



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DE SUPERFÍCIES REFLETORAS COM RECURSO À FOTOGRAMETRIA

Gonçalo Botelho de Sousa Abranches

Orientação | Doutor Manuel Pedro Ivens Collares
Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DE SUPERFÍCIES REFLETORAS COM RECURSO À FOTOGRAMETRIA

Gonçalo Botelho de Sousa Abranches

Orientação | Doutor Manuel Pedro Ivens Collares
Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Manuel Collares Pereira por me acolher na Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora e orientar quanto ao tema a investigar e ao tipo de trabalho a desenvolver.

Agradeço a João Marchã e a Tiago Osório, ambos investigadores na Cátedra de Energias Renováveis, pelo apoio e disponibilidade ao longo dos meses de trabalho experimental. Sem a sua intervenção não teria sido possível a concretização do mesmo. Ao Professor Doutor Diogo Canavarro pela ajuda providencial em determinadas questões.

À Universidade de Évora e à Cátedra de Energias Renováveis por disponibilizarem um local adequado à realização dos ensaios necessários: PECS – Plataforma de Ensaios em Coletores Solares.

Ao corpo docente do Mestrado em Engenharia da Energia Solar, pelos ensinamentos transmitidos ao longo dos três semestres em que fui seu aluno, conhecimentos esses que foram da maior importância.

Aos colegas que partilharam o meu espaço de trabalho, por fornecerem um ambiente propício ao desenvolvimento do meu trabalho. (da minha investigação)

Agradeço em especial aos meus pais pelo seu apoio pessoal e financeiro, sem eles não teria sido possível concretizar esta minha ambição.

Resumo

Neste trabalho é utilizada a Fotogrametria como ferramenta para avaliação geométrica de concentradores solares térmicos. Coletores do tipo *cpc* – coletores parabólicos compostos são submetidos a diversas experiências fotogramétricas e avaliados quanto à sua forma. Outros objetos com superfícies refletoras e não refletoras como concentradores solares *ptc* – *parabolic trough concentrator* e fornos solares também são alvo de experiências fotogramétricas com o objetivo de estudar os efeitos de diferentes tipos de superfícies na fotogrametria.

É também comparado o modelo 3D do concentrador ideal com aquele que foi obtido através da fotogrametria, para o que foi feito um estudo exaustivo, verificando as diferenças geométricas entre os dois modelos, bem como os efeitos dessas diferenças físicas na reflexão dos raios solares, ou seja, na energia captada pelo concentrador.

Palavras-chave: Fotogrametria; *cpc* – concentrador parabólico composto; *PhotoModeler UAS*; Concentração Solar; Fotografia; Modelo 3D.

Abstract

Geometrical assessment of reflective surfaces using photogrammetry

This paper uses Photogrammetry as a tool for the geometric evaluation of solar concentrators. Collectors of the cpc type - compound parabolic collectors are submitted to several photogrammetric experiments and evaluated for their shape. Other objects with reflecting and non-reflecting surfaces such as ptc - parabolic through concentrators and solar ovens are also the subject of photogrammetric experiments to study the effects of different types of surfaces in photogrammetry.

There is also a comparison between the 3D model of the ideal concentrator and that obtained by photogrammetry. An exhaustive study was done verifying the geometric differences between the two models as well as the effects of these physical differences in the reflection of the solar rays that represent the energy captured by the concentrator.

Key-words: Photogrammetry; *cpc* – compound parabolic concentrator; *PhotoModeler*; Solar Concentration; Photography; 3D model.

Índice Geral

Índice Geral.....	VI
Índice de Figuras.....	IX
Índice de Tabelas.....	XI
Índice de Gráficos.....	XII
Parte I	
Introdução.....	1
Apresentação da dissertação, objetivos e importância do estudo.....	1
Objetivo geral.....	2
Capítulo 1	
Introdução teórica.....	4
1.1. A fotogrametria como técnica.....	4
1.2. Alguns aspetos teóricos.....	5
1.2.1. História da fotogrametria.....	5
1.2.2. Aplicações da fotogrametria.....	7
1.2.3. Princípios fundamentais.....	7
1.2.4. Outras técnicas de medição remota.....	9
1.2.5. Estado da Arte.....	11
1.2.6. Software de fotogrametria.....	14
Parte II – Metodologia.....	16
Capítulo 2	
Questões recorrentes da fotogrametria e metodologia.....	16
2.1. Questões recorrentes da fotogrametria.....	16
2.1.1. Quão precisa é a fotogrametria?.....	16

2.1.2. Qual o nível de dificuldade de aprendizagem de utilização da fotogrametria e de obtenção dos primeiros resultados?	17
2.1.3. Quais são as melhores câmaras para a fotogrametria?.....	17
2.1.4. Como tirar as fotografias?	18
2.1.5. Quanto tempo demora a completar um projeto e como automatizá-lo?.....	19
2.1.6. É possível exportar ficheiros de fotogrametria para outras aplicações?	20
2.1.7. Que tipo de objetos são melhores para a utilização da fotogrametria?.....	20
2.1.8. Pode-se utilizar medições (medidas) existentes/conhecidas para melhorar um projeto individual de fotogrametria?.....	21
2.1.9. Como começar um projeto?.....	21
2.2. Descrição sumária de métodos e procedimentos adotados	22

Parte III – Resultados e discussão.....	24
---	----

Capítulo 3

Esquema de trabalho e fotogrametria.....	24
3.1. Calibração.....	24
3.2. Captura.....	25
3.3. Processamento.....	27
3.4. Calibração da máquina fotográfica utilizada.....	31
3.5. Experiências fotogramétricas.....	37
3.5.1. Bloco de cimento.....	38
3.5.2. Forno solar.....	39
3.5.3. Concentrador solar térmico PTC.....	41
3.5.4. Concentrador solar térmico CPC.....	44

Capítulo 4

Projeto Final.....	48
Avaliação Geométrica de um concentrador solar térmico do tipo CPC.....	48
4.1. A utilização do programa <i>Photomodeler</i> UAS.....	48
4.1.1 Algumas questões por resolver.....	52
4.2. A utilização do programa <i>Rhino3D</i>	53
4.3. A utilização do programa <i>Cloud Compare</i>	53
4.3.1. Procedimento.....	54
4.4. A utilização do programa <i>Tonatiuh</i>	59
4.4.1. Procedimento – concentradores tipo <i>CPC teórico/ideal</i> e tipo <i>CPC real/fabricado</i>	60
4.4.1.1. Concentrador do tipo <i>CPC teórico/ideal</i>	60
4.4.1.2 Concentrador do tipo <i>CPC real/fabricado</i>	61
4.4.2. Caracterização do cpc utilizado.....	62
4.5. Discussão: aprofundamento da análise anterior.....	63
4.6. Conclusões sobre o projeto final.....	65
Conclusão.....	68
Referências.....	71
Anexos.....	73

Índice de figuras

Figura 1 - Calibração da máquina fotográfica utilizada pelo método multi sheet com utilização de tripé. Disposição proposta pelo PhotoModeler UAS.	25
Figura 2 - Método da sobreposição ou overlapping. Fonte: https://www.photomodeler.com	26
Figura 3 - Mesh de fachada de edifício, resultante do método de varrimento. Fonte: https://www.photomodeler.com	26
Figura 4 - Menu inicial do PhotoModeler UAS.	27
Figura 5 - Manual modeling - carro de brincar. Fonte: https://www.photomodeler.com	28
Figura 6 - Modelação ao longo do tempo. Fonte: https://www.photomodeler.com . ..	29
Figura 7 - RAD - Ring Automated Detected - alvo do PhotoModeler UAS. Fonte: https://www.photomodeler.com	30
Figura 8 - Eliminação de alvos refletidos; A vermelho está um alvo para eliminar (reflexão); A verde está um alvo real.	30
Figura 9 - Máquina fotográfica utilizada - Canon Powershot G9.	31
Figura 10 - Action Cam Konig CSACWG 100.	31
Figura 11 – Matriz de calibração utilizada com duas das folhas de alvos mais elevadas.	33
Figura 12 - Representação da fixação das definições da máquina fotográfica utilizada.	34
Figura 13 - Nuvem de pontos do bloco de cimento. Fonte: PhotoModeler UAS.	38
Figura 14 - Bloco de cimento utilizado. Fonte: fotografia.....	38
Figura 15 - Mesh mais nuvem de pontos, mesh texturizada. Fonte: PhotoModeler UAS.	38
Figura 16 - Mesh do bloco de cimento. Fonte: PhotoModeler UAS.	38
Figura 17 - Mesh texturizada/DSM - forno solar. Fonte: PhotoModeler UAS.	39
Figura 18 - Mesh texturizada/DSM - forno solar. Fonte: PhotoModeler UAS.	39
Figura 19 - Forno solar com 200 alvos.....	40
Figura 20 - Nuvem de pontos do forno solar. Fonte: PhotoModeler UAS.....	41
Figura 21 - Superfície traçada ao longo da nuvem de pontos. Fonte: PhotoModeler UAS.	41
Figura 22 - Em cima à esq. estrutura metálica; Em baixo à esq. estrutura metálica montada; Em cima à dir. e em baixo à dir. estrutura metálica montada com espelhos concentradores.....	42
Figura 23 - PTC sistema completo - espelhos concentradores, estrutura metálica, alvos colocados e metro (instrumento de medida).	43
Figura 24 - À esq. vista de lado; À dir. perspetiva da nuvem de pontos/modelo 3D do ptc. Fonte: PhotoModeler UAS.	43
Figura 25 - cpc utilizado com alvos.....	44
Figura 26 - Perfil do concentrador utilizado com dimensões.	45
Figura 27 - Nuvem de pontos do cpc com eixos. Fonte: PhotoModeler UAS.	45
Figura 28 - cpc e base de cimento com alvos.....	50

Figura 29 - cpc com superfície traçada com comando loft. Fonte: PhotoModeler UAS.	51
Figura 30 – Esquema de concentrador solar tipo cpc com zoom localizado na zona do v-shape e tubo recetor. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16301980	52
Figura 31 - Conjunto de quatro vistas do modelo tridimensional do cpc utilizado. Fonte: Rhino3D.	53
Figura 32 - Nuvem de pontos do modelo proveniente da fotogrametria (pontos brancos) e mesh do modelo teórico/ideal a verde. Fonte: CloudCompare.	54
Figura 33 - Nuvem de pontos e mesh sobrepostas; código de cores para as distâncias entre os pontos e a mesh; régua vermelha com o comprimento dos dois modelos de 2.02m. Fonte: CloudCompare	55
Figura 34 - Vista de trás da sobreposição da duas meshes. A mesh de trás é a real colorida e a da frente a ideal a verde. Fonte: CloudCompare.	57
Figura 35 - Vista de frente da sobreposição das duas meshes. A mesh verde é a real e a colorida é a mesh ideal. Fonte: CloudCompare.	58
Figura 36 - Logotipo do programa Tonatiuh. Fonte: google.	59
Figura 37 - Conjunto cpc ideal com tubo recetor.	60
Figura 38 - Conjunto cpc ideal com tubo recetor. 100000 raios de luz simulados a incidir no conjunto. Incidência normal.	61
Figura 39 - Conjunto cpc real com tubo recetor.	61
Figura 40 - conjunto cpc real com tubo recetor. 100000 raios de luz simulados a incidir no conjunto. Incidência normal.	62
Figura 41 - quatro vistas da nova superfície criada: "ideal modificado". Fonte: Rhino3D	64
Figura 42 - Simulação do traçado dos raios na nova superfície: "ideal modificado". Fonte: Tonatiuh	64
Figura 43 - Vista frontal da nova superfície na simulação do traçado dos raios. Fonte: Tonatiuh.	65

Índice de tabelas

Tabela 1 - Lista de programas de fotogrametria	14
Tabela 2 - Lista de tipos de projeto que se podem desenvolver no PhotoModeler UAS	27
Tabela 3 - Valores relevantes da calibração que fiz da máquina fotográfica utilizada em todo o trabalho.....	36
Tabela 4 - Escalas utilizadas no programa PhotoModeler UAS.....	53
Tabela 5 - Distâncias entre os pontos da nuvem (real) e a mesh (ideal). Fonte: CloudCompare.....	56

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Gráfico de barras que representa as distâncias entre os pontos da nuvem e a mesh. Os valores estão distribuídos por 4 classes e estão em metros. Fonte: CloudCompare.	55
Gráfico 2 - Gráfico de barras que representa as distâncias entre as duas meshes. Os valores estão distribuídos por 28 classes. Fonte: CloudCompare.....	58

Parte I - Introdução

Apresentação da dissertação, objetivos e importância do estudo

O trabalho que se segue é a minha dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia Solar da Universidade de Évora.

O objetivo desta dissertação é a utilização da fotogrametria como ferramenta de avaliação geométrica de coletores solares.

O trabalho que se apresenta estrutura-se em quatro grandes partes: Introdução, Metodologia, Resultados e Discussão e Conclusão. Esta estrutura adequa-se ao trabalho realizado pois introduz o tema ao leitor, explicando a origem desta técnica, bem como o estado em que se encontra e as diferentes maneiras de ser utilizada. A metodologia adotada é explicada, numa descrição sumária, mais à frente, e introduz os procedimentos que foram utilizados nas experiências fotogramétricas e no projeto final. Por fim, exponho os resultados obtidos, bem como os comentários e conclusões que elaborei relativamente aos mesmos.

Numa primeira fase, é apresentada uma fundamentação teórica sobre Fotogrametria de modo a enquadrar melhor o trabalho na área das ciências e tecnologias. A fotogrametria é uma técnica ótica para a determinação de distâncias; como tal, foi feito um estudo para comparar as diferentes técnicas óticas de medição que existem. O estado da arte relativo ao desenvolvimento desta técnica é apresentado, bem como todos os passos necessários para utilizar a fotogrametria. De seguida, é explicado todo o procedimento experimental, desde a calibração da máquina fotográfica ao processamento das fotografias até se obterem os modelos tridimensionais desejados. Finalmente, são apresentados os resultados finais e tecidas conclusões sobre os mesmos.

O tema “Determinação da qualidade geométrica de superfícies refletoras com recurso à fotogrametria” foi-me proposto pelo meu orientador Professor Doutor Manuel Collares Pereira, Professor Catedrático e Presidente da Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora, orientador desta dissertação. Todo o trabalho experimental foi realizado na PECS – Plataforma de Ensaios em Coletores Solares (doravante PECS), instalações que pertencem à Cátedra de Energias Renováveis da

Universidade de Évora. Graças à minha integração neste núcleo de investigação, foi-me possível utilizar um programa para fotogrametria de nível profissional, o *PhotoModeler UAS* cuja licença de utilização tem custos elevados. Todos os outros *softwares* utilizados são de utilização gratuita. Tive também acesso a objetos como concentradores do tipo *cpc* (concentrador parabólico composto) e *ptc* (*parabolic through concentrator*) e outros como fornos solares para fazer experiências fotogramétricas.

Ao longo deste projeto, surgiram diversos problemas desafiantes, uma vez que se tratava do meu primeiro contacto com a fotogrametria e com o *software PhotoModeler*.

Todo trabalho realizado foi levado a cabo de modo a responder a duas grandes questões, a primeira das quais se prende com a possibilidade de utilizar a fotogrametria em superfícies refletoras. Uma vez que se verificou esta hipótese, foi possível avançar para segunda questão igualmente importante: é possível fazer uma avaliação geométrica de coletores solares do tipo *cpc* com a fotogrametria? Um dos motivos para a realização deste estudo foi a verificação da possibilidade da utilização da fotogrametria como ferramenta de medição rápida, eficaz e de baixo custo de estruturas relacionadas com a energia solar.

Objetivo geral

O tema da minha dissertação de mestrado está alinhado com um dos ramos da investigação da Cátedra das Energias Renováveis da Universidade de Évora, a fotogrametria. No meu caso, foi utilizada a fotogrametria terrestre ou *close-range photogrammetry*. Este trabalho tem o objetivo principal de verificar a forma de uma estrutura, mais precisamente, fazer uma avaliação geométrica da forma de um coletor solar do tipo *cpc* presente na PECS – Plataforma de Ensaios em Coletores Solares, instalações da Universidade de Évora, utilizando a fotogrametria como ferramenta para tal. Há, no entanto, diversas verificações a fazer tal como perceber se a fotogrametria pode ser utilizada em superfícies espelhadas visto que se trata de um concentrador solar espelhado.

Este trabalho tem como objetivos específicos, os seguintes:

- Apresentar a Fotogrametria de maneira simples e concisa;
- Possibilitar a utilização da fotogrametria a quem não a conheça;
- Verificar se a Fotogrametria se pode aplicar em superfícies espelhadas;
- Extrair modelos tridimensionais em *CAD* do coletor solar térmico *cpc*;
- Verificar a forma do coletor solar térmico escolhido: *cpc*;
- Fazer uma análise do trajeto dos raios solares nos modelos 3D resultantes – *ray trace analisys* de modo a obter valores de eficiência ótica.

Capítulo 1 – Introdução teórica

1.1. A fotogrametria como técnica

A fotogrametria é uma técnica que permite extrair informação quanto à dimensão de determinado objeto a partir de fotografias. As imagens captadas através de câmaras fotográficas fornecem estes dados, se devidamente processadas, sendo o potencial desta técnica extraordinário, quando comparado com outras técnicas de medição remota, podendo ser aplicada tanto em fotografias captadas do espaço, como em microscópicas. É atualmente um dos métodos mais económicos, rápidos, eficazes e de fácil logística para verificar distâncias, fazer mapas ou modelos 3D sem ser necessário contacto físico com os objetos reais, não alterando assim a sua posição ou constituição.

Esta técnica pode ser classificada quanto à posição da câmara fotográfica, existindo dois tipos de fotogrametria: aérea e terrestre (Brito & Coelho, 2007). A fotogrametria terrestre ou em inglês *close-range photogrammetry* tal como o nome indica é feita com a câmara fotográfica posicionada no chão com o auxílio de um apoio ou tripé. Geralmente, o seu *output* são modelos 3D, desenhos, medidas ou nuvens de pontos. A fotogrametria de curta distância é utilizada para medir e modelar edifícios e estruturas, cenas forenses e de acidente, minas, artefactos arqueológicos e todo o tipo de objetos reais como por exemplo, concentradores solares.

A fotogrametria aérea é feita recorrendo a aviões ou mais recentemente a *drones* ou *UAS – unmaned aerial systems*. Com o aparecimento dos segundos, foi possível reduzir substancialmente o custo da fotogrametria aérea, deixando de ser necessário alugar ou adquirir um avião convencional com piloto, combustível e todos os custos que acarreta, para se passar a realizar a tarefa com *drones*. Estes equipamentos são cada vez mais evoluídos, com potência suficiente para atingir grandes altitudes mesmo com a câmara, baterias que aguentam voos de tempo suficiente para recolher as imagens necessárias e a uma fração do preço da outra alternativa.

As fotografias são o principal *input* para realizar esta técnica. Como tal, qualquer objeto ou cena que possa ser fotografado também pode ser medido ou mesmo modelado através da fotogrametria. Nos dias de hoje, as áreas de aplicação da fotogrametria são muitas graças ao avanço da tecnologia, nomeadamente das câmaras

fotográficas, que passaram a ser digitais e com resoluções cada vez maiores, e dos computadores que têm processadores cada vez mais potentes e capazes de processar muita informação em cada vez menos tempo.

Para realizar um projeto com fotogrametria, são necessários três elementos fundamentais: uma câmara digital; um computador; um *software* de fotogrametria. Qualquer computador atual tem capacidade para correr um programa de fotogrametria; se o projeto necessitar de muitas fotografias pode ocorrer alguma demora no processamento das mesmas, caso seja um modelo menos potente. O *software* de fotogrametria pode ser adquirido *on-line* com facilidade, pois existe uma grande oferta deste tipo de programas, desde soluções sem custos até soluções profissionais que ascendem a alguns milhares de euros (mais à frente é apresentada uma lista com diversas opções). Quanto à câmara fotográfica, há que ter atenção a alguns aspetos como a distância focal fixa, foco e controlo de luminosidade automáticos. Para obter bons resultados, estes três fatores são muito importantes e todos têm que se manter inalteráveis; no entanto, é possível utilizar câmaras inferiores e obter resultados, ainda que com precisão mais reduzida.

1.2. Alguns aspetos teóricos

1.2.1. História da fotogrametria

A fotogrametria surgiu em 1851 desenvolvida por Aimé Laussedat, que apelidou a técnica de Metrofotografia. Em 1858, Laussedat em conjunto com Albrecht Meydenbauer fizeram os primeiros levantamentos precisos de edifícios e de pequenos terrenos. Foi apenas em 1867 e por sugestão de Meydenbauer que surgiu o termo fotogrametria que viria a ser aceite pela comunidade científica. A primeira obra de literatura relativa à fotogrametria foi publicada em 1889 por Carl Koppe – Manual de Fotogrametria (Brito & Coelho, 2007).

