

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



Ciências
ULisboa

**Determinação de fatores de sombreamento com recurso a
modelos 3D**

Rafael Ferreira da Cruz Carreira

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão
Professor Doutor Miguel Centeno Brito

2017

Agradecimentos

Aos Professores Doutores Miguel Brito e Marta Panão, orientadores da dissertação, pela sua disponibilidade, esclarecimentos e conselhos ao longo de todos estes meses de trabalho. Um sincero obrigado pela paciência, pelo incentivo e pela acessibilidade que sempre demonstraram.

À Professora Doutora Paula Redweik, pelo seu apoio no desenvolvimento do método *fisheye*, pela ajuda na compreensão de certos aspetos que são alheios à minha formação académica. Agradeço-lhe a paciência e a dedicação dada a um trabalho que não era seu.

À minha família pelo constante apoio, alegria e por tudo o que trabalharam para que chegasse até aqui. Ao meu pai pela racionalidade inculcada que não me deixou desviar do meu caminho. À minha mãe pela emoção que me permite desafiar todos os dias. À minha irmã que é o meu exemplo de esforço e trabalho. À minha avó que ainda é uma criança e à minha sobrinha cuja ingenuidade infantil me divertiu quando eu mais precisei. Nesta dissertação encontra-se um pouco de cada um de vós.

Um enorme obrigado à Laura não é suficiente. Sempre estive comigo quer nos momentos de imensa alegria quer nos de frustração, só ela compreende o que o finalizar desta etapa significa para mim e tudo o que passei para o concluir. Obrigado por tudo, acredita que não será esquecido.

A todos os amigos que tive o prazer de conhecer no meu percurso académico. Um especial obrigado ao Omar, à Natacha e ao Rama pelas gargalhadas e boa disposição.

Aos amigos da terra mais linda da região Oeste, a Cabeça Gorda: “Ché”, Mike, “Gorda”, Hugo, Rui, Neto e “Tunnes”. Obrigado por todos os momentos e apoio que cada um me deu à sua maneira ao longo destes 5 anos.

Resumo

O setor dos edifícios representa uma parte significativa do consumo elétrico mundial. Numa era em que se fala cada vez mais no conceito de sustentabilidade urbana, a contribuição deste setor pode passar por favorecer um design que consiga explorar o recurso solar, não só com vista à produção de energia, mas também como um meio para a diminuição do consumo elétrico. Uma das estratégias passivas mais atraentes é a incorporação propositada de elementos de sombra, para controlar os ganhos solares através de vãos envidraçados, tendo em conta as necessidades térmicas dos espaços. Esta modelação é feita com recurso ao cálculo do fator de sombreamento nas estações de aquecimento e arrefecimento. O objetivo desta dissertação é explorar procedimentos para estimar este fator, com o auxílio de duas abordagens inovadoras neste âmbito, comparando os resultados com os dois métodos previstos na regulamentação portuguesa, selecionando a metodologia mais fiável e económica neste contexto.

As abordagens atuais para determinação do fator de sombreamento são enquadradas pela legislação portuguesa: i) uma metodologia de cálculo que envolve a contabilização de ângulos de obstrução para cada fonte causadora de sombra; ii) em alternativa, pode ser usado um sistema de atribuição de três classes de sombreamento, apoiada numa avaliação qualitativa no local do perfil de obstrução, denominada de regras de simplificação. Os métodos inovadores propostos consistem no cálculo do fator de sombreamento com recurso a um modelo 3D construído a partir de dados LiDAR e através da sobreposição de um diagrama solar em fotografias *fisheye*.

Avaliando a precisão da metodologia *fisheye*, os resultados gerados apontam para erros relativos inferiores a 15% para as orientações mais relevantes, validando a aplicação deste método em situações onde os vãos envidraçados não possuem obstruções relevantes provenientes de palas verticais ou horizontais.

Os dois métodos propostos nesta dissertação revelam uma precisão que lhes permite serem considerados para o cálculo do fator de sombreamento em edifícios, constituindo alternativas vantajosas do ponto de vista da análise do desempenho energético face à metodologia atual. O método *fisheye* é aquele que representa uma maior viabilidade económica que, associada a uma possível portabilidade para dispositivos móveis, pode trazer benefícios ao nível da certificação energética e tornar-se a referência no que toca ao cálculo do fator de sombreamento em edifícios.

Palavras-Chave: Fator de sombreamento, LiDAR, método fotográfico *fisheye*, ganhos solares.

Abstract

The buildings sector represents a significant part of the world's electricity consumption. At a time where the concept of urban sustainability is increasingly being a topic of discussion, the contribution of this sector may favor a design that can exploit the solar resource, not only as a way to produce energy, but also as a means to reduce the consumption. One of the most attractive passive strategies is the deliberate incorporation of shade elements to control solar gains through glazed spans, taking into account the thermal needs of the spaces. This modeling is accomplished using the calculation of the shading reduction factor in the heating and cooling seasons. The objective of this dissertation is to explore procedures to estimate this factor, with the help of two innovative approaches in this field, comparing the results with the two methods provided in the Portuguese regulation, selecting the most reliable and economic methodology in this context.

The current approaches to determining the shading reduction factor are framed by the Portuguese legislation: i) a calculation methodology that involves the accounting of obstruction angles for each source causing shade; ii) Alternatively, a system of three shading classes can be used, based on a qualitative on-site assessment of the obstruction profile, called simplification rules. The proposed innovative methods consist of the calculation of the shading reduction factor using a 3D model constructed from LiDAR data and through the superposition of a solar diagram in fisheye photographs.

Evaluating the accuracy of the fisheye methodology, the generated results point to relative errors of less than 15% for the most relevant orientations, validating the application of this method in situations where the glazed spans do not have relevant obstructions from fins or overhangs.

The two methods proposed in this dissertation reveal a precision that allows them to be considered for the calculation of the shading reduction factor in buildings, constituting advantageous alternatives from the point of view of the energy performance analysis against the current methodology. The fisheye method is the one that represents greater economic viability that coupled with possible portability for mobile devices can bring benefits to experts in energy certification and become the benchmark for shading reduction factor calculation in buildings.

Keywords: Shading reduction factor, LiDAR, fisheye photographic method, Solar gains.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Acrónimos	xv
Simbologia e Notações.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento Geral.....	1
1.2. Objetivo.....	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
2. Estado da arte	5
2.1. Métodos de ambiente CAD	5
2.1.1 SOMBREIRO	5
2.1.2. TownScope.....	6
2.1.3. Solar3DBR	6
2.2. Modelos Digitais de Elevação	7
2.2.1. GOSOL.....	7
2.2.2. Solar Out of LiDAR (SOL)	8
2.2.3. Solar Analyst	9
2.3. Aparelhos de registo de obstruções no local	9
2.3.1. SunEye 210 Shade Tool	9
2.3.2. Panorama Master.....	10
2.4. Metodologias previstas na legislação portuguesa.....	11
2.4.1. Metodologia de Cálculo	11
2.4.1.1. Fator de sombreamento do horizonte	11
2.4.1.2. Fator de sombreamento por elementos horizontais e verticais.....	13
2.4.2. Regras de Simplificação	15
3. Metodologia.....	19
3.1. Local de estudo.....	19
3.2. Definição dos períodos de cálculo.....	20
3.3. Aplicação das metodologias previstas na legislação portuguesa.....	20
3.4. Método SOL – LiDAR	21
3.4.1. Identificação do vão envidraçado no MDS	21

3.4.2.	Remoção de pontos auto-sombreados	23
3.4.3.	Cálculo do fator de sombreamento.....	24
3.5.	Fotografia fisheye.....	25
3.5.1.	Equipamento utilizado.....	26
3.5.2.	Aquisição e processamento de imagem.....	26
3.5.3.	Importação, tratamento e sobreposição do modelo de radiação solar	29
3.5.4.	Cálculo do fator de sombreamento.....	34
4.	Resultados	37
4.1.	Metodologias presentes na legislação portuguesa versus Método LiDAR	37
4.2.	Metodologia fisheye versus Método LiDAR	40
4.3.	Benchmarking	42
5.	Conclusões e trabalho futuro	45
	Referências Bibliográficas	47
A.	Anexos.....	49
	Anexo A - Levantamento fotográfico e pós-processamento pelo método fisheye	49
	Anexo B - Fatores de sombreamento dos vãos envidraçados obtidos pela aplicação da regulamentação portuguesa, método LiDAR e método fisheye	53

Índice de Figuras

Figura 1.1: Consumo de energia final por setor em Portugal. Adaptado de [4].	1
Figura 1.2: Representação de pontos sem sombreado ($F_s=1$) e fortemente sombreados ($F_s<1$) à esquerda e à direita, respetivamente.	2
Figura 2.1: Interface do programa ShadowFX (esquerda). Perfil diário de percentagem de sombreado de janela (direita).	6
Figura 2.2: TownScope. Imagem fisheye gerado (esquerda) e mapas de contornos da duração de sombra (direita) [14].	6
Figura 2.3: Exemplos de mapa de sombra (esquerda) e Diagrama solar (direita) gerados pelo GOSOL [20].	8
Figura 2.4: Projeção da imagem panorâmica gerada pela ferramenta Solar Analyst [25].	9
Figura 2.5: SunEye 210 Shade Tool (esquerda) exemplo de output da ferramenta (direita) [26].	10
Figura 2.6: Panorama Master (esquerda) e exemplo de output da ferramenta (direita) [27].	10
Figura 2.7: Plano de análise do ângulo de horizonte [7].	11
Figura 2.8: Representação de um ângulo de horizonte. Adaptado de: [7].	12
Figura 2.9: Representação de ângulos de de pala vertical (esquerda) e horizonte (direita). Adaptado de: [29].	13
Figura 3.1: Edifício C6 da FCUL. Vãos identificados a amarelo (pisso 2), a vermelho (pisso 4) [28].	19
Figura 3.2: Identificação do hiperponto no MDS (esquerda) a partir das plantas do edifício (direita).	22
Figura 3.3: Localização do vão envidraçado nos hiperpontos do MDS.	23
Figura 3.4: Demonstração dos limites de exclusão dos pontos auto-sombreados.	24
Figura 3.5: Etapas da construção do método fisheye para o cálculo do fator de sombreado.	25
Figura 3.6: Esquema de montagem da lente fisheye num dispositivo móvel [31].	26
Figura 3.7: Fotografia fisheye original retirada no vão SSE ₂ .	27
Figura 3.8: Determinação do centro da fotografia fisheye retirada no vão SSE ₂ .	28
Figura 3.9: Correção de pontos indesejados (esquerda) e resultado final do processamento de imagem efetuado (direita).	29
Figura 3.10: Posição do Sol no sistema de coordenadas do objeto.	30
Figura 3.11: Modelo geométrico da câmara fisheye [33].	31
Figura 3.12: Relação entre a posição do Sol e os sistemas de coordenadas utilizados.	33
Figura 3.13: Sobreposição do modelo solar para o dia 21 de Dezembro na vista do vão SSE ₂ .	34
Figura 4.1: Fatores de sombreado obtidos através do método LiDAR e das metodologias previstas na legislação na estação de aquecimento.	39
Figura 4.2: Fatores de sombreado obtidos através do método LiDAR e das metodologias previstas na legislação na estação de arrefecimento.	40
Figura 4.3: Fatores de sombreado obtidos através dos métodos LiDAR e fisheye na estação de aquecimento.	41
Figura 4.4: Fatores de sombreado obtidos através dos métodos LiDAR e fisheye na estação de arrefecimento.	41
Figura 4.5: Fotografia fisheye retirada no vão NNO ₂ .	42
Figura 4.6: Comparação do DMC obtido nas três metodologias aplicadas no estudo para a estação de aquecimento.	43
Figura 4.7: Comparação do DMC obtido nas três metodologias aplicadas no estudo para a estação de arrefecimento.	44
Figura A.1: Fotografia fisheye original retirada no vão NNO ₂ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita).	49

