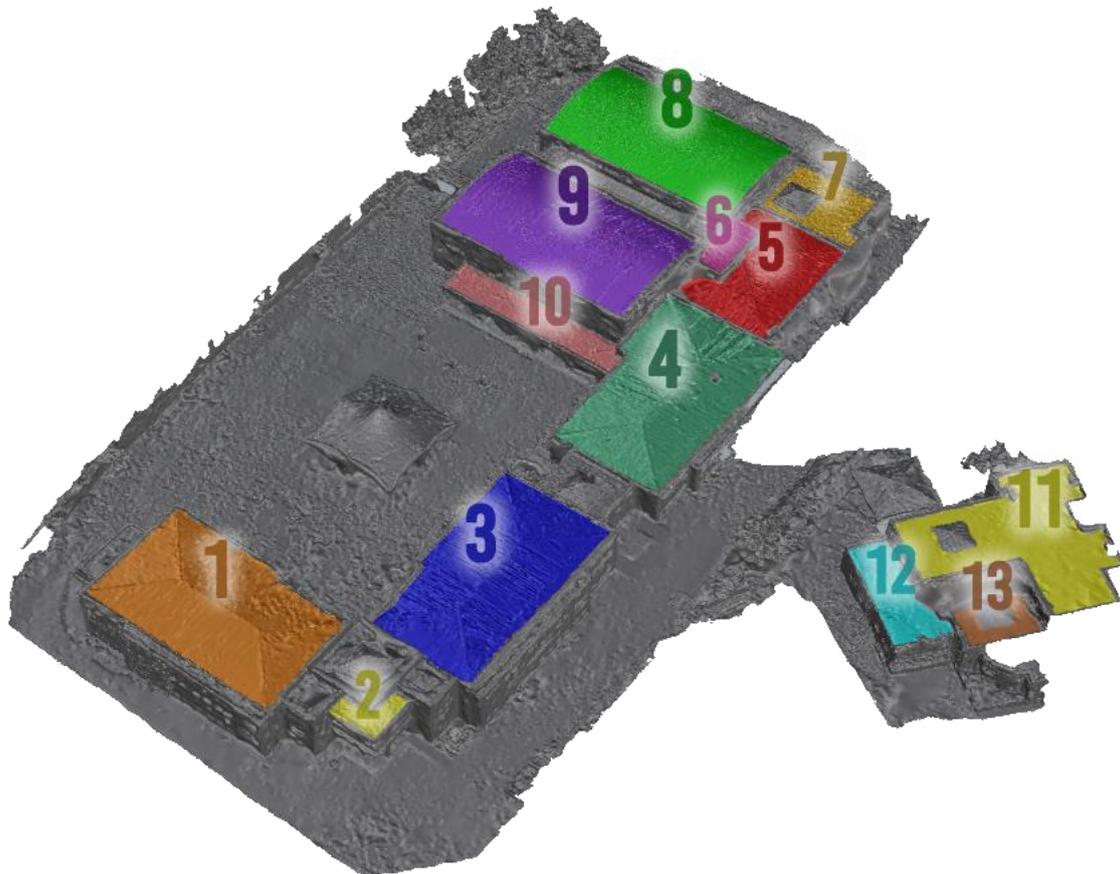


Figura 4.21: Seleção e enumeração dos telhados do complexo.

Usando o módulo de avaliação solar da Figura 4.16 para cada um dos telhados, simulou-se a exposição solar do complexo. Embora possua uma média de incidência solar por metro quadrado menor que as moradias (1401 *KWh/m²* em comparação com 1493 *KWh/m²*), em parte devido à inclinação mais horizontal dos seus telhados, o complexo compensa pela sua área bruta de

3843 m^2 , que recebe quase o dobro da radiação solar anual (5383 MWh), que se poderia traduzir num sistema PV com uma produção anual de 646 MWh .

Contudo, e ao contrário das moradias, em que se pode assumir a instalação de um sistema fotovoltaico com uma inclinação próxima da do telhado, na instalação de um sistema fotovoltaico num telhado horizontal justifica-se, normalmente, uma estrutura que optimize a orientação e inclinação dos painéis. Desta forma, e posteriormente ao estudo da incidência solar nos telhados que continua a ser relevante para a identificação de sombras, decidiu-se proceder a um dimensionamento simplificado de um sistema PV no complexo, que servirá de exemplo para aplicação em telhados horizontais na metodologia desenvolvida nesta dissertação.

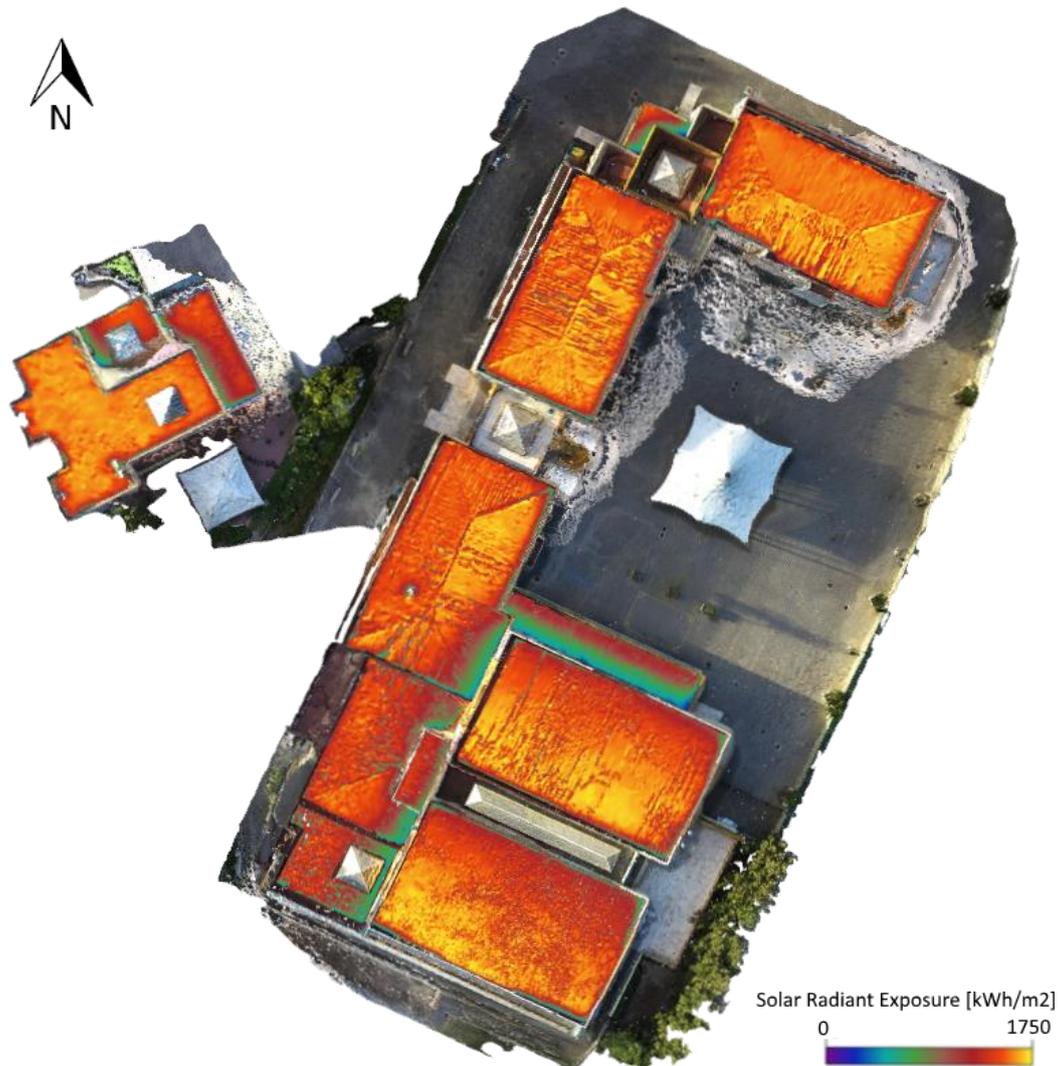


Figura 4.22: Visualização dos valores de potencial PV em kWh/m^2 anuais.

O painel usado neste dimensionamento terá $1,5 \text{ m}$ de altura e 1 m de largura. Contudo, antes de se proceder à colocação manual dos painéis nos telhados do modelo 3D do complexo, é primeiro preciso definir alguns parâmetros. Nomeadamente:

- a) **Orientação:** sendo o local de estudo Lisboa, que fica no hemisfério norte, e pretendendo-se apenas maximizar a produção de energia, a orientação ideal é a sul. O cenário poderia

ser diferente caso se obtivesse dados sobre o consumo do complexo e se quisesse dimensionar para autoconsumo, isto é, que a energia produzida fosse consumida no próprio sítio. Nesse caso a orientação ideal poderia ser mais para este (caso se quisesse maximizar a geração de energia da parte da manhã) ou para oeste (caso se quisesse maximizar a geração de energia da parte da tarde).

- b) **Inclinação:** para averiguar que inclinação teria melhor desempenho, começou-se por simular a incidência solar em painéis com diferentes inclinações: 25°, 30°, 35°, 40° e 45° graus (da esquerda para a direita na Figura 4.23). O painel com 35° teve o melhor desempenho e será o usado. Este resultado também foi também confirmado pela ferramenta PVGIS que estima a inclinação ideal em Lisboa de 34° graus [81]. Mais uma vez, num regime de autoconsumo, poderia querer-se maximizar a energia no inverno (painel mais inclinado) ou no verão (menos inclinado).

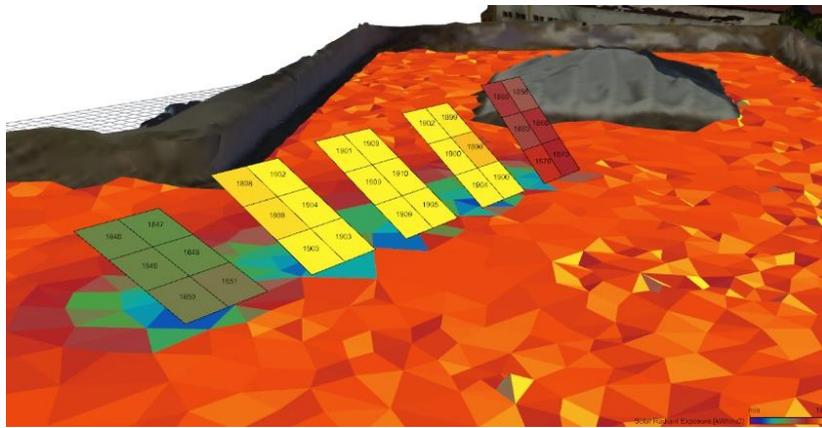


Figura 4.23: Comparação de irradiação incidente com painéis com diferentes inclinações.

- c) **Distância entre filas:** a distância entre filas dependerá da determinação da projeção das sombras. Como regra geral, esta distância deve ser tal, de forma a que, ao meio dia solar do dia mais desfavorável (i.e. no solstício de inverno a 21 de dezembro), a sombra da aresta superior duma fila se projete, no máximo, sobre a aresta inferior da fila seguinte [86]. Neste dia e a esta hora, a altura solar (ângulo entre a terra e o sol) dá-se por:

$$h_0 = (90^\circ - \text{Latitude do lugar}) - 23,5^\circ \quad (4.3)$$

Dada a latitude de Lisboa de $38,71667^\circ$, temos então uma altura solar de $27,783^\circ$. Considerando os parâmetros indicados na Figura 4.24, z como a altura da aresta superior do painel ao chão e L como comprimento do painel (1,5m), pode-se equacionar:

$$d = d_1 + d_2 = \frac{z}{\tan(h_0)} + \frac{z}{\tan(\beta)} = L * \left(\frac{\text{sen}(\beta)}{\tan(h_0)} + \cos(\beta) \right) \quad (4.4)$$

Mesmo com a distância obtida de $d = 2,86 \text{ m}$, podem-se produzir sombras nas filas durante o inverno ao início e ao final do dia, o que, mesmo não sendo grave, é recomendável aumentar a distância em 25% se não existirem limitações de espaço [86].

Considerando a área considerável de 3843 m^2 de telhado no complexo, e pretendendo-se rentabilizar o investimento, considerou-se então a distância de $d = 3,58 \text{ m}$.

Obtido este valor, confirmou-se a sua validade com uma simulação de duas filas de painéis no solístico de inverno (Figura 4.24).

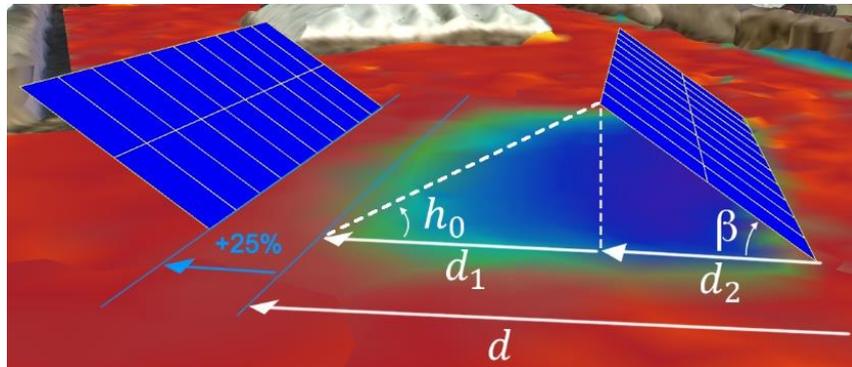


Figura 4.24: Estudo da distância entre *arrays* de painéis PV.

Recorrendo ao ambiente do Rhino para copiar, colar e mover as filas, os painéis foram então colocados manualmente sob os telhados do complexo. Para auxiliar neste processo, criou-se um *polyline* com a distância definida entre as fileiras que serviu de “régua” na sua colocação. Embora esta distância apenas seja válida para um telhado horizontal, uma vez que as inclinações existentes nos telhados do complexo são variáveis e não muito significativas, optou-se por não efetuar cálculos para cada inclinação e apenas ter em consideração uma distância ligeiramente maior ou menor consoante se visualizasse necessário.

Durante a colocação, levou-se em consideração não só a incidência solar durante o ano apresentada na Figura 4.22 (para excluir à partida as secções de telhado que não iriam ser usadas) como também a simulação efetuada para o dia do solstício de inverno (Figura 4.25), de forma a realçar e ajudar a evitar a exposição dos painéis às sombras. Assim, foi possível replicar “visualmente” as mesmas regras que as aplicadas, anteriormente, para a distância entre fileiras, sem a necessidade de cálculos para cada obstáculo existente no modelo 3D: desde as orlas do telhado, passando por claraboias, paredes e chaminés.

No total, foram dispostos 434 painéis PV, perfazendo uma área de 651 m^2 . O sistema tem uma radiação incidente de 1860 kWh/m^2 ou 1211 MWh ao longo do ano e, levando em consideração a Equação (4.1), possui uma capacidade de produção de 145 MWh de energia por ano, ou 223 kW/m^2 . Considerando o consumo do complexo de 257 MWh de eletricidade por ano [60], este valor de produção PV representa cerca de 56,4% das necessidades de energia elétrica do complexo.