Em 1901, foi inventado por Carl Pulfrich o estéreo comparador que permitia aos astrónomos identificar diferenças entre fotografias do céu noturno. Nesta altura, este aparelho revolucionou a fotogrametria ao permitir a utilização de fotografias

observadas estereoscopicamente (estereopares) que eliminaram grande parte dos cálculos matemáticos, que, até então, eram necessários por parte dos fotogrametistas. Foi a alvorada da fotogrametria analógica.

Theodor Scheimpflug foi outro cientista que contribuiu para o avanço da técnica. Em 1904, inventou uma câmara que foi importante, nomeadamente para a retificação, tendo patenteado um método de retificação - o Princípio de Scheimpflug, que descreve uma condição ótica que permite a documentação de um objeto inclinado com a máxima profundidade de campo e mínima distorção de imagem. É nesta altura que surgem os primeiros retificadores analógicos que viriam a ser substituídos por restituídores analógicos, cujo objetivo era permitir a visão estereoscópica.

Um dos períodos de maior utilização da fotogrametria foi durante a segunda Guerra Mundial. Recorreu-se bastante à fotogrametria aérea nesta altura para a construção de mapas. Diversas fontes indicam até que grande parte dos mapas do mundo foram feitos com a fotogrametria analógica.

Após o aparecimento dos computadores na década de 40, a fotogrametria deu outro salto evolutivo. Em 1953, Helmut Schmidt começou um estudo onde estavam inseridos o tratamento matricial, as soluções por mínimos quadrados, a solução simultânea utilizando múltiplas imagens e uma análise completa da propagação de erros estabelecendo assim as bases da fotogrametria analítica. Em 1957, é desenvolvido o restituídor analítico por Uki Helava, cientista Finlandês, introduzindo a possibilidade de medição das coordenadas de marcas fiduciais de pontos existentes em duas fotografias, o que aumentava a precisão dos resultados e diminuía o tempo gasto num projeto.

Finalmente, com a invenção da câmara fotográfica digital, a fotogrametria passa a ser também digital, como é hoje em dia.

1.2.2. Aplicações da Fotogrametria

Como já foi referido, a fotogrametria tem um vasto leque de potenciais aplicações. Devido à grande vantagem de utilizar fotografias como *input* é possível medir ou modelar praticamente todo o tipo de objetos, cenários e até seres vivos, desde que possam ser fotografados.

Inicialmente, esta técnica era utilizada predominantemente na cartografia, para a obtenção de mapas. Mais recentemente, e devido aos avanços tecnológicos que os equipamentos necessários para a fotogrametria sofreram, é possível aplicar a técnica às mais variadas áreas, tais como: Indústria – medições industriais; Arqueologia - documentação arqueológica; Cartografia - construção de mapas; Geologia - erosão dos solos, movimentos da crosta; Engenharia Civil e Arquitetura - verificação de estruturas; Investigação policial - levantamento de cenários de crime; Medicina – Diagnóstico por imagem; Controle de qualidade - comparação de objetos reais previamente definidos com modelos 3D feitos com fotogrametria, nomeadamente componentes de sistemas de produção de energia térmica por via solar – concentradores solares.

1.2.3. Princípios fundamentais da fotogrametria

Neste ponto, irei enumerar e explicar alguns princípios e conceitos que são muito importantes para a compreensão do funcionamento da técnica.

O que permite aos seres humanos observar o mundo a três dimensões é um fenómeno denominado Estereoscopia. Os nossos olhos permitem apenas captar duas dimensões: a largura e o comprimento. A profundidade resulta da visão binocular em que cada olho observa o mesmo objeto a partir de ângulos diferentes, criando assim dois centros de perspetiva diferentes, sendo que o cérebro, posteriormente, interpreta estas diferenças como profundidade. Na fotogrametria é possível replicar este fenómeno, tirando duas fotografias do mesmo objeto a partir de dois locais distintos, mas tem que haver sobreposição das fotografias (as características do objeto têm que estar presentes em ambas as fotografias). A este tipo de fotografia, chama-se estereopar.

Outro conceito importante, mas apenas para a fotogrametria aérea, é a Paralaxe Estereoscópica que define a sensação de movimento ocorrido entre dois objetos fixos que se encontram a distâncias diferentes do ponto de observação, estando este em movimento. Um exemplo claro deste efeito é quando estamos num transporte (carro, comboio) e parece que os objetos mais distantes se aproximam mais lentamente que os objetos mais próximos. Quanto maior for a distância entre o visor da câmara e a lente, maior o erro de paralaxe. Recorde-se que este conceito não se aplica à fotogrametria terrestre já que a câmara está fixa.

Quando se termina a captura de imagens, o passo a seguir é a Orientação das mesmas. A orientação pode ser de dois tipos: interna e externa. Na orientação interna, o objetivo é a referenciação da imagem relativamente à câmara. Os parâmetros de orientação interna são a distância focal, as coordenadas do ponto principal (centro geométrico da fotografia) e as distorções da lente que podem ser determinados através da calibração da máquina (Brito & Coelho, 2007). Na orientação externa, são relacionados os sistemas de coordenadas da fotografia com o do objeto real através de seis parâmetros de orientação externa: coordenadas X,Y,Z do centro de perspetiva e ângulos de rotação do plano da fotografia ω , ϕ , κ em que ω é o ângulo de rotação em torno do eixo X, ϕ o ângulo de rotação em torno de Y e κ o ângulo de rotação em torno de Z.

A Retificação é outro dos passos a tomar durante o processamento das fotografias na fotogrametria. Mesmo que se tire uma fotografia perpendicularmente ao objeto, este apresentará sempre distorções geométricas. Surge então a retificação que transforma uma fotografia numa imagem sem distorções geométricas ou efeitos de perspetiva, isto é, uma projeção ortogonal, que, nesta área, se chama ortofotografia. Rezende (2009, p. 89) define fotografia retificada, ou ortofotografia, como sendo uma “imagem produzida a partir da manipulação (retificação) e correção da distorção ótica de fotografias com o objetivo de desfazer os efeitos de perspetiva”.

Por fim, apresento a Restituição que é a reconstrução fotogramétrica do objeto em causa e que pode ser de três tipos: mono-restituição; estéreo-restituição; restituição a partir de múltiplas fotografias. A primeira consiste na reconstrução fotogramétrica de

um objeto a partir de apenas uma fotografia, esta deve ser o mais perpendicular possível em relação ao mesmo. “Uma das importantes práticas da mono-restituição é a possibilidade de restituir a imagem de uma edificação histórica já demolida através da utilização de apenas uma fotografia” (Yanaga, 2006, p. 47). A segunda utiliza fotografias estéreopares que devem ser tiradas perpendicularmente em relação ao objeto, convém também que exista uma sobreposição das fotografias de cerca de 50%, de modo a obter a profundidade. Na restituição a partir de várias fotografias, a reconstrução fotogramétrica é feita a partir de múltiplas fotografias captadas à volta do objeto sem restrições nos ângulos entre elas, havendo uma só condição que é a seguinte: cada ponto homólogo deve aparecer em pelo menos duas fotografias. Mais à frente, irei explicar como fiz a minha experiência fotogramétrica, cujo processo de restituição assenta em múltiplas fotografias.

1.2.4. Outras técnicas de medição remota

Quando se utiliza uma técnica de medição remota em conjunto com um veículo, independentemente de se tratar de fotogrametria ou não, na verdade, o que se está a fazer chama-se *mobile mapping* – mapeamento móvel. Neste processo, acoplado a um veículo pode estar um equipamento de fotografia, *SAR*, *Laser Scanner*, *LiDAR* ou qualquer outro aparelho de medição sem contacto físico. Os resultados/*outputs* de *mobile mapping* são *GIS* – *geographic information system*, mapas digitais ou imagens e vídeos georreferenciados.

A fotogrametria está incluída num grupo de técnicas de medição remotas, sem contacto físico. Entre elas está o *SAR* – *Synthetic Aperture Radar* ou radar de abertura sintética, uma tecnologia que permite criar modelos digitais terrestres. O conceito fundamental desta tecnologia é a emissão de pulsos de ondas rádio e a captação do eco resultante, cujo sinal é posteriormente traduzido e transformado num modelo digital. O aparelho é montado num avião que sobrevoa a zona a modelar e a “abertura” do radar de abertura sintética vem da distância coberta pelo avião com o *SAR* acoplado. Os modelos criados pelo *SAR* são de resolução média.

Outra tecnologia semelhante é o SAR interferométrico. A interferometria é uma técnica que sobrepõe duas ou mais ondas e utiliza a onda resultante para estudar e comparar as de entrada. Tratando-se de ondas eletromagnéticas, este método é aplicável a diversas áreas do conhecimento. Quando aplicado ao SAR, como técnica ótica, no ramo da astronomia, consiste em combinar a luz proveniente de diferentes recetores, telescópios ou antenas de rádio para obter uma imagem de maior resolução. Este equipamento é colocado em órbita à volta da Terra, como num vaivém espacial. Permite cobrir vastas áreas de terreno e os modelos que produz são mapas de deslocamento precisos.

Mais tarde, surge o *laser scanner* que pode ser utilizado a partir do solo ou do ar. O aparecimento desta tecnologia e os grandes avanços que sofreu a nível de alcance, precisão e volume de dados gerados levaram a que a fotogrametria visse o seu domínio afetado não só no que toca à produção de modelos digitais terrestres, campo onde mais se utiliza o *laser scanner* aéreo, mas também no levantamento de dados arqueológicos, arquitetónicos e geológicos. Esta tecnologia, também denominada *LaDAR – laser detection and ranging*, mede um objeto, fazendo incidir pulsos de laser no mesmo e medindo os raios refletidos. Posteriormente, consoante o tempo entre emissão e receção do pulso e o seu comprimento de onda, é possível criar um modelo tridimensional de um objeto. De facto, com os avanços sofridos pela fotogrametria, o *LaDAR* perdeu um pouco de terreno como tecnologia de medição remota; no entanto, continua a ser a primeira opção para muitas pessoas cuja formação não inclui Geomática – recolha, armazenamento, processamento e fornecimento de informação geográfica.

Foi só após o aparecimento de *UAS – Unmanned aerial systems* e de novas técnicas de orientação e conexão entre fotografias que, por um lado, reduziram os custos logísticos e, por outro, automatizaram o processamento das mesmas, que a fotogrametria voltou a ser competitiva. Atualmente, a maioria dos *softwares* próprios para a técnica têm grande parte do processamento das fotografias automatizado.

Outra técnica de medição remota é a deflectometria ou distorção de padrões refletidos. É amplamente utilizada na medição de desvios na geometria de concentradores solares com superfícies espelhadas, fornecendo resultados de elevada precisão e resolução. É utilizada uma fonte de luz/ecrã que emite raios de luz sobre a

superfície do objeto em teste, sendo esses raios refletidos e captados por uma câmara. No processamento, são calculadas as normais dos raios de luz nos pontos em que são refletidos pela superfície do objeto, definindo assim o mesmo. Contrariamente à fotogrametria, esta técnica adapta-se perfeitamente a superfícies refletoras.

Apesar de todas as técnicas descritas e de algumas poderem apresentar resultados melhores em certas áreas ou para determinados tipos de objetos, a fotogrametria continua a ser a que apresenta mais vantagens e é sem dúvida a mais flexível e completa de todas para recolher e processar informação tridimensional. Outro fator que deve ser levado em conta é que mesmo quando são utilizadas outras técnicas que não a fotogrametria, geralmente também têm de ser tiradas fotografias quer seja para a produção da orto fotografia ou simplesmente para ter um registo fotográfico, ou seja, já que se tem de tirar fotografias também se poderia utilizar a fotogrametria.

1.2.5. Estado da arte

Neste ponto, são dados a conhecer alguns sistemas de medição fotogramétricos ou que incluem a fotogrametria, que penso serem os mais avançados atualmente. Primeiramente, há que ter a noção de que existem diversas técnicas e tecnologias de medição remota, assim como a fotogrametria o é. No entanto, após extensa investigação, tem-se vindo a verificar que, em geral, tendo em conta as vantagens, a fotogrametria é a melhor técnica de medição remota, como tenho vindo a referir.

A fotogrametria está sempre a evoluir direta ou indiretamente. A técnica evolui indiretamente por meio de avanços tecnológicos nos equipamentos utilizados como câmaras fotográficas e computadores (esses progressos não são feitos exclusivamente pela fotogrametria). Outros desenvolvimentos que a técnica apresenta, mas de maneira direta ou propositada, são por exemplo novos *softwares* especialmente desenhados para o efeito, novos métodos de tirar fotografias ou até na orientação das mesmas. Como tal, esta é uma técnica em constante evolução e com um amplo espectro de aplicações desde a indústria à medicina.

É um facto que a fotogrametria não é superior em tudo a todas as outras formas de obter medidas ou modelos tridimensionais de forma remota. A tecnologia conhecida como *LaDAR*, que já foi referida anteriormente, tem um poder de penetração superior ao da fotogrametria; já a última obtém resultados mais precisos e com maior resolução para determinados projetos. Uma solução ideal passa pela utilização das duas técnicas em simultâneo. Outro exemplo de emparelhamento de diferentes tecnologias e técnicas é o *SAR* em conjunto com a fotogrametria de onde podem resultar *DTM – Digital Terrain Models* e orto fotografias o que torna o projeto em questão mais completo e viável.

Sendo a fotogrametria uma técnica de medição remota, é amplamente utilizada em sistemas de controlo de qualidade não só pela elevada precisão dos seus resultados, mas também por não implicar alterações físicas ou químicas nos objetos a avaliar, tornando-se ideal para o efeito. A empresa *CSP Services* que pertence ao *DLR – Centro Aeroespacial Alemão* especializada em serviços de engenharia e consultoria para instalações solares térmicas é um dos expoentes máximos no que toca a medições remotas e fotogrametria. O objetivo principal desta empresa passa por avaliar um campo solar em questão ou apenas alguns dos elementos que o constituem como os concentradores ou as estruturas onde são fixados, reportar e corrigir os erros detetados, de forma a ter as instalações a operar no rendimento máximo. Tendo em vista atingir o seu objetivo, esta empresa utiliza diversas tecnologias e técnicas de medição. De forma geral, a companhia dispõe de três sistemas diferentes para o efeito: *QFOTO*; *QDEC*; *QFLY*.

QFOTO é o único dos três que apenas utiliza fotogrametria; trata-se de um sistema automático de verificação de estruturas onde serão colocados os concentradores solares. Um braço robótico montado numa calha móvel e equipado com uma câmara fotográfica específica, move-se ao longo da estrutura a avaliar, fazendo o levantamento das fotografias e, automaticamente, faz o seu processamento e, no final, indica ao operador o estado dessa estrutura.

QDEC - trata-se de um sistema para avaliação dos próprios concentradores solares. Como já foi referido, apesar de ser possível aplicar a fotogrametria em superfícies espelhadas, não é a melhor opção principalmente pelo fator tempo. Para avaliar superfícies espelhadas com a fotogrametria, são necessárias marcas fiduciais

artificiais (alvos) em todos os espelhos avaliados, pois, de outra forma, devido às reflexões da luz inerentes a tais superfícies, os resultados não seriam aceitáveis. Colocar e remover tais alvos em todos os concentradores a verificar seria um processo moroso; como tal, neste sistema QDEC foi incorporada outra técnica baseada no princípio das medições deflectométricas. É um sistema ótico para quantificar os parâmetros geométricos relevantes de concentradores solares refletores e que utiliza a distorção de padrões refletidos, técnica que se provou ideal para o efeito. Esta ferramenta é utilizada, atualmente, por diversos fabricantes de concentradores solares por todo o mundo.

QFLY é o terceiro sistema disponibilizado pela *CSP Services*, contrariamente aos outros dois, este é utilizado em instalações solares térmicas com concentração, já em funcionamento ou prestes a iniciar e que sejam do tipo *parabolic trough*. Trata-se de um *UAS – Unmanned Aerial System* ou *drone* equipado com três diferentes sistemas e cujo objetivo é a identificação e avaliação do potencial de otimização da performance da instalação. Entre as diversas vantagens apresentadas por esta tecnologia, está a facilidade e rapidez com que se pode avaliar uma instalação deste tipo, já que se trata de uma caracterização aérea. Com este dispositivo, é possível detetar anomalias nas propriedades óticas e térmicas da instalação, os seus resultados incluem a forma do espelho, a posição do tubo absorber, o alinhamento dos módulos, comportamento do seguidor e perdas térmicas pelos tubos. Estes dados permitem efetuar um controlo de qualidade, bem como testes óticos de aceitação para o campo solar em questão e também pode ser utilizado para fins de garantia. O sistema *QFLY* conta com três modos de medição diferentes sendo eles: *QFLY SURVEY*, *QFLY HIGH RESOLUTION* e *QFLY THERMO*.

QFLY SURVEY permite uma rápida caracterização de grande parte ou até de toda a instalação solar térmica em apenas um dia e fornece dados relativamente à forma e alinhamento dos concentradores e ao sistema de seguimento; trata-se de um sistema fotogramétrico cuja precisão é elevada, mas apenas o bastante para obter bons resultados.

QFLY HIGH RESOLUTION é outro sistema fotogramétrico, mas de elevadíssima precisão; o seu objetivo é a caracterização de uma pequena parte da instalação e os seus resultados incluem geometria dos espelhos concentradores e posição tubo absorber.

QFLY THERMO já não se trata de um sistema fotogramétrico, mas sim de uma câmara térmica, que devolve informação quanto ao estado do isolamento dos tubos absorsores e dos topos de cada linha de coletores.

Para além de estes três sistemas, estão ainda a ser desenvolvidos métodos para integrar no *QFLY*, de modo a que seja possível detetar fugas de fluido de transferência de calor, fazer medições de *soiling* e alargar todas as suas funcionalidades para os helióstatos (concentrador solar para centrais solares térmicas de torre). A fotogrametria tem diversas aplicações, quando relacionada com energia solar térmica e o *QFLY* é provavelmente o sistema de medição fotogramétrico mais avançado do mundo.

1.2.6. Software de fotogrametria

Em baixo, apresenta-se uma tabela com alguns programas de fotogrametria que considere importantes.

Tabela 1 - Lista de programas de fotogrametria

PhotoModeler UAS
Xlab
Vi3Dim
SmartMobileVision
REDcatch
Qualup SAS
Pix4D SA
Photometrix
Orbit

Os programas apresentados têm funcionalidades semelhantes ao *PhotoModeler UAS*, que foi o programa utilizado no decurso desta dissertação. Mais à frente, explica-se todo o funcionamento do mesmo.

Parte II - Metodologia

Capítulo 2

Questões recorrentes na Fotogrametria e metodologia

Apresentam-se de seguida algumas questões importantes sobre a fotogrametria, designadamente sobre a sua precisão, aspetos técnicos, utilização e adoção em projetos de investigação, como este.

A seguir, descreve-se a metodologia utilizada na investigação desenvolvida para a consecução desta dissertação.

2.1. Questões recorrentes na fotogrametria

2.1.1. Quão precisa é a fotogrametria?

Por definição, a exatidão é a proximidade de um valor medido ou calculado ao valor verdadeiro/real. A precisão de qualquer instrumento ou técnica de medição é avaliada, comparando os seus resultados com os obtidos num padrão conhecido.

A fotogrametria profissional é altamente precisa, é uma técnica capaz de igualar ou até exceder a precisão de instrumentos com funções semelhantes, tais como *Scanners a laser* e *Total stations*.

A fotogrametria pode gerar:

- **Nuvens de pontos** com uma precisão semelhante ao scanner laser, aproximadamente 0.1 a 1 pixel.
- **Pontos discretos** e outras características de um objeto como linhas, arestas, curvas, entre outros, com mais rigor que a *total station* e o GPS, sobretudo quando o tamanho do mesmo diminui.

Pode-se usar a fotogrametria como um método rápido para obter resultados fiáveis para um objetivo específico ou utilizá-la em conjunto com outras tecnologias para atingir níveis de precisão ainda mais elevados.

Como a qualidade e a resolução das câmaras fotográficas estão sempre a aumentar, a fotogrametria irá continuar a proporcionar um método para obtenção de medições com níveis de precisão ainda mais elevados no futuro.

2.1.2. Qual o nível de dificuldade de aprendizagem de utilização da fotogrametria e de obtenção dos primeiros resultados?

Efetivamente, a fotogrametria é uma técnica relativamente fácil de aprender. É possível de começar a criar os seus próprios dados fotogramétricos praticamente desde o primeiro dia, embora, como com qualquer *software* mais sofisticado, haja sempre mais para aprender, designadamente em projetos mais complexos e com um nível de rigor mais elevado, como este. Como tinha experiência anterior de utilização de CAD – *Computer Assisted Design* ou *software* 3D, senti-me mais familiarizado com a sua utilização devido a algumas semelhanças.