Figura A.2: Fotografia fisheye original retirada no vão NNO_{J_2} (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita).....	49
Figura A.3: Fotografia fisheye original retirada no vão NNO_{J_4} (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita).....	50
Figura A.4: Fotografia fisheye original retirada no vão ENE_2 (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 20 de Abril.....	50
Figura A.5: Fotografia fisheye original retirada no vão OSO_2 (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 4 de Fevereiro.....	50
Figura A.6: Fotografia fisheye original retirada no vão OSO_{P_2} (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 4 de Fevereiro.....	51
Figura A.7: Fotografia fisheye original retirada no vão SSE_2 (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 21 de Dezembro.....	51
Figura A.8: Fotografia fisheye original retirada no vão SSE_{J_2} (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 21 de Dezembro.....	51
Figura A.9: Fotografia fisheye original retirada no vão SSE_{J_4} (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 21 de Dezembro.....	52

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Valores do fator de sombreamento do horizonte F_h na estação de aquecimento para Portugal Continental. Adaptado de: [7].	12
Tabela 2.2: Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais F_f na estação de aquecimento. Adaptado de: [7].	14
Tabela 2.3: Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais F_f na estação de arrefecimento. Adaptado de: [7].	14
Tabela 2.4: Valores dos fatores de sombreamento de elementos horizontais F_o na estação de aquecimento. Adaptado de: [7].	15
Tabela 2.5: Valores dos fatores de sombreamento de elementos horizontais F_o na estação de arrefecimento. Adaptado de: [7].	15
Tabela 2.6: Regras de simplificação para o cálculo do fator de sombreamento na estação de aquecimento. Adaptado de: [9].	16
Tabela 2.7: Regras de simplificação para o cálculo do fator de sombreamento na estação de arrefecimento. Adaptado de: [9].	16
Tabela 2.8: Comparação entre os vários métodos de cálculo de sombras existente na literatura.	17
Tabela 3.1: Categorização dos vãos envidraçados identificados.	20
Tabela 3.2: Propriedades óticas dos dispositivos utilizados.	26
Tabela 4.1: Perfil de obstrução dos vãos envidraçados em estudo.	38
Tabela A.1: Fatores de sombreamento obtidos pelos diferentes métodos aplicados na estação de aquecimento.	53
Tabela A.2: Fatores de sombreamento obtidos pelos diferentes métodos aplicados na estação de arrefecimento.	53

Acrónimos

OIM	Organização Internacional de Migração
GEE	Gases de Efeito de Estufa
UE	União Europeia
NZEB	Net Zero Energy Building
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
MDS	Modelo Digital de Superfície
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
SVF	<i>Sky View Factor</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
SOL	<i>Solar Out of LiDAR</i>
NNO	Nor-Noroeste
ENE	És-Nordeste
OSO	Oés-Sudoeste
SSE	Su-Sudeste
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>

Simbologia e Notações

α	Ângulo de horizonte [°]
α_{inf}	Ângulo de horizonte do limite inferior do intervalo de interpolação [°]
α_s	Altura solar [°]
α_{sup}	Ângulo de horizonte do limite superior do intervalo de interpolação [°]
β	Ângulo de pala vertical [°]
γ	Ângulo de pala horizontal [°]
δ	Declinação solar [°]
Δx	Distância horizontal entre o vão envidraçado e o obstáculo [m]
φ	Latitude local [°]
θ	Ângulo entre o azimute solar e a direção Este no sentido anti-horário [°]
ψ	Azimute solar [°]
ψ_{visada}	Azimute da fachada [°]
ω	Ângulo horário [°]
A_s	Área efetiva coletora de radiação solar [m ²]
C_{cam}	Comprimento do sensor da câmara [m]
$D_{fac,MDS}$	Comprimento da fachada no MDS [m]
$D_{fac,planta}$	Comprimento da fachada na planta [adimensional]
$D_{horizontal}$	Distância entre o centro do vão envidraçado e a extremidade da fonte de sombreamento horizontal que cruza o plano da fachada [m]
DMC	Diferença face à Metodologia de Cálculo [%]
$D_{vão,MDS}$	Distância entre a extremidade da fachada e o vão envidraçado pretendido no MDS [m]
$D_{vão,planta}$	Distância da extremidade da fachada ao vão envidraçado pretendido na planta [adimensional]
$D_{vertical}$	Distância entre o centro do vão envidraçado e a extremidade da fonte de sombreamento vertical que cruza o plano da fachada [m]
ER	Erro Relativo [%]
F_f	Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado [adimensional]
F_h	Fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores ao edifício [adimensional]
$F_{h,inf}$	Fator de sombreamento do limite inferior do intervalo de interpolação [adimensional]
$F_{h,sup}$	Fator de sombreamento do limite superior do intervalo de interpolação [adimensional]
f_{lente}	Distância focal da lente <i>fisheye</i> [m]
F_o	Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado [adimensional]
F_s	Fator de sombreamento [adimensional]
$F_{s,aquec}$	Fator de sombreamento na estação de aquecimento [adimensional]
$F_{s,arref}$	Fator de sombreamento na estação de arrefecimento [adimensional]
$F_{s,i}$	Fator de sombreamento do método em análise [adimensional]

$F_{s,LiDAR}$	Fator de sombreamento obtido através do método LiDAR [adimensional]
$F_{s,MC}$	Fator de sombreamento obtido através da metodologia de cálculo [adimensional]
f_{smart}	Distância focal da câmara traseira do <i>smartphone</i> [m]
$G_{sol,arref}$	Energia solar média incidente numa superfície vertical durante toda a estação de arrefecimento [kWh/m ²]
G_{sul}	Valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical a Sul durante a estação de aquecimento [kWh/m ²]
H	Pé-direito [m]
h_{envidr}	Elevação do ponto central do envidraçado [m]
h_{obstr}	Elevação da obstrução [m]
I_{dir}	Radiação solar direta [W/m ²]
I_{dif}	Radiação solar difusa [W/m ²]
I_g	Radiação solar global incidente [W/m ²]
$I_{g,s}$	Radiação solar global incidente sem obstrução do horizonte [W/m ²]
J	Dia Juliano [dias]
L_{cam}	Largura do sensor da câmara [m]
M	Duração da estação de aquecimento [meses]
Np_{obstr}	Número de píxeis representativos de obstrução [píxeis]
$Np_{céu}$	Número de píxeis representativos de céu [píxeis]
Nx_{pix}	Número de píxeis constituintes do eixo X do sistema de coordenadas da imagem <i>fisheye</i> [píxeis]
Ny_{pix}	Número de píxeis constituintes do eixo Y do sistema de coordenadas da imagem <i>fisheye</i> [píxeis]
P	Número do piso em estudo [adimensional]
$P_{horizontal}$	Distância entre o plano do vão e a ponta exterior da fonte de sombreamento horizontal [m]
$P_{vertical}$	Distância entre o plano do vão e a ponta exterior da fonte de sombreamento vertical [m]
$Q_{sol,aquec}$	Ganhos solares brutos através de vãos envidraçados na estação de aquecimento [kWh]
$Q_{sol,arref}$	Ganhos solares brutos através de vãos envidraçados na estação de arrefecimento [kWh]
R	Raio da fotografia <i>fisheye</i> [m]
r	Fator de escala [m]
Re	Matriz de rotação espacial [adimensional]
t	Hora do dia [h]
X_j	Fator de orientação para diferentes exposições
Z_{base}	Altura base do hiperponto [m]
Z_{min}	Altura mínima do piso [m]
Z_{max}	Altura máxima do piso [m]

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

Vivemos numa época em que as grandes áreas urbanas são proeminentes e onde cada vez mais se observa o fenómeno do êxodo rural, isto é, a migração da população do campo para a cidade. Segundo o relatório de 2015 da Organização Internacional de Migração (OIM) [1] - aproximadamente 54% da população mundial habita em áreas urbanas, estimando-se que este indicador possa atingir os 67% no ano de 2050. Este crescimento acentuado das áreas metropolitanas conduz, invariavelmente, a um aumento da procura de energia elétrica desafiando o panorama energético como atualmente o conhecemos. Temas como a introdução de veículos elétricos, a produção de energia de forma descentralizada e o aumento da eficiência da rede de transportes, cada vez mais se afiguram como realidades futuras que convergem no conceito de sustentabilidade urbana. Esta noção ganha uma maior relevância numa época de cumprimento de metas estabelecidas para o ano de 2020, em que todos os países da União Europeia (UE) devem reduzir as emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) em 20% face aos níveis de 1990, melhorar a sua eficiência energética em 20% e atingir a mesma percentagem no que toca à penetração de renováveis no *mix* energético [2]. Assim, no âmbito de uma cidade sustentável, foi promulgado que até ao final da presente década qualquer nova construção teria de ser reconhecida como Net Zero Energy Building (NZEB), isto é, deve existir um balanço energético nulo entre a produção e o consumo do edifício numa base anual [3].