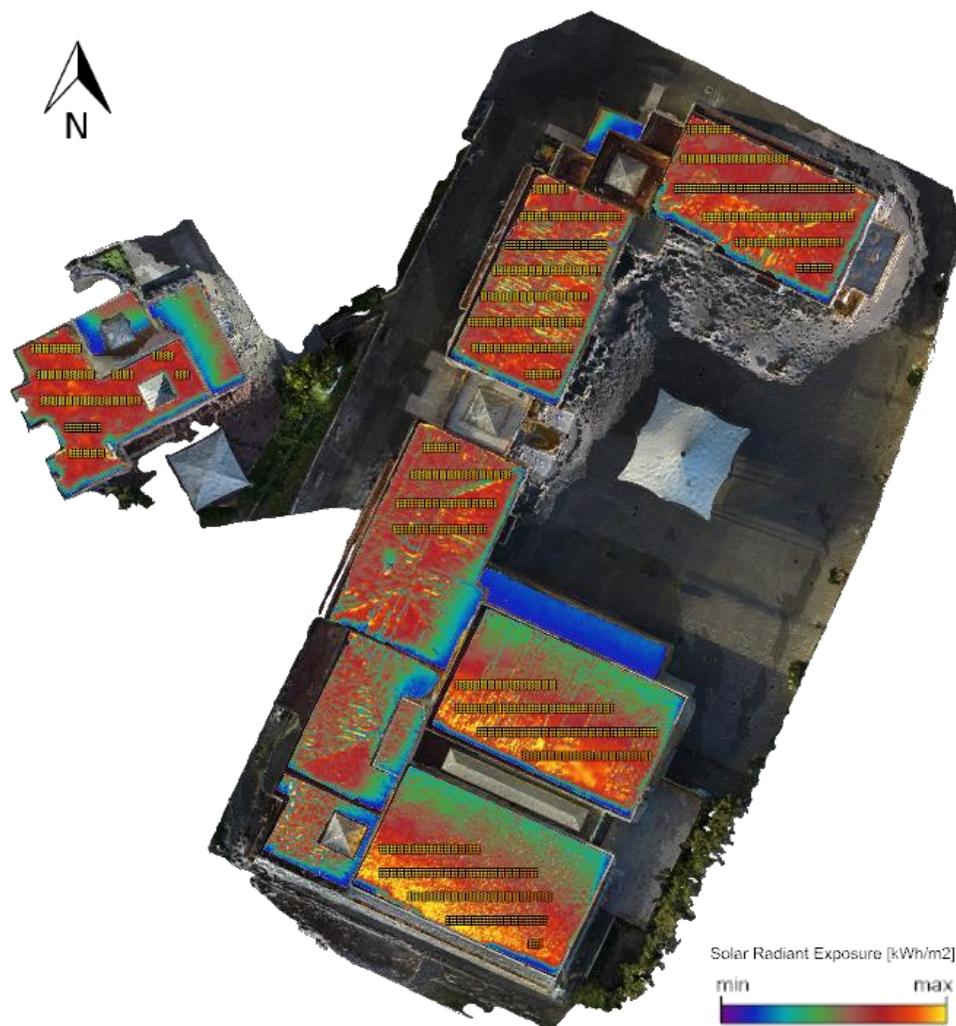


Figura 4.25: Colocação dos painéis tendo em consideração os sombreamentos no solstício de inverno.



Figura 4.26: Perspetiva do complexo e distribuição de PV.

A Figura 4.27 apresenta em pormenor os painéis do telhado 11, sendo possível observar a variação da radiação solar incidente em diferentes zonas dos painéis, provavelmente causados por sombreamentos nas primeiras e últimas horas do dia. É de notar que, para além da redução de energia recebida localmente que é considerada na simulação, os sombreamentos e diferenças de irradiância entre células e painéis podem gerar perdas adicionais no sistema PV que não são ponderadas neste modelo.

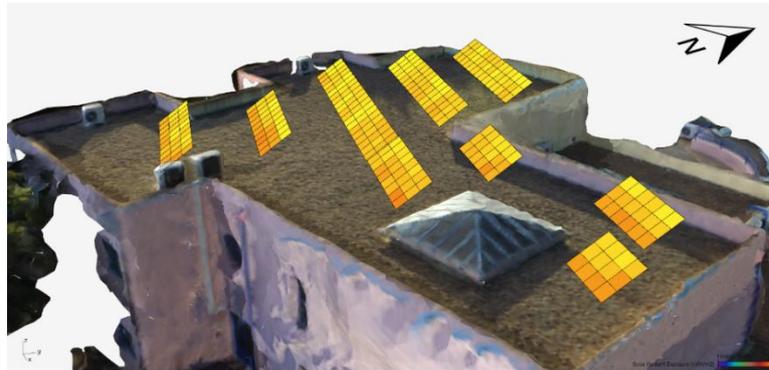


Figura 4.27: Perspetiva do telhado 11 do complexo com escala de 1000 a 1900 kWh/m^2 da radiação solar incidente nos painéis solares.



Figura 4.28: Sistema PV alternativo para o complexo considerando a maximização da produção PV.

Inicialmente, optou-se por um sistema que maximizasse a produção por painel e, conseqüentemente, o retorno do investimento, mas outras disposições de painéis poderiam ter sido consideradas. Com efeito, a Figura 4.28 apresenta outra opção interessante, que consiste na colocação das filas de acordo com a orientação dos telhados em vez de a sul, permitindo aumentar o número de painéis e maximizar a produção PV.

Por observação da Tabela 4.2: Comparação entre o primeiro sistema considerado para o complexo, com foco na eficiência, e o segundo, com foco na produção., que compara ambos os sistemas PV, pode-se confirmar o aumento na produção de energia na ordem dos 36%. Por outro lado, a adição de 176 painéis (mais 41% dos painéis que o primeiro sistema), implicaria um aumento do investimento no sistema.

Tabela 4.2: Comparação entre o primeiro sistema considerado para o complexo, com foco na eficiência, e o segundo, com foco na produção.

	Painéis #	Área [m ²]	Radiação Solar Incidente		Potencial PV		
			Total [MWh]	Média [kWh/m ²]	Total [MWh]	Média [kWh/m ²]	% do Consumo
Foco na Eficiência	434	651	1211.10	1860	145.33	223.24	56.55%
Foco na Produção	610	915	1649.60	1803	197.95	216.34	77.02%

Finalizam-se, assim, os casos de estudo das moradias e dos complexos, demonstrando a adaptabilidade e viabilidade da análise de PV com recurso a drones. Este processo de experimentação é, afinal de contas, e mais do que os casos de estudo em si, o objetivo desta dissertação, e será através dos conhecimentos daqui adquiridos que se irão extrair conclusões e traçar uma metodologia final para este processo no Capítulo 5.

Capítulo 5 – Conclusões, Metodologia Proposta e Desenvolvimentos Futuros

O presente capítulo encontra-se dividido em três partes: a apresentação das conclusões, a sistematização da metodologia usada e proposta neste trabalho para recolha e análise de dados para estudos locais do potencial PV com recurso a drones e, por fim, a sugestão de possíveis desenvolvimentos futuros.

5.1. Conclusões

A exploração de novas abordagens que permitam contribuir para uma realidade energética mais sustentável é de maior importância, nomeadamente na multiplicação do peso das energias renováveis, da economia de espaço e da geração distribuída. A tecnologia estudada ao longo desta dissertação, com a finalidade de cativar e descomplicar o processo para a adoção de PV, assenta na utilização de drones, pela facilidade e acessibilidade da sua aquisição e aplicação para levantamentos aéreos cada vez mais evidentes. Aprofundaram-se, então, conhecimentos teóricos sobre estas aeronaves, as implicações legais da sua utilização para levantamentos aéreos, os tipos de sensores que poderiam ser associados – como máquinas fotográficas, LiDAR ou sensores térmicos – e os *softwares* atualmente existentes que foram aplicados na aquisição e tratamento dos dados.

Passou-se em seguida pela preparação da missão, que teve em conta várias tecnologias disponíveis e, por isso, envolveu a realização de diversos ensaios, que proveram uma preparação prática e conhecimento de causa da realidade da aeronáutica e da fotogrametria, tendo-se revelado enriquecedoras e extremamente relevantes para uma deliberação cuidada e criteriosa ao longo deste trabalho. A missão teve também desafios logísticos, o primeiro de todos tendo sido a seleção de um local com características vantajosas ao levantamento aéreo e que, preferencialmente, trouxesse uma fundamentação adicional que valorizasse a sua utilidade fora do contexto académico. A solução encontrada passou por uma colaboração com a Câmara Municipal de Mafra e consistiu em dois objetos de estudo, ambos na vila da Venda do Pinheiro: (1) um conjunto de dez moradias, para a aplicação da solução numa zona suburbana com telhados inclinados; (2) e um complexo escolar e multidesportivo, que permitiu testar a solução em edifícios de maior dimensão e com telhados horizontais. Em ambos os casos, existe hipótese de aplicação da tecnologia PV em contexto real: as moradias para servir de exemplo numa iniciativa de “bairro sustentável” e o complexo no contexto de um *retrofit* energético previsto. Uma vez de selecionado o local e definidos os equipamentos, passou-se à solicitação da autorização necessária para o levantamento aéreo à AAN e, finalmente, o levantamento aéreo em si, que implicou, entre outros, levantamentos de terreno para definir o local indicado para a descolagem/aterragem e a pré-programação do percurso aéreo, atendendo às limitações existentes, por exemplo do horário de funcionamento do complexo.

Após a missão, deu-se o processamento das imagens para um modelo tridimensional *mesh* através do software Pix4D. Enquanto que, por um lado, o *software* simplifica profundamente a criação de um modelo tridimensional, possui também bastante documentação, técnicas e normas que podem e devem também ser consultadas, de forma a garantir o melhor resultado possível. Alguns exemplos destas técnicas foram abordados, como a criação de MTPs para a calibração do modelo, a limpeza de ATPs não desejados e a criação de áreas de processamento para acelerar o

processamento. No caso do complexo, foi ainda necessário visitá-lo uma segunda vez para um levantamento terrestre, para a colmatação de falhas do levantamento aéreo. Os dois levantamentos foram então unidos através de um método de união de projetos que utilizou MTPs comuns a ambos os modelos.

Recorrendo à ferramenta Grasshopper no *software* Rhino 3D, juntamente com o *plugin* DIVA, procedeu-se à análise de radiação solar incidente do modelo *mesh*, o que implicou a seleção e recorte dos telhados que se pretendiam estudar e a realização de várias simulações para cada telhado e cenário. No caso do complexo exemplificou-se ainda a instalação de um sistema PV, com vários painéis solares.

Analisando os valores obtidos e, com recurso a alguns cálculos adicionais, estimou-se o potencial PV para cada caso de estudo: no conjunto das dez moradias, a seleção de 25% dos telhados com maior exposição solar, resultou num potencial anual de 90,3 *MWh*, o suficiente para cobrir três vezes e meia o consumo, se considerando o consumo médio no setor doméstico em Mafra em 2015 e sem levar em conta o desfaseamento entre a produção e o consumo; já para o sistema de 434 painéis PV desenvolvido para o complexo escolar e multidesportivo, seria capaz de produzir 145 *MWh* por ano, o que representa 56,4% das necessidades de energia elétrica do complexo.

Posto isto, foi possível demonstrar a viabilidade de estudos de potencial PV a nível local com recurso a drones. Assim como a sua flexibilidade na aplicação em diferentes contextos, como em moradias num contexto suburbano, ou edifícios de serviços de maiores dimensões. Uma vez cumpridos os objetivos propostos referentes à aplicação prática, prossegue-se ainda à sistematização de uma metodologia para estudo de potencial PV com recurso a drones, desde a aquisição à análise final dos dados, com enfoque em Portugal.

5.2. Metodologia

Estes casos de estudo permitiram traçar uma metodologia simplificada que pode ser aplicada por uma pessoa ou entidade, com acesso a um drone com as especificações necessárias - nomeadamente no que diz respeito à capacidade de fotografia aérea e, de preferência, com GPS para a referenciação das imagens - para estimar o potencial PV da sua casa, de um edifício de grandes dimensões ou até em escalas maiores, como um bairro, aldeia ou vila:

1. Consultar o guia e mapas para o *software* Google Earth da campanha “Voa na Boa”, para regras gerais de segurança e determinação das regras do espaço aéreo em que se pretende realizar o levantamento aéreo.
2. Preparação de um plano de voo para requerimento de autorização para o levantamento aéreo à AAN (sempre necessário).
 - a. Utilização do Google Earth e, idealmente, levantamentos do terreno para definir:
 - i. Um local de aterragem/descolagem desafogado e com boa linha de vista para o drone a todas as alturas, com atenção também ao alcance máximo do drone.
 - ii. Em que o trajeto seja desimpedido por obstáculos e de conjuntos de mais de 12 pessoas.
 - b. Utilização adicional de softwares como o Mission Planner ou o Pix4D Capture para simplificação e otimização do trajeto e da fotografia aérea.
3. Consoante as regras apresentadas, preparar ainda um requerimento de autorização para as seguintes entidades:

- a. ANAC – para autorização de voo aéreo nas zonas indicadas.
 - b. CNPd – caso o levantamento aéreo envolva, de alguma forma, a aquisição ou tratamento de dados pessoais em que uma pessoa singular possa ser identificada direta ou indiretamente.
4. Instalar e utilizar o software Pix4D para renderização de um modelo tridimensional:
- a. Iniciar um novo projeto e selecionar as fotografias georreferenciadas adquiridas pelo drone.
 - b. Correr a primeira (“*Initial Processing*”) e a segunda (“Point Cloud and Mesh”) etapas de processamento do Pix4D.
 - i. Se o modelo apresentado não for satisfatório, considerar a criação de MTPs.
 - ii. No caso de grandes concentrações de ATPs não desejados que possam interferir com o modelo *mesh* final e que não se tenham conseguido eliminar calibrando o modelo (usando, por exemplo, os MTPs), eliminar manualmente recorrendo à ferramenta de seleção do Pix4D.
 - iii. Se o processamento for demasiado demorado, considerar adicionar “áreas de processamento” para os próximos passos. Outros aspetos que afetam o tempo de processamento é o hardware, a dimensão do projeto e as opções de output selecionadas.
 - iv. No final, recalculer o modelo.
 - c. Confirmar que um modelo *mesh* com o formato *.obj* e uma textura com formato *.jpg* estão selecionados no segundo passo de processamento e foram criados na pasta do projeto em <project folder>/2 densification/3d mesh/.
5. Instalar e utilizar o *software* Rhino 5 com Grasshopper e o *plugin* DIVA, para a análise solar:
- a. Importar o ficheiro *.obj* e a textura *.jpg*.
 - b. Analisar a incidência solar nas superfícies pretendidas:
 - i. Usar o comando “Explode” para dividir o modelo em vários *mesh*.
 - ii. Criar um novo *layer* e adicionar os *mesh* das superfícies que se pretendem estudar.
 - iii. Se necessário, criar uma *polyline* e recorrer ao comando MeshSplit para recortar um *mesh* (usando o *polyline* como linha de corte).
 - c. Criar um sistema com painéis PV (opcional):
 - i. Criar uma superfície com as dimensões do painel PV.
 - ii. Definir a orientação, inclinação e distância entre fileiras:
 1. Orientação ideal a Sul. Mais a Este para beneficiar a produção de energia de manhã ou para Oeste para beneficiar a tarde.
 2. Inclinação normal em Portugal de 34°. Maior inclinação para beneficiar a produção energética no Inverno, e menor para beneficiar o Verão.
 3. Se o objetivo for a criação de fileiras, estas calculam-se recorrendo à fórmula (para Portugal):
$$d = L * \left(\frac{\sin(\beta)}{\tan(h_0)} + \cos(\beta) \right)$$
Em que L é a altura do painel e β a sua inclinação. Para Portugal pode-se considerar a altura solar $h_0 = 38,72$ graus.
 - iii. Copiar e colar o painel PV original para os locais pretendidos.
 1. Se dispostos em fileiras, criar uma *polyline* com a dimensão da distância calculada e usa-la na disposição dos painéis.

- d. Iniciar o “*grasshopper*” com o comando com o mesmo nome e preparar o projeto:
 - i. Aceder e fazer download do repositório open source [drones4PVpotencial](https://github.com/bernardotavares/drones4PVpotencial) (github.com/bernardotavares/drones4PVpotencial), criado no contexto desta dissertação. Abrir e o ficheiro com formato .gh no Grasshopper e utilizar como base para o desenvolvimento de novos projetos.
 - ii. Fazer o download dos ficheiros climáticos para [Lisboa](#), ou outra região, (através do [website](#) para o efeito do EnergyPlus) e importa-los para o diretório do DIVA em *.../DIVA/WeatherData*, sendo então possível seleciona-los no campo “*Loc*” no módulo *Rad Map*.
- e. Executar “Run” clicando no botão, para simular cada um dos componentes.