Existe uma grande variedade de recursos disponíveis que me ajudaram a aprender a utilizar esta técnica, não só ao nível dos vendedores de *software* para a fotogrametria, como nas comunidades *on-line* de utilizadores da mesma. Há também soluções profissionais, devidamente documentadas, bem como com outros recursos de aprendizagem, tais como vídeos no *Youtube*.

2.1.3. Quais são as melhores câmaras fotográficas para a fotogrametria?

De acordo com a pesquisa que efetuada, é possível conseguir uma qualidade aceitável de fotogrametria com um *smartphone* ou com uma simples câmara fotográfica digital, existindo até alguns programas e aplicações específicos para estes equipamentos. Apesar de não ser o único fator que determina a qualidade do projeto, o material fotográfico tem efeito nos resultados; obter uma câmara com uma alta resolução e uma lente bem-adaptada à fotogrametria é uma via importante para melhorar a qualidade de um projeto. De facto, um dos grandes benefícios da utilização da fotogrametria, relativamente a outras técnicas de medição remota, é que facilmente se pode melhorar a resolução através de uma simples mudança de câmara ou de lente.

Se se pretendem ótimos resultados de fotogrametria e uma precisão mais elevada, é fundamental a aquisição de uma câmara digital *SLR- Single Lens Reflex* e uma lente com uma distância focal fixa. Os pré-requisitos para a câmara fotográfica são a lente com distância focal fixa e a possibilidade de desligar o zoom, foco e ajuste de luz automáticos.

2.1.4. Como tirar as fotografias?

A maior parte dos projetos de fotogrametria requer duas ou mais fotografias do objeto em diferentes ângulos. Um projeto pode ser constituído por poucas fotografias ou por centenas. O número exato de imagens requerido depende, frequentemente, da forma e tamanho do objeto. Pode-se melhorar a precisão e a qualidade de um projeto, tirando mais fotografias do que o número mínimo previsto. Também é possível utilizar mais que uma câmara em simultâneo no mesmo projeto.

De acordo com o que aprendi, existem duas formas distintas de capturar imagens para projetos fotogramétricos:

Fotografias para DSM (Dense Surface Modeling)

Numa configuração paralela, os percursos da câmara para o objeto estão alinhados uns com os outros, ou seja, as posições da câmara fotográfica variam entre si numa só dimensão, de modo a que seja feito um género de varrimento do objeto com a máquina fotográfica sempre à mesma distância do objeto e com o mesmo ângulo. Muitas vezes, esta configuração chama-se "*stereo pairs*". Este tipo de configuração adequa-se melhor a projetos de *Dense Surface Modeling (DSM)*, onde o objetivo principal é criar uma *mesh*.

Fotografias para a maioria dos objetos

Para a maioria dos objetos utiliza-se a sobreposição, incluindo nos projetos de fotogrametria que apresento mais à frente. Neste método, faz-se uma cobertura fotográfica do objeto em questão percorrendo os 360° com intervalos regulares entre cada fotografia (cerca de 30°). Por vezes, como acontece na modelação do *cpc* nesta dissertação, o projeto em questão não requer uma modelação do objeto na sua totalidade, ou seja, pode ser preciso apenas a parte da frente como foi o meu caso. Este

tipo de configuração adequa-se melhor a projetos que utilizam alvos que foram colocados/marcados manualmente para criar modelos CAD com características discretas como coordenadas de pontos, linhas, arestas, curvas e outros.

2.1.5. Quanto tempo demora a completar um projeto e como automatizá-lo?

Após realizar inúmeras experiências fotogramétricas, posso afirmar que todos os projetos que utilizam medições e modelações fotogramétricas são constituídos por duas partes: recolha de dados e processamento dos mesmos através de *software* especializado. Com a fotogrametria, a parte da recolha de dados de um projeto, sobretudo no campo, é extremamente rápida, quando comparada com outros métodos. A recolha de dados implica tirar fotografias e, normalmente, consoante o projeto, também se recolhe uma medida de distância de parte do objeto como escala. A maior parte do trabalho é feita *a posteriori* no computador.

O tempo de processamento varia. Alguns projetos completam-se em minutos, outros levam horas, especialmente quando o número de fotografias é muito grande. O processamento das tarefas mais demoradas é geralmente automatizado o que permite ao utilizador continuar com outra tarefa.

O nível de automatização depende do tipo de projeto que se está a desenvolver. Projetos do tipo *DSM* podem ser altamente automatizados. Projetos em que são utilizados alvos (*RAD – ring auto detected*) também podem ser bastante automatizados. Projetos cujo objetivo é obter modelos CAD de um objeto ou cena envolvem um maior nível de envolvimento da parte do utilizador, como foi o caso do meu projeto final. É necessário identificar e ligar aspetos físicos de interesse entre as múltiplas fotografias vistas a partir de diferentes posições da câmara.

Independentemente do tipo de projeto, a facilidade da recolha de dados e os meios de processamento automático revelam que a fotogrametria proporciona muitas oportunidades para poupar tempo, comparativamente a outros métodos. Além disso, permite fazer grande parte do trabalho num ambiente e horário confortáveis. Em muitos tipos de projetos, as fotografias são recolhidas e utilizadas como parte da

documentação. A utilização destas fotografias como base do processo de medida resulta em maior eficiência, permitindo combinar duas tarefas numa. Nesta dissertação, grande parte das imagens utilizadas foram capturadas por mim.

2.1.6. É possível exportar ficheiros de fotogrametria para outras aplicações?

É possível exportar ficheiros de fotogrametria para diversas outras aplicações. No decorrer da minha dissertação, nomeadamente no projeto final, exporto o ficheiro resultante do *PhotoModeler UAS*, *software* de fotogrametria utilizado, para três outros programas. É muito frequente usar a fotogrametria como parte de um trabalho mais abrangente que também envolva outros *softwares* seja para análises posteriores, melhoria de resultados, seja para apresentações. Os utilizadores de fotogrametria exportam frequentemente ficheiros para serem utilizados em pacotes *CAD*, em sistemas *GSI*, *software* de visualização, filmes de animação e desenvolvimento de jogos.

2.1.7. Que tipo de objetos são melhores para utilização da fotogrametria?

Existem técnicas e métodos para usar a fotogrametria para modelar quase todo o tipo de objetos. Não há restrições de tamanho ou de tipo de objeto, desde que seja possível fotografar também se pode utilizar a fotogrametria. Este trabalho é exemplo deste tópico, a utilização de uma superfície refletora como objeto de um estudo fotogramétrico. Apesar de constituir alguns desafios, dada a sua natureza, foi possível modelar o *cpc* em questão com sucesso.

De modo a produzir *meshes* do tipo *DSM – Dense Surface Modeling*, os melhores objetos são aqueles com superfícies irregulares e aleatórias tais como tecido, paredes de tijolos ou formações rochosas.

Modelos *CAD* adquirem-se mais facilmente a partir de objetos que tenham em abundância cantos afiados, arestas e características bem definidas, como um edifício.

Objetos que tenham superfícies suaves/polidas, uniformes ou com curvaturas muito acentuadas podem mesmo ser medidos e modelados através do uso de alvos próprios para a utilização da fotogrametria.

2.1.8. Pode-se utilizar medições (medidas) existentes/conhecidas para melhorar um projeto individual de fotogrametria?

Ao iniciar um projeto, é possível e até aconselhável que se tenha alguma informação sobre o objeto a medir ou modelar. É necessário ter sempre noção dos valores das medições que estão a ser devolvidos pelo *software* de fotogrametria, e também se deve sempre introduzir uma ou mais medidas conhecidas do objeto ou mesmo do que o rodeia, de modo a ajudar o programa a calcular todas as outras distâncias mais rapidamente e com maior precisão. Estas informações relativas ao objeto denominam-se dados de controlo e são utilizados para a referenciação do modelo, neste caso, para a definição da escala.

Se o objetivo fundamental de um trabalho de fotogrametria é fornecer um modelo ou medições de unidades do mundo real, o programa irá necessitar de uma escala de referência. Esta escala pode ser adquirida, usando ferramentas simples, como uma fita métrica ou para projetos de maior precisão, podem ser empregues métodos mais sofisticados de medição.

2.1.9. Como começar?

Existe muita informação sobre fotogrametria, como e em que situações se pode usar, bem como vantagens e desvantagens relativamente a outras técnicas. Uma das melhores opções para começar a usar esta técnica é com o apoio de tutoriais em formato vídeo, o *Youtube* tem muitos exemplos. No caso do programa de fotogrametria utilizado, é possível entrar em contacto com o apoio técnico do fornecedor do *software*, o que me foi bastante útil para ultrapassar certas questões.

2.2. Descrição sumária de métodos e procedimentos adotados

O trabalho realizado segue uma estrutura bem definida na qual se introduz e fundamenta o tema, descreve-se a metodologia adotada, apresentam-se os resultados e, por fim, tecem-se conclusões e observações sobre os mesmos.

Neste ponto, apresento a metodologia que utilizei para levar a cabo este projeto. Já numa fase experimental, cujo objetivo foi provar experimentalmente que é possível utilizar a fotogrametria como ferramenta de avaliação geométrica de coletores do tipo *cpc*, utilizo e apresento três programas diferentes: *PhotoModeler UAS*; *CloudCompare* e *Tonatiuh*. O primeiro é o *software* de fotogrametria que utilizei, que possibilita medições, levantamento de modelos 3D digitais automáticos ou com recurso a alvos especiais. *UAS* indica a possibilidade de fazer fotogrametria aérea com este pacote de *software*, utilizando *drones*, por exemplo. Este programa foi o mais utilizado ao longo da dissertação, tendo sido feitos diversos modelos tridimensionais, utilizando vários objetos para o efeito. Foi necessária alguma aprendizagem para utilizar o programa e, por vezes, algumas sugestões por parte do apoio técnico do mesmo. Deste programa, resulta um modelo 3D do *cpc* utilizado (*mesh*) e também uma nuvem de pontos.

O segundo programa a ser utilizado foi o *CloudCompare*, que, tal como o nome indica, permite comparar modelos tridimensionais. Apresento duas comparações: uma delas entre uma *mesh* do modelo ideal do *cpc* e a nuvem de pontos proveniente da fotogrametria (modelo real), a outra entre a *mesh* real e a *mesh* ideal. Deste modo, foi possível averiguar se existem desvios entre o modelo ideal e o real.

Por fim, de modo a completar esta dissertação, apresento um estudo do traçado dos raios solares efetuado no programa *Tonatiuh*. Este estudo permite visualizar o comportamento dos raios solares ao embaterem nas duas superfícies e também fornece resultados numéricos, nomeadamente a eficiência ótica para a incidência normal. Com este parâmetro, posso avaliar o *cpc* e comparar o ideal com o real, fazendo depois as conclusões quanto aos resultados, possíveis erros e de onde provêm.

Parte III - Resultados e Discussão

Capítulo 3

Esquema de Trabalho e Fotogrametria

Ao longo deste capítulo, é apresentada toda a componente experimental associada a esta dissertação. Todas as etapas presentes num projeto de fotogrametria são explicadas, bem como alguns desafios que são mais frequentes. Está incluído neste capítulo o projeto final, ao qual o título da dissertação se refere: determinação da qualidade geométrica de superfícies refletoras com recurso à fotogrametria. Muitas outras experiências fotogramétricas fazem parte deste capítulo, de modo a perceber melhor as características e funcionamento desta técnica. O *software* de fotogrametria utilizado foi o *Photomodeler UAS*. O modelo *CAD* resultante do projeto final foi comparado com o modelo teórico no programa *CloudCompare*. A análise do traçado dos raios solares foi feita com o programa *Tonatiuh*.

Um projeto de fotogrametria divide-se em três fases: calibração; captura e processamento. Como foi visto em capítulos anteriores, esta técnica requer fotografias como *input* – captura. Posteriormente e utilizando um *software* de fotogrametria, há que trabalhar essas fotografias até atingir o resultado desejado – processamento.

3.1. Calibração

Qualquer projeto de fotogrametria deve ser iniciado da mesma forma: com a calibração da câmara fotográfica. Apesar de diversos *softwares* de fotogrametria permitirem uma calibração automática, feita diretamente a partir das fotografias que irão ser utilizadas no projeto em si, é aconselhável efetuar uma calibração manual. Geralmente, este é um procedimento que está bem explicado na base de dados do *software* utilizado e tem o objetivo de determinar as características da máquina fotográfica tais como, *focal length*, *lens distortion*, *image size*, *principal points* e *format size*. O pacote de *software* utilizado: *Photomodeler UAS* sugere uma calibração, o método *multi-sheet*, na qual são utilizadas 9 páginas com padrões bem definidos e

distribuídas no chão, de forma a criar uma matriz 3x3. Duas destas páginas devem ser colocadas ligeiramente mais elevadas que o resto. A câmara fotográfica deve estar fixa num suporte ou tripé que será movido ao longo dos quatro lados da matriz e captura-se uma imagem por lado. Depois de tirar as quatro fotografias, altera-se a posição da mesma, de modo a ter três *sets* de 4 fotografias cada e com as três orientações da câmara possíveis: vertical para a esquerda; vertical para a direita; horizontal. A fotografia em baixo representa a matriz de calibração utilizada e inclui o tripé com a câmara.



Figura 1 - Calibração da máquina fotográfica utilizada pelo método *multi sheet* com utilização de tripé. Disposição proposta pelo *PhotoModeler UAS*.

3.2. Captura

Para ter um bom projeto fotogramétrico, deve ser feita uma cobertura fotográfica o mais extensa possível; quanto mais fotografias, melhores são as hipóteses de se obter um bom resultado final. Existem dois grandes métodos de captura de imagens para a fotogrametria terrestre ou *close-range photogrammetry*: sobreposição e varrimento. A maneira como se tiram as fotografias varia de acordo com o tipo de objeto e o tipo de projeto.

A sobreposição é uma técnica de captura de imagens que permite tirar fotografias à volta de todo o objeto com a particularidade de que duas fotografias seguidas têm de conter elementos homólogos, ou seja, que estejam presentes nas duas. As fotografias estão desfasadas com cerca de 30° . A figura seguinte ilustra este método.

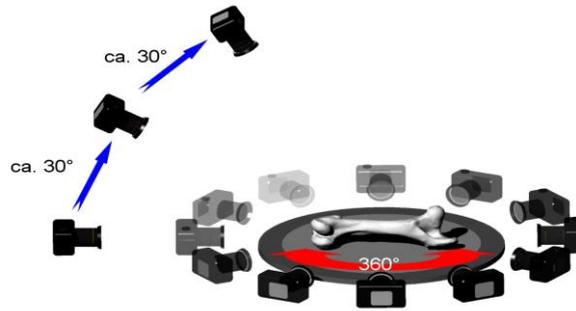


Figura 2 - Método da sobreposição ou *overlapping*. Fonte: <https://www.photomodeler.com>

Este método, também denominado *overlapping*, é o mais utilizado em projetos de fotogrametria, apenas não sendo o mais indicado quando queremos nuvens de pontos automáticas ou *mesh*. As nuvens de pontos tal como o nome sugere são diversos pontos captados em fotografia e posteriormente dispersos tridimensionalmente. Uma *mesh* é o que resulta de uma nuvem de pontos depois de texturizada, todos os pontos são unidos por uma superfície.

O método de captura por varrimento efetua um levantamento fotográfico do objeto a uma dimensão, deslocando a câmara para os lados; é um método ideal para o levantamento fotogramétrico de fachadas com características físicas distintas.

A imagem seguinte é um exemplo de uma *mesh*, neste caso, de uma fachada de um edifício.



Figura 3 - *Mesh* de fachada de edifício, resultante do método de varrimento. Fonte: <https://www.photomodeler.com>

3.3. Processamento

Quando se inicia um projeto no programa *Photomodeler UAS*, há que escolher o tipo de projeto a desenvolver de entre as seguintes opções:

Tabela 2 - Lista de tipos de projeto que se podem desenvolver no PhotoModeler UAS

<i>Automated point clouds and meshes (smart points)</i>
<i>Automated targets</i>
<i>Camera calibration</i>
<i>Manual modeling</i>
<i>Modeling over time</i>
<i>Shapes based</i>

A imagem em baixo é exemplo de como todos os projetos de fotogrametria feitos no *Photomodeler* são iniciados; é neste ponto que se dá a conhecer ao programa o tipo de projeto que se vai começar.

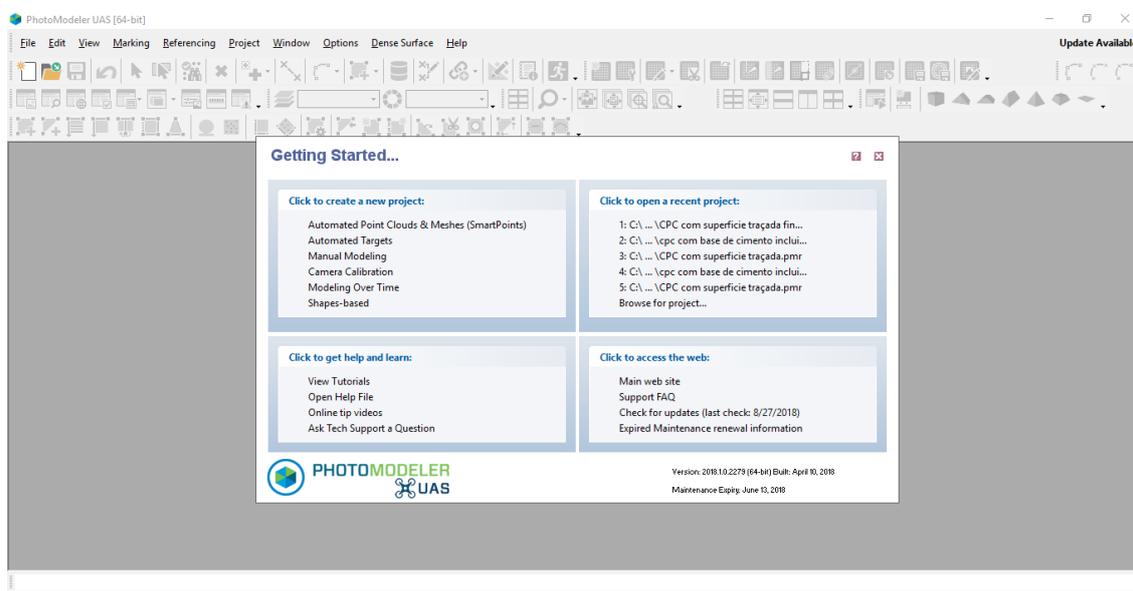


Figura 4 - Menu inicial do *PhotoModeler UAS*.

Independentemente do tipo de projeto a desenvolver, há passos a tomar que são os mesmos. A orientação das fotografias é feita automaticamente pelo programa de fotogrametria. Escalar um projeto é algo que tem sempre de ser feito e passa por introduzir uma ou mais dimensões já conhecidas do objeto a modelar no programa; a

partir desses valores, o mesmo irá calcular todas as outras dimensões desse objeto. Definir a rotação e translação do modelo também é essencial. Este procedimento é crucial para se obterem bons resultados em fotogrametria. *Manual modeling* é a opção mais simples e utiliza-se para projetos mais pequenos e rápidos cujo objetivo geralmente é fazer medições, sem necessitar de um modelo 3D. São projetos que normalmente necessitam de menos fotografias. Um exemplo é fazer o levantamento das medidas de um objeto pequeno, como um carro de brincar, possibilitando a verificação do tamanho do modelo e das suas características, tendo em conta o fator escala. Veja-se a este propósito a figura que se apresenta a seguir.

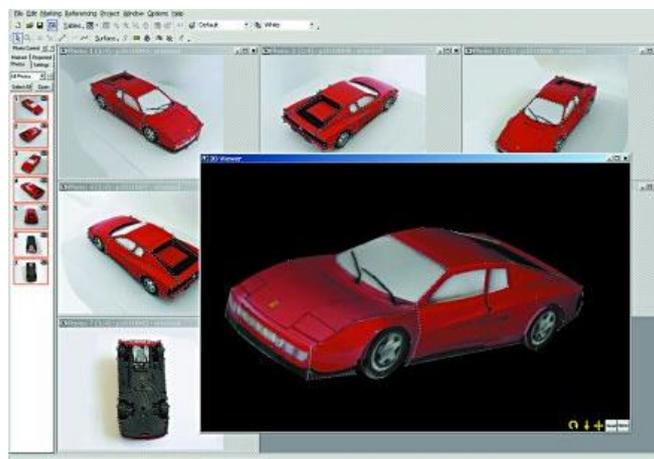


Figura 5 - *Manual modeling* - carro de brincar. Fonte: <https://www.photomodeler.com>.