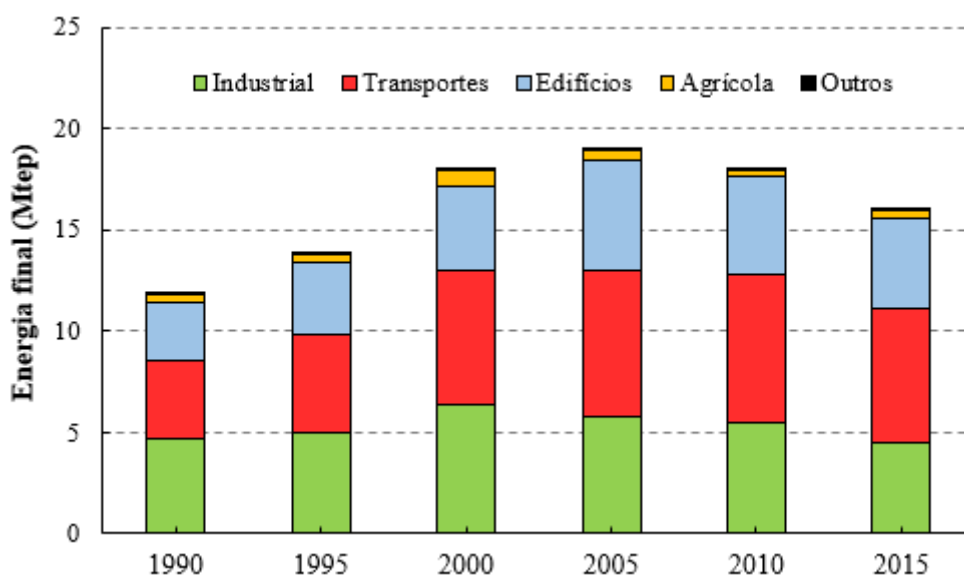


Figura 1.1: Consumo de energia final por setor em Portugal. Adaptado de [4].

O crescimento populacional e o desenvolvimento económico acentuados desde o início da segunda metade do século passado permitem que o setor dos edifícios seja atualmente o maior consumidor de energia mundial [5]. Observando a Figura 1.1, retira-se que Portugal seguiu essa mesma tendência, na medida em que o consumo energético final aumentou significativamente entre 1990 e 2005 [4] fruto da grande expansão urbana verificada durante o mesmo período. Setores como os transportes e os edifícios elevaram o seu consumo para novos máximos em território nacional mantendo-se esse paradigma energético até aos dias de hoje, porém registando um consumo de energia final menor fruto de políticas de redução de consumo.

A contribuição dada pelos edifícios para a era da sustentabilidade urbana pode passar por favorecer um design que potencie um maior aproveitamento do recurso solar existente através do uso de estratégias passivas. Estas medidas, para além de serem agentes de redução do consumo energético, são um modo de integrar energia renovável de forma flexível e atrativa, podendo aumentar o conforto visual nos espaços se for favorecida uma maior entrada de iluminação natural. Estudos realizados referem que estes objetivos podem ser atingidos com um custo semelhante ao de um design convencional [6].

A viabilidade destes sistemas tem uma forte relação com a disposição do local e deve ser estudada numa fase prévia do projeto para um correto dimensionamento dos mecanismos. Se existirem obstáculos capazes de bloquear o acesso direto à radiação solar durante uma grande parte do ano, o design atual do edifício pode ser penalizador do ponto de vista dos ganhos solares pelos vãos envidraçados. Isto pode acarretar um aumento das cargas de climatização na estação de aquecimento e, conseqüentemente, do consumo energético. No Verão, por oposição, estas obstruções são bastante eficazes no controlo do sobreaquecimento dos espaços diminuindo os ganhos de climatização por arrefecimento. O compromisso entre estas duas vertentes é uma das estratégias passivas mais importantes no design de um edifício.

Assim, o sombreamento pode ser causado por obstruções no horizonte (edifícios vizinhos, vegetação, orografia) ou por elementos do próprio edifício, tais como palas, varandas ou contornos do vão externo à caixilharia [7].

A modelação deste processo é feita com recurso ao cálculo do fator de sombreamento (F_s), que se define como o rácio entre a radiação solar global recebida numa determinada superfície na presença de obstáculos e na ausência dos mesmos [8]. Este é um parâmetro que depende da latitude, longitude, orientação, clima local e dos meses que se consideram na estação de aquecimento e arrefecimento [7] permitindo corrigir os ganhos solares consoante as necessidades energéticas dos edifícios através da introdução de mecanismos de sombreamento que se adequam a cada estação. Define-se como um parâmetro adimensional compreendido entre 0 e 1 e, de um modo geral, quanto maior este fator menor o sombreamento do objeto no período de análise (Figura 1.2).

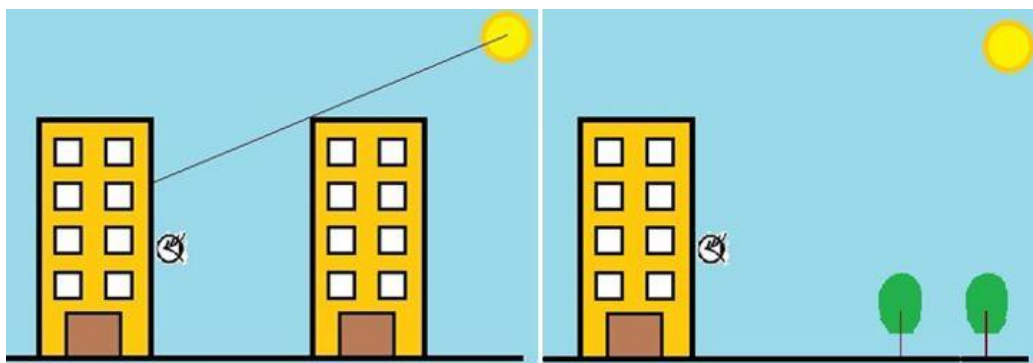


Figura 1.2: Representação de pontos sem sombreamento ($F_s=1$) e fortemente sombreados ($F_s<1$) à esquerda e à direita, respetivamente.

Na estação de aquecimento, é conveniente a potencialização dos ganhos solares ($Q_{sol,aquec}$) pelos envidraçados do edifício. Um elevado fator de sombreamento (F_s) desses vãos permite uma maior entrada de radiação solar no espaço e um previsível aumento da temperatura interior. A equação (1.1) ilustra a relação de proporcionalidade direta entre o fator de sombreamento e os ganhos solares de determinado vão em estudo.

$$Q_{sol,aquec}[kWh] = G_{sul} F_s X_j A_s M \quad (1.1)$$

onde G_{sul} representa ao valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical a Sul, em kWh/m², durante a estação de aquecimento, X_j é o fator de orientação para diferentes exposições, A_s corresponde à área efetiva coletora de radiação solar [m²] e M representa a duração da estação de aquecimento em meses.

Por outro lado, na estação de arrefecimento, para evitar situações de desconforto térmico devido a uma temperatura interior elevada, é útil registar um fator de sombreamento baixo, reduzindo os ganhos solares por vãos envidraçados ($Q_{sol,arref}$) expressos pela equação (1.2).

$$Q_{sol,arref}[kWh] = G_{sol,arref} F_{s,arref} A_s \quad (1.2)$$

Onde $G_{sol,arref}$ representa a energia solar média incidente, em kWh/m², no vão envidraçado durante toda a estação de arrefecimento.

De notar que o fator de sombreamento não pretende quantificar a sombra (ou falta dela) para determinado local, mas sim o acesso solar que este tem face ao que é disponibilizado. Logo, uma fachada pode encontrar-se sombreada num determinado período do dia e mesmo assim ter um fator igual a 1, correspondente a um ponto sem sombreamento. O mesmo é válido se essa mesma fachada se encontrar permanentemente sombreada ao longo do ano, bastando que a sombra seja provocada pelo próprio plano da fachada. A literatura existente atribui a este fenómeno a designação de *self-shadowing point*, em português ponto auto-sombreado, uma nuance a ter em conta ao calcular o fator de sombreamento com modelos representativos da morfologia urbana já que os mesmos habitualmente apenas indicam se as células do objeto se encontram sombreadas e não a que se deve tal ocorrência.

Segundo a legislação portuguesa, no âmbito da certificação energética de edifícios, o fator de sombreamento é obtido através de duas possíveis abordagens: i) uma metodologia de cálculo rigorosa onde se calculam ângulos de obstrução de todas as fontes de sombra existentes [7]; ii) um conjunto de regras de simplificação que atribuem uma classe de sombreamento baseada numa avaliação efetuada no local [9]. Dado o processo moroso que constitui a metodologia de cálculo, o perito qualificado tende a utilizar as regras de simplificação nos seus estudos de certificação energética. Ainda assim, não existem certezas sobre a precisão das mesmas face à metodologia de cálculo convencional, podendo estar a incorrer numa penalização na análise efetuada, como por exemplo, sobrestimando os ganhos solares na estação de arrefecimento.

O fator de sombreamento é um indicador que se encontra geralmente associado a um vão envidraçado, porém dada a natureza pontual do cálculo, uma abordagem semelhante pode ser tomada para elementos opacos, inclusive para aplicações fotovoltaicas [8]. Assim, alargando o conceito de fator de sombreamento para a escala de uma fachada e conjugando dados da radiação solar incidente podemos identificar zonas de elevado potencial fotovoltaico.

Com o desenvolvimento desta dissertação pretende-se avaliar o impacto da morfologia urbana no acesso ao recurso solar propondo duas abordagens alternativas para o cálculo do fator de sombreamento em fachadas.

1.2. Objetivo

O objetivo da dissertação proposta é calcular o fator de sombreamento de vãos envidraçados, no edifício C6 do campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), considerando diferentes perfis de obstrução do horizonte. Para isso são propostas duas metodologias distintas, uma recorrendo a um Modelo Digital de Superfície (MDS) previamente obtido através de dados Light Detection and Ranging (LiDAR) e outra tendo em conta um levantamento fotográfico com recurso a uma lente fisheye. A estes dois métodos inovadores juntam-se as abordagens atuais previstas na legislação portuguesa, nomeadamente, uma metodologia detalhada que envolve o cálculo dos ângulos de obstrução do local e uma alternativa utilizando regras de simplificação estabelecidas para cada tipo de perfil do horizonte.