6. Para um cálculo do potencial PV, usar:

$$E_{PV} [MWh] = E_{incidente} [MWh] * r[\%] * PR$$

Em que $E_{incidente}$ é a energia solar incidente total simulada e $r[\%]$ a eficiência do painel. O *performance ratio* (PR) pode ser calculado consoante as características das componentes do sistema ou, para uma estimativa geral, pode-se considerar equivalente a 0,8.

Os softwares utilizados estão disponíveis gratuitamente por um período de experimentação.

5.3. Desenvolvimentos Futuros

Complementarmente aos objetivos desta dissertação, existem vários pontos em que este trabalho poderia ser posteriormente desenvolvido e melhorado. O primeiro passaria pelo melhoramento da aquisição de dados recorrendo, por exemplo, ao piloto automático como via para a simplificação e otimização do levantamento aéreo. Este seria também um passo lógico se considerarmos que esta solução deva ser acessível a todos, nomeadamente para amadores sem competências sérias de pilotagem de drones. Por outro lado, também seria útil a experimentação da metodologia aplicada a uma área de estudo mais extensa, dado que podem existir pontos suplementares não previstos na metodologia apresentada. Tanto um sobrevoamento automático, como o de uma área mais extensa, não foram considerados na presente dissertação por dificuldades técnicas e pela prioridade máxima atribuída à segurança, dado que o drone se encontra a sobrevoar zonas povoadas.

O segundo ponto, passaria pela validação dos resultados obtidos através desta metodologia recorrendo, por exemplo, a *softwares* ou mesmo projetos em curso de dimensionamento de sistemas PV. Embora, à partida, se confie nas ferramentas e na aplicação dada ao *plugin* DIVA, responsável pela parte dos cálculos de radiação solar incidente, podem existir outros fatores de acumulação de erro, como na modelação tridimensional.

Seria ainda interessante considerar o desfasamento entre a produção e o consumo, em vez de considerar apenas os totais anuais, de forma a gerar resultados mais realistas à aplicação de um sistema PV real em regimes de autoconsumo. Poderia-se recorrer, para esse efeito, a medições reais de consumo elétrico de um edifício e o modelo de Grasshopper para o cálculo da incidência solar desenvolvido nesta dissertação, para alimentar um projeto de design generativo que selecione as disposições de painéis que melhor relacionam estes dados.

Finalmente, seria interessante o desenvolvimento de *software* específico para esta aplicação, uma vez que foram utilizados vários *softwares* que segmentam o processo e não são *open-source*.

Considerando que já existem vários projetos open-source para algumas das aplicações necessárias, como o OpenDroneMap [87] para a modelação tridimensional, ou o Solar3DCity [88], não é difícil de imaginar a incorporação de ferramentas como estas para criar um *software* com capacidade de acompanhar o processo, desde a importação das fotografias aéreas, até à exportação de dados sobre o potencial PV, abrindo portas, desta forma, para uma proliferação dos estudos locais de potencial PV com recurso a drones.

Referências Bibliográficas

- [1] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2017,” 2017.
- [2] República Portuguesa, *Resolução do Conselho de Ministros no. 29/2010*; , vol. 2020, no. Ene 2020. 2010, pp. 1289–1296.
- [3] República Portuguesa, *Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013*. 2010, pp. 6394–6397.
- [4] M. Šúri, T. A. Huld, E. D. Dunlop, and H. A. Ossenbrink, “Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1295–1305, Oct. 2007.
- [5] “Atlas de Portugal.” [Online]. Available: http://dev.igeo.pt/atlas/Cap1/Cap1d_1.html. [Accessed: 22-Sep-2017].
- [6] T. Ackermann, “Distributed generation : a definition,” vol. 57, pp. 195–204, 2001.
- [7] M. F. Akorede, H. Hizam, and E. Pouresmaeil, “Distributed energy resources and benefits to the environment,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010.
- [8] W. Jager, “Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective,” *Energy Policy*, vol. 34, no. 14, pp. 1935–1943, 2006.
- [9] I. Ajzen, “The theory of planned behavior,” *Organizational Behav. Hum. Decis. Process.*, vol. 50, pp. 179–211, 1991.
- [10] M. Max-Neef, E. Antonio, and H. Martin, “Development and human needs,” *Real life Econ.*, pp. 197–214, 1992.
- [11] G. Walker, “What are the barriers and incentives for community-owned means of energy production and use?,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4401–4405, 2008.
- [12] MarketsandMarkets, “UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Drone Market - Global Forecast to 2022,” 2016.
- [13] ICAO Headquarters, “Remotely Piloted Aircraft Systems,” pp. 23–25, 2015.
- [14] Eurocontrol, “Remotely Piloted Aircraft System (RPAS).” [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/rpas>. [Accessed: 28-Mar-2017].
- [15] Diário da República, *Regulamento n.º 1093/2016*. 2016, pp. 20–23.
- [16] “Google Trends - drone, UAV, RPA, UAS.” [Online]. Available: <https://trends.google.pt/trends/explore?date=all&q=drone,UAV,RPA,UAS>. [Accessed: 28-Mar-2017].

- [17] “Drop Zone: What’s in a Name? Redefining Drones in the Professional Lexicon – Over the Horizon: Online Professional Journal.” [Online]. Available: <https://overthehorizonmdos.com/2017/09/01/drop-zone-whats-in-a-name-redefining-drones-in-the-professional-lexicon/>. [Accessed: 09-Dec-2017].
- [18] Y. Gibbs, “NASA Dryden Fact Sheet - Helios Prototype,” 2015.
- [19] J. . Everaerts, “The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XXXVII, no. Part B1, p. 6, 2008.
- [20] I. Colomina and P. Molina, “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 92, pp. 79–97, 2014.
- [21] A. C. Watts, V. G. Ambrosia, and E. A. Hinkley, “Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research,” *Remote Sens.*, vol. 4, no. 6, pp. 1671–1692, 2012.
- [22] “History of Ardupilot — APM Planner 2 documentation.” [Online]. Available: <http://ardupilot.org/planner2/docs/common-history-of-ardupilot.html>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [23] “Maker Movement 2016: Let’s Do This Together.” [Online]. Available: <https://makezine.com/2016/01/20/maker-movement-2016-do-it-together/>. [Accessed: 28-Sep-2017].
- [24] G. Gigerenzer and W. Gaissmaier, “Heuristic Decision Making,” *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 62, no. 1, pp. 451–482, 2011.
- [25] “Power Line Maintenance Inspection - Albatroz Engenharia.” [Online]. Available: <http://www.albatroz.engineering/solucoes/plmi/>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [26] J. R. Martinez-De Dios and A. Ollero, “Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using UAVS,” *2006 World Autom. Congr. WAC’06*, 2007.
- [27] H. Bin and A. Justice, “The design of an unmanned aerial vehicle based on the ArduPilot,” 1999.
- [28] “Pixhawk Flight Controller Hardware Project.” [Online]. Available: <https://pixhawk.org/>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [29] UVS International, *RPAS - The Global Perspective 2016/2017*, 13th Annu. 2016.
- [30] P. van Blyenburgh, “UAVs: an overview,” *Air Sp. Eur.*, vol. 1, no. 5–6, pp. 43–47, 1999.
- [31] G. M. Hoffmann, H. Huang, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin, “Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed,” *Control Eng. Pract.*, p. 14, 2011.
- [32] “Flight Control - DJI Mobile SDK Documentation.” [Online]. Available: https://developer.dji.com/mobile-sdk/documentation/introduction/flightController_concepts.html. [Accessed: 06-Nov-

2017].

- [33] ANAC, *Guia de Utilização do Espaço Aéreo*. 2011.
- [34] C. Europeia, “Regulamento de Execução N.º 923/2012 - Regras do Ar,” no. 5, 2012.
- [35] D. de N. Rute Coelho, “Legislação - Lei dos drones traz regras mas não obriga a registo de propriedade,” 2016.
- [36] “AAN - Foto / Filmagens Aéreas.” [Online]. Available: <http://www.aan.pt/subPagina-AAN-001.005.001-foto-filmagens-aereas>. [Accessed: 01-Apr-2017].
- [37] Assembleia da República, *Lei da Protecção de Dados Pessoais - Decreto Lei 67/98 de 26 de Outubro*, vol. 247. 1998, pp. 5536–5546.
- [38] “O que é a CNPD.” [Online]. Available: <https://www.cnpd.pt/bin/cnpd/acnpd.htm>. [Accessed: 01-Apr-2017].
- [39] T. Schenk, “Introduction to Photogrammetry,” *Dep. Civ. Environ. Eng. Geod. Sci. Ohio State Univ.*, pp. 79–95, 2005.
- [40] H. Eisenbeiss, “UAV Photogrammetry,” ETH Zurich, 2009.
- [41] N. Kerle, S. Heuel, and N. Pfeifer, *Real-time data collection and information generation using airborne sensors*, no. January 2008. 2008.
- [42] “Optical encoders and LiDAR scanning.” [Online]. Available: <http://www.renishaw.com/en/optical-encoders-and-lidar-scanning--39244>. [Accessed: 06-Nov-2017].
- [43] S. E. Reutebuch, H. E. Andersen, and R. J. McGaughey, “Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory,” *J. For.*, vol. 103, no. 6, pp. 286–292, 2005.
- [44] “Download – Applied Imagery.” [Online]. Available: <http://appliedimagery.com/download/>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [45] A. Imagery, “Quick Terrain Reader: Getting Started,” no. 301.
- [46] “CloudCompare - 3D point cloud and mesh processing software.” [Online]. Available: <http://www.danielgm.net/cc/>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [47] D. Girardeau-Montaut, “CloudCompare version 2.6.1. user manual,” p. 181, 2015.
- [48] “Google Earth.” [Online]. Available: <https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [49] “Mission Planner Overview — Mission Planner documentation.” [Online]. Available: <http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>. [Accessed: 29-Oct-

- 2017].
- [50] “DJI GO - Capture and Share Beautiful Content Using this New App.” [Online]. Available: <https://www.dji.com/goapp>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [51] “Pix4Dcapture - Pix4D.” [Online]. Available: <https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [52] “Ctrl+DJI – Aplicações Android no Google Play.” [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pix4d.plugin.dji>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [53] “Pix4Dmapper: Photogrammetry software. Desktop or cloud processing.” [Online]. Available: <https://pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/>. [Accessed: 14-Nov-2017].
- [54] “OpenDroneMap | OpenDroneMap is a tool to postprocess drone, balloon, kite, and street view data to geographic data including orthophotos, point clouds, & textured mesh. In the tradition of the Ship of Theseus, it was originally forked from qwesda/BundlerTools <https://github.com/qwesda/BundlerTools>.” [Online]. Available: <http://opendronemap.org/>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [55] “Rhinoceros.” [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [56] R. K. C. Cheng, “Inside Rhinoceros 4,” 2008.
- [57] “Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino.” [Online]. Available: <http://www.grasshopper3d.com/>. [Accessed: 14-Nov-2017].
- [58] “DIVA for Rhino.” [Online]. Available: <http://diva4rhino.com/>. [Accessed: 14-Nov-2017].
- [59] “Código Drone - Voa na Boa.” [Online]. Available: <http://www.voanaboia.pt/codigo-drone/>. [Accessed: 09-Apr-2017].
- [60] “MOEEBIUS - Portugal.” [Online]. Available: <http://www.moeebius.eu/pilot-sites/portugal>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [61] Francisco Javier Royo - SOL; David Lanceta – SOL; Jon Martínez – SOL; Javier Biosca - SOL, “MOEEBIUS - Modelling Optimization of Energy Efficiency in Buildings for Urban Sustainability,” 2016.
- [62] “RS900 - User Manual,” 2011.
- [63] “Pixhawk Overview.” [Online]. Available: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [64] “Pixhawk Wiring Quick Start.” [Online]. Available: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-wiring-and-quick-start.html>. [Accessed: 06-Apr-2017].

- [65] “DJI is running away with the drone market - Recode.” [Online]. Available: <https://www.recode.net/2017/4/14/14690576/drone-market-share-growth-charts-dji-forecast>. [Accessed: 08-Oct-2017].
- [66] “DJI’s biggest competition in drones is itself - The Verge.” [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2016/11/15/13629082/dji-drones-competition-market-dominance>. [Accessed: 08-Oct-2017].
- [67] “Phantom 3 Professional - Specs, FAQ, Tutorials, Downloads and DJI GO - DJI.” [Online]. Available: <http://www.dji.com/phantom-3-pro/info#specs>. [Accessed: 01-Oct-2017].
- [68] DJI, “Phantom 3 Professional - Guia de Início Rápido,” pp. 3–6, 2016.
- [69] “DJI Unveils the Phantom 3, the Next Evolution of the World’s Most Popular Consumer Drone.” [Online]. Available: <http://www.dji.com/newsroom/news/dji-unveils-the-phantom-3-the-next-evolution-of-the-world-s-most-popular-consumer-drone>. [Accessed: 08-Oct-2017].
- [70] “DJI Phantom 3 - Planeta drones.” [Online]. Available: <https://planetadrones.es/dji-phantom-3/>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [71] “Phantom 3 Professional - Let your creativity fly with a 4K camera in the sky. - DJI.” [Online]. Available: <https://www.dji.com/phantom-3-pro>. [Accessed: 02-Dec-2017].
- [72] Velodyne, “Vlp-16 User Manual and Programming Guide,” 2015.
- [73] “What is a LAS dataset?—Help | ArcGIS for Desktop.” [Online]. Available: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-.htm>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [74] FLIR Systems, “FLIR AX8 - Thermal Imaging Camera For Continuous Condition and Monitoring, Safety,” pp. 8–9.
- [75] “Formulários | Autoridade Aeronáutica.” [Online]. Available: <http://www.aan.pt/subPagina-AAN-001.005.002-formularios>. [Accessed: 27-Oct-2017].
- [76] “Processing Steps – Support.” [Online]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002495706-Processing-Steps#gsc.tab=0>. [Accessed: 10-Nov-2017].
- [77] “How to manually calibrate uncalibrated Cameras in the rayCloud – Support.” [Online]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560189-How-to-manually-calibrate-uncalibrated-Cameras-in-the-rayCloud#gsc.tab=0>. [Accessed: 11-Nov-2017].
- [78] “Merging Projects – Support.” [Online]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558529-Merging-Projects#gsc.tab=0>. [Accessed: 13-Nov-2017].
- [79] “ReduceMesh | Rhino 3-D modeling.” [Online]. Available: <http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/reducemesh.htm>. [Accessed: 14-Nov-2017].

- [80] “Weather Data by Location | EnergyPlus.” [Online]. Available: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI. [Accessed: 14-Nov-2017].
- [81] “PV potential estimation utility.” [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>. [Accessed: 26-Nov-2017].
- [82] “How to calculate the output energy or power of a solar photovoltaic system, Excel PV calculator to estimate solar electricity output.” [Online]. Available: <http://photovoltaic-software.com/PV-solar-energy-calculation.php>. [Accessed: 26-Nov-2017].
- [83] “2017 Most Efficient Solar Panels on the Market | EnergySage.” [Online]. Available: <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [84] M. C. Brito, N. Gomes, T. Santos, and J. A. Tenedório, “Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 283–288, 2012.
- [85] “PORDATA - Consumo de energia eléctrica por consumidor: total e por tipo de consumo.” [Online]. Available: <https://www.pordata.pt/Municipios/Consumo+de+energia+eléctrica+por+consumidor+total+e+por+tipo+de+consumo-436>. [Accessed: 23-Dec-2017].
- [86] INETI, “Instalações Solares Térmicas,” 2006.
- [87] “OpenDroneMap - Github.” [Online]. Available: <https://github.com/OpenDroneMap/OpenDroneMap>. [Accessed: 19-Dec-2017].
- [88] “Solar3Dcity - Github.” [Online]. Available: <https://github.com/tudelft3d/Solar3Dcity>. [Accessed: 19-Dec-2017].

Anexos

A.1. Primeiro levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados



Figura A. 1: Percurso do Levantamento Terrestre no dia 20 de Abril de 2017 na Rua Maria na freguesia dos Anjos, em Lisboa.