Outra opção é o *Automated point clouds and meshes (Smartpoints)*, cuja principal função é a produção de modelos tridimensionais de objetos do mundo real, recorrendo apenas à câmara fotográfica e ao computador equipado com o devido *software* de fotogrametria. Com esta funcionalidade, é possível extrair modelos já texturizados, ou seja, para além de se obter o modelo 3D, este fica automaticamente com a cor/padrão das fotografias originais. Note-se que esta opção não permite qualquer tipo de objeto, superfícies refletoras como são os espelhos concentradores e, por isso, não podem ser utilizadas. A figura na página 26 deste capítulo é exemplo de uma *mesh* automática.

Modeling over time já se refere a projetos com o objetivo de visualizar o movimento de determinado objeto e analisar possíveis desvios ou alterações com o

decorrer do tempo, devido ao efeito do vento ou outro fator. A imagem a seguir representa a modelação ao longo do tempo; por baixo da mesma, encontra-se um link para um pequeno vídeo que demonstra melhor esta técnica, o vídeo está no *site* <https://www.photomodeler.com>.

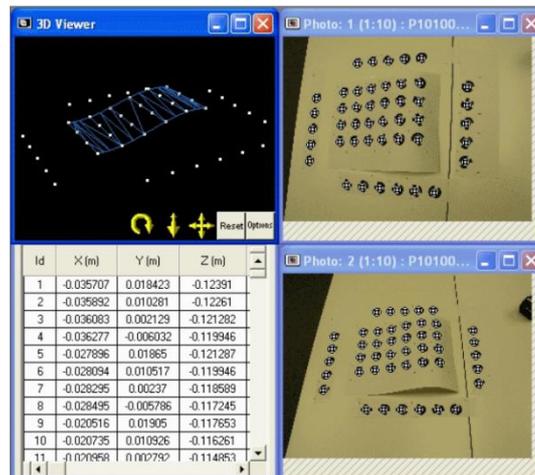


Figura 6 - Modelação ao longo do tempo. Fonte: <https://www.photomodeler.com>.



modeling over time.html

<https://www.photomodeler.com/applications/engineering/default.html>

Automated targets é uma opção que utiliza alvos especiais com padrões posteriormente reconhecidos pelo programa. A utilização destes alvos salvaguarda um bom resultado mesmo que se trate de uma superfície espelhada ou outro objeto que não seja bem identificado pelo programa. Estes alvos marcam pontos de interesse específicos ou não e podem ser distribuídos aleatoriamente pelo objeto. Neste tipo de projeto, são os alvos que irão formar a nuvem de pontos, que, noutros modos de trabalho, é criada automaticamente, como já foi referido.

A imagem em baixo é representativa de um alvo ou *RAD target* proveniente do *PhotoModeler*.



Figura 7 - RAD - Ring Automated Detected - alvo do PhotoModeler UAS. Fonte: <https://www.photomodeler.com>.

Este método foi o selecionado para modelar o concentrador solar térmico escolhido: *cpc*. Como se trata de uma superfície refletora, é quase impossível para o programa distinguir a superfície dos reflexos que nela surgem. De qualquer forma, aconselha-se ao utilizador que esteja a fazer um projeto deste tipo que faça uma filtragem/tratamento das fotografias, conferindo se os alvos estão a aparecer nas posições esperadas e eliminando possíveis erros. Por vezes, quando se trata de superfícies refletoras curvas, como é o caso de um *cpc*, podem aparecer alvos a mais, resultado de reflexões e se o programa os tomar como alvos reais, têm de ser eliminados. Vejamos o exemplo abaixo:

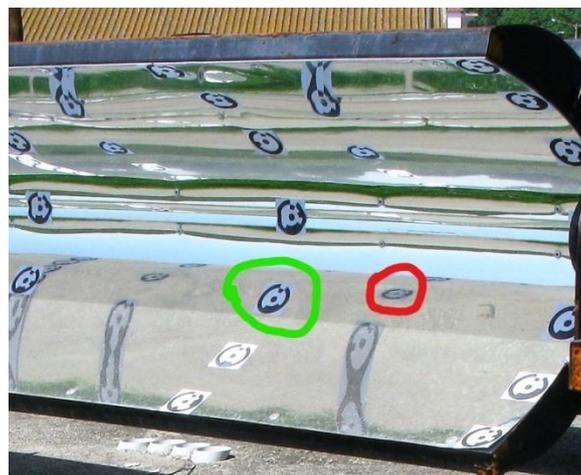


Figura 8 - Eliminação de alvos refletidos; A vermelho está um alvo para eliminar (reflexão); A verde está um alvo real.

3.4. Calibração da máquina fotográfica utilizada

Neste ponto do trabalho, explica-se como se procedeu para calibrar a câmara fotográfica. Apesar de ser virtualmente possível fazer fotogrametria com qualquer máquina digital, a realidade é que certos dispositivos não são indicados para o efeito. Durante o início da dissertação, foi-me emprestada uma câmara do tipo *action cam* da marca König – CSACWG100 pela Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora. Após diversas experiências fotogramétricas, verificou-se que não era possível realizar fotogrametria e obter resultados aceitáveis com esta máquina devido à distorção elevada causada pelo tipo de lente. Consegui outra câmara, emprestada por Dr. José Abranches, da marca Canon – Powershot G9, que se apresenta na figura seguinte:



Figura 9 - Máquina fotográfica utilizada - Canon Powershot G9.



Figura 10 - Action Cam König CSACWG 100.

Para se fazer fotogrametria, a máquina fotográfica utilizada deve ter determinadas características, mais propriamente deve ter a capacidade de fixar algumas funcionalidades, cujas mais importantes são as seguintes:

- Foco automático (*Auto-focus*);
- Zoom estável (*Zoom stable*);
- ISO fixo e mínimo possível;

O *PhotoModeler* inclui uma função de calibração da câmara que determina as informações sobre a mesma melhorando a precisão em projetos posteriores. O programa calcula a distância focal da câmara, a distorção da lente, o tamanho do formato e o ponto principal. Os dados de calibração resultantes podem ser guardados e utilizados em todos os projetos do *PhotoModeler* que envolvam fotografias tiradas por essa câmara. A calibração não modifica a câmara. Um projeto de alta precisão requer uma máquina fotográfica bem calibrada.

O programa utilizado dispõe de três métodos de calibração: uma folha (*single-sheet method*); várias folhas (*multi-sheet method*); calibração automática (*automatic calibration*). O primeiro é o mais simples, trata-se de uma só folha com vários alvos impressos. Como os alvos estão numa só folha, ficam todos à mesma altura. Quanto à forma como se tiram as fotografias, não varia entre os dois métodos: seja com uma ou várias folhas, há que fazer três conjuntos de quatro fotografias cada e cada um destes *sets* é feito com uma orientação da câmara diferente. As orientações possíveis são as seguintes: horizontal, vertical para a esquerda e vertical para a direita.

Quando se quer um projeto com precisão mais elevada, é aconselhável utilizar o método de múltiplas folhas para calibrar a máquina fotográfica. Como já foi explicado anteriormente, consiste numa matriz 3x3 de 9 folhas impressas com alvos do programa com a grande diferença relativamente ao primeiro método não só no número de folhas, mas também no facto de ter duas dessas folhas a uma altura diferente das outras, calibração 3D. Deste modo, obtêm-se resultados melhores. Ainda se pode melhorar a calibração se as fotografias forem tiradas à mesma distância que a câmara está do objeto sobre o qual se irá realizar a fotogrametria.

Existe também um método de calibração automática, sem efetuar nenhum dos métodos já descritos; o utilizador necessita apenas de tirar as fotografias ao objeto e, antes do processamento ser feito, indica-se ao *PhotoModeler* que se quer fazer uma calibração automática. A seguinte imagem é a matriz de calibração utilizada com os alvos espalhados em alturas diferentes de modo a melhorar os cálculos de profundidade.

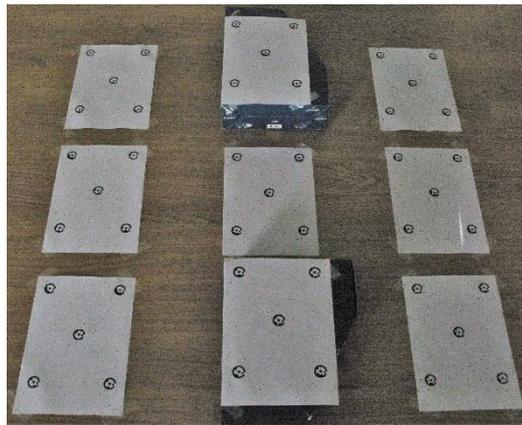


Figura 11 – Matriz de calibração utilizada com duas das folhas de alvos mais elevadas.

Qualquer que seja o projeto de fotogrametria, seja uma calibração ou não, é necessário fixar algumas funcionalidades da máquina fotográfica. Após diversas experiências consegui a melhor configuração possível para a câmara Canon – Powershot G9, como se constata nas figuras seguintes:



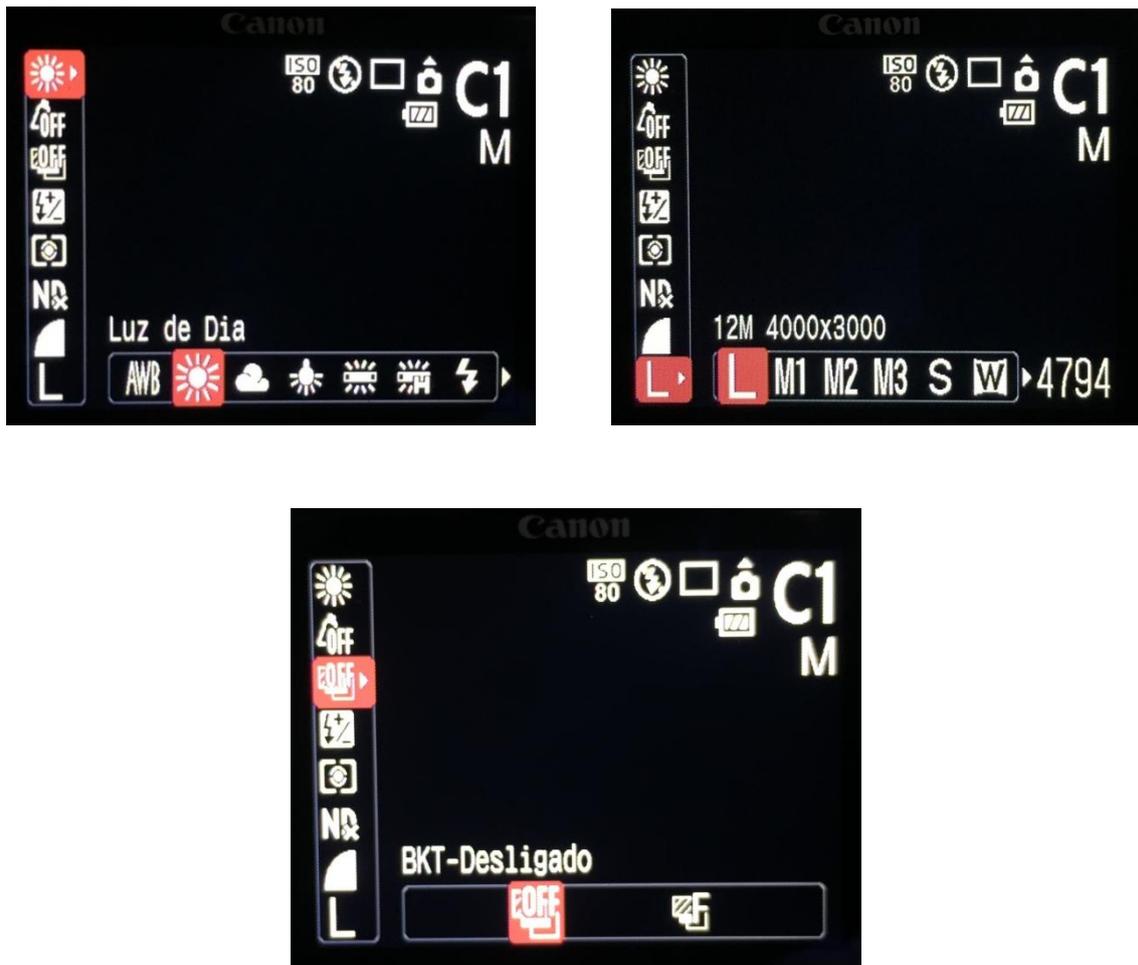


Figura 12 - Representação da fixação das definições da máquina fotográfica utilizada.

As cinco imagens em cima ilustram as definições da câmara que foram utilizadas nas experiências fotogramétricas e no projeto final.

Em suma, fixar as definições da máquina da maneira que apresentei resulta em imagens com pouco ruído digital, o que melhora bastante os resultados. Neste parágrafo, forneço uma breve explicação do que cada uma destas funcionalidades permite fazer ou, neste caso, não permite fazer.

- Resolução: Uma fotografia é um conjunto de pontos (*pixels*) que variam em quantidade e cor. O número de *pixels* determina os detalhes que podem ser vistos na fotografia. A relação da quantidade de pontos que formam uma imagem com o tamanho em que é exibida chama-se resolução. Para o meu trabalho, coloquei a resolução no 12MP (Mega pixel).

- Filtro ND (filtro de densidade neutra): Determina a quantidade de luz que chega ao sensor. Esta funcionalidade é desligada para que não haja diferenças entre fotografias, já que é automática e varia com a luminosidade do local.
- BKT: *Focus bracketing* é um modo em que a câmara tira mais que uma fotografia: uma com o foco na posição atual e duas com mais e menos zoom, respetivamente. Esta opção tem que estar desligada, pois todas as fotografias têm de ser tiradas com o mesmo zoom e, para cada posição da câmara, apenas é necessária uma fotografia.
- Luminosidade: Com esta opção, é possível escolher o tipo de luz a que a lente vai estar exposta. A máquina fotográfica utilizada permite escolher entre luz solar, nublado, tungsténio, fluorescente e claro o modo automático que reconhece o tipo de luz e ajusta as definições sem intervenção do utilizador. Foi escolhida a opção luz do dia.
- Cor: Com esta opção, é possível escolher o esquema de cores a utilizar, tal como com as outras funções já apresentadas, há que fixá-la ou mesmo desativá-la. Neste caso, desativa-se, pois queremos as cores reais; poder-se-ia, no entanto, alterar para preto e branco, sépia, entre outros.
- ISO: É a sensibilidade do sensor da câmara: quanto mais elevado o seu valor, mais sensível à luz fica e a fotografia fica mais clara, o que é muito bom em fotografia normal ou até artística, possibilitando a captação de imagens em ambientes por vezes muito escuros; tem, no entanto, a consequência de produzir ruído digital o que, visualmente, são pequenos pontos em certas áreas da fotografia. Para a fotogrametria, requerem-se imagens com o mínimo ruído digital possível; logo, é aconselhável definir o ISO o mais baixo possível. Para o meu trabalho, utilizei um ISO de 80 como se pode verificar pelas imagens em cima.
- Flash: É desligado pois já foi definido que a luz a utilizar é a do dia.

Na primeira página dos anexos, apresento o resultado/relatório da minha calibração, fornecido pelo *PhotoModeler UAS*.

Após diversas experiências de calibração, a que obtive melhores valores foi a que devolveu o relatório apresentado. Quando se faz uma calibração e, posteriormente, um

projeto de fotogrametria, pode escolher-se o nível de precisão; no meu caso, foi escolhida a precisão máxima. Os valores de referência fornecidos pelo programa de fotogrametria utilizado, para projetos com a precisão máxima são os seguintes:

- Maior erro residual ≤ 1.00 pixel
- Área da fotografia com alvos $\geq 80\%$

Como se pode verificar pelo relatório da calibração, os valores relevantes para se ter uma noção da qualidade da mesma e das características da máquina fotográfica encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Valores relevantes da calibração que fiz da máquina fotográfica utilizada em todo o trabalho

Maior erro residual	1.14 pixel
Área da fotografia com alvos	72%
Distância focal	7.487795mm
Coordenadas do ponto principal	(x,y)=(3.591318,2.741222)
Tamanho do formato	7.416047 x 5.562600
Coeficientes de distorção radial – k_1, k_2, k_3	k_1, k_2, k_3 $k_1 = 4e^{-003}$ $k_2 = -8.294e^{-005}$ $k_3 = 0$
Distorção descentrada – P_1, P_2	P_1, P_2 $P_1 = 2.44e^{-005}$ $P_2 = 1.184e^{-004}$

O maior erro residual e a área da fotografia com alvos são respetivamente maior e menor que o ideal; assim, entrei em contacto com o apoio técnico do *PhotoModeler* de modo a esclarecer se havia alguma implicação em utilizar esta calibração. Visto que os valores 1.00 pixel e 80% são meramente referências para projetos de elevada precisão, pude utilizá-los. Como consequência e como os meus projetos foram feitos para a precisão máxima, por vezes, o programa indica que os resultados poderiam ser

melhores, sugerindo, inclusivamente, algumas alterações, como se pode verificar pelo relatório da calibração.

3.5. Experiências Fotogramétricas

Neste ponto, apresento algumas das experiências fotogramétricas que fiz ao longo da dissertação. Duas máquinas fotográficas foram utilizadas, a primeira da marca König não apresentou resultados aceitáveis. Por este motivo, todos os resultados apresentados provêm de fotografias da máquina Canon devidamente processadas com o programa *PhotoModeler*.

Todos os objetos alvo de fotogrametria utilizados foram fornecidos pela Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora.

Durante a minha aprendizagem e familiarização com a fotogrametria e todas as técnicas necessárias para atingir os objetivos, utilizei diversos objetos como troncos de árvores, caixas, estruturas metálicas, a fachada do edifício pré-fabricado da PECS, entre outros, para fazer fotogrametria.

Os objetos que foram alvo de experiências fotogramétricas que vão ser apresentados neste ponto são os seguintes:

- Bloco de cimento;
- Forno Solar;
- Concentradores solares térmicos do tipo *PTC*;
- Concentrador solar térmico do tipo *CPC*.

O bloco de cimento foi modelado com *DSM - dense surface model* no modo *Automated point clouds and meshes (smart points)*; o forno solar da mesma forma e também com *Automated targets*. Os dois últimos são superfícies espelhadas que, tal como já foi dito anteriormente, apresentam alguns problemas quando se utiliza a fotogrametria, pelo que precisam de alvos utilizando o modo *automated targets*.

Todas as quatro experiências apresentadas neste ponto têm as suas fotografias inseridas nos anexos da dissertação, nas páginas 78 e 79.

3.5.1. Bloco de cimento



Figura 14 - Bloco de cimento utilizado. Fonte: fotografia.

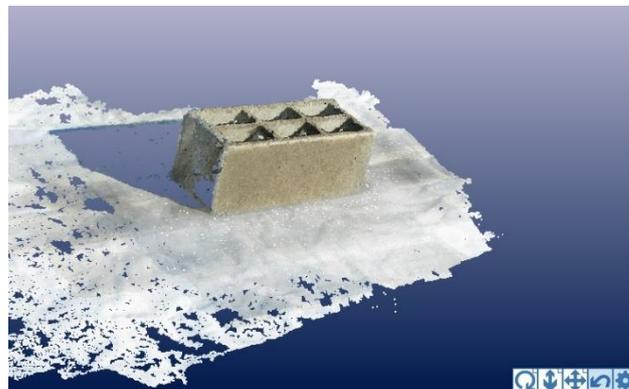


Figura 13 - Nuvem de pontos do bloco de cimento. Fonte: PhotoModeler UAS.

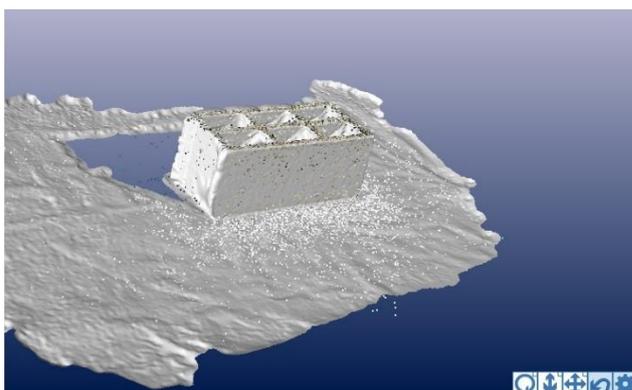


Figura 16 - Mesh do bloco de cimento. Fonte: PhotoModeler UAS.

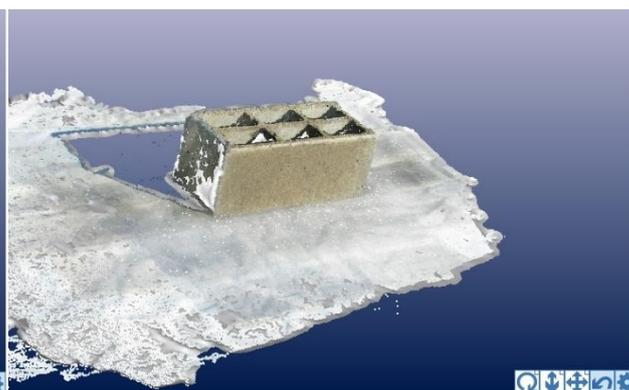


Figura 15 - Mesh mais nuvem de pontos, mesh texturizada. Fonte: PhotoModeler UAS.