Assim, esta dissertação pretende responder às seguintes questões:

- Serão as regras de simplificação suficientemente precisas para dispensar a avaliação rigorosa dos ângulos de obstrução aplicada na metodologia de cálculo?
- Qual a capacidade de detalhe, precisão e viabilidade de cada método no cálculo do fator de sombreamento em edifícios?
- Considerando as metodologias propostas nesta dissertação, qual se apresenta como o melhor recurso para o cálculo do fator de sombreamento em edifícios?

1.3. Estrutura da dissertação

De modo a cumprir os objetivos propostos, esta dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

O presente capítulo fornece um enquadramento geral do fator de sombreamento no panorama energético do setor dos edifícios. Aqui são definidos os objetivos deste trabalho e as principais questões que o mesmo pretende responder.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura existente no que diz respeito ao cálculo do fator de sombreamento. A pesquisa filtrou resultados de diversos ambientes, desde os mais antigos e rudimentares *softwares* CAD (*Computer Aided Design*) aos recentes e sofisticados modelos urbanos 3D, passando pelos aparelhos de registo de obstruções no local e pelos métodos previstos na legislação portuguesa.

No Capítulo 3 são apresentadas as metodologias aplicadas nesta dissertação. Numa primeira parte é descrito o local de estudo sendo identificados os vãos envidraçados sujeitos ao cálculo do fator de sombreamento. De seguida, são detalhadas as duas metodologias propostas nesta dissertação. Aqui são enunciados todos os pressupostos necessários ao cálculo do fator de sombreamento para vãos envidraçados em cada método aplicado.

O Capítulo 4 compila os resultados obtidos através da aplicação de cada um dos métodos. Apontando as diferenças e semelhanças entre cada uma das abordagens é discutida a aplicabilidade de cada metodologia proposta juntamente com a legislação atualmente em vigor.

No Capítulo 5 são enunciadas as conclusões relevantes do trabalho desenvolvido bem como sugestões com vista a um desenvolvimento futuro.

2. Estado da arte

Atualmente existe uma grande variabilidade de sistemas que determinam a sombra numa dada área objetivo. A pesquisa bibliográfica efetuada permitiu filtrar os métodos nos quais são reconhecidas as potencialidades de cálculo do fator de sombreamento categorizando-os em quatro grupos: Métodos de ambiente CAD, abordagens que recorrem a um Modelo Digital de Elevação (MDE), aparelhos de registo de obstruções no local e metodologias previstas na legislação portuguesa.

2.1. Métodos de ambiente CAD

O cálculo de uma sombra num dado intervalo de tempo é intrinsecamente dinâmico. Assim, exige o auxílio de um programa que consiga modelar essa variação. Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento de ferramentas CAD, surgiram os primeiros modelos tridimensionais incorporando algoritmos capazes de calcular um mapa de sombras ao longo de um intervalo temporal de simulação.

2.1.1 SOMBRERO

Desenvolvido na Alemanha, o *software* SOMBRERO calcula o sombreamento resultante de obstruções variadas tendo em conta a localização espacial do objeto em análise. O programa contém uma interface simples na qual os objetos são introduzidos como polígonos pelas suas coordenadas cartesianas. Qualquer forma desenhada pode ser assumida como um plano recetor de sombra no qual o *software* avalia a existência de sombreamento no mesmo [10]. Após a configuração do horizonte, o programa faz a projeção de cada elemento que constitui um obstáculo à radiação solar direta com vista ao cálculo de um coeficiente geométrico de sombreamento. Este corresponde ao rácio entre a área sombreada e total do objeto-alvo para uma dada hora.

O SOMBRERO obtém as áreas referenciadas através de uma contagem do número de pixéis sombreados antes e depois da projeção, esta abordagem torna o programa mais simples e leve reduzindo o tempo de processamento que resultaria da necessidade de lidar com as sobreposições de sombras provenientes de diferentes projeções [11].

Este *software* foi desenhado à semelhança de um modelo já existente criado por arquitetos israelitas, o SHADING [12]. Ambos constituem uma forma de calcular os requisitos de exposição solar e sombreamento de um edifício, sendo capazes de fornecer mapas de sombras ao utilizador para futuras simulações. O modelo SOMBRERO encontra-se disponível para aquisição, embora já não existam atualizações do mesmo. Um programa com uma interface mais acessível e que acompanhou o avanço da tecnologia CAD é o ShadowFX (Figura 2.1). Com um método de cálculo semelhante, permite ao utilizador o acesso a uma biblioteca de objetos pré-desenhados, como edifícios, palas e árvores, de modo a permitir um uso fácil e rápido. O custo desta ferramenta é aproximadamente de 88€ [13].

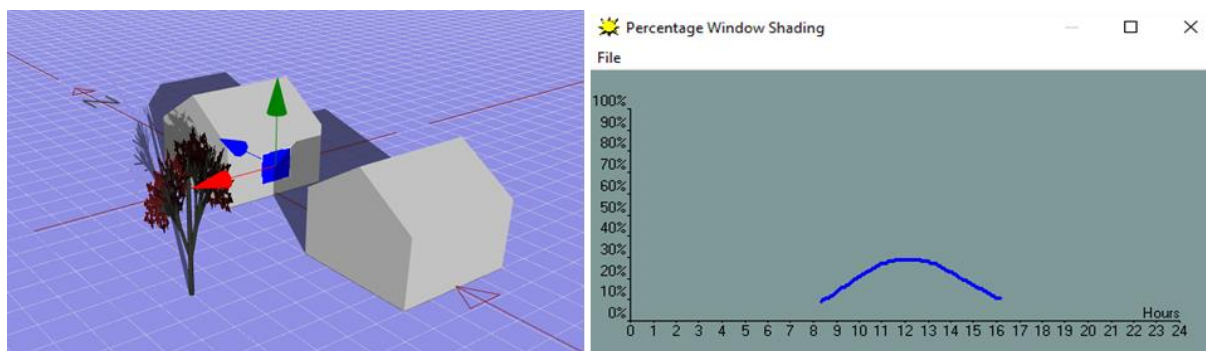


Figura 2.1: Interface do programa ShadowFX (esquerda). Perfil diário de percentagem de sombreamento de janela (direita).

2.1.2. TownScope

Idealizado por investigadores belgas da Universidade de Liege, o TownScope serve de suporte na fase de planeamento para o design de projetos urbanos sustentáveis. Consiste num sistema de informação 3D que permite importar dados de ambiente CAD ao mesmo tempo que procede à análise da penetração de radiação solar e conforto térmico ou visual de áreas a designar pelo utilizador. Criando um modelo tridimensional são calculadas as radiações direta, difusa e refletida para todos os pontos da área em estudo. Por outro lado, ao cruzar os ângulos de obstrução e a altura solar ao longo da cúpula hemisférica, obtém-se um mapa de contornos da duração de sombra da área de análise como se pode verificar na Figura 2.2. O programa consegue ainda gerar imagens *fisheye* de pontos a definir pelo utilizador visando o cálculo da fração de céu visível ou *Sky View Factor* (SVF). O TownScope possui uma versão *free-trial* no mercado válida por duas semanas, sendo o custo da versão completa na ordem dos 450€ para fins académicos [14].

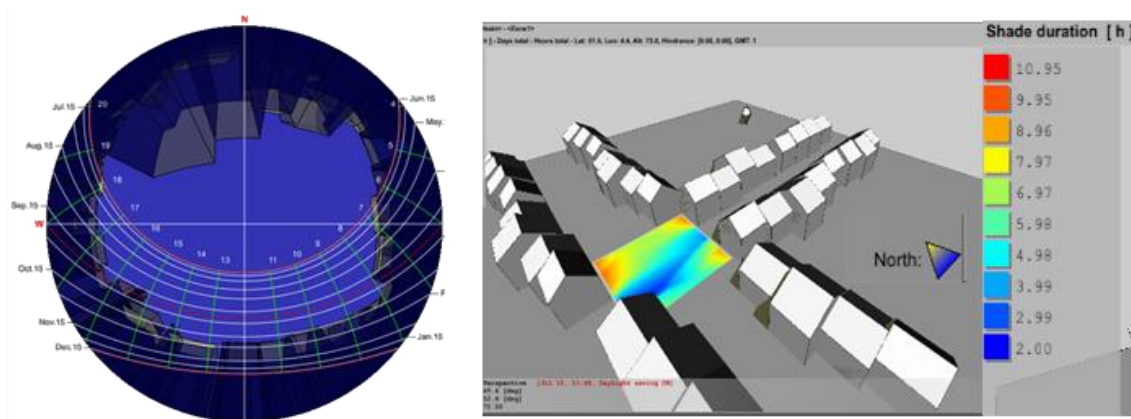


Figura 2.2: TownScope. Imagem *fisheye* gerado (esquerda) e mapas de contornos da duração de sombra (direita) [14].

2.1.3. Solar3DBR

Desenvolvido como uma extensão do Google SketchUp [15], o Solar3DBR foi inicialmente criado para estudar os efeitos da projeção de sombras por obstruções na performance de módulos fotovoltaicos. O programa calcula a radiação incidente nas superfícies 3D e os seus fatores de sombreamento correspondentes tendo por base o modelo da radiação difusa anisotrópica de Perez, onde são consideradas três componentes da radiação difusa (brilho do horizonte, isotrópica e circumsolar) [16]. A criação de uma matriz com estes fatores introduz precisão e simplicidade aliado a um processamento

rápido [17]. O Google SketchUp, pela sua interface e utilização intuitivas, facilita o uso desta metodologia para uma análise quantitativa do problema fornecendo em tempo real representações gráficas que suportam os dados obtidos. O Solar3DBR define fator de sombreamento como o quociente entre a irradiância bloqueada por interferências ao redor da instalação e a irradiância global num plano inclinado num dado instante [18]. Assim, o valor calculado pelo algoritmo corresponde ao complementar do fator de sombreamento por definição, utilizado no cálculo dos ganhos solares de um vão envidraçado.