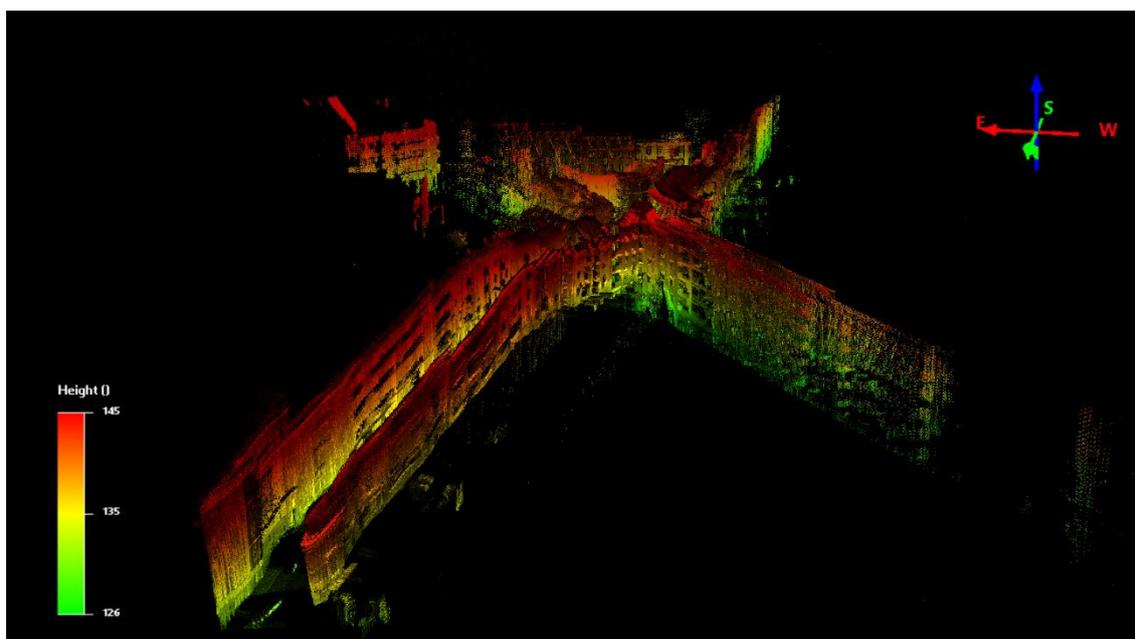


Figura A. 2: Nuvem de pontos completa com cores em função da à altura do ponto.

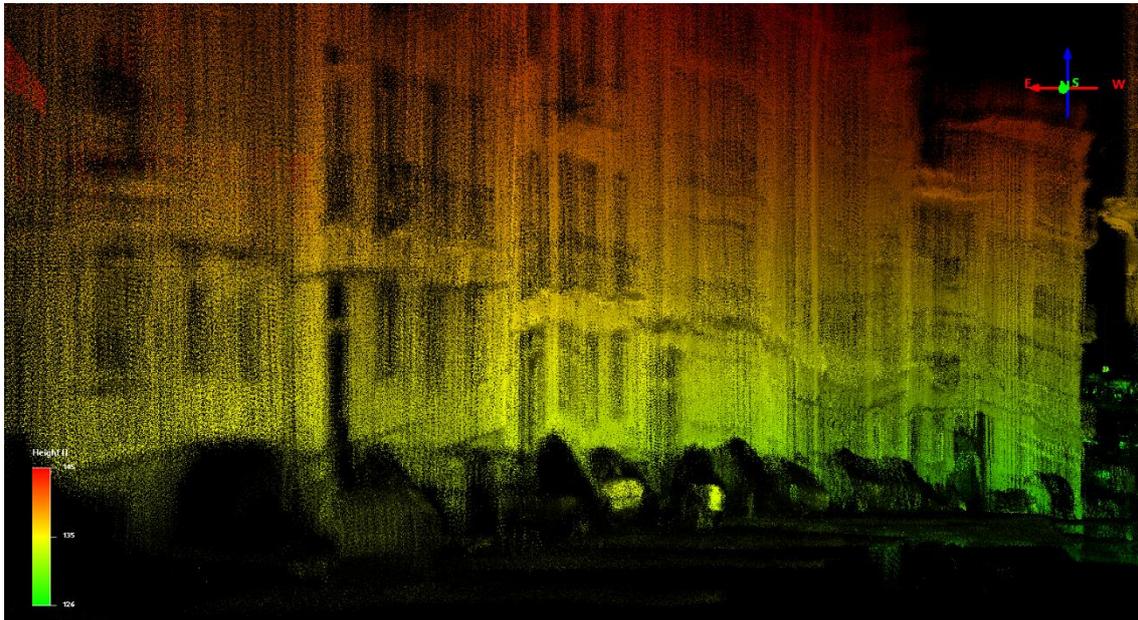


Figura A. 3: Representação LiDAR de fachada com carros estacionados.

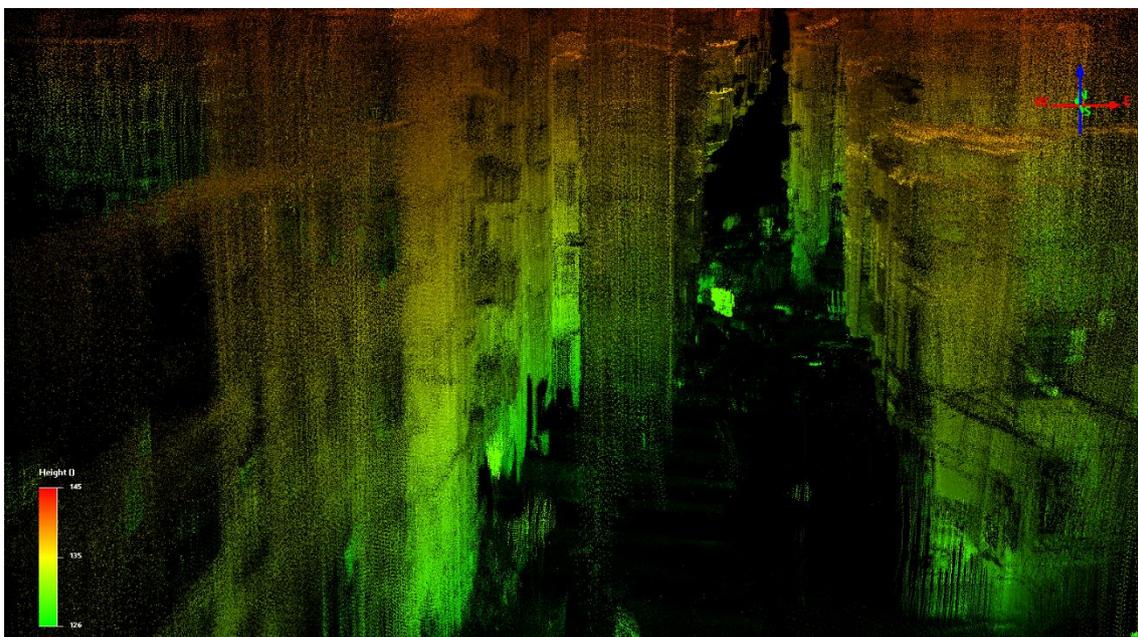


Figura A. 4: Ocasão em que é mais perceptível a incoerência nos pontos, com a criação de "duplas fachadas".

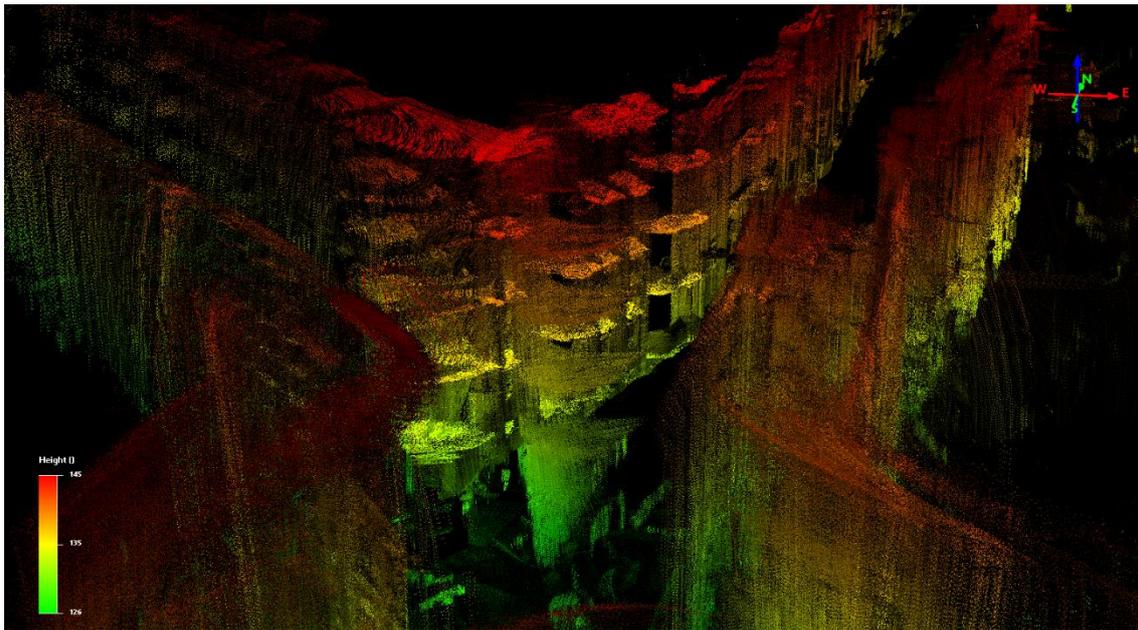


Figura A. 5: Ocasão em que é mais perceptível a incoerência nos pontos, com a criação de "duplas fachadas", que nesta imagem se pode confundir com a largura dos edifícios.

A.2. Segundo levantamento terrestre com LiDAR – Imagens dos resultados

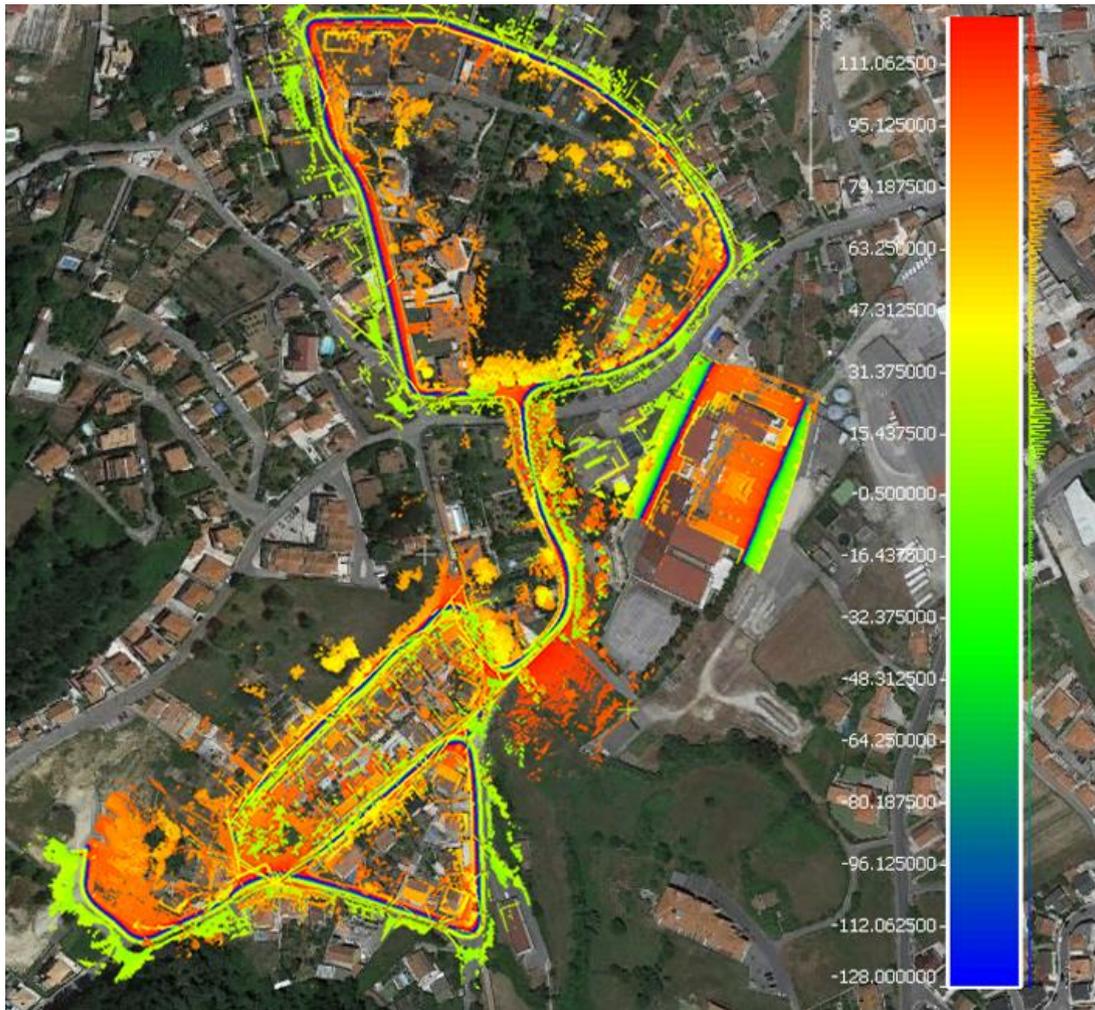


Figura A. 6: Sobreposição de levantamento terrestre LiDAR com mapa da Venda do Pinheiro. As cores dizem respeito à classificação de ângulo incidente.

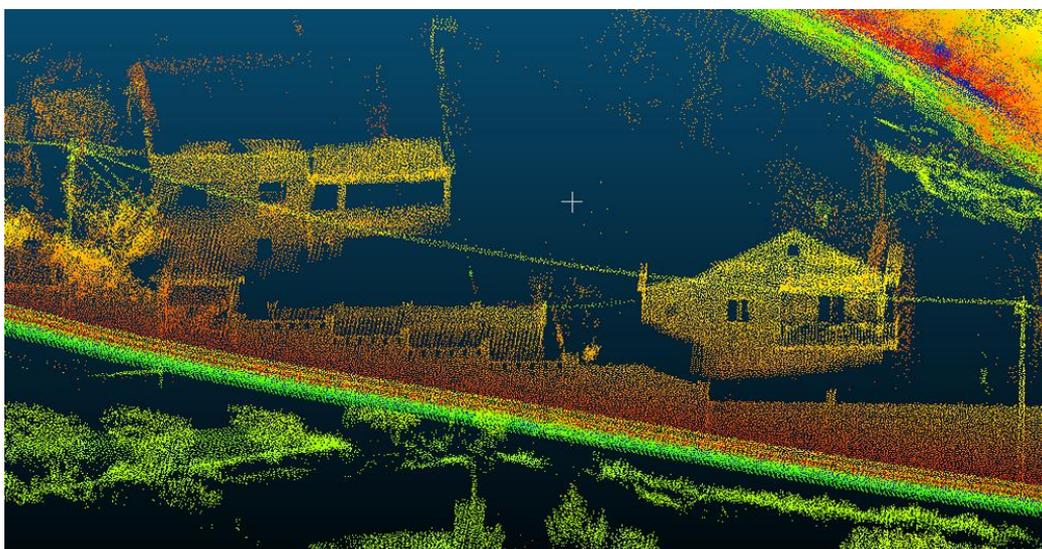


Figura A. 7: Moradias e linha elétrica num segundo levantamento terrestre.