Para criar um modelo 3D deste bloco de cimento, como ilustram as três figuras em cima, foi necessário tirar 27 fotografias que estão presentes nos anexos desta dissertação. O modo escolhido foi *Automated point clouds and meshes (smart points)* que possibilitou a criação de um *DSM – dense surface model*. A base/chão aparece em branco pelo facto de se ter colocado um tapete branco por baixo do bloco, visto que o mesmo se confundia com o chão, por terem cores e texturas semelhantes. A primeira imagem é uma fotografia do bloco, a segunda é a nuvem de pontos, a terceira é a *mesh* correspondente e a quarta é a junção das duas, ou seja, uma *mesh* texturizada. Por se

tratar de um objeto pequeno e por querer um modelo que integrasse todos os lados do mesmo, o método de tirar as fotografias foi o da sobreposição; como tal, e apesar de ter sido possível criar o modelo, não ficou ideal. Ao observar as imagens, é possível verificar que há partes do bloco que não estão totalmente definidas.

Com esta experiência, fiquei a entender melhor a grande influência que o modo de processamento das fotografias, a maneira como se tiram as fotografias e o tipo de objeto têm nos resultados.

3.5.2. Forno Solar

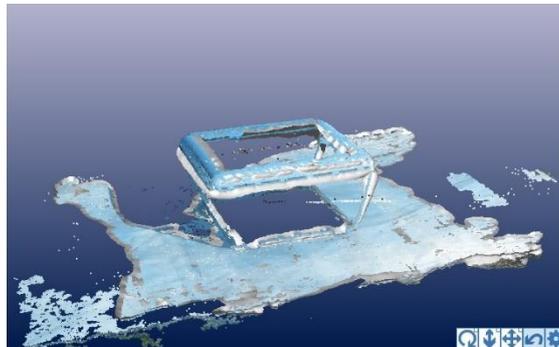


Figura 17 - Mesh texturizada/DSM - forno solar. Fonte: PhotoModeler UAS.

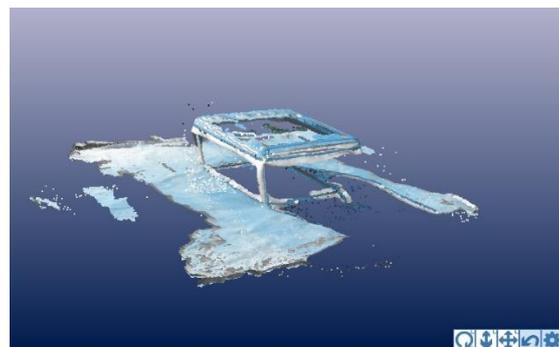


Figura 18 - Mesh texturizada/DSM - forno solar. Fonte: PhotoModeler UAS.

As duas imagens em cima ilustram o resultado de uma das experiências feitas com o forno solar. Neste caso, foi utilizado o modo *Automated point clouds and meshes (smart points)*. As fotografias utilizadas para este modelo estão nos anexos. Como se pode verificar pelo modelo obtido, o resultado está longe de ser o ideal, tanto o topo, como as laterais do forno não aparecem. O motivo prende-se, tal como com o bloco de

cimento, com a incompatibilidade do modo escolhido com o objeto e a maneira de tirar as fotografias.

Foi realizada outra experiência com o mesmo objeto, mas agora recorrendo ao uso de alvos. Estes alvos designam-se *RAD – ring automated detected*.

A imagem seguinte demonstra como foram distribuídos os alvos pela superfície do forno solar.



Figura 19 - Forno solar com 200 alvos.

Há que recordar que, uma vez que a calibração foi feita e o ficheiro com as informações da mesma foi guardado, só é necessário abri-lo no *PhotoModeler UAS* para se poder imprimir os alvos que serão colocados no forno. Para além do ficheiro de calibração, também tem de se informar o programa de quanto é a maior distância entre câmara e o objeto para que os alvos tenham o tamanho correto. Este segundo ensaio foi feito, escolhendo o modo *Automated targets*, tendo a nuvem de pontos resultante deste modo sido definida pelos alvos colocados, que, neste caso, foram 200. Ora veja-se a figura abaixo.

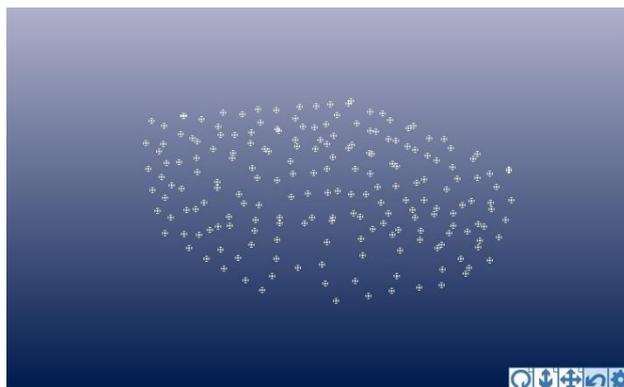


Figura 20 - Nuvem de pontos do forno solar. Fonte: *PhotoModeler UAS*.

Na segunda imagem que apresento, pode-se ver a nuvem de 200 pontos resultante. Ao introduzir uma ou mais distâncias conhecidas (medida no local por meios convencionais), todo o modelo fica com as medidas corretas.

De modo a proporcionar uma melhor visualização, recorrendo a outras funcionalidades do *PhotoModeler UAS*, foi possível traçar uma superfície a unir os pontos da nuvem como na figura em baixo. O resultado é um modelo tridimensional do forno solar como se pode verificar pela imagem seguinte.

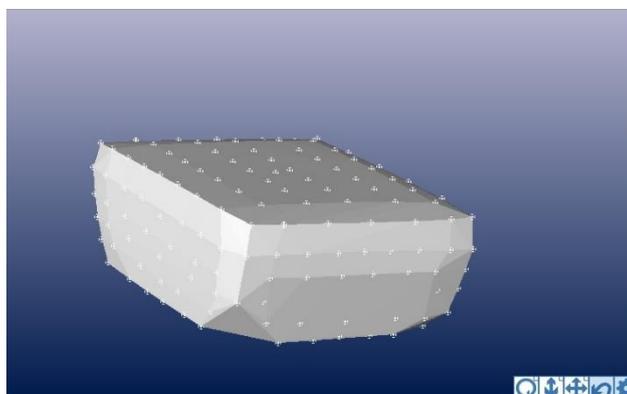


Figura 21 - Superfície traçada ao longo da nuvem de pontos. Fonte: *PhotoModeler UAS*.

Note-se que os cantos inferiores não ficaram bem definidos, consequência de alguns alvos não terem aparecido nas fotografias ou em fotografias suficientes. Há também diversas arestas que deveriam ser arredondadas; para ultrapassar este problema, é necessário recorrer a outras funcionalidades do programa com as quais não estava familiarizado nesta fase do trabalho. Mais à frente, no projeto final, o mesmo problema surge e é ultrapassado e devidamente explicado.

3.5.3. Concentrador solar térmico – PTC

Para realizar experiências em concentradores solares térmicos do tipo *parabolic through*, foi necessário, numa primeira fase, montar uma parte do que seria o sistema completo. Para isso, foram utilizados materiais de substituição do sistema de concentração solar térmica do tipo PTC presente na PECS. As imagens abaixo demonstram parcialmente a montagem da estrutura.



Figura 22 - Em cima à esq. estrutura metálica; Em baixo à esq. estrutura metálica montada; Em cima à dir. e em baixo à dir. estrutura metálica montada com espelhos concentradores.

Com a ajuda do investigador da Cátedra de Energias Renováveis João Marchã, montei a estrutura visível nas fotografias acima. Tanto a base, como os espelhos fazem parte de um sistema maior composto por 28 concentradores.

Para utilizar este novo PTC como objeto de fotogrametria, visto que se trata de uma superfície espelhada, foi escolhido o modo *Automated targets*. Utilizando a mesma calibração e inserindo uma distância máxima de 5m entre a câmara e o objeto,

imprimem-se os 66 alvos já dimensionados pelo *PhotoModeler*. Tanto o número de alvos colocados, como a sua disposição nos concentradores variaram entre experiências.

Neste ponto, coloco a que apresentou resultados mais promissores. Após recortados os alvos e colados nos espelhos, dá-se início à sessão de fotografia, tendo ambos os concentradores sido limpos.



Figura 23 - PTC sistema completo - espelhos concentradores, estrutura metálica, alvos colocados e metro (instrumento de medida).

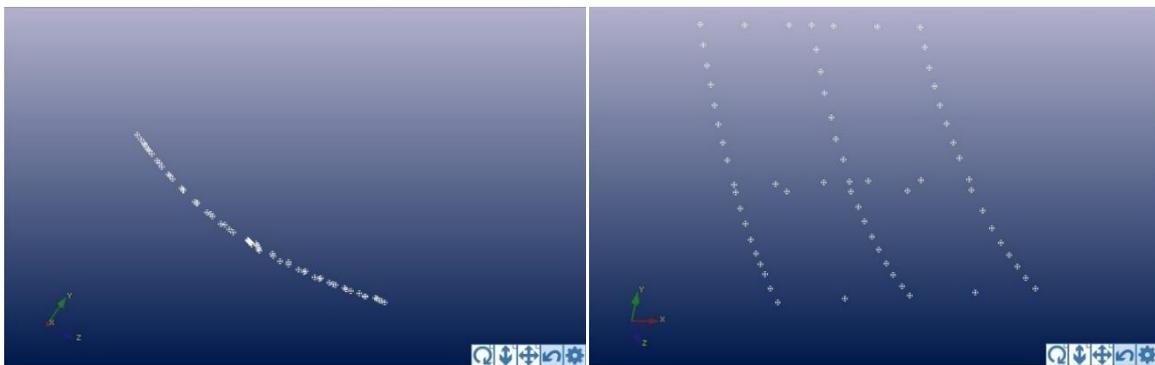


Figura 24 - À esq. vista de lado; À dir. perspectiva da nuvem de pontos/modelo 3D do ptc. Fonte: *PhotoModeler UAS*.

Para esta experiência, foram tiradas 39 fotografias pelo método da sobreposição, respeitando a distância máxima de 5m. Uma vez carregadas as fotografias no programa, é feita a orientação das mesmas de forma automática. De seguida, é possível visualizar o modelo 3D que é uma nuvem de 66 pontos. Nesta fase, dá-se uma escala ao projeto, inserindo uma ou mais distâncias conhecidas e, depois, define-se a rotação e a translação. Uma vez caracterizado, é possível utilizar o modelo em outros programas para diversos fins, entre eles uma possível comparação entre a montagem aqui

analisada com outra semelhante, mas teóricamente correta. Este tipo de instalação requer uma montagem minuciosa: cada espelho concentrador deve estar colocado na posição certa e com a curvatura correta. Consoante o aperto dado nos apoios do espelho, este muda ligeiramente de posição e forma; como tal, existe uma posição ideal que faz concentrar os raios solares no recetor. Utilizando a fotogrametria, é possível fazer essa verificação da montagem, caso exista um modelo *CAD* do sistema que está na posição ideal, ao comparar os dois modelos, verificam-se os desníveis, possibilitando o posterior acerto da posição dos espelhos.

3.5.4. Concentrador solar térmico – *CPC*

Neste ponto, apresenta-se uma das experiências fotogramétricas levadas a cabo no âmbito desta dissertação cujo objeto alvo é um concentrador solar térmico ou calha do tipo *CPC* – coletor parabólico composto. No entanto, e apesar de apresentar como projeto final uma avaliação geométrica de um concentrador deste tipo, decidi colocar uma das experiências realizadas com este objeto neste capítulo como parte do percurso experimental que possibilitou a obtenção dos resultados que, mais à frente, serão expostos.

No *CPC* utilizado, há apenas uma montagem possível em que se coloca uma folha metálica refletora no interior da curva da estrutura/calha; por esse motivo, a avaliação feita incide na construção e não na montagem do concentrador. A figura seguinte demonstra a disposição dos alvos ao longo do *cpc* utilizada nesta experiência.

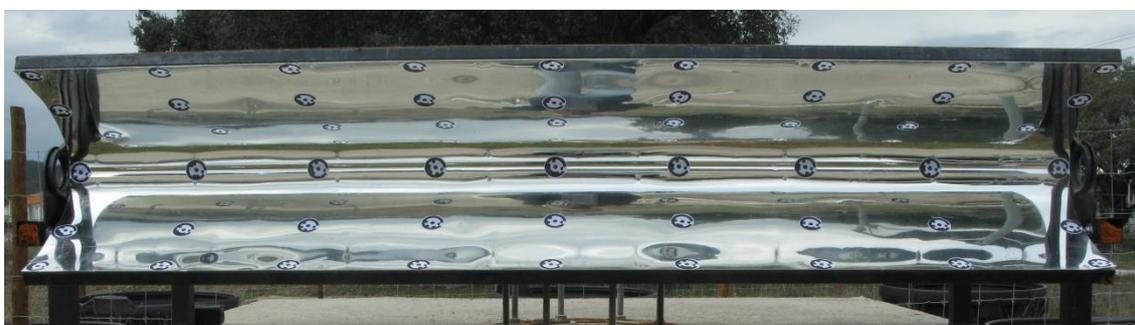


Figura 25 - *cpc* utilizado com alvos.

Na figura em baixo apresento uma fotografia do perfil do concentrador utilizado com as respectivas medidas.

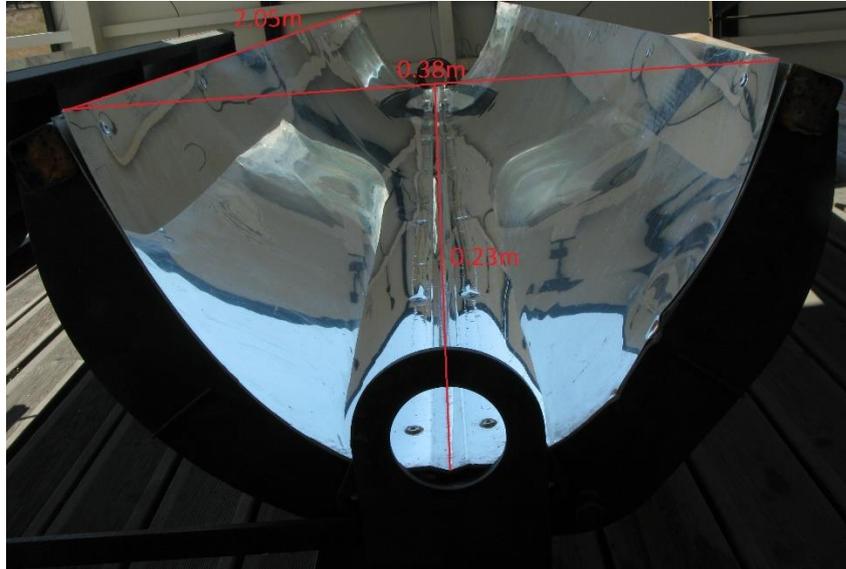


Figura 26 - Perfil do concentrador utilizado com dimensões.

O objetivo deste sistema é direcionar a radiação incidente no concentrador para o recetor, tubo que passa pelo foco. Como tal, qualquer deformação no concentrador seja uma depressão, um canto dobrado ou outra anomalia terá consequências na quantidade de radiação que chega ao fluido térmico que circula pelo sistema. Nesta fase experimental, apresento um dos modelos que obtive através da fotogrametria, na figura seguinte:

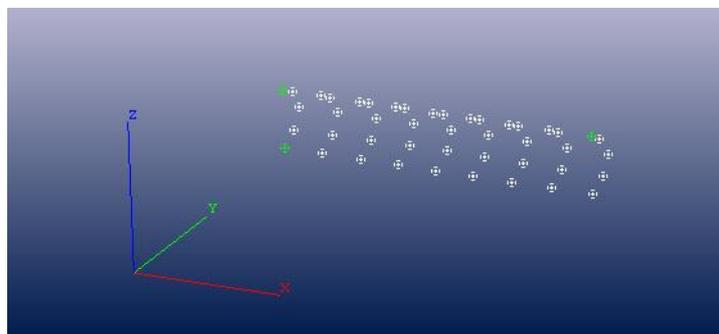


Figura 27 - Nuvem de pontos do *cpc* com eixos. Fonte: *PhotoModeler UAS*.

Para realizar a fotogrametria sobre este sistema, foram necessários 45 alvos e 29 fotografias, tiradas empregando o método da sobreposição e respeitando a distância máxima introduzida para produzir os alvos. Há que lembrar que, para se obter boas fotografias, deve-se cobrir o máximo possível da área do objeto e todos os alvos devem aparecer em várias fotografias. Para o *PhotoModeler* processar estas imagens, escolhe-se o modo *Automated targets*, idealmente todas as fotografias são boas e estão orientadas; se for o caso, avança-se para a visualização do modelo resultante, que se trata de uma nuvem de 45 pontos. Com o modelo construído, dá-se início à referenciação do mesmo, ou seja, define-se uma escala, rotação e translação.

À semelhança das outras experiências, introduziram-se medidas conhecidas do objeto que coincidiam com a distância entre dois alvos, tiradas no local com um metro (instrumento de medida) para definir a escala; com essa informação, o programa calcula todas as outras distâncias. A rotação é definida de maneira mais interativa, ou seja, o programa faz perguntas como: “onde quer definir o eixo do x?”, o utilizador seleciona dois pontos e é sobre esse segmento de reta que irá passar o eixo do x. O mesmo processo repete-se para o eixo do y, o último eixo é automático. A imagem em cima, onde se pode ver a nuvem de pontos e os eixos, permite visualizar três alvos destacados a verde, sendo que com os dois alvos verdes mais próximos definiu-se o eixo do z e com os dois alvos verdes de cima definiu-se o eixo do x. A translação não foi definida.

Capítulo 4

Projeto Final

Avaliação geométrica de um coletor solar térmico do tipo cpc

Neste capítulo, apresento a parte principal da minha dissertação, o projeto final. Toda a aprendizagem em fotogrametria e experiências efetuadas tiveram o objetivo de adquirir conhecimento e experiência suficientes para que fosse possível desenvolver este projeto.

O objetivo principal deste projeto é, como indica o título, fazer uma avaliação da geometria de um concentrador parabólico composto presente na PECS, utilizando a fotogrametria como ferramenta para o efeito.

O trabalho aqui apresentado foi repartido em três partes:

- Fotogrametria – *PhotoModeler UAS*
- Comparação de curvas – *CloudCompare*
- Análise do traçado dos raios – *Tonatiuh e Rhino3D*

Na primeira, descrevo todo o processo fotogramétrico realizado com recurso ao pacote de *software* de fotogrametria *PhotoModeler UAS*. Na segunda, baseio-me no *CloudCompare* que possibilita a comparação entre nuvens de pontos, entre *meshes* ou entre nuvens de pontos e *meshes*. Por fim, numa terceira fase faço um estudo do traçado dos raios solares de modo a verificar as perdas de eficiência devido a mal formações ou danos no *cpc* para o efeito é utilizado o programa *Tonatiuh*. Para conseguir utilizar o programa de traçado de raios tive de fazer algumas modificações no modelo *CAD* resultante da fotogrametria para o que utilizei o programa *Rhino3D*. Essas alterações foram apenas para colocar o modelo no ponto $(x.y.z) = (0.0.0)$.

4.1. A utilização do programa *PhotoModeler UAS*

Para realizar este projeto de fotogrametria, há que retomar uma série de passos, descritos anteriormente, no ponto referente às experiências fotogramétricas, onde se explica o processo fotogramétrico. No entanto, neste ponto, faço uma breve recapitulação.

Calibração - é o primeiro passo a dar num projeto fotogramétrico, tem o objetivo de determinar os POI – parâmetros de orientação interior da câmara que são a distância focal, coordenadas do ponto principal, o tamanho do formato, os coeficientes de distorção radial e a distorção descentrada. Uma calibração bem efetuada possibilita a correção de erros sistemáticos das medições no espaço imagem, que afetam a precisão dos processos fotogramétricos posteriores. Para este projeto, foi utilizada a mesma calibração, já apresentada.

Produção dos alvos - é feita através do *PhotoModeler UAS*, introduz-se a distância máxima que irá existir entre a câmara e o objeto que foi 2,5m, de modo a que este ocupe a maior área da imagem produzida pela máquina juntamente com o ficheiro, que resulta da calibração que contém os POI. Os alvos ou *RAD – ring automated detected* consistem em marcas formadas por padrões redondos impressas em papel ou em um tipo de vinil próprio para o efeito, detetáveis pelo programa. Produziram-se para o efeito 56 alvos.