2.2. Modelos Digitais de Elevação

Recentemente, os algoritmos de sombra têm sido aplicados a modelos de radiação solar em superfícies topográficas complexas. Estas rotinas de cálculo têm vindo a ser integradas para calcular o efeito do sombreamento causado pela própria elevação da superfície. Habitualmente as rotinas consistem numa análise, para cada célula do MDE, do ângulo de obstrução em cada uma das direções comparando com a altura solar verificada gerando mapas de sombra [19]. Existem dois tipos de MDE, um que considera apenas a elevação do terreno, designado por Modelo Digital do Terreno (MDT), e outro que ainda contabiliza todos os edifícios, árvores e outros objetos relevantes denominado por Modelo Digital de Superfície (MDS). Para estudar o fator de sombreamento é necessário adicionar ao MDT todo o parque edificado e obstruções relevantes. Quanto ao MDS, estas especificidades encontram-se detalhadas e o modelo de radiação pode ser aplicado diretamente. Estes métodos têm o potencial necessário para o cálculo do fator de sombreamento, porém não o permitem fazer de forma explícita, sendo necessário o tratamento dos mapas de sombra numa fase posterior.

2.2.1. GOSOL

O GOSOL é um programa de simulação alemão que foi especialmente desenvolvido para estudos do potencial da energia solar em ambiente urbano. Constitui um dos primeiros *softwares* criados com o intuito de promover uma simbiose entre avaliação energética e planeamento urbano. Primeiramente são definidas as características dos edifícios que serão utilizados na simulação energética, bem como outras fontes de sombreamento, como a vegetação e edifícios existentes que não carecem de análise. De seguida é adicionado o MDT e procedida a simulação. O GOSOL demonstra a sua utilidade na fase de planeamento ao ser capaz de quantificar as perdas de radiação solar incidente, não só por efeitos de sombreamento, como por orientação desfavorável, permitindo a identificação de problemas do design atual num estudo prévio. Diagramas solares e mapas de sombras, como os da Figura 2.3, constituem também *outputs* deste programa que permite importar modelos mais complexos construídos em programas CAD [20].

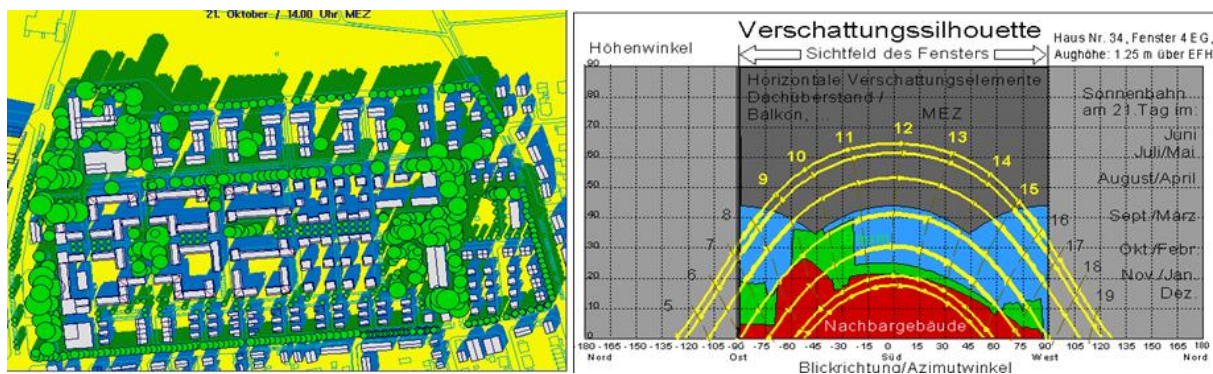


Figura 2.3: Exemplos de mapa de sombra (esquerda) e Diagrama solar (direita) gerados pelo GOSOL [20].

2.2.2. Solar Out of LiDAR (SOL)

O programa SOL, desenvolvido na FCUL, permite a análise do potencial solar em ambiente urbano com recurso a um MDS, obtido através de um levantamento LiDAR. Estas leituras são feitas via aérea e baseadas no intervalo de tempo entre a emissão de um feixe laser infravermelho e a deteção do sinal refletido. Tendo por base esta medição é possível estimar a distância entre o emissor e o recetor construindo um mapa com informação detalhada da superfície. Os dados foram recolhidos com uma densidade de medição de 20 pontos por m^2 e posteriormente rearranjados para uma resolução $1 \times 1 m^2$ em todo o MDS. No que toca aos elementos de fachadas, existe a particularidade de diversos pontos possuírem diferentes cotas para o mesmo par de coordenadas XY. A abordagem tomada para ultrapassar este problema levou à criação de hiperpontos que englobam todo o conjunto de dados verticais permitindo a sua representação com um intervalo de 1m até atingirem o plano horizontal mais próximo [17].

Recorrendo à base de dados do SOLTERM, obtêm-se valores de irradiância horizontal média, direta e difusa, medidos de hora a hora ao longo de 30 anos. Para transpor estes dados para superfícies inclinadas é empregue uma metodologia baseada na posição do Sol amplamente descrita por Redweik et al. (2015) [21]. É descartada a componente refletida da radiação e utilizado o modelo isotrópico da radiação difusa. Assim, zonas sombreadas podem estar expostas a radiação difusa bastando apenas que uma porção do céu seja visível [22].

Para cada intervalo de tempo de simulação, um algoritmo de sombra toma cada ponto do MDS como uma fonte de sombreamento traçando uma linha oposta à direção do Sol. Se esta linha é intercetada por outra célula do modelo de elevação, então todas as que possuem uma cota inferior para o mesmo hiperponto encontram-se sombreadas. Estes pixéis recebem o atributo 0 e aos restantes é lhes dado o valor 1 criando um mapa de sombras binário que ao ser cruzado com a base de dados da radiação direta, exclui esta componente dos pontos que se encontrem sombreados. Assim, um mapa da radiação global é obtido como *output* para cada intervalo de tempo da simulação, correspondendo à soma das componentes direta e difusa [23]. Tendo tudo isto em conta, as obstruções existentes no horizonte e associando alguma geometria solar é possível calcular o fator de sombreamento para qualquer ponto da fachada.

2.2.3. Solar Analyst

O Solar Analyst é uma ferramenta desenvolvida como uma extensão do *software* ArcGIS [24]. Este calcula um mapa de irradiação tendo por base um MDS e as coordenadas geográficas do local de análise. O método de cálculo da radiação incidente consiste numa divisão equiangular da cúpula hemisférica considerando o modelo isotrópico da radiação difusa. O programa cria uma imagem panorâmica da cúpula para cada célula do modelo digital de elevação procurando para cada direção o maior ângulo de obstrução existente, o ângulo de horizonte. Estes são transformados para um sistema de coordenadas hemisféricas (zénite e azimute) através de projeções equiangulares. Sobrepondo o diagrama solar é possível estimar, para o ponto em análise, quando é que este se encontra sombreado e que divisões hemisféricas são descartadas para o cálculo da radiação direta incidente [25]. O Solar Analyst não se encontra atualmente programado para o cálculo do fator de sombreamento, porém um pós-processamento da imagem criada pela ferramenta (Figura 2.4) pode permitir a obtenção deste parâmetro.

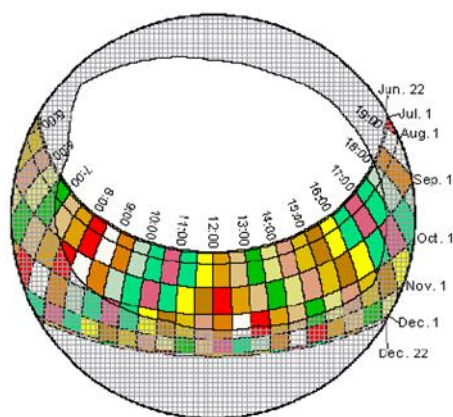


Figura 2.4: Projeção da imagem panorâmica gerada pela ferramenta Solar Analyst [25].

2.3. Aparelhos de registo de obstruções no local

O fator de sombreamento pode também ser extraído a partir da sobreposição de um diagrama solar numa imagem panorâmica que registe todas as obstruções do horizonte. As grandes vantagens destes sistemas residem na portabilidade dos dispositivos e capacidade dos *outputs* gerados de serem exportados para tratamento em diversos programas.

2.3.1. SunEye 210 Shade Tool

O SunEye 210 Shade Tool [26] é um aparelho eletrónico que permite fazer medições do recurso solar com vista a aferir o potencial de produção fotovoltaico do local. Esta ferramenta faz o reconhecimento dos obstáculos existentes no horizonte através de uma câmara *fisheye* possibilitando uma análise visual e quantitativa do nível de obstrução verificado numa imagem panorâmica. Baseando-se na latitude e longitude do local, o mecanismo é capaz de traçar diagramas solares calculando a exposição solar tanto numa base anual, como para períodos especificados pelo utilizador. É também possível obter gráficos como o da Figura 2.5, que relacionam as obstruções no horizonte para cada azimute com o diagrama solar, de modo a deduzir em que alturas do ano o ponto de medição se encontra sombreado. O SunEye 210 Shade Tool possibilita a construção de cenários hipotéticos no local com a função adicionar/remover

obstáculos, permitindo ainda a sobreposição no ecrã de diagramas solares, em tempo real, admitindo o registo em vídeo para identificação de regiões não sombreadas. Uma vez conectado a um computador, o dispositivo exporta todos os dados registados.

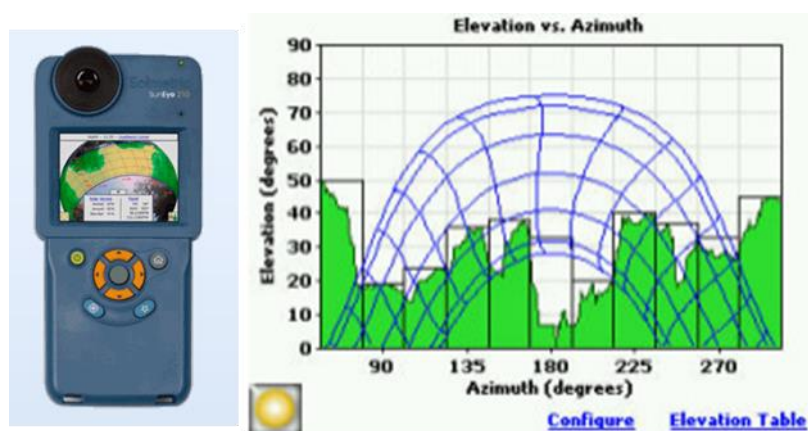


Figura 2.5: SunEye 210 Shade Tool (esquerda) exemplo de *output* da ferramenta (direita) [26].