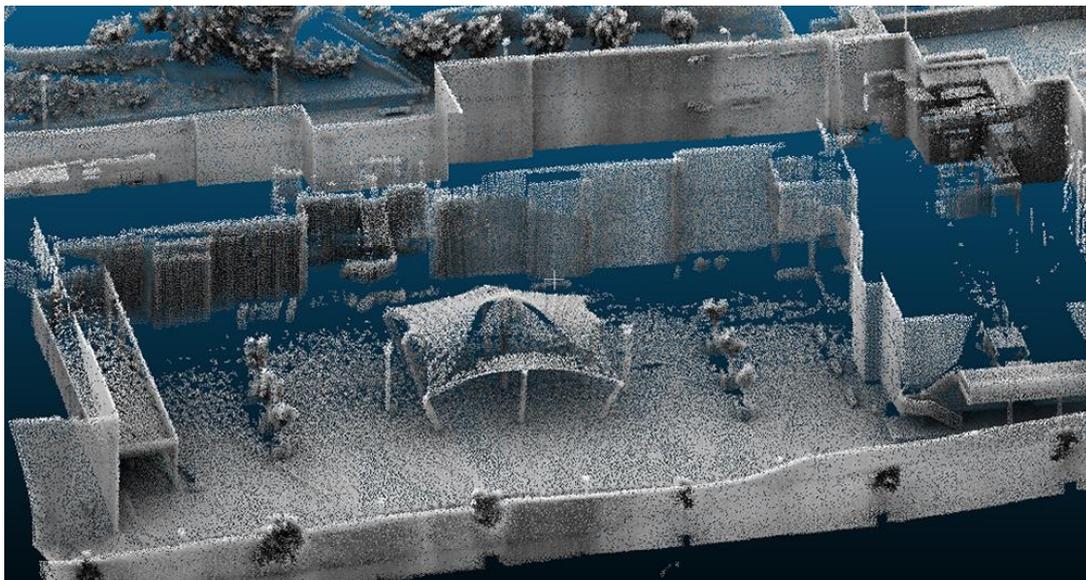


Figura A. 8: Recinto do complexo com oclusão ambiental renderizada.

A.3. Testes com a Câmara Térmica

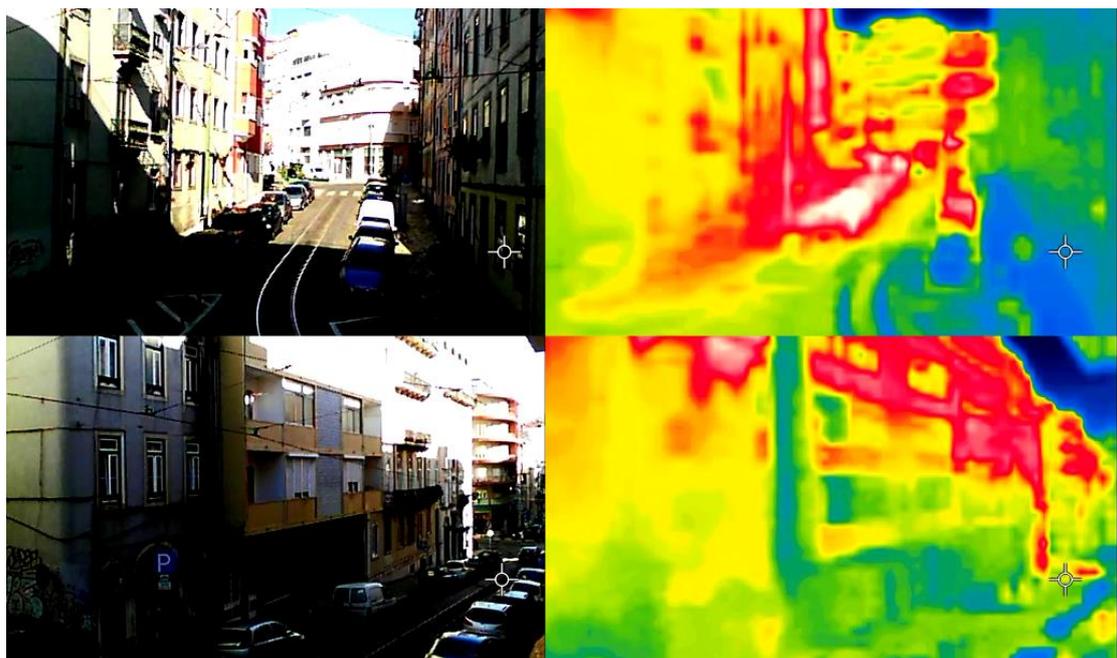


Figura A. 9: Figuras comparam a incidência de irradiação solar nas fachadas com o observado no sensor térmico.

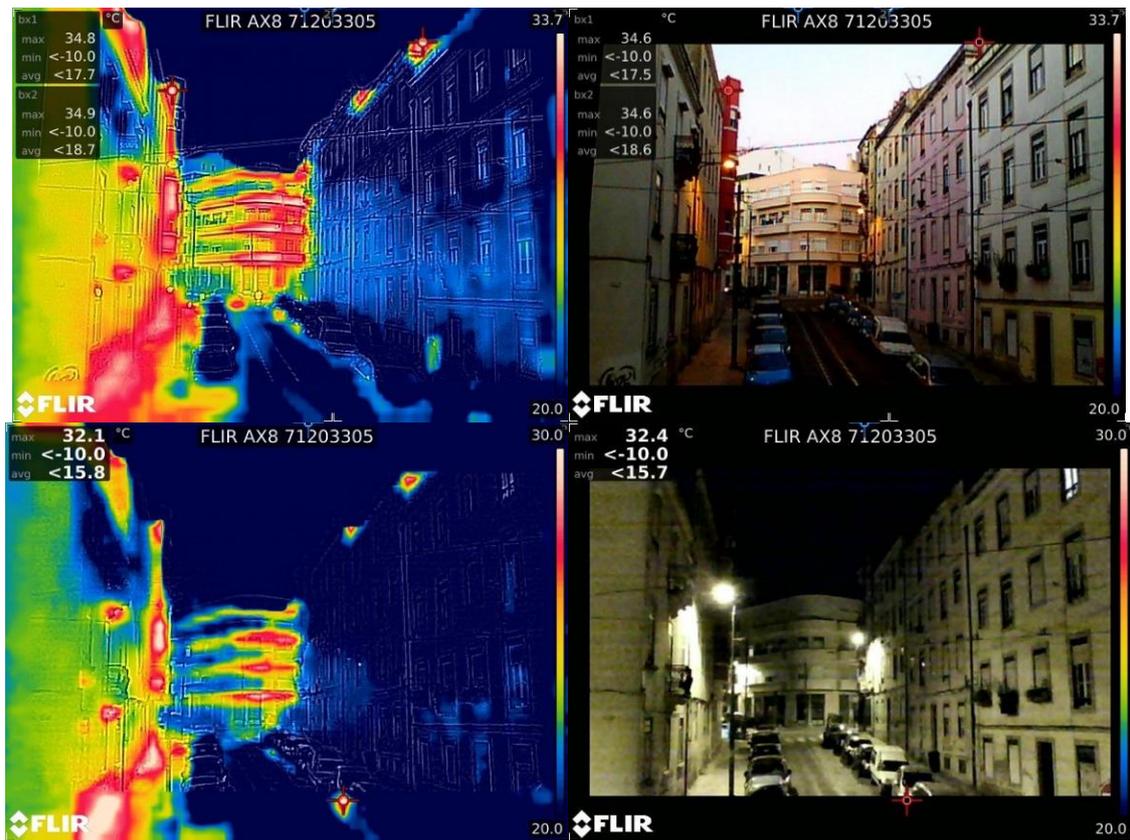


Figura A. 10: Dissipação de calor após irradiação do sol durante o dia (fachada frontal e esquerda) em comparação com fachada à sombra a várias horas (direita) às 20h15 (em cima) e 21h (em baixo).

A.4. Formulário – Declaração de Apoio do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



Ciências | Engenharia Geográfica,
ULisboa | Geofísica e Energia

DECLARAÇÃO DE APOIO

PARA EFEITO DE SOLICITAÇÃO À AUTORIDADE AERONÁUTICA NACIONAL DE
LEVANTAMENTO AÉREO EM TERRITÓRIO NACIONAL

No âmbito do desenvolvimento do trabalho para dissertação de mestrado do nosso aluno, Bernardo Pessoa Camocho Tavares, do Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, com o título "*Recolha e Processamento de Dados para Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones*", realizada em colaboração institucional entre a FCUL e a empresa Albatroz Engenharia SA, é necessário proceder a um levantamento aéreo em território nacional.

Considerando que se trata de um levantamento de cariz académico e científico, essencial para a prossecução dos objetivos da tese, apoiamos o pedido de autorização do levantamento.

Lisboa, 26 de Junho 2017

Miguel Centeno Brito
Orientador

João Catalão Fernandes
Presidente do departamento

A.5. Formulário – Declaração de Apoio da Câmara Municipal de Mafra



DECLARAÇÃO DE APOIO

PARA EFEITOS DE SOLICITAÇÃO À AUTORIDADE AERONÁUTICA NACIONAL DE LEVANTAMENTO
AÉREO EM TERRITÓRIO NACIONAL

No âmbito do desenvolvimento do trabalho para dissertação de mestrado de Bernardo Pessoa Camocho Tavares, com o título “*Recolha e Processamento de Dados para Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones*”, realizada em colaboração institucional entre a FCUL e a empresa Albatroz Engenharia SA, e que conta também com o apoio do Município de Mafra, é necessário proceder a um levantamento aéreo em território nacional.

Considerando que se trata de um levantamento em que o Município de Mafra manifesta interesse, no sentido do melhoramento energético e aproveitamento solar do local em estudo, apoiamos o pedido de autorização do levantamento.

Mafra, 30 de Junho 2017

O Vice-Presidente da Câmara Municipal de Mafra



(Joaquim Sardinha)

A.6. Formulário – Autorização da AAN



MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL
AUTORIDADE AERONÁUTICA NACIONAL
Gabinete da Autoridade Aeronáutica Nacional

AUTORIZAÇÃO / AUTORIZATION N.º AAN 3241/17

Nos termos do artigo 4º da Lei n.º 28/2013, de 12 de abril, é concedida a autorização ao requerente abaixo indicado, para efectuar o seguinte tipo de operação:

In accordance with article 4 of Law 28/2013, dated 12 April, we hereby grant permission to the applicant below to carry out the operation stated in item 1., under the following conditions:

TITULAR / HOLDER

Nome/Entidade: _____
Name/Entity

Telefone: _____ Tlm: _____
Telephone Mobile

PILOTO / PILOT

Nome/designação: _____
Name/designation

Telefone: -- Tlm: _____
Telephone Mobile

1. Tipo de operação autorizada: Fotografia e filmagem oblíqua e panorâmica.
Type of Operation

2. Condições técnicas e administrativas estabelecidas:
Technical and Administrative Procedures

Captção de imagens aéreas para fins académicos e comerciais, através da plataforma n.º PSADCG240100EK, na área poligonal de Venda do Pinheiro constante do formulário submetido (cuja cópia deve acompanhar esta autorização).

3. Limitações impostas:
Limitations

Operação de acordo com o Regulamento n.º 1093/2016 da ANAC, devendo ser observado escrupulosamente o seu Artigo 11.º.

Que os produtos audiovisuais obtidos sejam divulgados, exclusivamente, no contexto autorizado.

NOTA IMPORTANTE: A presente autorização não dispensa o cumprimento de outros regimes jurídicos constantes de diplomas legais e regulamentares que sejam, eventualmente, aplicáveis.

PLEASE BE AWARE: *The present authorization does not exempt the fulfillment of other legal obligations established in the applicable texts.*

Válida de / from 18 de julho de 2017 a / to 01 de agosto de 2017

Alfragide, 18 de julho de 2017

P/ O Chefe do Gabinete

José Augusto de Barros Ferreira
Major-General



A.7. Planeamento da Missão - Sobreposição de Fotografias

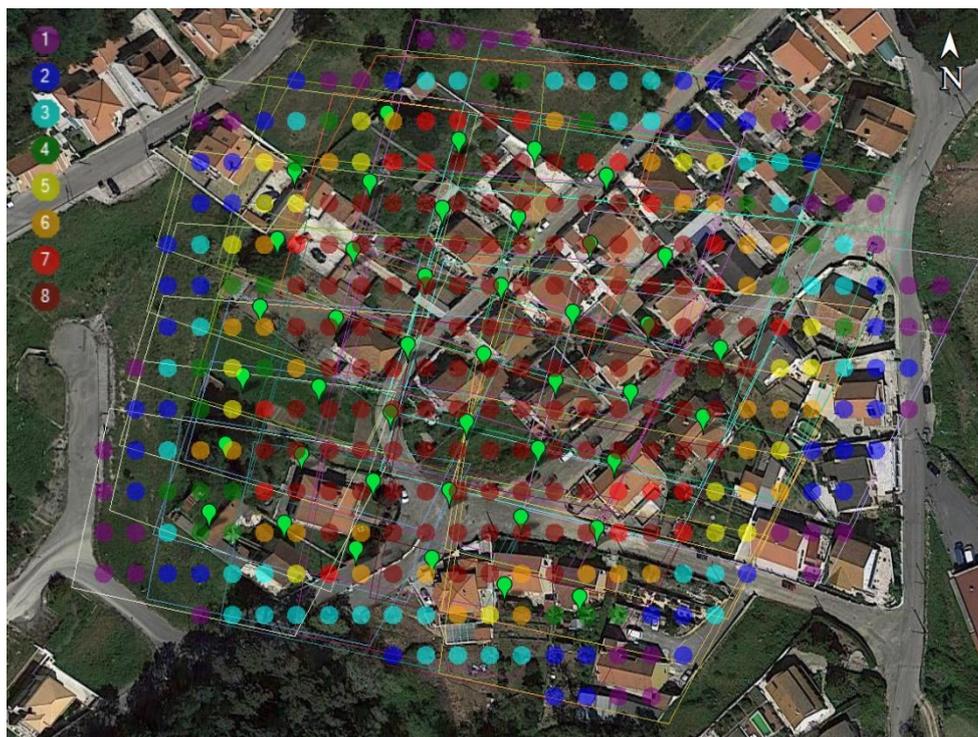


Figura A. 11: Sobreposição de fotografias prevista na área 1, com o número de fotografias sobrepostas de acordo com a legenda no canto superior esquerdo.

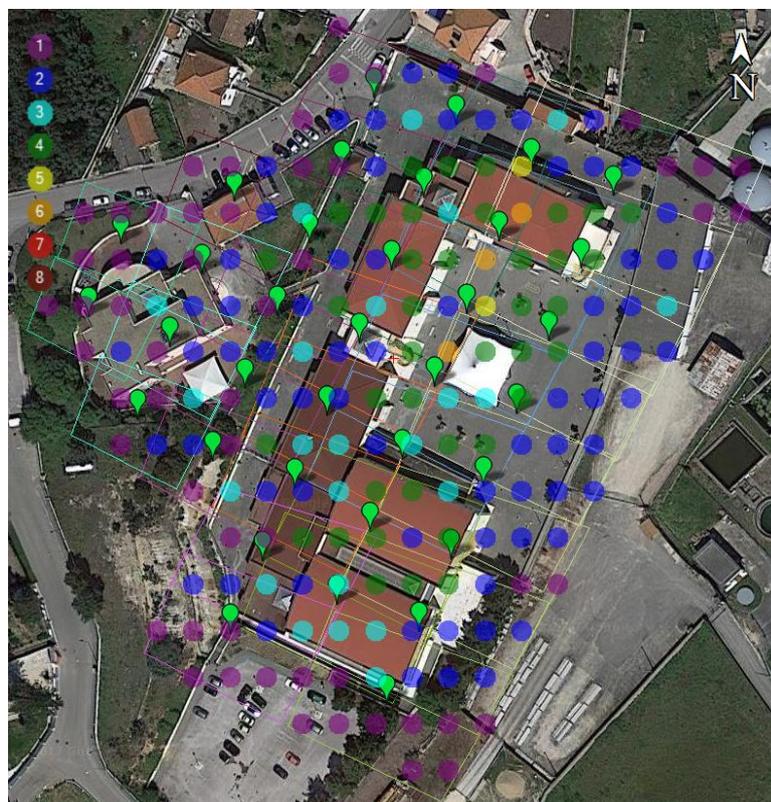


Figura A. 12: Sobreposição de fotografias prevista na área 2, com o número de fotografias sobrepostas de acordo com a legenda no canto superior esquerdo.

A.8. Manual Tie Points - Moradias

Tabela A. 1: MTPs criados no Modelo 1 - Moradias.