Colocação dos alvos – Depois de produzidos, os alvos são impressos em papel A4 e recortados com tesoura individualmente ou em linhas que incluem mais que um alvo. Depois de se visualizar através de um esboço as suas posições, colam-se os alvos no concentrador. Foi utilizada cola de tubo normal.

Cobertura fotográfica – Nesta situação e para este tipo de objeto, o modo de captura de imagens mais apropriado é a sobreposição – *overlapse*. Para este projeto, foram tiradas 45 fotografias.

Processamento automático - Este é um projeto que recorre ao uso de *RAD targets* e, portanto, o modo de processamento das fotografias a utilizar é o *Automated targets*. A orientação das fotografias é feita automaticamente pelo programa.

Visualização – Uma vez que as fotografias estão orientadas, é possível visualizar o modelo tridimensional resultante: trata-se de uma nuvem com 56 pontos.

Processamento manual – Nesta fase, são fornecidos ao programa os últimos *inputs* necessários para se ter um modelo correto. Trata-se da referenciação onde se define a escala, a rotação e a translação. São também corrigidos quaisquer erros que possam ter surgido até ao momento.

Após diversas experiências e por sugestão do apoio técnico do *PhotoModeler UAS*, cheguei à conclusão que é possível melhorar os resultados se incluir na área ocupada por alvos o local onde está inserido o *cpc*. Neste caso, o sistema avaliado está assente num bloco de cimento e, portanto, o modelo apresentado inclui parte deste bloco.

Foram utilizados mais 14 alvos para a base de cimento. A figura seguinte é uma fotografia do conjunto *cpc* e base de cimento com os alvos já dispostos.



Figura 28 - *cpc* e base de cimento com alvos.

Uma vez processadas as imagens, verificou-se que, devido ao sombreamento, alguns alvos não apareceram. Para corrigir este erro, foi necessário marcar manualmente o local onde deveriam estar estes pontos, utilizando o comando *sub pixel marker* em todas as fotografias em que deveriam aparecer; posteriormente, esses pontos aparecem no modelo 3D.

Outro erro foi o surgimento de pontos/alvos que não existem por efeito de reflexões, visto que se trata de uma superfície refletora curva; este efeito é explicado

anteriormente e ilustrado pela imagem 8. Para eliminar estes pontos, é necessário seleccioná-los no modo de visualização 3D e apagá-los com o comando *delete*.

Uma vez eliminados os pontos indesejados e marcados os que estavam em falta, dá-se início à referenciação, introduzindo medidas conhecidas, devendo dar-se especial atenção a um pormenor relativamente a este passo, pois o programa vai assumir as medidas que fornecemos, como a distância entre centros de alvos que têm um determinado tamanho. Define-se a rotação, seleccionam-se dois pontos do modelo e ao segmento de reta formado atribui-se um eixo, há que definir dois eixos, o terceiro é automático. O comando a utilizar para referenciar um projeto é o *scale/rotate wizard*.

Ao aumentar o *target spread*, incluindo a base de cimento, melhora-se a precisão dos resultados; no entanto, o objetivo do trabalho é avaliar o concentrador e não o bloco de cimento e, como tal, separam-se os pontos em dois conjuntos ou *layers*, uma para a base e outra para o *cpc*. Desta forma, é possível, numa fase posterior, exportar para outro programa apenas a *layer* desejada, neste caso, a do concentrador.

Na etapa seguinte, agora a trabalhar apenas na *layer cpc*, selecionei todos os pontos do *cpc* e criei uma superfície que os incluísse a todos. À semelhança do que se passou com o forno solar, a superfície criada constituída por inúmeros triângulos formados entre cada três pontos da nuvem, sendo o coletor avaliado composto por dois ramos de parábola, suaves e contínuos. Com o comando *loft*, foi possível unir os pontos de cada linha de alvos do concentrador e, posteriormente, unir cada uma dessas curvas com uma superfície. Deste modo, foi possível criar o modelo completo do *cpc* como se pode constatar na figura 29.

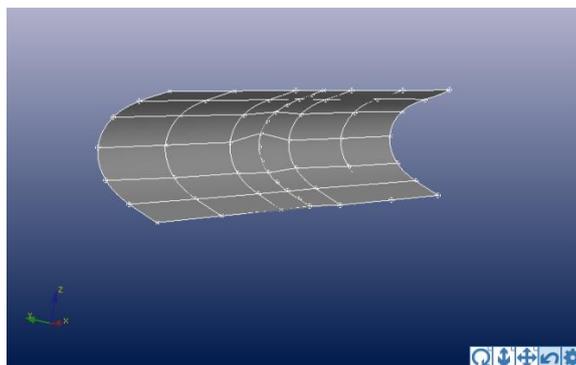


Figura 29 - *cpc* com superfície traçada com comando *loft*. Fonte: *PhotoModeler UAS*.

4.1.1. Algumas questões por resolver

1. Após visualização do modelo tridimensional, e em especial depois de criada a superfície, foi possível verificar a inexistência da involuta (o concentrador utilizado não tem uma involuta mas sim uma geometria designada *v-groove*, região onde as duas curvas se unem, é um pequeno vale sobre o qual se localiza o tubo recetor que tem a função de minimizar as perdas óticas por baixo do tubo. Para ultrapassar este problema, teria de colocar mais alvos cujos centros se situassem nas zonas altas da involuta e não só ao longo da zona de maior depressão. Como no modo de processamento utilizado, o programa apenas reconhece os alvos, este conectou a zona mais profunda da involuta com os alvos adjacentes, eliminando-a.
2. Translação – como não foi feita, teve de se usar o *Rhino3D* para situar o modelo no espaço e colocar um dos seus pontos no ponto (0,0,0), de modo a poder trabalhar com o mesmo no programa *Tonatiuh*, numa fase mais avançada.

A figura seguinte é um esquema de um concentrador solar, como o que foi utilizado, com a zona do *v-groove* e do tubo recetor aumentadas para uma melhor perceção destes elementos.



Figura 30 – Esquema de concentrador solar tipo *cpc* com zoom localizado na zona do *v-shape* e tubo recetor. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16301980>

A tabela em baixo inclui as escalas inseridas no modelo e revela as diferenças entre a realidade e o mesmo, os valores de distância nas colunas 5,6 e 7 estão em metros.

Tabela 4 - Escalas utilizadas no programa *PhotoModeler UAS*.

Id /	Active	Type	IDs	PhotoModeler Distance	Measured Distance	Delta Distance	Delta (perce
scale	yes	scale	Pt 20, Pt 29	0.674646	0.670000	0.004646	0.6934
scale	yes	scale	Pt 9, Pt 36	0.505085	0.501000	0.004085	0.8152
scale	yes	scale	Pt 39, Pt 51	2.019758	2.050000	-0.030242	-1.475

Fonte: programa *PhotoModeler UAS*.

4.2. A utilização do programa *Rhino3D*

Como já referi anteriormente, este programa apenas foi utilizado para terminar a referência do modelo, nomeadamente a translação. Como tal, o *software* aqui apresentado foi o menos utilizado, sendo necessário apenas para situar o modelo na origem. A imagem abaixo ilustra várias vistas do modelo retiradas deste programa.

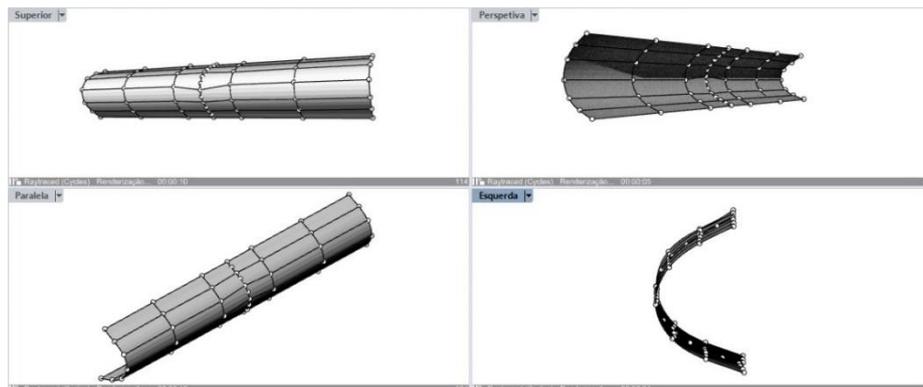


Figura 31 - Conjunto de quatro vistas do modelo tridimensional do *cpc* utilizado. Fonte: *Rhino3D*.

4.3. A utilização do programa *CloudCompare*

Este software permite efetuar comparações entre modelos 3D, fazendo uma análise dos desvios, aceita nuvens de pontos e *meshes*. Para poder fazer qualquer tipo de comparação, precisei do modelo teórico do *cpc* utilizado. O ficheiro *.stl* necessário do modelo foi-me fornecido pelo investigador da Cátedra de Energias Renováveis Tiago Osório.

Uma vez na posse do modelo teórico e do modelo real (através da fotogrametria), consegui dar início às comparações. Do programa *PhotoModeler UAS*

resultam dois modelos: uma nuvem de pontos e uma *mesh*, a última inclui uma superfície criada que une todos os pontos da nuvem. O modelo teórico é uma *mesh*. Desta forma, são efetuadas duas comparações, uma delas entre uma nuvem de pontos e uma *mesh* e a outra entre duas *meshes*.

4.3.1. Procedimento

A primeira coisa a fazer foi carregar os dois modelos para o programa, após o que se orientaram os modelos, tendo para tal que se fixar um deles e sobrepor o outro. Esta operação é possível conectando três pontos de um dos modelos com os três pontos homólogos do outro modelo. Desta forma, os dois modelos ficam sobrepostos e podemos analisar ponto a ponto a nuvem originada com a fotogrametria, verificando a que distância é que cada um se encontra da *mesh* teórica.

Em baixo, apresento as imagens retiradas do programa *CloudCompare* que ilustram o processo de sobreposição dos modelos; fiz questão de introduzir também uma “régua” a vermelho na figura 33 para demonstrar que ambos os modelos têm o mesmo tamanho. A figura 33 inclui ainda uma legenda de cores que indica o valor da distância e onde se situam a maioria dos pontos avaliados em termos de desvio em relação à *mesh* ideal, que é na zona do verde. Todas as figuras neste ponto foram retiradas do programa *CloudCompare*.

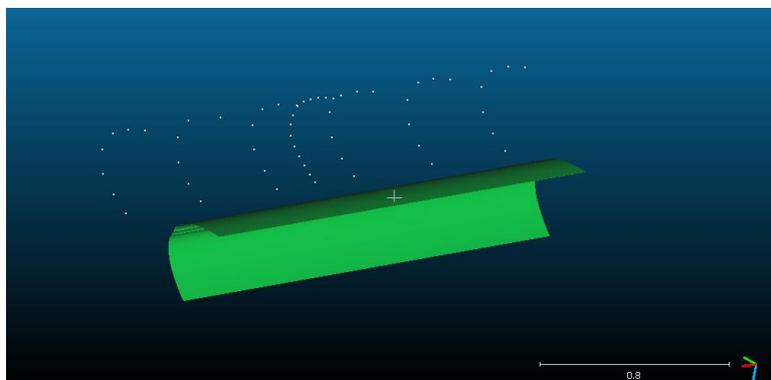


Figura 32 - Nuvem de pontos do modelo proveniente da fotogrametria (pontos brancos) e *mesh* do modelo teórico/ideal a verde. Fonte: *CloudCompare*.

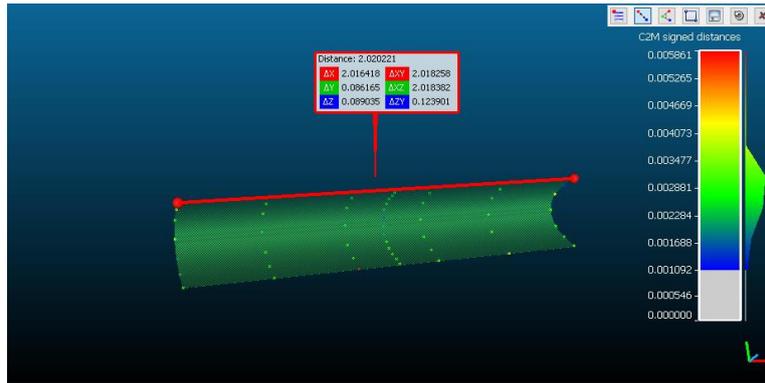


Figura 33 - Nuvem de pontos e *mesh* sobrepostas; código de cores para as distâncias entre os pontos e a *mesh*; régua vermelha com o comprimento dos dois modelos de 2.02m. Fonte: *CloudCompare*

O gráfico de barras em baixo apresenta uma estatística simples, onde os pontos avaliados são agrupados por classes e em que cada classe contempla um intervalo de distâncias.

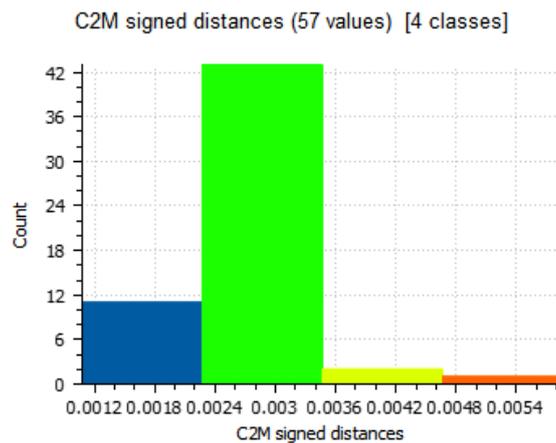


Gráfico 1 - Gráfico de barras que representa as distâncias entre os pontos da nuvem e a *mesh*. Os valores estão distribuídos por 4 classes e estão em metros. Fonte: *CloudCompare*.

A tabela em baixo apresenta os valores dessas distâncias em metros para todos os pontos da nuvem real. As colunas da tabela apresentam, respetivamente, o número do alvo/ponto, a coordenada x, y, z e, por fim, a distância entre os pontos da nuvem e a *mesh* teórica.

Tabela 5 - Distâncias entre os pontos da nuvem (real) e a mesh (ideal). Fonte: CloudCompare.

#	x	y	z	distância C->M
1	-0,495609	2,471769	0,382048	0,002985
2	-0,491657	2,471499	0,287746	0,003467
3	-0,485965	2,452000	0,194429	0,002955
4	-0,480521	2,383888	0,122979	0,003404
5	-0,475546	2,289581	0,121552	0,001855
6	-0,474114	2,206299	0,173017	0,002105
7	-0,474625	2,134557	0,240700	0,002774
8	-0,102117	2,488145	0,400739	0,002562
9	-0,098143	2,487876	0,305495	0,003006
10	-0,093313	2,469048	0,212027	0,003240
11	-0,087322	2,400007	0,141737	0,002226
12	-0,080186	2,301036	0,140888	0,002593
13	-0,077487	2,222263	0,190699	0,002954
14	-0,079776	2,155327	0,256863	0,002597
15	0,309313	2,506520	0,417580	0,003231
16	0,312767	2,504957	0,324442	0,002468
17	0,317516	2,485444	0,229557	0,002411
18	0,325621	2,417627	0,160175	0,002432
19	0,327548	2,319391	0,158722	0,002804
20	0,327961	2,239965	0,208647	0,003046
21	0,325361	2,172756	0,268107	0,005861
22	0,512288	2,515411	0,426039	0,003396
23	0,514446	2,515513	0,382647	0,002386
24	0,516574	2,513892	0,338840	0,002265
25	0,518800	2,508855	0,295069	0,002308
26	0,521034	2,498036	0,249541	0,002491
27	0,523682	2,479788	0,210160	0,002263
28	0,525953	2,449037	0,179708	0,001078
29	0,528060	2,410223	0,163166	0,001846
30	0,529846	2,364850	0,157908	0,001902
31	0,530724	2,323167	0,199841	0,002992
32	0,531499	2,285059	0,190753	0,003230
33	0,532037	2,250222	0,216587	0,003082
34	0,534068	2,216288	0,246902	0,002899
35	0,534446	2,185050	0,277601	0,003411
36	0,718526	2,523815	0,435522	0,002979
37	0,722722	2,522096	0,339959	0,002328
38	0,728542	2,501971	0,245691	0,002402

39	0,735833	2,434487	0,178188	0,002654
40	0,741486	2,342004	0,175351	0,002932
41	0,742575	2,260774	0,224739	0,003161
42	0,737916	2,186920	0,294486	0,003176
43	1,122187	2,540900	0,453613	0,002278
44	1,125379	2,539900	0,360287	0,002705
45	1,129046	2,520256	0,266293	0,002575
46	1,133962	2,450252	0,195561	0,002773
47	1,137202	2,354064	0,194901	0,003225
48	1,142624	2,204229	0,311528	0,004049
49	1,520809	2,557934	0,471083	0,002838
50	1,526202	2,552897	0,374838	0,001650
51	1,531348	2,537134	0,028058	0,004128
52	1,534299	2,467804	0,213693	0,002911
53	1,540472	2,370034	0,214390	0,002731
54	1,541638	2,293400	0,262452	0,003105
55	1,541692	2,225540	0,329788	0,003154

Fonte: Programa *CloudCompare*.

De seguida, compararam-se as duas *meshes*, a real e a teórica; com esta comparação, pretendeu-se fornecer um resultado mais visual, sendo possível verificar pelas cores quais as zonas do *cpc* real mais afastadas da *mesh* teórica. Neste caso, as distâncias são ilustradas por um código de cores: a *mesh* proveniente da fotogrametria é colorida e a teórica é toda verde.

De seguida, apresento as imagens que ilustram o resultado da sobreposição das duas *meshes*.

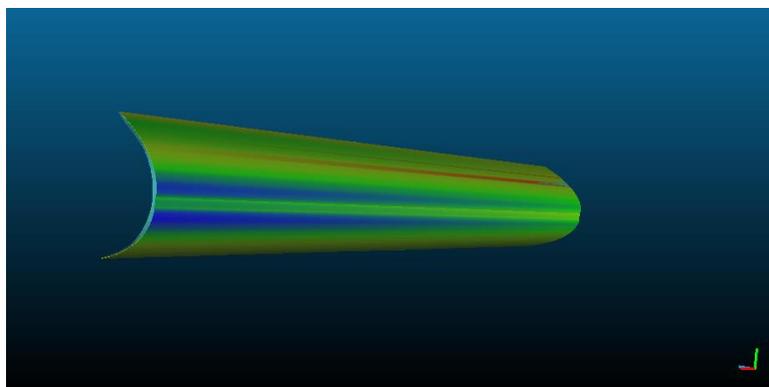


Figura 34 - Vista de trás da sobreposição da duas *meshes*. A *mesh* de trás é a real colorida e a da frente a ideal a verde. Fonte: *CloudCompare*.

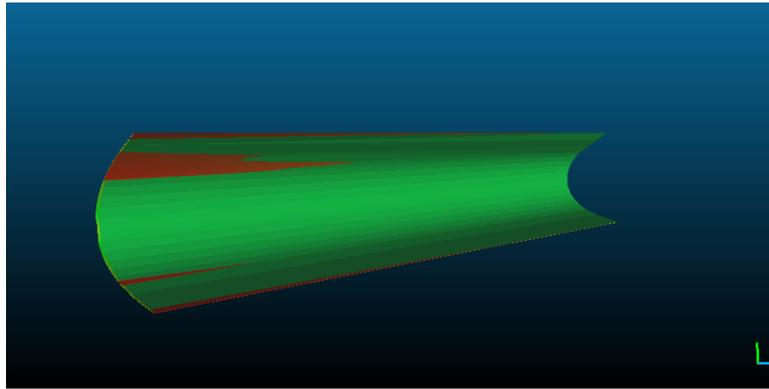
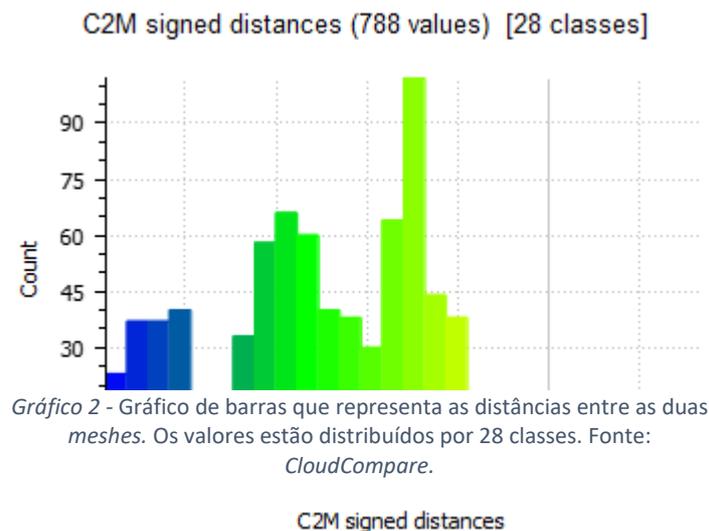


Figura 35 - Vista de frente da sobreposição das duas *meshes*. A *mesh* verde é a real e a colorida é a *mesh* ideal. Fonte: *CloudCompare*.