2.3.2. Panorama Master

O Panorama Master representa outra alternativa no âmbito do estudo de sombreamentos. Consiste num sistema fixador para câmaras digitais suportado por um tripé (Figura 2.6), que permite a rotação da câmara ao longo dos 360° da envolvente, captando sucessivas fotografias com um intervalo de 20° até que seja registado todo o nível de obstrução do horizonte. A justaposição das fotografias, com vista a obtenção de uma única imagem panorâmica, é alcançada recorrendo ao *software* HorizON. Este programa apresenta ainda uma funcionalidade de sobreposição automática de um diagrama solar do local em estudo num processo semelhante ao da ferramenta anterior. O *output* é posteriormente exportado para programas capazes de realizar uma análise do potencial fotovoltaico, como o PV*SOL. Com o auxílio deste *software*, e tendo em conta o perfil de obstrução da imagem panorâmica, é possível avaliar os níveis de sombreamento do local da medição. Assumindo a necessidade de recorrer às duas extensões computacionais, o preço do conjunto Panorama Master e *software* ronda os 1200€, sendo a aquisição do PV*SOL a principal fonte de encarecimento com um custo aproximado de 920€ [27].

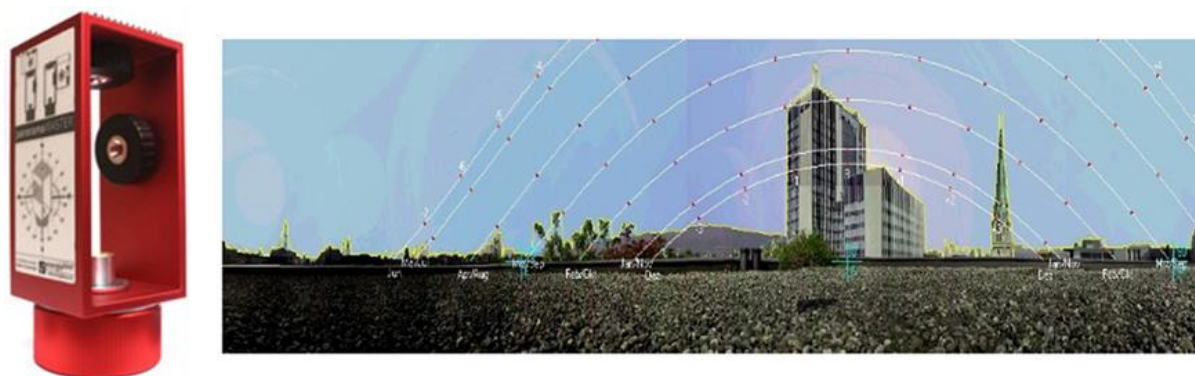


Figura 2.6: Panorama Master (esquerda) e exemplo de *output* da ferramenta (direita) [27].

2.4. Metodologias previstas na legislação portuguesa

A legislação portuguesa prevê dois métodos de cálculo do fator de sombreamento em edifícios. O primeiro segue a metodologia de cálculo baseada nos ângulos de obstrução existentes, enunciada no Despacho (extracto) n° 15793-K/2013 [7], e o segundo considera as regras de simplificação correspondendo uma classe de sombreamento a cada elemento envidraçado de acordo com o Despacho (extracto) n° 15793-E/2013 [9].

2.4.1. Metodologia de Cálculo

A metodologia de cálculo é o processo mais detalhado presente na legislação portuguesa para o cálculo do fator de sombreamento. Pressupõe o cálculo dos ângulos de obstrução das fontes de sombreamento existentes não sendo completamente necessária a análise de possíveis obstáculos no local. Esta abordagem considera três componentes do fator de sombreamento, de acordo com a equação (2.1):

$$F_s = F_h F_o F_f \quad (2.1)$$

Onde F_h é o fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores ao edifício, F_o representa o fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado compreendendo palas e varandas e F_f corresponde ao fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, compreendendo palas verticais, outros corpos ou partes de um edifício [7].

2.4.1.1. Fator de sombreamento do horizonte

No caso da componente de sombreamento provocado pelo horizonte, para a estação de aquecimento, é traçada uma reta que une o ponto central do envidraçado e o ponto mais alto da maior obstrução existente entre dois planos verticais que fazem 60° para cada um dos lados da normal ao envidraçado, como se encontra ilustrado na Figura 2.7 [7].

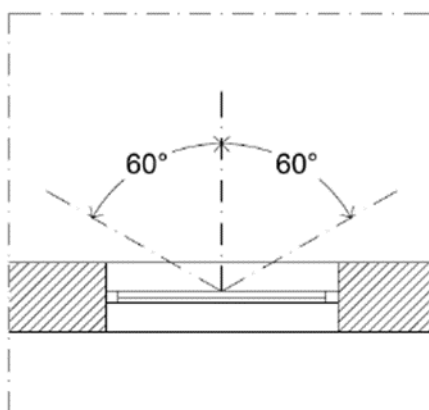


Figura 2.7: Plano de análise do ângulo de horizonte [7].

O ângulo que dado traçado faz com o plano horizontal denomina-se de ângulo de horizonte α (Figura 2.8) e é dado pela equação (2.2):

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h_{obstr} - h_{envidr}}{\Delta x}\right) \quad (2.2)$$

Onde h_{obstr} corresponde à elevação da obstrução, h_{envidr} representa a elevação do ponto central do envidraçado e Δx é a distância horizontal entre o vão envidraçado e o obstáculo. Todas as unidades em metros. Estes podem ser obtidos através da ferramenta Google Earth [28] e constituem o primeiro passo desta metodologia.

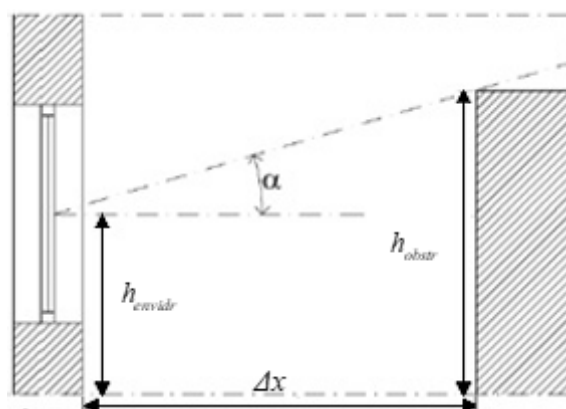


Figura 2.8: Representação de um ângulo de horizonte. Adaptado de: [7].

Associando a orientação do vão a cada valor obtido através do cálculo supramencionado, é atribuído um fator de sombreamento do horizonte de acordo com a informação contida na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores do fator de sombreamento do horizonte F_h na estação de aquecimento para Portugal Continental. Adaptado de: [7].

Ângulo de horizonte (α)	Orientação do vão envidraçado				
	N	NE/NO	E/O	SE/SO	S
0°	1	1	1	1	1
10°	1	0,96	0,94	0,96	0,97
20°	1	0,96	0,84	0,88	0,90
30°	1	0,85	0,71	0,68	0,67
40°	1	0,81	0,61	0,52	0,50
45°	1	0,80	0,58	0,48	0,45

A legislação existente negligencia a contribuição do horizonte para o sombreamento na estação de arrefecimento, como tal prevê que esta tenha o valor de 1 para todas as orientações [7].

Atentando na Tabela 2.1, observam-se valores do fator de sombreamento do horizonte para oito azimutes distintos. Caso a orientação do vão seja diferente das enunciadas toma-se o valor existente da orientação mais próxima. Para casos em que o vão possui uma orientação intermédia entre dois azimutes enunciados na Tabela 2.1 é efetuada a média dos fatores de sombreamento do horizonte correspondentes. Por exemplo, para um vão orientado a És-Nordeste (ENE), o fator de sombreamento do horizonte corresponde à média entre os fatores dos azimutes Este (E) e Nordeste (NE).

O cálculo do ângulo de horizonte pode conduzir a um valor diferente dos que constam na Tabela 2.1, de modo a ultrapassar essa limitação é feita uma interpolação do fator de sombreamento tendo em conta o intervalo de valores em que este se encontra de acordo com a equação (2.3), onde $F_{h,inf}$ e $F_{h,sup}$ representam o fator de sombreamento dos limites inferior e superior do intervalo de interpolação, respetivamente, e α_{inf} e α_{sup} correspondem aos ângulos de horizonte desses mesmos limites.

$$F_h = F_{h,inf} + \frac{F_{h,sup} - F_{h,inf}}{\alpha_{sup} - \alpha_{inf}} (\alpha - \alpha_{inf}) \quad (2.3)$$

2.4.1.2. Fator de sombreamento por elementos horizontais e verticais

As contribuições dos elementos horizontais e verticais são calculadas de forma semelhante ao processo acima descrito, sendo funções dos ângulos de pala horizontal (γ) e vertical (β), respetivamente. Define-se como ângulo de pala horizontal ou vertical, o ângulo entre o plano do vão e uma reta que une a ponta da fonte de sombreamento ao centro do envidraçado [7] (Figura 2.9).

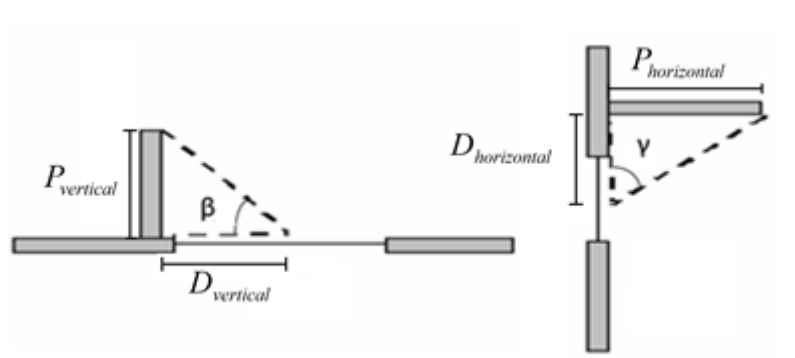


Figura 2.9: Representação de ângulos de pala vertical (esquerda) e horizontal (direita). Adaptado de: [29].

O ângulo de pala vertical é expresso pela razão trigonométrica (2.4), onde $P_{vertical}$ representa a distância, em metros, entre o plano do vão e a ponta exterior da fonte de sombreamento vertical e $D_{vertical}$ corresponde ao comprimento medido, em metros, entre o centro do vão envidraçado e a extremidade da fonte de sombreamento que cruza o plano da fachada.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{P_{vertical}}{D_{vertical}} \right) \quad (2.4)$$

De forma semelhante, o ângulo de pala horizontal é dado pela equação (2.5), onde $P_{horizontal}$ representa a distância, em metros, entre o centro do vão envidraçado e a extremidade da fonte de sombreamento horizontal que cruza o plano da fachada e $D_{horizontal}$ corresponde ao comprimento medido, em metros, entre o plano do vão e a ponta exterior da fonte de sombreamento horizontal.