#MTP	Descrição	Projeção do Erro [pixel]	Verificado/Marcado
1	Canto de Tabela	0.675	3 / 3
2	Canto de Vedação	1.376	9 / 9
3	Ponta do Telhado (Casa Azul)	0.017	2 / 2
4	Ponto do Telhado (Casa com Borda Verde)	1.852	5 / 5
5	Canto de Vaso do Jardim	0.450	3 / 3
6	Canto de Estrutura do Baloço	2.004	13 / 14



Figura A. 13: Exemplo de MTP – #1 Canto de Tabela.



Figura A. 14: Exemplo de MTP – #3 Ponta do Telhado (Casa Azul).



Figura A. 15: Exemplo de MTP – #5 Canto de Vaso de Jardim.

A.9. Manual Tie Points - Complexo

Tabela A. 2: MTPs criados no Modelo 2 - Complexo.

<i>Nome do MTP</i>	<i>Projeção de Erro [pixels]</i>	<i>Verificado/Marcado</i>
ponto1	1.834	26 / 31
ponto2	2.953	28 / 33
ponto4	1.732	33 / 33
ponto5	1.943	44 / 45
ponto6	2.121	16 / 16
ponto7	1.652	12 / 12
ponto8	2.366	26 / 29
canto_infantario	3.184	28 / 33
point_cobertura	1.114	27 / 27
blue_dot	1.802	21 / 21
ponto9	2.507	23 / 23
piramide	1.172	32 / 34
corner_esgoto	0.803	15 / 16
cone_point	0.836	10 / 10
E_corner	0.432	7 / 8
corner_pscina	1.003	7 / 7
canto_esgoto2	0.819	3 / 3
pscina_toldo	4.029	24 / 28
rede_amarela	0.902	22 / 22
canto_pavilhao	0.817	32 / 32

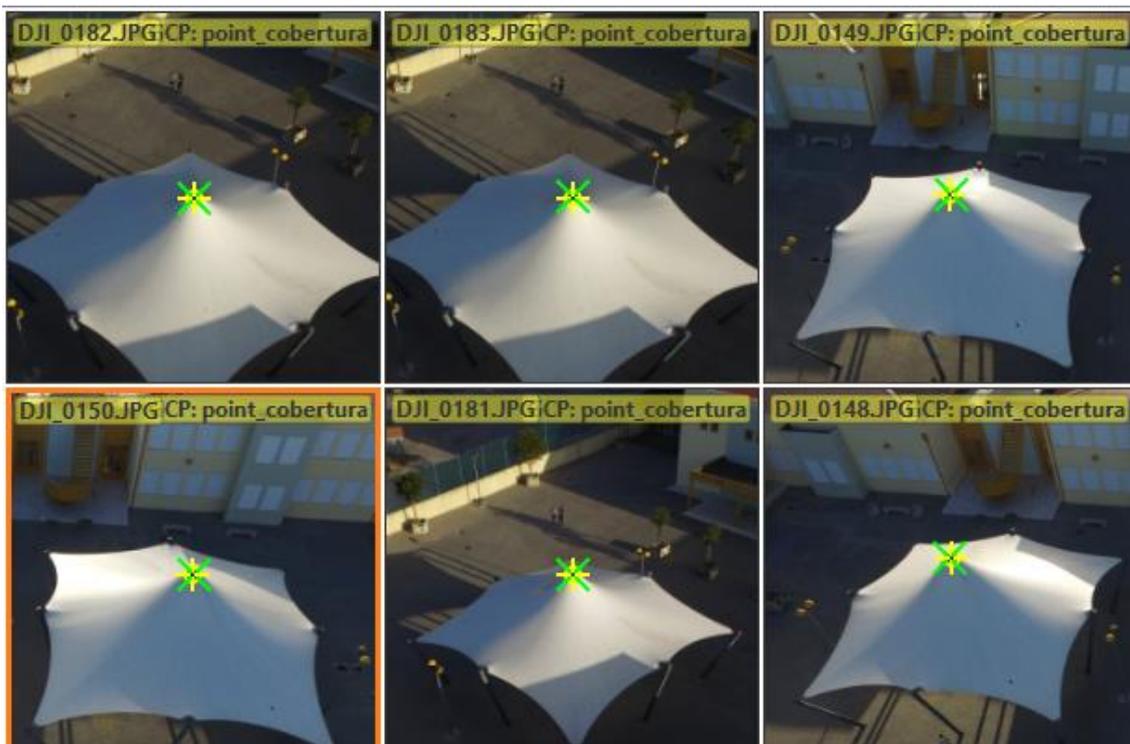


Figura A. 16: Exemplo de MTP - point_cobertura.



Figura A. 17: Exemplo de MTP – ponto3.



Figura A. 18: Exemplo de MTP – ponto8.



Figura A. 19: Exemplo de MTP – blue_dot.



Figura A. 20: Exemplo de MTP – piramide.

A.10. Relatório de Qualidade – Moradias

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.2.23

! **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	VP2_Casas_Nadir
Processed	2017-08-01 18:52:43
Camera Model Name(s)	FC300X_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.98 cm / 0.78 in
Area Covered	undefined

Quality Check



? Images	median of 36652 keypoints per image	✓
? Dataset	48 out of 48 images calibrated (100%), all images enabled	✓
? Camera Optimization	1.38% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 14399.3 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	no, no 3D GCP	⚠

Preview

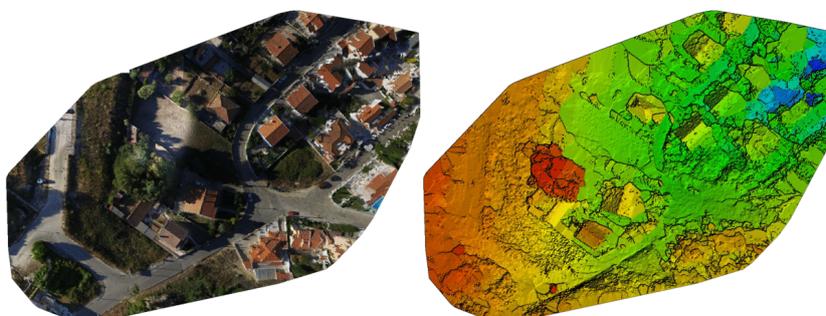


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	48 out of 48
Number of Geolocated Images	48 out of 48

Initial Image Positions

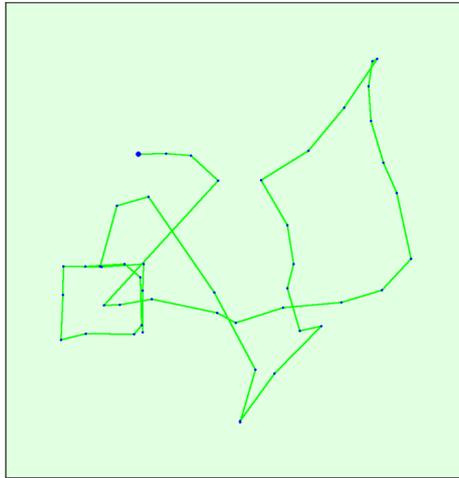
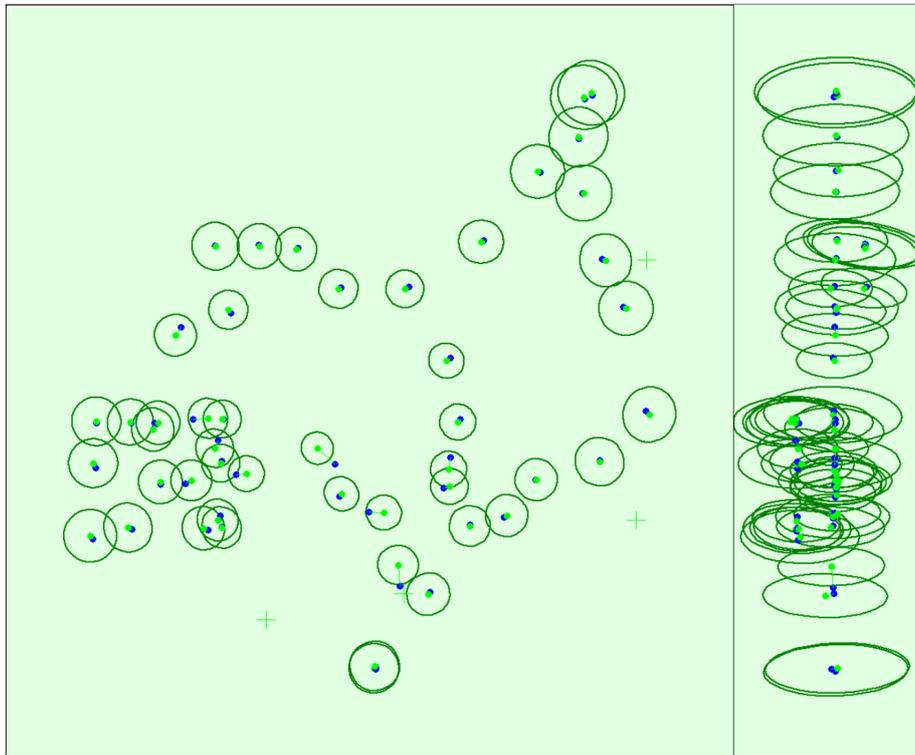
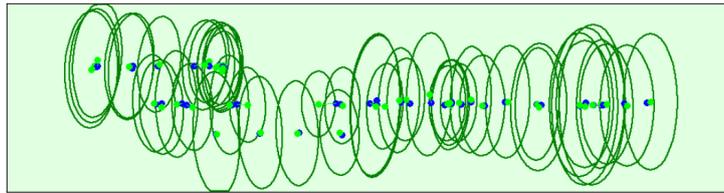


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Uncertainty ellipses 5x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.738	0.742	1.734	2.640	2.298	1.128
Sigma	0.130	0.128	0.377	0.274	0.252	0.316

Overlap

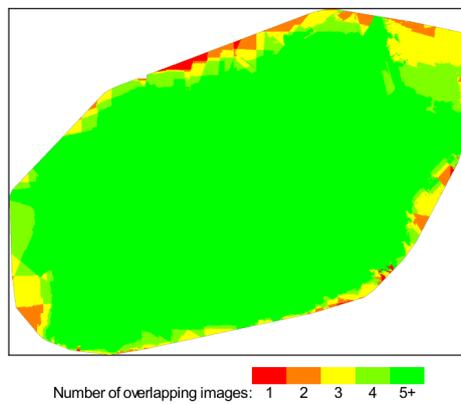


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	666319
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	255675
Mean Reprojection Error [pixels]	0.265

Internal Camera Parameters

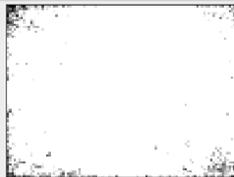
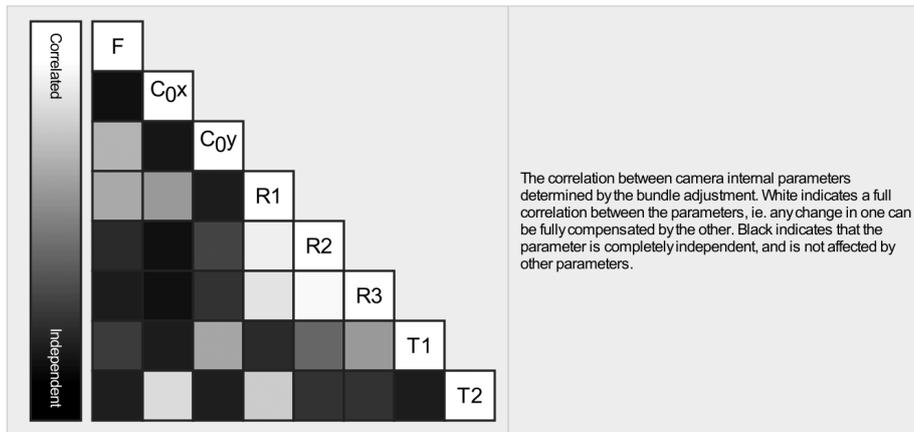
FC300X_3.6_4000x3000 (RGB), Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]

EXIF ID: FC300X_3.6_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2

Recolha e Processamento de Dados para Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones

Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.014	0.013	-0.000	0.001	0.000
Optimized Values	2317.492 [pixel] 3.660 [mm]	2021.986 [pixel] 3.193 [mm]	1475.855 [pixel] 2.331 [mm]	-0.008	0.013	0.005	-0.000	0.001
Uncertainties (Sigma)	0.841 [pixel] 0.001 [mm]	0.389 [pixel] 0.001 [mm]	0.459 [pixel] 0.001 [mm]	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	36652	14399
Mn	29083	4118
Max	49476	23320
Mean	36773	13882

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	184782
In 3 Images	38381
In 4 Images	14579
In 5 Images	6921
In 6 Images	3877
In 7 Images	2299
In 8 Images	1521
In 9 Images	1046
In 10 Images	684
In 11 Images	427
In 12 Images	357
In 13 Images	227
In 14 Images	199
In 15 Images	131
In 16 Images	95

In 17 Images	63
In 18 Images	34
In 19 Images	26
In 20 Images	16
In 21 Images	6
In 22 Images	4

2D Keypoint Matches

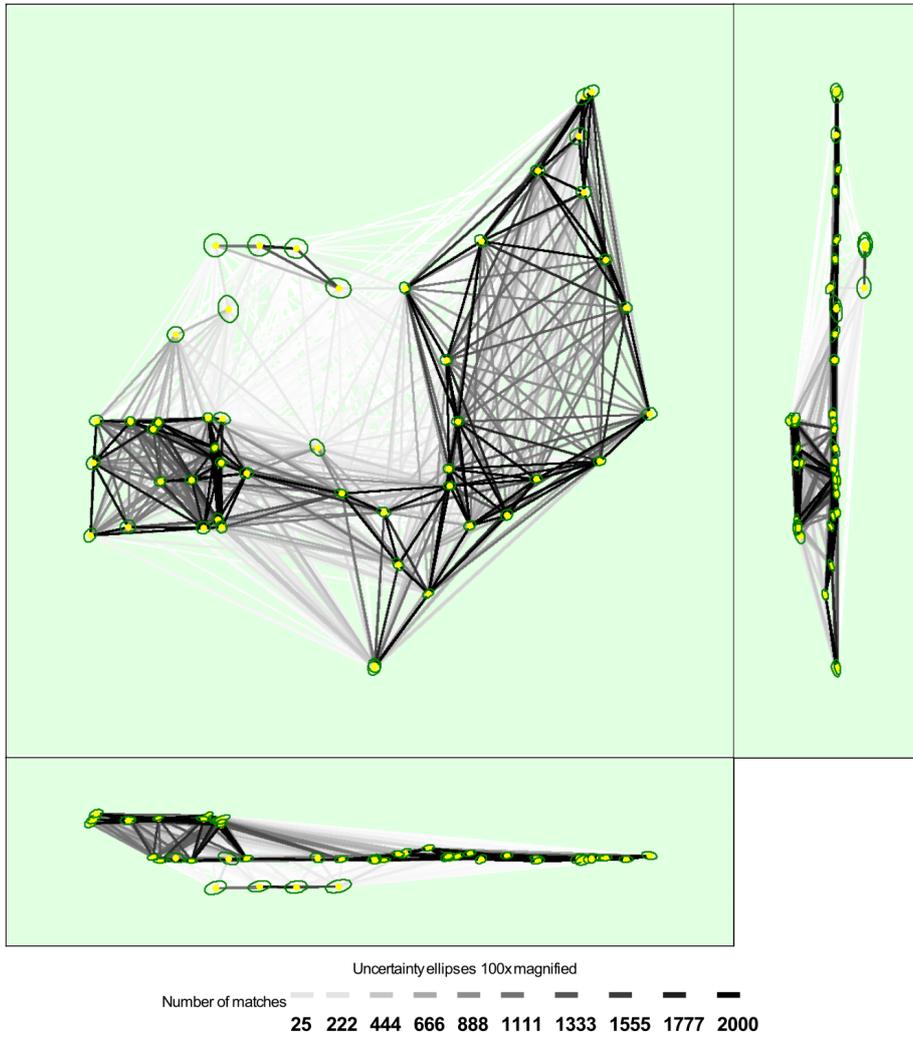


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.012	0.011	0.006	0.016	0.017	0.010