O gráfico de barras seguinte distribui todos os pontos da *mesh* proveniente da fotogrametria por classes. As escalas de cores são diferentes entre os dois projetos feitos neste programa.



Após a visualização do gráfico em cima, verifica-se que a classe que contém mais valores indica que estes se encontram a uma distância aproximada entre 0.004 e 0.005 metros. Por outro lado, os pontos mais distantes, representados pelas classes azuis, têm distâncias compreendidas entre 0.012 e 0.015 metros. Observando o gráfico e as duas imagens acima, é possível afirmar que as maiores distâncias apresentadas entre os dois modelos coincidem com a zona da involuta o que seria de esperar, de acordo com o que já foi explicado anteriormente.

Conclui-se, através da análise dos dados provenientes do programa *CloudCompare*, que existem desvios entre o modelo teórico fornecido e o modelo real obtido através da fotogrametria. A maioria dos pontos analisados da nuvem estão situados a uma distância compreendida entre 0.003 e 0.008m da *mesh*. Os pontos mais distantes encontram-se a uma distância de 0.015m e estão na zona da involuta, que apenas aparece no modelo teórico. Por fim, ainda se verifica uma diferença no tamanho dos modelos, ambos medem 2.02m no programa, mas na realidade têm 2.05m de comprimento, este erro provém do *PhotoModeler*.

4.4. A utilização do programa *Tonatiuh*

Para a tarefa final da componente experimental desta dissertação, foi utilizado o programa *Tonatiuh*. Este *software* permite fazer análises ao traçado dos raios solares ao incidirem numa superfície, neste caso, os concentradores *cpc* real e teórico, bem como os tubos recetores, simulando uma fonte (Sol). Deste modo, é possível determinar a eficiência ótica do sistema para todos os ângulos de incidência, condições atmosféricas e irradiação. Este estudo foi possível graças ao Professor Doutor Diogo Canavarro que foi indispensável e incansável na sua ajuda, nomeadamente na componente de programação inerente a este estudo. Para obter resultados numéricos e não apenas visuais, foi necessário implementar uma rotina em *Python* que foi fornecida também pelo Professor Doutor Diogo Canavarro.



Figura 36 - Logotipo do programa *Tonatiuh*. Fonte: google.

Este ponto divide-se em dois estudos, um sobre o *cpc* real proveniente da fotogrametria e outro sobre o *cpc* teórico/ideal. O tubo recetor utilizado é o mesmo para os dois modelos e foi fornecido pelo Investigador da Cátedra Tiago Osório.

4.4.1. Procedimento – concentradores tipo *cpc* teórico/ideal e tipo *cpc* real/fabricado

O procedimento é o mesmo para os dois casos. Em primeiro lugar, foi necessário importar os concentradores para o programa. Uma superfície teórica fornecida pelo investigador Tiago Osório e a superfície real criada por mim e originada através da fotogrametria. O tubo recetor está dividido em três partes: o vidro exterior, o vidro interior e o recetor.

Depois de importado o modelo do concentrador, importou-se o tubo (que são três modelos) e colocou-se no local correto que é exatamente no meio das duas curvas, o concentrador estudado não é *cpc* típico. Nesta fase, define-se a fonte, ou seja, o Sol: a sua posição e o número de raios. Neste estudo, apenas são apresentados resultados para a incidência normal, o que significa inserir um Azimute de 0° e uma elevação de 90° . Para esta simulação, defini uma fonte com 100000 raios, $1000\text{W}/\text{m}^2$ de irradiação e a atmosfera é definida por um *csr* de 0.05, que é característica de um céu limpo. Uma vez definidas as superfícies, a fonte e a atmosfera, dá-se início à análise do traçado dos raios, fazendo incidir os mesmos nos modelos.

4.4.1.1. Concentrador tipo *CPC* teórico/ideal

Todas as imagens apresentadas neste ponto foram retiradas do programa *Tonatiuh*.

As imagens em baixo ilustram a simulação feita no programa *Tonatiuh* onde foi utilizado o modelo ideal do concentrador.

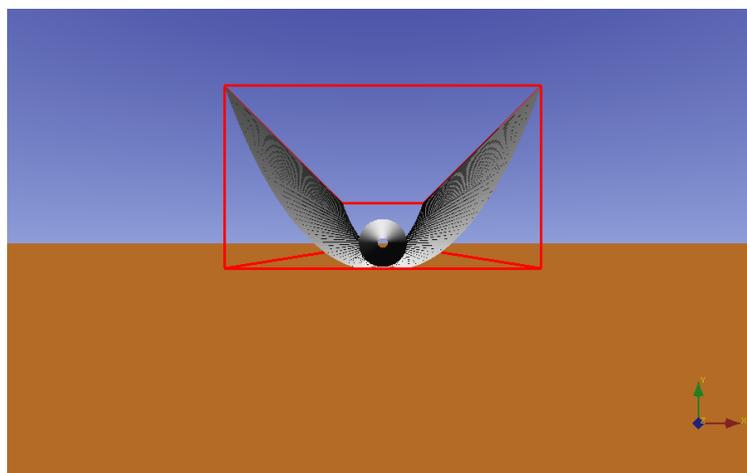


Figura 37 - Conjunto *cpc* ideal com tubo recetor.

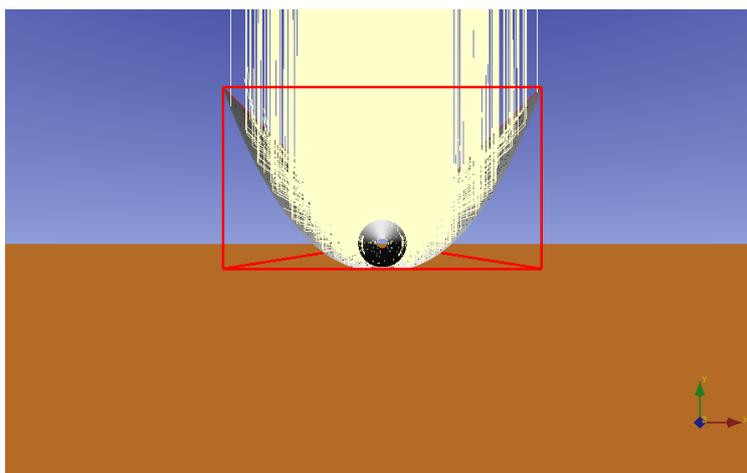


Figura 38 - Conjunto *cpc* ideal com tubo recetor. 100000 raios de luz simulados a incidir no conjunto. Incidência normal.

Ao analisar as imagens em cima, verifica-se a existência da involuta. Como desejado, é possível analisar o traçado dos raios solares ao incidirem no conjunto *cpc* com tubo recetor. Com recurso à rotina de Python, fornecida pelo Professor Doutor Diogo Canavarro, tem-se uma análise mais detalhada, obtendo valores de eficiência ótica para cada elemento do sistema. Para o caso, é utilizado o valor de eficiência ótica no tubo recetor.

Eficiência ótica para incidência normal no tubo recetor do concentrador tipo *cpc* ideal com involuta: $E_{\text{ótica}} = 75.1\%$

4.4.1.2. Concentrador tipo *CPC* real/fabricado

As imagens em baixo representam a simulação feita em *Tonatiuh* no concentrador proveniente da fotogrametria.

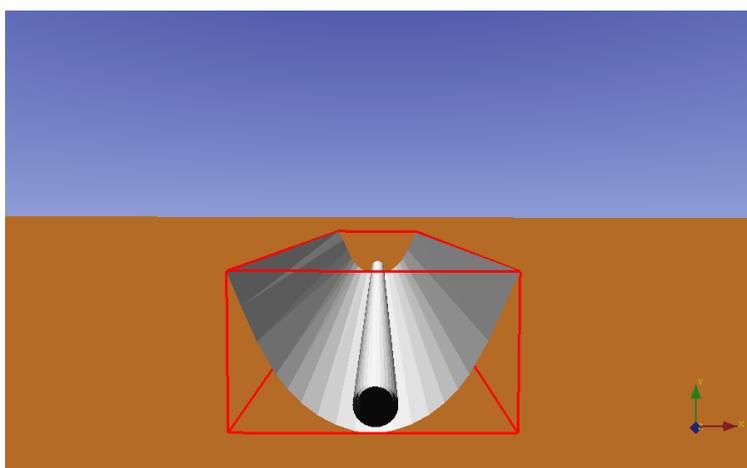


Figura 39 - Conjunto *cpc* real com tubo recetor.

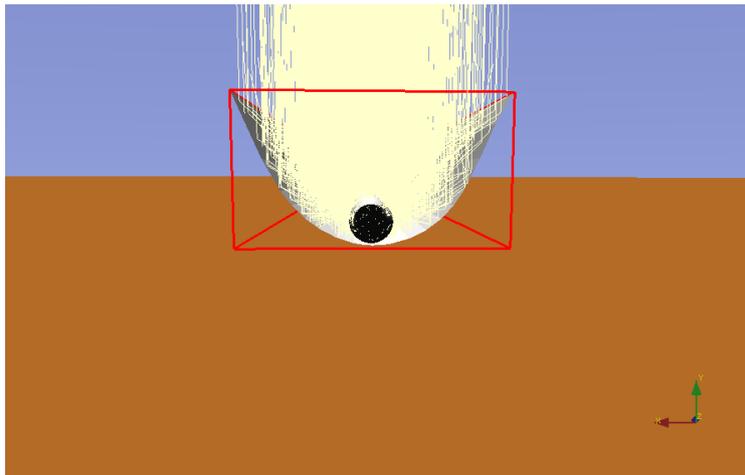


Figura 40 - conjunto *cpc* real com tubo recetor. 100000 raios de luz simulados a incidir no conjunto. Incidência normal.

Contrariamente ao modelo teórico, neste não está presente a involuta. Os resultados devolvidos pelo programa utilizado e traduzidos pela rotina *Python* foram os seguintes:

Eficiência ótica para incidência normal no tubo recetor do concentrador tipo *cpc* real/fabricado: $E_{\text{ótica}} = 63.6\%$

4.4.2. Caracterização do concentrador utilizado

Neste ponto, apresento a caracterização do *cpc* utilizado ao longo do projeto final.

Dimensões do concentrador:

- 2.05m de comprimento
- 0.38m de abertura
- Área de abertura – $A_a = 0.38 \times 2.05 = 0.779\text{m}^2$

Dimensões do tubo:

- 2.05m de comprimento - h
- 0.029m de raio - r
- Área de receção, corresponde à área lateral do tubo – $A_r = 2\pi r h = 0.374\text{m}^2$

Fator de concentração:

- $C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{0.779}{0.374} = 2.08$

Com as dimensões apresentadas, o sistema estudado tem um fator de concentração de 2.08.

Resultados relevantes do *Tonatiuh* traduzidos pela rotina de *Python*:

- Eficiência ótica no tubo recetor para incidência normal no concentrador ideal:
75.1%
- Eficiência ótica no tubo recetor para incidência normal no concentrador real:
63.6 %

4.5. Discussão: aprofundamento da análise anterior

Depois de analisar os resultados que obtive no ponto anterior e tendo em conta o facto de o modelo “real” proveniente da fotogrametria não apresentar a involuta e o *v-groove*, optei por desenhar uma nova superfície. Esta superfície feita no programa Rhino3D, à semelhança do modelo da fotogrametria, já não integra o *v-groove* o que torna uma comparação das eficiências óticas entre o modelo “real” da fotogrametria e o modelo “ideal modificado” mais correta do que a que fiz no ponto anterior. Neste ponto, apresento uma nova simulação do traçado dos raios, agora numa nova superfície que representa o mesmo concentrador solar térmico com o nome “ideal modificado”. Desta forma, posso afirmar com mais certeza que a diferença de eficiências óticas na incidência normal tem origem nos defeitos de fabrico e não tem que ver com a presença de *v-groove* apenas num dos modelos. Anteriormente, durante o desenvolvimento do trabalho, e como já referi, o modelo tridimensional resultante da fotogrametria, ou seja, o “real”, não apresentou o *v-groove*. Como tal, criei uma nova superfície que representa o concentrador “ideal”, agora sem *v-groove*; no seu lugar uno os dois arcos do concentrador com outra curva. Criei este novo concentrador com o nome “ideal modificado” para poder compará-lo com o “real” minimizando os erros. Nos pontos anteriores acabei por comparar dois objetos que não eram iguais na zona do *v-groove*.

Utilizo os valores de eficiência ótica para a incidência normal como fator de comparação entre o modelo “real” e o “ideal modificado”. Em baixo, apresento três figuras, a primeira permite a visualização de quatro vistas da nova superfície criada no programa *Rhino3D*, as duas seguintes têm origem no programa *Tonatiuh* e representam a simulação do traçado dos raios feita sob as mesmas condições que as outras simulações.

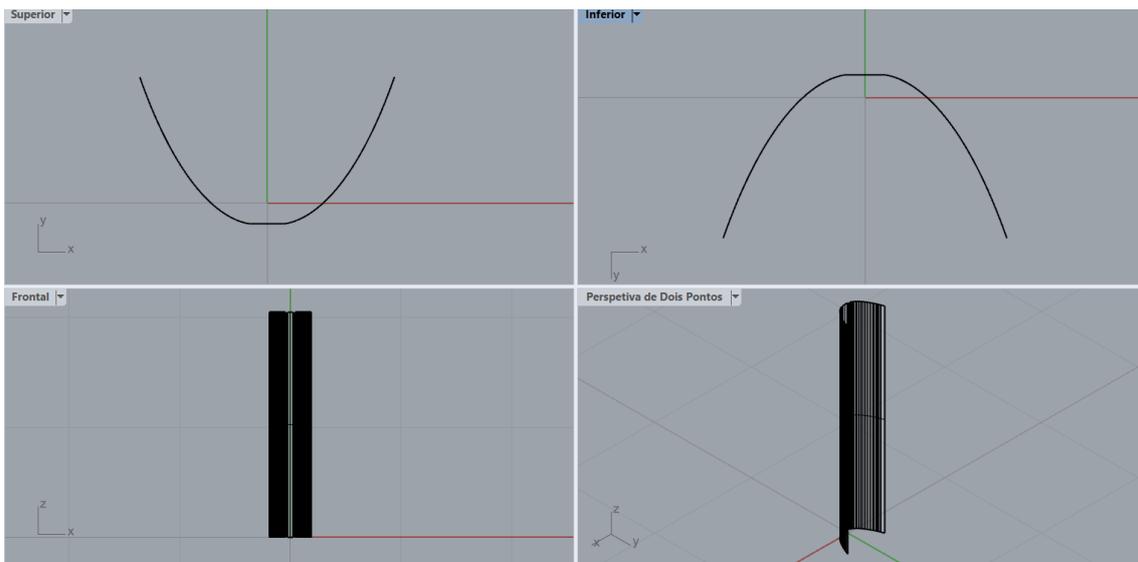


Figura 41 - quatro vistas da nova superfície criada: "ideal modificado". Fonte: Rhino3D

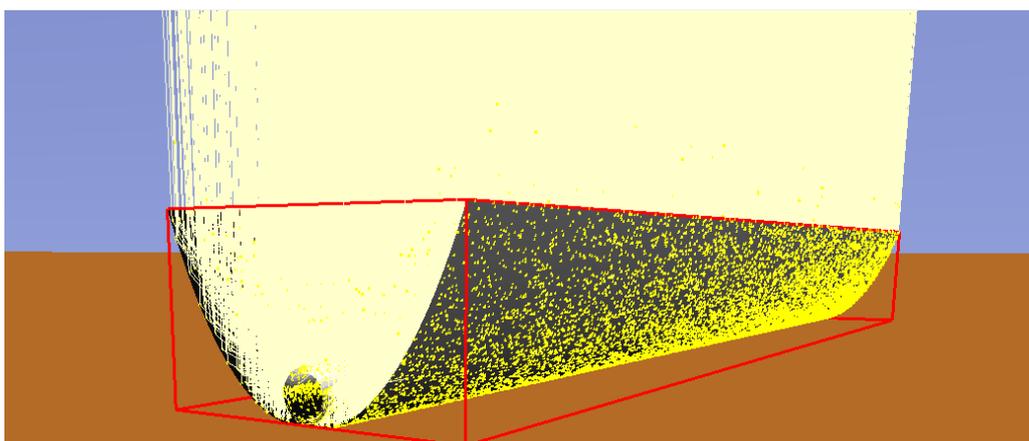


Figura 42 - Simulação do traçado dos raios na nova superfície: "ideal modificado". Fonte: Tonatiuh

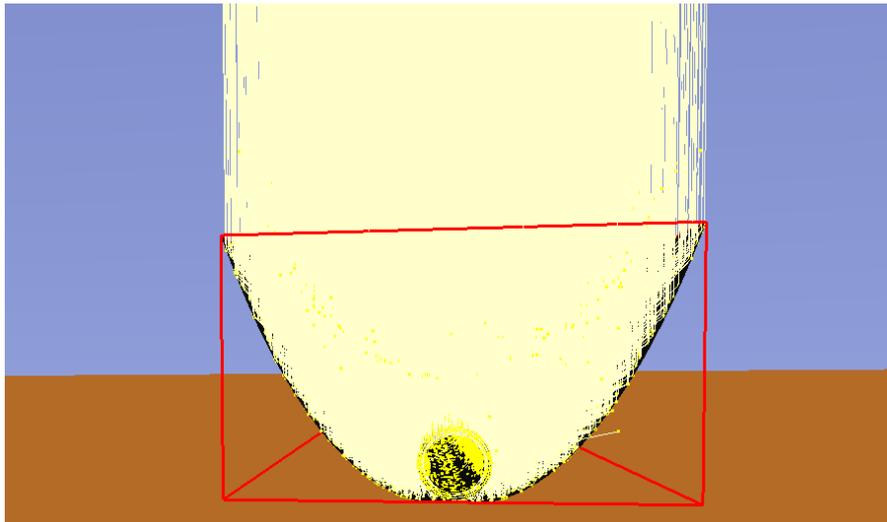


Figura 43 - Vista frontal da nova superfície na simulação do traçado dos raios. Fonte: Tonatiuh

Depois de criada a superfície no programa *Rhino3D*, denominada “ideal modificado”, utilizei a ferramenta *Tonatiuh* para efetuar uma simulação do traçado dos raios e assim obter o valor da eficiência ótica para a incidência normal. A nova simulação foi feita nas mesmas condições que as anteriores, ou seja, fiz incidir 100000 raios sobre a superfície segundo uma incidência normal e as propriedades dos materiais também foram as mesmas.

Eficiência ótica no tubo recetor para a incidência normal na superfície “ideal modificado”: 73.1%.

4.6. Conclusões sobre o projeto final

Após a finalização deste projeto, há diversas conclusões que se podem tirar. Os objetivos iniciais foram atingidos, visto que ficou provado que é possível utilizar a fotogrametria em superfícies refletoras nomeadamente concentradores solares térmicos. Também foi possível fazer uma avaliação geométrica de um concentrador solar tipo *cpc* – concentrador parabólico composto, utilizando um modelo tridimensional do mesmo a partir da fotogrametria.

Foram surgindo algumas complicações que tornaram o projeto mais desafiante. Na utilização do *PhotoModeler UAS*, devido a uma distribuição dos alvos menos boa ao longo do objeto, o *v-groove* não aparece no modelo. Por motivos que não conheço, o modelo resultante do *cpc* mede 2.02m em vez de 2.05m; este problema, no entanto, não causou alterações nos resultados, pois os dois modelos comparados têm sempre o mesmo tamanho. Não consegui definir a translação do modelo no programa *PhotoModeler UAS*, daí a utilização do programa *Rhino3D*.

Na utilização do *software CloudCompare* é possível visualizar os pontos do modelo real e a distância a que se encontram do modelo ideal numa comparação entre nuvem de pontos (real) e *mesh* (ideal). De seguida, numa comparação entre duas *meshes*, a real e a ideal, é possível visualizar mais facilmente em que zonas se situam os maiores desvios através de um código de cores, verificando que é na zona da involuta, pois no modelo real não aparece.

Na fase final deste projeto, apresento um estudo do traçado dos raios feito com o programa *Tonatiuh* cujos resultados são traduzidos por uma rotina de *Python*. Apenas foi estudada a incidência normal de modo a obter valores para a eficiência ótica dos dois sistemas, real e ideal. Os valores para este parâmetro são 75.1% no *cpc* ideal e 63.6% no *cpc* real. A diferença de 11.5% deve-se a dois fatores principais: o primeiro prende-se com a inexistência da involuta e o segundo com possíveis erros fabrico. Por se tratar de uma superfície refletora curva, alguns alvos apareciam em duplicado e tiveram de ser eliminados; por outro lado, alguns alvos não apareceram no modelo/nuvem de pontos resultante e tiveram de ser marcados manualmente, como já foi explicado em capítulos anteriores. Estes processos podem ter criado alguns erros que foram propagados até se fazer a simulação no programa *Tonatiuh*, onde se verifica a diferença nas eficiências óticas dos dois modelos.