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{P_{horizontal}}{D_{horizontal}} \right) \quad (2.5)$$

Os ângulos de obstrução acima referidos podem ser calculados através da ferramenta Google Earth [28] ou com recurso a plantas do edifício de estudo, para casos em que as extensões do edifício constituem palas, ou por medições no local se existirem pequenas saliências ou dispositivos de sombreamento que não figurem na planta.

Identificados os ângulos é possível registar os fatores de sombreamento por elementos verticais com o auxílio da Tabela 2.2 e da Tabela 2.3, e os valores correspondentes a elementos horizontais de acordo com a Tabela 2.4 e Tabela 2.5 considerando a mesma abordagem descrita para o cálculo do F_h .

Tabela 2.2: Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais F_f na estação de aquecimento. Adaptado de: [7].

Posição da pala	Ângulo de pala vertical (β)	Orientação do vão envidraçado							
		N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Pala à esquerda	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	1	1	0,97	0,93	0,91	0,87	0,89
	45°	1	1	1	0,95	0,88	0,86	0,80	0,84
	60°	1	1	1	0,91	0,83	0,79	0,72	0,80
Pala à direita	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	0,89	0,87	0,91	0,93	0,97	1	1
	45°	1	0,84	0,80	0,86	0,88	0,95	1	1
	60°	1	0,80	0,72	0,79	0,83	0,91	1	1

Tabela 2.3: Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais F_f na estação de arrefecimento. Adaptado de: [7].

Posição da pala	Ângulo de pala vertical (β)	Orientação do vão envidraçado							
		N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Pala à esquerda	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	1	0,96	0,91	0,91	0,96	0,95	0,86
	45°	1	1	0,96	0,85	0,87	0,95	0,93	0,78
	60°	1	1	0,95	0,77	0,84	0,93	0,88	0,69
Pala à direita	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	0,86	0,95	0,96	0,91	0,91	0,96	1
	45°	1	0,78	0,93	0,95	0,87	0,85	0,96	1
	60°	1	0,69	0,88	0,93	0,84	0,77	0,95	1

Observando a Tabela 2.2 e Tabela 2.3 verificam-se valores distintos consoante a posição da pala. Existindo elementos à esquerda e à direita do vão é considerado o produto de ambos os fatores [7].

Tabela 2.4: Valores dos fatores de sombreamento de elementos horizontais F_o na estação de aquecimento. Adaptado de: [7].

Ângulo da pala horizontal (γ)	Orientação do vão envidraçado									
	N	NE/NO	E/O	SE/SO	S	N	NE/NO	E/O	SE/SO	S
0°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30°	1	0,94	0,84	0,76	0,73	1	0,92	0,82	0,68	0,45
45°	1	0,90	0,74	0,63	0,59	1	0,88	0,72	0,60	0,56
60°	1	0,85	0,64	0,49	0,44	1	0,83	0,62	0,48	0,43

Tabela 2.5: Valores dos fatores de sombreamento de elementos horizontais F_o na estação de arrefecimento. Adaptado de: [7].

Ângulo da pala horizontal (γ)	Orientação do vão envidraçado									
	N	NE/NO	E/O	SE/SO	S	N	NE/NO	E/O	SE/SO	S
0°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30°	0,98	0,86	0,75	0,68	0,63	0,97	0,84	0,74	0,69	0,68
45°	0,97	0,78	0,64	0,57	0,55	0,95	0,76	0,63	0,60	0,62
60°	0,94	0,70	0,55	0,50	0,52	0,92	0,68	0,55	0,54	0,60

A legislação em vigor prevê ainda que o produto entre os fatores de sombreamento por elementos horizontais e verticais não deve ser superior a 0,9 de forma a contabilizar o sombreamento provocado pelo contorno do vão, exceção feita quando este se situa na face exterior da parede [7]. Por fim, basta contabilizar as três componentes para obter o fator de sombreamento que caracteriza a obstrução existente recorrendo à equação (2.1).

2.4.2. Regras de Simplificação

Uma metodologia alternativa, que dispensa o rigor da abordagem tomada no ponto anterior, baseia-se na utilização de regras de simplificação. Este método de avaliação do perfil de obstrução no local considera três classes de sombreamento para as estações de aquecimento e arrefecimento: fortemente sombreado, sombreamento normal/standard e sem sombreamento. Atualmente, no contexto da certificação energética, é o método mais utilizado pelos peritos devido à simplicidade da aplicação das regras face ao processo mais demorado descrito em 2.4.1. A atribuição destas classes tem em conta a orientação do vão e a relevância da obstrução em causa quer seja proveniente do horizonte ou de elementos horizontais e verticais adjacentes ao edifício.

Na Tabela 2.6 e Tabela 2.7, encontram-se as regras de aplicação e simplificações que são efetuadas na obtenção do fator de sombreamento para as estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Tabela 2.6: Regras de simplificação para o cálculo do fator de sombreamento na estação de aquecimento. Adaptado de: [9].

Regra de aplicação	F_s	Classe
Envidraçados orientados a Norte. Envidraçados nas restantes orientações, sem obstruções do horizonte e sem palas	0,90	Sem sombreamento
Envidraçados não orientados a Norte, com obstruções do horizonte ou palas que conduzam a um ângulo de obstrução inferior ou igual a 45°	0,45	Sombreamento normal/standard
Envidraçados não orientados a Norte, com obstruções do horizonte ou palas que conduzam a um ângulo de obstrução claramente superior a 45°	0,27	Fortemente sombreado

Tabela 2.7: Regras de simplificação para o cálculo do fator de sombreamento na estação de arrefecimento. Adaptado de: [9].

Regra de aplicação	F_s	Classe
Envidraçados orientados a Norte. Envidraçados nas restantes orientações, sem palas horizontais	0,90	Sem sombreamento
Envidraçados não orientados a Norte, com palas que conduzam a um ângulo de obstrução inferior ou igual a 45°	0,80	Sombreamento normal/standard
Envidraçados não orientados a Norte, com palas que conduzam a um ângulo de obstrução claramente superior a 45°	0,71	Fortemente sombreado

Pelas tabelas acima apresentadas, verifica-se que apenas é necessário identificar três parâmetros por parte do experimentador no local: a estação desejada, a orientação do vão e a existência ou não de ângulos de obstrução de 45° , ou seja, deduzir se o comprimento da pala (ou altura do obstáculo) é superior ou inferior à distância da(o) mesma(o) ao vão em estudo. Esta é uma avaliação rápida que simplifica todo o processo enunciado no ponto anterior permitindo agilizar o cálculo do fator de sombreamento em edifícios.

Realizado o levantamento de potenciais métodos e ferramentas de cálculo do fator de sombreamento, foi resumida a informação relevante de todas as abordagens referidas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Comparação entre os vários métodos de cálculo de sombras existente na literatura.

Tipologia de método	Método	Cálculo	Vantagens	Desvantagens
CAD	SOMBRERO, SHADING e ShadowFX	-Coeficiente Geométrico de Sombreamento	-Baixo custo -Fácil utilização	-Não calcula o F_z por definição (quantifica a sombra no objeto)
	TownScope	-Mapas de radiação e de duração de sombra	-Calcula diversos parâmetros numa única simulação	-Implementação de rotinas auxiliares para obter F_z
	Solar3DBR	-Fator de Sombreamento (complementar)	-Fácil construção (extensão do SketchUp)	-Não calcula o F_z por definição (refere-se à perda por sombreamento)
MDE	GOSOL	-Mapas de sombra -Diagramas solares	-Permite a importação de modelos CAD	-Utiliza um MDT -Necessita de rotina de cálculo do F_z - Existência de pontos auto sombreados
	SOL	-Mapas de sombra e de radiação global, direta e difusa	-Utiliza um MDS (obstruções já representadas)	-Carece de rotina para o cálculo do F_z -Existência de pontos auto sombreados
	Solar Analyst	-Diagramas solares -Mapas de radiação global, direta e difusa	-Utiliza um MDS -Extensão do ArcGIS	-Necessita de algoritmo de cálculo do F_z -Inexistência de pontos auto sombreados
Aparelhos de registo de obstruções no local	SunEye 210 Shade Tool	-Diagramas Solares	-Portabilidade -Fácil uso -Adaptabilidade	-Custo elevado -Carece de algoritmo para o cálculo do F_z
	Panorama Master	-Diagramas Solares	-Registo detalhado da envolvente -Adaptabilidade	-Custo elevado -Necessita o uso de <i>softwares</i> auxiliares -Carece de algoritmo para o cálculo do F_z
Metodologias previstas na legislação portuguesa	Metodologia de Cálculo	-Fator de Sombreamento	-Cálculo de F_z como função dos ângulos de obstrução e orientação específicos.	-Necessita de ferramentas auxiliares para obter ângulos de obstrução -Processo moroso
	Regras de Simplificação	-Fator de Sombreamento	-Fácil aplicação -Rápido -Não carece de ferramentas auxiliares	-Pode revelar-se pouco preciso ao incluir apenas 3 classes de sombreamento -Análise no local

Ao longo deste capítulo foram enumeradas diferentes metodologias de diversos ambientes, sendo notório que as vantagens de uns acabam por colmatar as fraquezas de outros. Os métodos de registo de obstruções no local, devido à natureza pontual do cálculo, são os mais práticos na obtenção do fator de

sombreamento em vãos envidraçados. Porém, à escala de um edifício de serviços, a introdução de uma metodologia que recorra a um MDS e que permite o cálculo de F_s em simultâneo para diversos pontos das fachadas, pode revelar-se vantajosa e bastante precisa pela caracterização de toda a obstrução no modelo de morfologia urbana. No que diz respeito aos métodos de ambiente CAD, estes carecem da criação de todo o perfil de obstrução a estudar constituindo um processo moroso para estudos a larga escala. No que toca às abordagens previstas na legislação portuguesa, existem dois métodos que diferem no modo de obtenção do F_s . Uma metodologia de cálculo morosa que contabiliza todas as possíveis fontes de sombreamento existentes e um conjunto de regras de aplicação que, embora constitua um processo menos rigoroso, simplifica a obtenção do fator de sombreamento. Assim, as abordagens a desenvolver no futuro para o cálculo deste parâmetro devem impor o rigor associado à metodologia de cálculo e a fácil utilização das regras de simplificação.