Recolha e Processamento de Dados para Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones

Sigma	0.003	0.003	0.002	0.004	0.005	0.003
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Manual Tie Points

MTP Name	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
telhado_bordaverde	0.675	3 / 3
baloico	1.376	9 / 9
telhado_casaazul	0.017	2 / 2
canto_casa	1.852	5 / 5
canto_vaso	0.450	3 / 3
canto_tabela	2.004	13 / 14

Projection errors for manual tie points. The last column counts the number of images where the manual tie point has been automatically verified v.s. manually marked.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	2.08	0.00
-3.00	0.00	33.33	47.92	52.08
0.00	3.00	66.67	50.00	47.92
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.000000	0.000001	-0.000002
Sigma [m]		0.807069	0.815752	0.418909
RMS Error [m]		0.807069	0.815752	0.418909

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.219

Phi	1.425
Kappa	2.791

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1070 (Driver: 22.21.13.8253)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 29N (egm96)

Processing Options

Detected Template	3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Lever-Arm Parameters Optimization: None Rematch: Auto, yes Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	04m:58s
Time for 3D Textured Mesh Generation	02m:30s

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	3653066

Recolha e Processamento de Dados para
Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones

Average Density (per m ³)	318.77
---------------------------------------	--------

A.11. Relatório de Qualidade – Complexo

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.2.23

! **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary **i**

Project	VP Escola Merge3
Processed	2017-08-16 15:35:44
Camera Model Name(s)	_0.0_4096x2160 (RGB), NIKOND90_18.0_4288x2848 (RGB), NIKOND90_21.0_4288x2848 (RGB), FC300X_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.05 cm / 0.41 in
Area Covered	undefined

Quality Check **i**

? Images	median of 20857 keypoints per image	✔
? Dataset	336 out of 543 images calibrated (61%), all images enabled, 2 blocks	⚠
? Camera Optimization	10.19% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠
? Matching	median of 4212.69 matches per calibrated image	✔
? Georeferencing	no, no 3D GCP	⚠

? Preview **i**

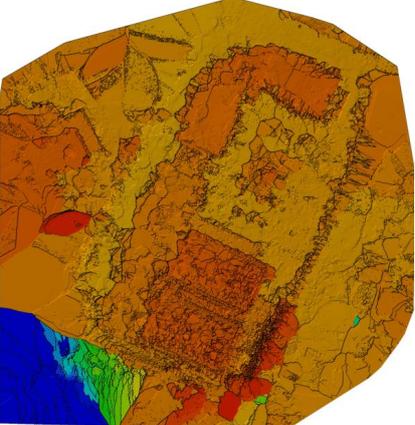



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	336 out of 543
Number of Geolocated Images	285 out of 543

Initial Image Positions



Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

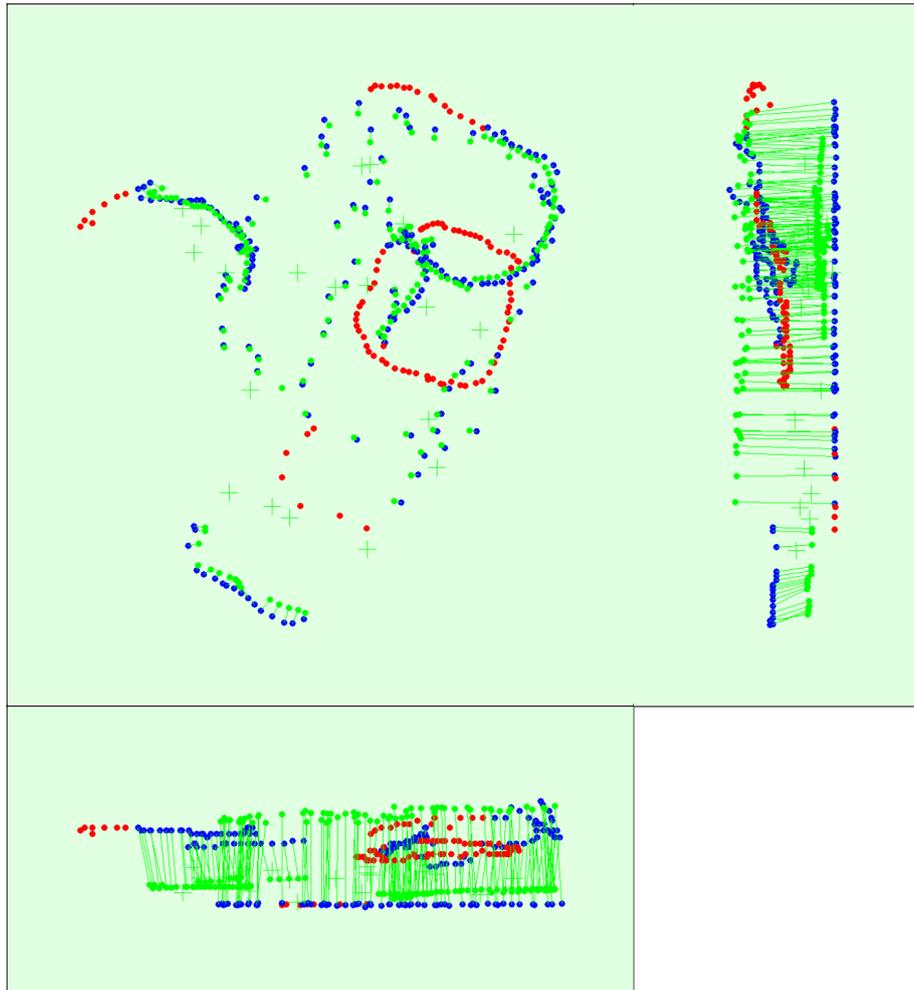


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images.

🔔 Absolute camera position and orientation uncertainties



Uncertainty computation failed.

🔔 Overlap



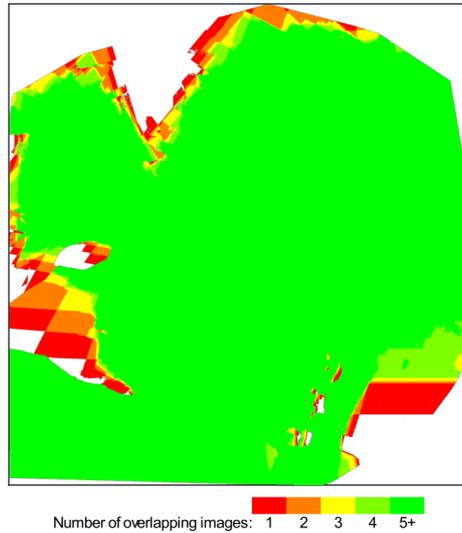


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

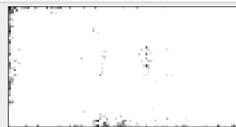
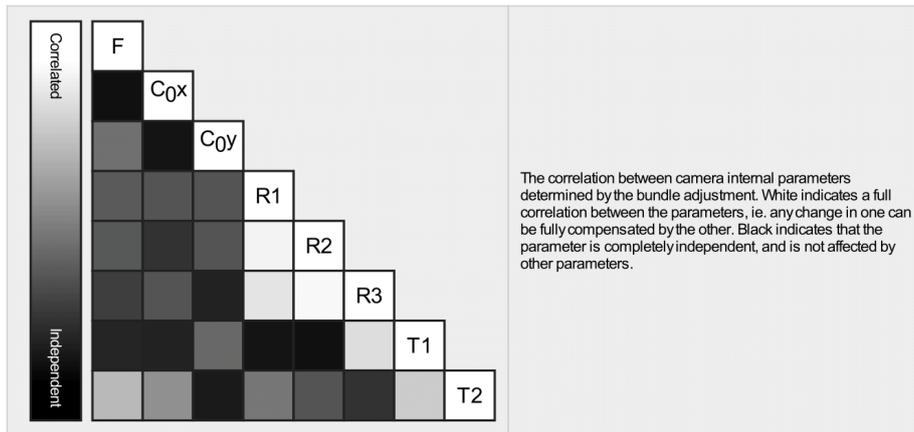
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1914713
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	861487
Mean Reprojection Error [pixels]	0.357

Internal Camera Parameters

_0.0_4096x2160 (RGB). Sensor Dimensions: 25.400 [mm] x 13.395 [mm]

EXIF ID: _0.0_4096x2160

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3225.197 [pixel] 20.000 [mm]	2048.000 [pixel] 12.700 [mm]	1080.000 [pixel] 6.697 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	2313.085 [pixel] 14.344 [mm]	2059.938 [pixel] 12.774 [mm]	1065.077 [pixel] 6.605 [mm]	-0.131	0.111	-0.017	0.002	0.001
Uncertainties (Sigma)	2.062 [pixel] 0.013 [mm]	1.136 [pixel] 0.007 [mm]	1.593 [pixel] 0.010 [mm]	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000



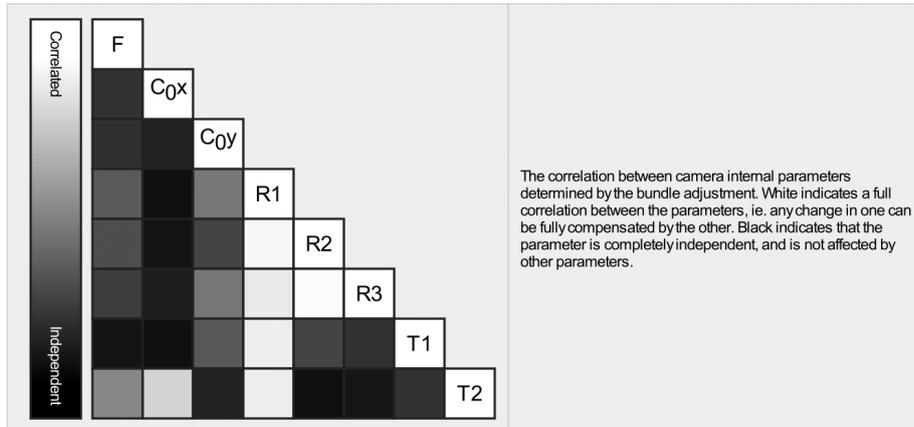
The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

Internal Camera Parameters

NIKOND90_18.0_4288x2848 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 15.498 [mm]

EXIF ID: NIKOND90_18.0_4288x2848

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3307.886 [pixel] 18.000 [mm]	2144.000 [pixel] 11.667 [mm]	1424.000 [pixel] 7.749 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3430.123 [pixel] 18.665 [mm]	2121.562 [pixel] 11.545 [mm]	1461.701 [pixel] 7.954 [mm]	-0.150	0.105	0.043	-0.000	-0.001
Uncertainties (Sigma)	1.891 [pixel] 0.010 [mm]	2.497 [pixel] 0.014 [mm]	2.441 [pixel] 0.013 [mm]	0.002	0.010	0.011	0.000	0.000





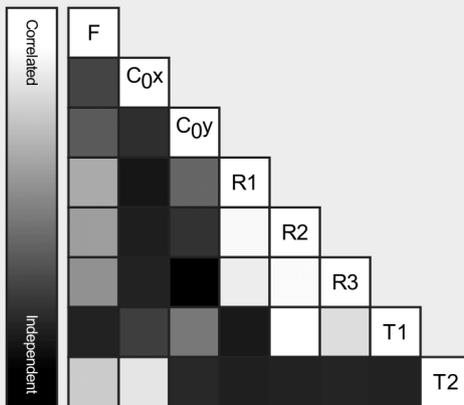
The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

Internal Camera Parameters

NIKOND90_21.0_4288x2848 (RGB). Sensor Dimensions: 23.710 [mm] x 15.747 [mm]

EXIF ID: NIKOND90_21.0_4288x2848

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3797.943 [pixel] 21.000 [mm]	2144.000 [pixel] 11.855 [mm]	1424.000 [pixel] 7.874 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3477.608 [pixel] 19.229 [mm]	2129.031 [pixel] 11.772 [mm]	1446.298 [pixel] 7.997 [mm]	-0.158	0.219	-0.126	-0.000	-0.002
Uncertainties (Sigma)	6.158 [pixel] 0.034 [mm]	9.794 [pixel] 0.054 [mm]	8.800 [pixel] 0.049 [mm]	0.017	0.070	0.086	0.001	0.001



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, i.e. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.



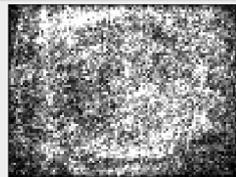
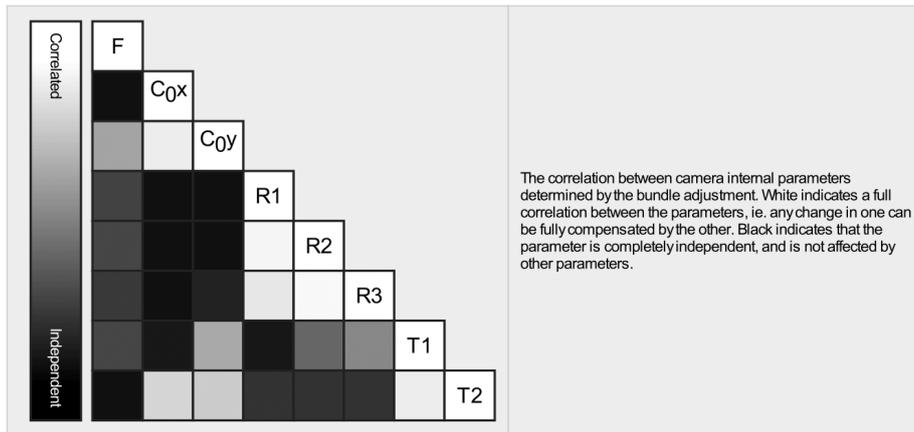
The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

Internal Camera Parameters

FC300X_3.6_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]

EXIF ID: FC300X_3.6_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.014	0.013	-0.000	0.001	0.000
Optimized Values	2294.347 [pixel] 3.624 [mm]	2018.983 [pixel] 3.189 [mm]	1489.511 [pixel] 2.352 [mm]	-0.006	0.008	0.007	0.000	0.001
Uncertainties (Sigma)	1.231 [pixel] 0.002 [mm]	0.917 [pixel] 0.001 [mm]	1.205 [pixel] 0.002 [mm]	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	20857	4213
Mn	16439	515
Max	67874	18810
Mean	26664	5699

2D Keypoints Table for Camera _0.0_4096x2160 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	23306	7382
Mn	16439	565
Max	67874	18810
Mean	31287	7752

2D Keypoints Table for Camera NIKOND90_18.0_4288x2848 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	20224	3373
Mn	17281	515
Max	29401	8787
Mean	21133	3434

2D Keypoints Table for Camera NIKOND90_21.0_4288x2848 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	20504	3958
Mn	19763	2225
Max	25097	5644
Mean	21788	3942

2D Keypoints Table for Camera FC300X_3.6_4000x3000 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	21838	3785
Mn	18884	1473
Max	49692	14567
Mean	26552	5301

Median / 75% / Maximal Number of Matches Between Camera Models

	_0.0_4096x2160 (RGB)	NIKOND90_18.0_4...	NIKOND90_21.0_4...	FC300X_3.6_4000...
_0.0_4096x2160 (RGB)	56 / 272 / 5243	1 / 2 / 3		6 / 15 / 74
NIKOND90_18.0_4288x2848 (RGB)		83 / 349 / 5244	31 / 179 / 2556	1 / 2 / 3
NIKOND90_21.0_4288x2848 (RGB)			499 / (n/a) / 2372	(n/a) / (n/a) / 1
FC300X_3.6_4000x3000 (RGB)				21 / 133 / 8051

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	764182
In 3 Images	58303
In 4 Images	18773
In 5 Images	8314
In 6 Images	4524
In 7 Images	2619
In 8 Images	1612
In 9 Images	998
In 10 Images	695
In 11 Images	438
In 12 Images	299
In 13 Images	193
In 14 Images	117
In 15 Images	84
In 16 Images	63
In 17 Images	70
In 18 Images	42
In 19 Images	36
In 20 Images	22
In 21 Images	17
In 22 Images	19
In 23 Images	20
In 24 Images	10
In 25 Images	9
In 26 Images	2
In 27 Images	6
In 28 Images	2
In 29 Images	1
In 30 Images	4
In 32 Images	2
In 33 Images	3
In 34 Images	3
In 35 Images	2
In 41 Images	1
In 42 Images	1
In 45 Images	1