Devido à grande diferença que se verificou entre os valores de eficiência ótica para os dois modelos testados, criei um terceiro com o nome “ideal modificado”. Esta nova superfície foi feita a partir do modelo “ideal” e utilizei o programa *Rhino3D*, já não inclui *v-groove* à semelhança do modelo resultante da fotogrametria o que permite uma comparação mais correta entre as duas superfícies. Trata-se de uma superfície em que simulei propositadamente o erro que sucedeu na fotogrametria para posteriormente

obter valores de eficiência ótica para a incidência normal mais fidedignos, recorrendo ao *Tonatiuh* para tal. Depois de desenhada a nova superfície de nome “ideal modificado” e feita a simulação no *Tonatiuh*, obtive uma eficiência ótica no tubo recetor para uma incidência normal de 73.1%, ou seja, menos dois pontos percentuais relativamente à mesma superfície, mas com *v-groove*. Esta queda na eficiência ótica está associada com o desaparecimento do *v-groove*. A diferença entre as eficiências óticas dos concentradores “real” e “ideal modificado” é de 9.5% e é muito provavelmente causada por erros na fabricação do concentrador.

Conclusão

Esta dissertação, com o título Determinação da qualidade geométrica de superfícies refletoras com recurso à fotogrametria, permitiu o desenvolvimento de uma técnica de avaliação geométrica de superfícies refletoras com a fotogrametria. Inicialmente apresentou diversos desafios visto ter sido o meu primeiro contacto com este método de detecção remota, no entanto, terminei este trabalho a entender a fotogrametria na íntegra e a saber aplicá-la a todo o tipo de objetos, nomeadamente concentradores solares térmicos.

Depois de analisar os resultados obtidos no capítulo 4, onde apresento o projeto final, verifiquei uma grande diferença entre os valores de cada modelo. Como já sabia que o modelo tridimensional proveniente da fotogrametria tinha um erro fotogramétrico, a ausência de *v-groove*, desenhei uma nova superfície com o nome “ideal modificado” que representa o modelo ideal sem o *v-groove*. Repeti a simulação do traçado dos raios, agora com a nova superfície e obtive um valor de eficiência ótica para a incidência normal mais baixo do que quando tinha o *v-groove*. Desta forma posso afirmar que, muito provavelmente, a queda de eficiência ótica que se verifica entre o modelo “real” e o modelo “ideal modificado” terá origem em defeitos de fabrico do próprio concentrador.

Comecei a minha dissertação por definir os objetivos que queria alcançar:

- Apresentar a Fotogrametria de maneira simples e concisa;
- Possibilitar a utilização da fotogrametria a quem não a conheça;
- Verificar se a Fotogrametria se pode aplicar em superfícies espelhadas;
- Extrair modelos tridimensionais em *CAD* do coletor solar térmico *cpc*;
- Verificar a forma do coletor solar térmico escolhido: *cpc*;

Como se pode observar na primeira parte desta dissertação e no resto do trabalho desenvolvido, os primeiros dois objetivos foram atingidos. Relativamente ao terceiro objetivo, consegui provar que é possível utilizar a fotogrametria em superfícies refletoras, como são os concentradores solares térmicos. A outra grande meta era

utilizar a técnica apresentada ao longo do trabalho para realmente avaliar geometricamente a forma do concentrador solar térmico do tipo *cpc* – concentrador parabólico composto, presente na PECS – Plataforma de ensaios em coletores solares.

Depois de apresentar a fotogrametria num capítulo puramente teórico, onde está presente a história da técnica, fundamentos, as suas aplicações e o estado da arte, expus quatro experiências fotogramétricas, de modo a dar a entender o funcionamento da mesma e o seu comportamento face a diferentes tipos de objetos. De seguida, introduzi o projeto final onde utilizei o modelo resultante da fotogrametria para fazer comparações com outro modelo já existente que representa o modelo ideal do concentrador avaliado. No decorrer do mesmo projeto utilizei quatro programas distintos, um dos quais, o *Tonatiuh*, uma ferramenta para fazer uma análise complementar de modo a enriquecer os resultados obtidos com valores de eficiência ótica na incidência normal para cada um dos modelos.

Este estudo apresenta algumas limitações que se prendem diretamente com as características da máquina fotográfica utilizada. A utilização de uma máquina fotográfica com uma maior resolução permitiria a obtenção de melhores resultados.

Tal como expliquei no ponto do estado da arte, a fotogrametria atinge outro potencial, no que toca a avaliação de concentradores solares, quando emparelhada com outras técnicas de deteção remota. Neste sentido, seria interessante, num futuro próximo, desenvolver estudos sobre soluções híbridas. Um desenvolvimento mais eficaz desta técnica na investigação pressupõe também a acessibilidade e utilização de programas informáticos de fotogrametria sem quaisquer custos.

Referências

As referências bibliográficas utilizadas para esta dissertação estão escritas sob a norma APA 6. Apresento os livros consultados, bem como web sites, revistas e artigos científicos.

Berberan, A. (2003). *Elementos de Fotogrametria*, edição do autor, ISBN:9729587353.
Brito, J. N. & Coelho, L. (2007). *Fotogrametria digital*. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Dalebäck, J. D.; Fernandes, O. E. ; Pereira, M. C. (2008). *Eurosun 1st international conference on solar heating cooling and buildings*

Gonçalves, G. R. (2005). *Elementos de fotogrametria analítica*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Elementos de aula de Fotogrametria Digital.

Kreider, J. F. & Kreith, F. (1992). *Solar heating and cooling: Engineering, Pratical design and Economics*. Revised 1st edition. London: McGraw-Hill.

Lichti, D. University of Calgary, Canada & Weng, Q. Indiana State University, USA, (2018). *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

Luther, J. (2000). *Solar Energy, the official journal of the International Solar Energy Society – ISES*.

Obaidli, A. A. & Calvet, N. (org) *Solar Paces 2016 concentrating solar power and chemical energy systems - Proceedings of the 22nd international conference*, American institute of physics (2016).

Rezende, W. S. (2009). *Fotogrametria digital e património histórico: uma proposta metodológica*. In Fórum Património v.2 n.1. Belo Horizonte.

Wolf, P. & Dewitt, B. (2000). *Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS*. 3rd Edition. London: McGraw-Hill.

Yanaga, S. S. (2006). *Fotogrametria digital a curta distância na documentação do património arquitetónico. Dissertação de mestrado*. Universidade Federal de Santa Catarina.

Sites consultados

<https://www.asprs.org>

<https://www.isprs.org>

<https://www.photomodeler.com>

<https://ec.europa.eu>

<https://www.seia.org>

<https://cipa.icomos.org>

<https://br.ccm.net>

<https://www.aerostat.com.br>

<https://www2.uefs.br>

<https://www.britanica.com>

<https://www.igeoe.pt>

<https://www.mat.uc.pt>

<https://www.oficinadanet.com.br>

Anexos

I – Relatório de calibração. Fonte: *PhotoModeler UAS*;

II – Material das experiências fotogramétricas;

III – Material do projeto final;

IV – Rotina de *Python* utilizada.

I - Relatório de calibração

Status Report Tree

Project Name: *** CPC - calibração ***

Problems and Suggestions (2)

Project Problems (2)

Problem: A large percentage of your points are sub-pixel marked so it is assumed you are striving for a high accuracy result. The largest residual (Point45 - 1.14) is greater than 1.00 pixels.

Suggestion: In high accuracy projects, strive to get all point residuals under 1.00 pixels. If you have just a few high residual points, study them on each photo to ensure they are marked and referenced correctly. If many of your points have high residuals, then make sure the camera stations are solving correctly. Ensure that you are using the best calibrated camera possible. Remove points that have been manually marked unless you need them.

The total photo area covered by points is 72%, which is less than the recommended 80%.

Try to take photos of the calibration grid so that marked points fill as much of the photo frame as possible. Also move the grid around the frame so overall there is good coverage across all photos. This will result in a better calibration as more of the lens will be calibrated to account for variability throughout the lens.

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Tue Dec 12 15:46:07 2017

Version: PhotoModeler UAS 2017.1.1.2199 (64-bit)

Status: successful

Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

Total Error

Number of Processing Iterations: 3

Number of Processing Stages: 2

First Error: 2.501

Last Error: 2.499

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: Canon PowerShot G9 [7.40]

Focal Length

Value: 7.487795 mm

Deviation: Focal: 0.001 mm

Xp - principal point x

Value: 3.591318 mm

Deviation: Xp: 0.002 mm

Yp - principal point y

Value: 2.741222 mm

Deviation: Yp: 0.002 mm

Fw - format width

Value: 7.416047 mm

Deviation: Fw: 3.0e-004 mm

Fh - format height

Value: 5.562600 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 4.000e-003

Deviation: K1: 3.0e-005

K2 - radial distortion 2

Value: -8.294e-005

Deviation: K2: 1.5e-006

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: 2.244e-005

Deviation: P1: 7.1e-006

P2 - decentering distortion 2

Value: 1.184e-004

Deviation: P2: 7.4e-006

Quality

Photographs

Total Number: 12

Bad Photos: 0

Weak Photos: 0

OK Photos: 12

Number Oriented: 12

Number with inverse camera flags set: 0

Cameras

Camera1: Canon PowerShot G9 [7.40]

Calibration: yes

Number of photos using camera: 12

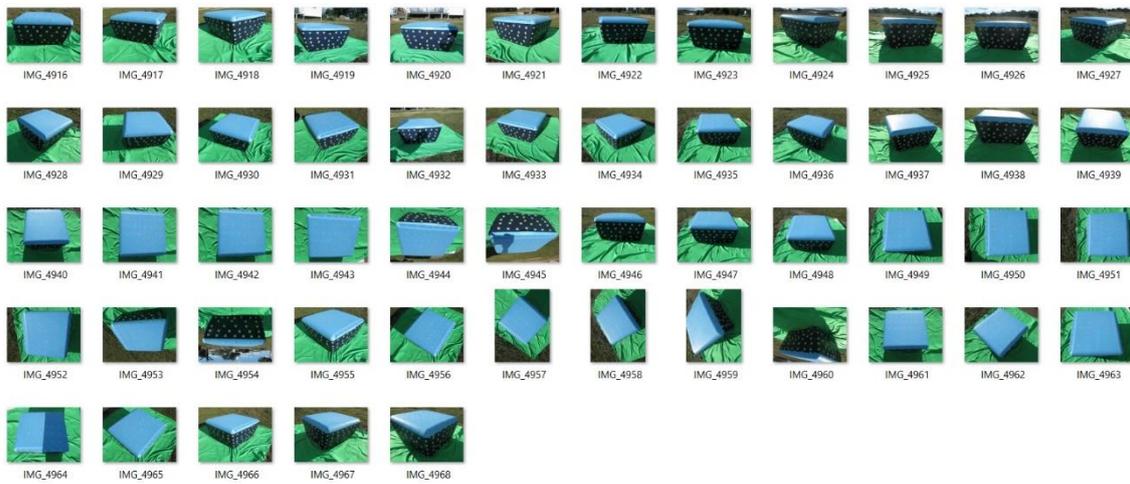
Average Photo Point Coverage: 72%

II – Fotografias capturadas e posteriormente processadas no programa *PhotoModeler UAS* para as experiências fotogramétricas

Bloco de Cimento:



Forno Solar:



PTC



CPC



III - Fotografias utilizadas e ficheiros resultantes dos programas utilizados no projeto final

Nesta parte dos Anexos coloco as fotografias que capturei para posterior utilização no projeto final de fotogrametria, estão distribuídas por tabelas onde está incluída alguma informação que considerei importante. Estas tabelas foram retiradas do programa *Photomodeler UAS*.

Photo #	Image Chip	Oriented	Can be Processed	Image Width (pixels)	Image Height (pixels)	Camera	Focal Length (mm)	Largest Residual (pixels)	RMS Residual (pixels)	Camera's Exif Focal Length	Photo's Exif Focal Length
1		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.196323	0.113428	7.400000	7.400000
2		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.356949	0.186734	7.400000	7.400000
3		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.285110	0.122521	7.400000	7.400000
4		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	1.074631	0.261580	7.400000	7.400000
5		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	1.896859	0.465520	7.400000	7.400000
6		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.494133	0.160571	7.400000	7.400000
7		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	2.359384	0.692407	7.400000	7.400000
8		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.215278	0.091913	7.400000	7.400000
9		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.273064	0.110854	7.400000	7.400000
10		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.120984	0.086101	7.400000	7.400000
11		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.530458	0.212082	7.400000	7.400000
12		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.441582	0.218436	7.400000	7.400000

13		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.813845	0.363615	7.400000	7.400000
14		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.379099	0.257378	7.400000	7.400000
15		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.230521	0.142813	7.400000	7.400000
16		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.222475	0.123974	7.400000	7.400000
17		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	2.829972	0.565863	7.400000	7.400000
18		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	3.345909	0.552530	7.400000	7.400000
19		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.179246	0.104984	7.400000	7.400000
20		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.215157	0.098699	7.400000	7.400000
21		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.747772	0.290158	7.400000	7.400000
22		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.518044	0.259134	7.400000	7.400000
23		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.577692	0.273367	7.400000	7.400000
24		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.404690	0.151930	7.400000	7.400000
25		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.281744	0.148737	7.400000	7.400000
26		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.309503	0.221554	7.400000	7.400000
27		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.393620	0.207137	7.400000	7.400000
28		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.330853	0.157130	7.400000	7.400000
29		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.505181	0.230482	7.400000	7.400000
30		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.885533	0.302460	7.400000	7.400000

31		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.269094	0.126053	7.400000	7.400000
32		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.363846	0.121518	7.400000	7.400000
33		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	1.389330	0.349768	7.400000	7.400000
34		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.400328	0.177275	7.400000	7.400000
35		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.264476	0.154394	7.400000	7.400000
36		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.192746	0.086302	7.400000	7.400000
37		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.504404	0.203447	7.400000	7.400000
38		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	1.363066	0.438579	7.400000	7.400000
39		no	no	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	n/a	n/a	7.400000	7.400000
40		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.446334	0.277357	7.400000	7.400000
41		no	no	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	n/a	n/a	7.400000	7.400000
42		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.481740	0.337585	7.400000	7.400000
43		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.497478	0.259745	7.400000	7.400000
44		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.439933	0.190573	7.400000	7.400000
45		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.339750	0.166466	7.400000	7.400000
46		yes	yes	4000	3000	Canon PowerShot G9...	7.484615	0.543886	0.320757	7.400000	7.400000

IV – Rotina de *Python* utilizada

```
import numpy as np
import string
#import pylab
from math import *
import os
import glob
from time import *

#treat a single TONATIUH output file "tonatiuh_out"
def main():

    studentname = 'real'
    outputdir = '/Users/Gonçalo Abranches/Desktop/' + studentname + '/'

#Routine

    for i in range(1, 2, 1):
        photonfile = 'incidencia normal real_' + str(i)
        surfIDs, surfnames = treat_photons( photonfile, outputdir )
        get_statistics( surfIDs, surfnames, photonfile, outputdir, delphotons = True, delcoords = True )

        print 'FINISHED TONATIUH OUTPUT TREATMENT AT:',
        print strftime('%H:%M:%S', gmtime())

    return

#treats photon arrays on the shape A=[[photon Spos]]
#and turns it into hit and absorption matrices to each surface
def treat_photons( photonfile, outputdir ):

    #photon and parameters files
    #experiencia abaixo estava a ser usado
    photons = outputdir + photonfile + '_i.dat'
    params = outputdir + photonfile + '_parameters.txt'

    #photons = '\Users\Solue\Desktop\TESE\Tonatiuh\rotina python\cpc_real\cpc_real_testei_i.dat'
    # params = '\Users\Solue\Desktop\TESE\Tonatiuh\rotina python\cpc_real\cpc_real_testei_parameters.txt'

    #surf ids & names
    surfIDs = []
    surfnames = []
    readfile=open(params,'r')
    lines=readfile.readlines()
    readfile.close()
    for line in lines:
```

```

try:
    treat_fields = string.splitfields( line, '/' )
    surfIDs.append(int(treat_fields[0]))
    surfname = string.splitfields( treat_fields[-1], '\n' )[0]
    surfnames.append(surfname)
except: pass

#get photons array
P = np.fromfile(photons,dtype='>d')
P = np.reshape(P, (-1, 8)) #1 photon per matrix line
print '%i photons loaded:' % P.shape[0],
print strftime('%H:%M:%S', gmtime())

#get WFgo matrix
WFgos = get_WFgos( P )
np.save( outputdir + 'WFgos', WFgos)

#get Hits and Abs matrices for surfaces
for surfID in surfIDs:
    A, H = get_Ms_4_surf( surfID, P )
    if A.size > 0: np.save( outputdir + 'abs_surfID_%i' % (surfID), A )
    if H.size > 0: np.save( outputdir + 'hits_surfID_%i' % (surfID), H )

print 'photons sorted:',
print strftime('%H:%M:%S', gmtime())

return surfIDs, surfnames

def get_statistics( surfIDs, surfnames, photonfile, outputdir, delphotons=False, delcoords=False ):

    photons = outputdir + photonfile + '_i.dat'
    params = outputdir + photonfile + '_parameters.txt'

    readfile=open(params,'r')
    lines=readfile.readlines()
    readfile.close()

    #overall stats
    totalphotons = np.fromfile(photons,dtype='>d')
    totalphotons = np.reshape(totalphotons, (-1, 8)) #1 photon per matrix line
    totalphotons = totalphotons.shape[0]
    s = '-----\n'
    s += 'photons file: ' + photons + '\n'
    s += 'parameters file: ' + params + '\n'
    s += '-----\n'
    s += 'total photons: %i \n' % totalphotons
    WFile = outputdir + 'WFgos.npy'

```

```

WFrays = np.load( WFFile )
WFrays = WFrays.shape[0]
s += 'total rays from WFront (hiting the system): %i \n' % WFrays
photonpower = float(lines[-1])
s += 'photon power: %0.4f [W/photon] \n' % photonpower
totalpowerKW = photonpower * WFrays / 1000
s += 'total power hitting the system: %0.3f [kW] \n' % totalpowerKW
s += '-----\n'

#surf statistics
s += '\n SURFACE STATISTICS \n'
s += '-----\n'

for i in range(len(surfIDs)):
    surfID = surfIDs[i]
    surfname = surfnames[i]
    try:
        Mfile = outputdir + 'abss_srfID_%i.npy' % (surfID)
        A = np.load( Mfile )
        abss = A.shape[0]
    except:
        abss = 0
    try:
        Mfile = outputdir + 'hits_srfID_%i.npy' % (surfID)
        H = np.load( Mfile )
        hits = H.shape[0]
    except:
        hits = 0
    #OPTICAL EFFICIENCY: ABSORBED PHOTONS / EMITTED PHOTONS (HITING THE SYSTEM)
    opteffic = float(abss) / float(WFrays)
    abspowerKW = float(abss) * photonpower / 1000
    #surf lines
    s += 'surfID: %i | surfname: ' % surfID
    s += surfname + '\n'
    s += '** total photon hits: %i \n' % hits
    s += '** total absorbed photon: %i \n' % abss
    s += '>> total absorbed power: %0.3f [kW] \n' % abspowerKW
    s += '>> optical efficiency: %0.6f \n \n' % opteffic

statsfile = outputdir + photonfile + '_stats.txt'
writefile = open(statsfile,'w')
writefile.write(s)
writefile.close()

#delete photonfile
if delphotons:
    os.remove(photons)

```

```

os.remove(params)

#delete hits and abss coord matrices
if delcoords:
    files = glob.glob(outputdir + '*.npy')
    for f in files: os.remove(f)

return

def get_WFgos( photonsM ):
    #prevID == 0 and nextID != 0
    M = photonsM[photonsM[:,5] == 0]
    M = M[M[:,6] != 0]
    #delete columns 0, 4, 5, 6, 7
    M = np.delete( M, np.s_[4:8], axis=1 )
    M = np.delete( M, np.s_[0:1], axis=1 )
    return M

def get_Ms_4_surf( surfID, photonsM ):
    #hits (surfID == surfID)
    H = photonsM[photonsM[:,7] == surfID]
    #abss (prevID != 0 and nextID == 0)
    if H.size > 0:
        A = H[H[:,6] == 0 ]
        if A.size > 0: A = A[A[:, 5] != 0 ]
        #delete columns 0, 4, 5, 6, 7
        if A.size > 0:
            A = np.delete( A, np.s_[4:8], axis=1 )
            A = np.delete( A, np.s_[0:1], axis=1 )
        if H.size > 0:
            H = np.delete( H, np.s_[4:8], axis=1 )
            H = np.delete( H, np.s_[0:1], axis=1 )
    else:
        A = H
    return A, H

# Startup routine
if __name__ == "__main__":
    main()

```