2D Keypoint Matches

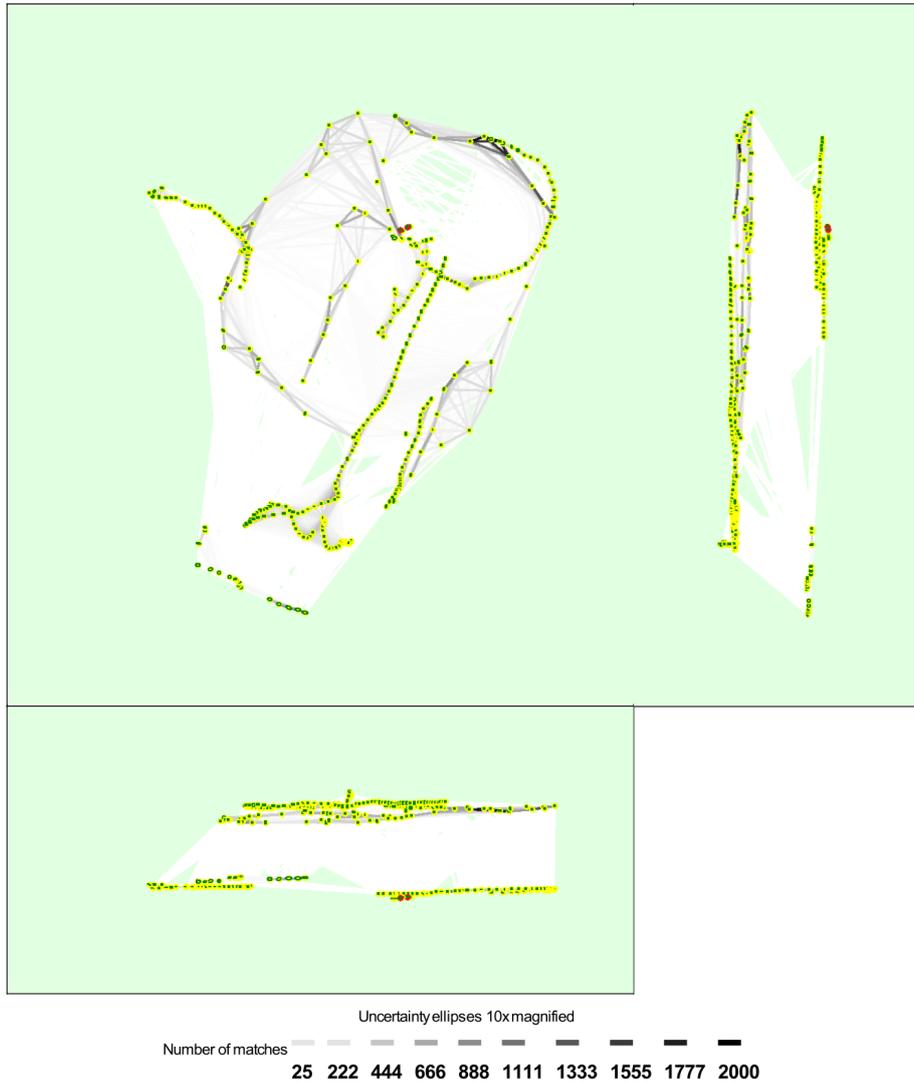


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.027	0.026	0.023	0.106	0.064	0.068
Sigma	0.010	0.007	0.007	0.109	0.036	0.099

Manual Tie Points

MTP Name	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto1	1.834	26 / 31
ponto2	2.953	28 / 33

Recolha e Processamento de Dados para Estudo Local de Potencial Fotovoltaico com Recurso a Drones

ponto4	1.732	33 / 33
ponto5	1.943	44 / 45
ponto6	2.121	16 / 16
ponto7	1.652	12 / 12
ponto8	2.366	26 / 29
canto_infantario	3.184	28 / 33
point_cobertura	1.114	27 / 27
blue_dot	1.802	21 / 21
ponto9	2.507	23 / 23
piramide	1.172	32 / 34
corner_esgoto	0.803	15 / 16
cone_point	0.836	10 / 10
E_corner	0.432	7 / 8
corner_pscina	1.003	7 / 7
canto_esgoto2	0.819	3 / 3
pscina_toldo	4.029	24 / 28
rede_amarela	0.902	22 / 22
canto_pavilhao	0.817	32 / 32

Projection errors for manual tie points. The last column counts the number of images where the manual tie point has been automatically verified v.s. manually marked.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	36.32
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	4.21	4.21	0.00
-3.00	0.00	45.79	42.11	0.00
0.00	3.00	49.47	51.05	0.00
3.00	6.00	0.53	2.63	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	3.16
9.00	12.00	0.00	0.00	11.05
12.00	15.00	0.00	0.00	11.05
15.00	-	0.00	0.00	38.42
Mean [m]		-0.000048	-0.000708	-0.000419
Sigma [m]		1.423997	1.659692	20.851487
RMS Error [m]		1.423997	1.659693	20.851487

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	99.47	3.68
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	55.79
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.995
Phi	2.089
Kappa	2.422

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details i

System Information i

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1070 (Driver: 22.21.13.8253)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems i

Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 29N (egm96)

Processing Options i

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Lever-Arm Parameters Optimization: None Rematch: Auto, no Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Density details i

Processing Options i

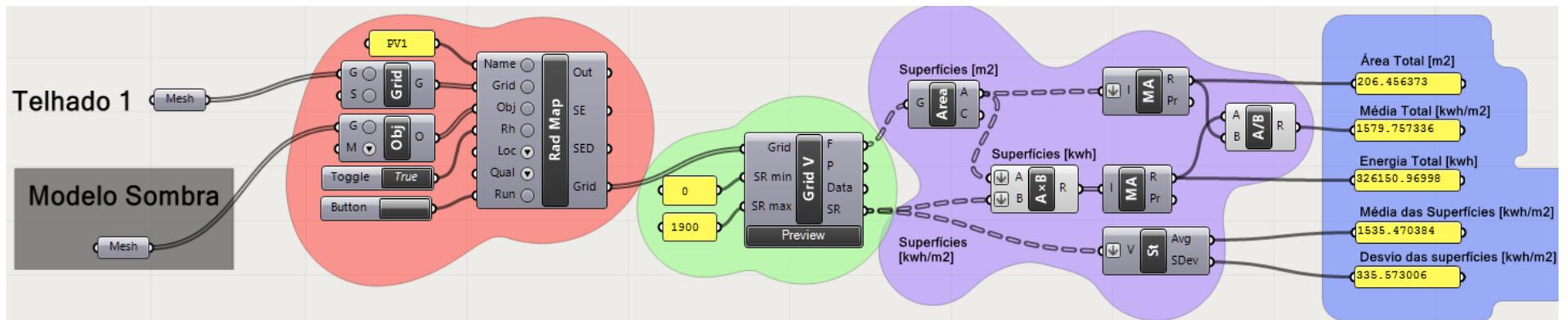
Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Density	35m:31s
Time for 3D Textured Mesh Generation	09m:48s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	16216003
Average Density (per m ³)	2832.48

A.12. Modelo Grasshopper do Potencial PV em detalhe



A.13. Valores da Pós-Análise – Moradias

Tabela A. 3: Tabela de valores da pós-análise – Moradias.

Telhado #	Área [m ²]	Radiação Solar Incidente			Potencial PV	
		Total [MWh]	Média [kWh/m ²]	Desvios [kWh/m ²]	Total [MWh]	Média [kWh/m ²]
1	206	325.96	1578.83	336.80	39.12	189.46
2	198	290.72	1471.60	325.61	34.89	176.59
3	127	186.95	1471.03	323.88	22.43	176.52
4	135	213.10	1581.80	298.42	25.57	189.82
5	123	188.21	1532.01	377.27	22.58	183.84
6	124	190.82	1541.35	341.54	22.90	184.96
7	107	170.55	1597.41	154.26	20.47	191.69
8	198	285.14	1438.15	318.55	34.22	172.58
9	232	316.58	1364.42	360.90	37.99	163.73
10	166	243.73	1471.95	392.81	29.25	176.63
Total:	1615	2411.75	1493.24	329.55	289.41	179.19

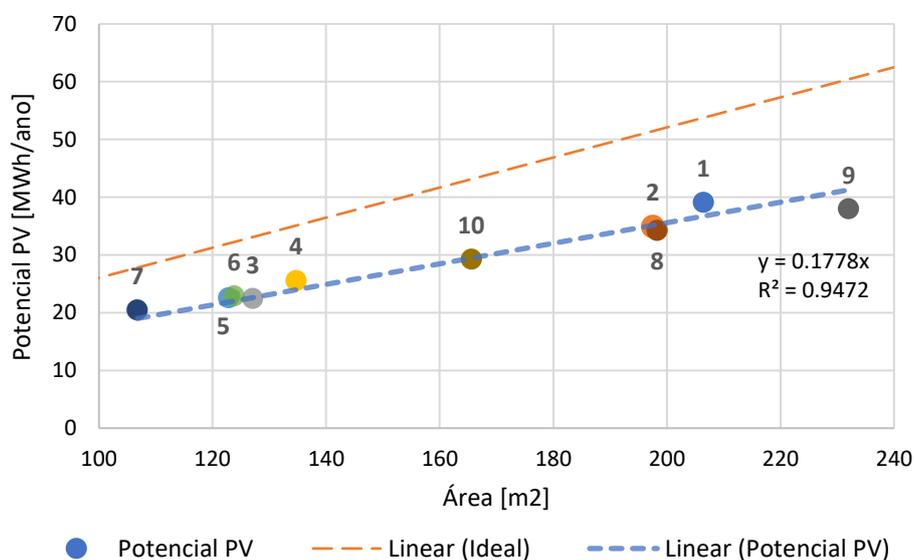


Figura A. 21: Potencial PV por ano em função da área do telhado e em comparação com o caso ideal⁷ – Moradias.

⁷ O caso ideal representa um sistema com as mesmas características (15% de eficiência e um *performance ratio* de 80%) com a incidência solar anual de 2179 kWh/m² (orientação a sul, inclinação de 34° e sem sombreamentos) em Portugal [81].

A.14. Valores da Pós-Análise – Seleção das Moradias

Tabela A. 4: Tabela de valores da pós-análise – Seleção das Moradias.

Telhado #	Área [m ²]	Radiação Solar Incidente			Potencial PV	
		Total [MWh]	Média [kWh/m ²]	Desvios [kWh/m ²]	Total [MWh]	Média [kWh/m ²]
1	63	111.43	1776.862	104.81	13.37	213.22
2	78	136.81	1749.171	176.32	16.42	209.90
3	23	43.47	1881.725	174.99	5.22	225.81
4	60	114.62	1900.471	54.44	13.75	228.06
5	62	116.80	1878.292	112.51	14.02	225.39
6	49	91.03	1852.415	105.16	10.92	222.29
7	0	0.00	-	-	-	-
8	0	0.00	-	-	-	-
9	29	54.31	1889.706	82.44	6.52	226.76
10	46	83.88	1830.887	135.18	10.07	219.71
Total:	410	752.34	1834.03	118.05	90.28	220.08

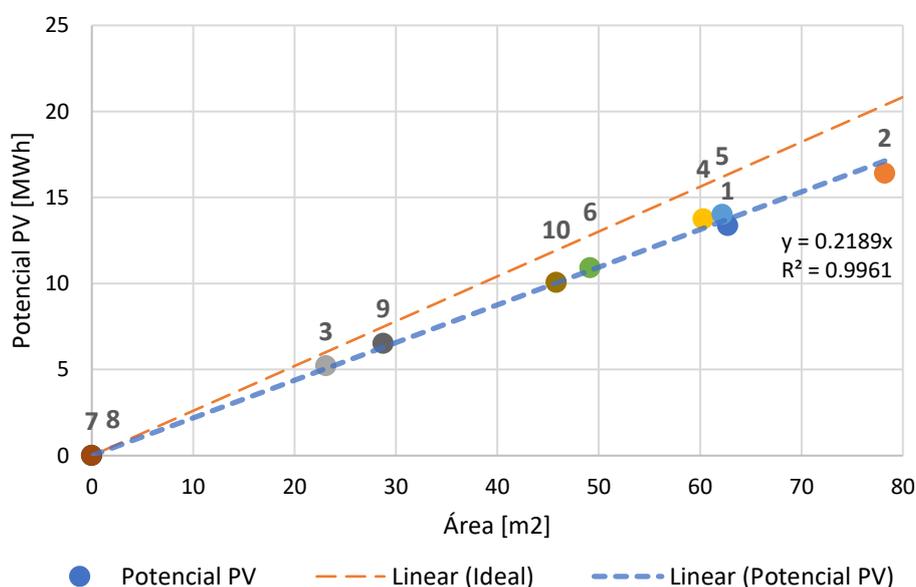


Figura A. 22: Total de radiação solar incidente por ano em função da área do telhado – Seleção das Moradias.

A.15. Valores da Pós-Análise – Complexo

Tabela A. 5: Tabela de valores da pós-análise – Complexo.

Telhado	Área [m ²]	Radiação Solar Incidente			Potencial PV	
		Total [MWh]	Média [kWh/m ²]	Desvios [kWh/m ²]	Total [MWh]	Média [kWh/m ²]
1	448	677.88	1514.60	299.04	81.35	181.75
2	23	22.18	955.65	371.40	2.66	114.68
3	472	698.11	1478.96	325.14	83.77	177.48
4	572	791.49	1383.94	341.69	94.98	166.07
5	283	358.34	1266.90	328.24	43.00	152.03
6	144	159.92	1112.98	360.69	19.19	133.56
7	41	48.11	1175.06	279.13	5.77	141.01
8	684	982.04	1435.80	388.39	117.84	172.30
9	636	934.87	1470.96	343.44	112.18	176.52
10	127	111.51	874.61	283.34	13.38	104.95
11	295	452.15	1533.82	261.18	54.26	184.06
12	86	105.04	1221.74	292.74	12.61	146.61
13	33	41.06	1238.96	345.42	4.93	148.68
Total:	3843	5382.69	1400.61	333.35	645.92	168.07

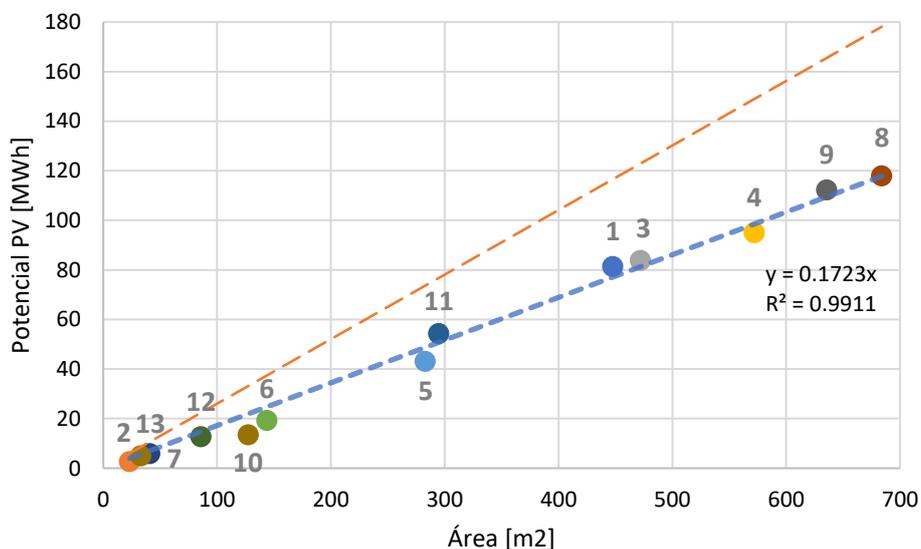


Figura A. 23: Total de radiação solar incidente por ano em função da área do telhado – Complexo