3. Metodologia

Neste capítulo serão abordadas as questões metodológicas desta dissertação. Numa primeira fase são discutidos os aspetos importantes na aplicação de cada uma das abordagens. Posteriormente, as metodologias previstas na legislação portuguesa, debatidas no capítulo anterior, são aplicadas ao caso de estudo. Por fim, são expostos os métodos inovadores desta dissertação, nomeadamente o processo de obtenção do fator de sombreamento com recurso a dados LiDAR e com o auxílio de um levantamento fotográfico *fisheye* nos vãos envidraçados em estudo.

3.1. Local de estudo

O caso de estudo desta dissertação, o edifício C6 do campus da FCUL, encontra-se orientado a Nor-Noroeste (NNO) com obstruções no horizonte relevantes em todas as direções inclusive nas fachadas És-Nordeste (ENE), Oés-Sudoeste (OSO) e Su-Sudeste (SSE). Os vãos envidraçados não possuem palas horizontais sobrejacentes, sendo apenas necessário considerar como fontes de sombreamento adicionais as extensões laterais do edifício que constituem palas verticais para vãos situados em fachadas interiores.

Foram identificados 13 vãos de estudo em todas as orientações de interesse distribuídos da seguinte forma: 7 pontos no piso 2 e 6 pontos no piso 4 registados a amarelo e vermelho na Figura 3.1, respetivamente. Cada vão é rotulado na Tabela 3.1 de acordo com a orientação, localização particular no edifício em estudo e pelo piso em que se encontra para uma maior facilidade de interpretação dos resultados.



Figura 3.1: Edifício C6 da FCUL. Vãos identificados a amarelo (piso 2), a vermelho (piso 4) [28].

Tabela 3.1: Categorização dos vãos envidraçados identificados.

Número do vão	Orientação	Localização	Obstruções relevantes	Piso	Rótulo
1	ENE	Fachada exterior	Edifícios vizinhos	2	ENE ₂
2	NNO	Fachada exterior	Vegetação	2	NNO ₂
3	NNO	Fachada interior (Jardim)	Próprio edifício	2	NNO _{J2}
4	OSO	Fachada exterior	Edifícios vizinhos	2	OSO ₂
5	OSO	Fachada interior (Pátio)	Próprio edifício	2	OSO _{P2}
6	SSE	Fachada exterior	Edifícios vizinhos	2	SSE ₂
7	SSE	Fachada interior (Jardim)	Próprio edifício	2	SSE _{J2}
8	ENE	Fachada exterior	Edifícios vizinhos	4	ENE ₄
9	NNO	Fachada exterior	Vegetação	4	NNO ₄
10	NNO	Fachada interior (Jardim)	Próprio edifício	4	NNO _{J4}
11	OSO	Fachada exterior	Edifícios vizinhos	4	OSO ₄
12	SSE	Fachada exterior	Edifícios vizinhos	4	SSE ₄
13	SSE	Fachada interior (Jardim)	Próprio edifício	4	SSE _{J4}

Apesar da metodologia enunciada nesta dissertação ter como caso de estudo um edifício de serviços, esta é igualmente aplicável ao setor residencial. Assim, este trabalho foca-se no cálculo do fator de sombreamento e na sua relação com a orientação do vão independentemente da função do edifício.

3.2. Definição dos períodos de cálculo

A obtenção do fator de sombreamento de determinado vão envidraçado carece da definição de dois períodos de cálculo, as estações de aquecimento e arrefecimento, de modo a limitar o intervalo temporal de simulação para cada um dos casos.

A estação de aquecimento tem uma duração variável consoante a região em que se efetua o estudo. De um modo geral, quanto mais a Norte do país nos encontramos, maior a duração da estação. De acordo com o Despacho (extracto) nº 15793-F/2013 [29] a duração da estação de aquecimento na Grande Lisboa é de 5,3 meses tendo início no primeiro de 10 dias consecutivos em que a temperatura média diária é inferior a 15°C. Assim, em concordância com os ficheiros climáticos da região dos últimos 30 anos, concluiu-se que a estação de aquecimento tem início no dia 18 de Novembro e fim a 6 de Maio do ano seguinte.

No que diz respeito à estação de arrefecimento, o Despacho (extracto) nº 15793-F/2013 [29] reitera que a duração da mesma é de 4 meses, entre 1 de Junho e 30 de Setembro, independentemente do ano e da região do país.

3.3. Aplicação das metodologias previstas na legislação portuguesa

Uma primeira abordagem é feita no sentido de calcular o fator de sombreamento através das normas em vigor amplamente descritas na secção 2.4.

Como anteriormente mencionado, a aplicação da metodologia de cálculo centra-se no cálculo de três ângulos de obstrução distintos provenientes de diferentes fontes de sombreamento: horizonte, elementos verticais e horizontais.

No que diz respeito aos elementos horizontais, como os vãos envidraçados analisados não possuem palas horizontais sobrejacentes, deduz-se que o ângulo de obstrução por elementos horizontais (γ) é de 0° para todos os vãos do edifício em estudo, traduzido num valor de F_o de 1 para as estações de aquecimento e arrefecimento. A contabilização dos ângulos de obstrução do horizonte (α) e de palas verticais (β) é necessária devido à variabilidade dos mesmos para as mais diversas orientações. Todos os parâmetros necessários ao cálculo dos ângulos de obstrução foram obtidos com recurso à ferramenta Google Earth [28].

No que diz respeito ao método das regras de simplificação, este foi aplicado no local de acordo com os pressupostos enunciados na secção 2.4.2.

3.4. Método SOL – LiDAR

Nesta fase do estudo são utilizadas as capacidades do algoritmo de sombra do modelo de radiação solar em meio urbano (SOL). Como *output* deste programa são fornecidos mapas de radiação solar direta, difusa e global incidente em todos os pontos das fachadas do edifício C6, para todas as horas de sol ao longo ano, que posteriormente constituem dados de entrada para o cálculo do fator de sombreamento. Estes ficheiros horários são tratados através de uma rotina desenvolvida em Matlab [30].

3.4.1. Identificação do vão envidraçado no MDS

Para obter o fator de sombreamento de determinado vão é necessário identificá-lo no vasto conjunto de células do MDS. Por forma a diminuir o tempo de computação optou-se por fazê-lo numa fase prévia do estudo evitando a repetição do processo para pontos cujo o interesse é nulo no âmbito desta dissertação. A forma mais fácil de o fazer é, numa primeira fase, encontrar o hiperponto em que está inserido, isto é, negligenciar a sua coordenada Z e encontrar apenas o seu par XY. Através da planta do edifício foi possível retirar o comprimento de cada fachada no desenho ($D_{fac,planta}$) e a distância de uma das extremidades da mesma ao vão envidraçado pretendido ($D_{vão,planta}$). Sabendo qual o comprimento da fachada no MDS ($D_{fac,MDS}$), em metros, é possível obter a distância entre a extremidade da fachada e o vão envidraçado ($D_{vão,MDS}$) segundo a equação (3.1) e, conseqüentemente, a localização do hiperponto no modelo. Numa tentativa de minimizar erros na localização da célula pretendida, também os hiperpontos adjacentes foram considerados para o cálculo do fator de sombreamento. A Figura 3.2 ilustra o modo como foi identificado o hiperponto no modelo.

$$D_{vão,MDS}[m] = \frac{D_{fac,MDS} D_{vão,planta}}{D_{fac,planta}} \quad (3.1)$$

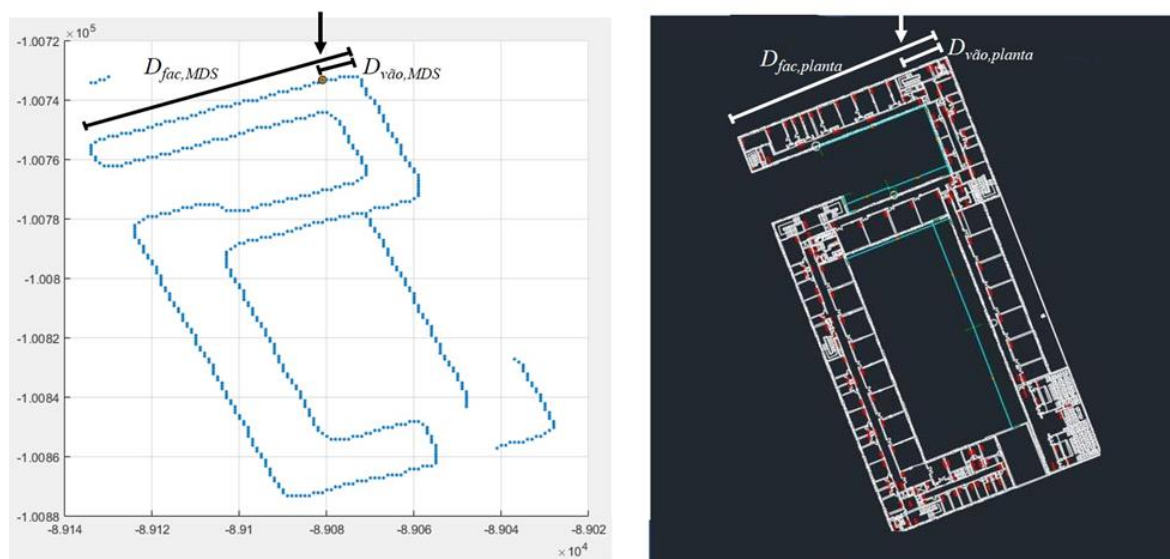


Figura 3.2: Identificação do hiperponto no MDS (esquerda) a partir das plantas do edifício (direita).

A segunda fase do processo passa por localizar o vão envidraçado no conjunto de dados verticais constituintes de cada um dos três hiperpontos. Sabendo a altura base, em metros, do hiperponto (Z_{base}) e assumindo que cada piso tem um pé-direito (H) de 3 metros, é possível obter a altura mínima (Z_{min}) e máxima (Z_{max}) de determinado piso em estudo (P) de acordo com as equações (3.2) e (3.3).

$$Z_{min}[m] = Z_{base} + H(P - 1) \quad (3.2)$$

$$Z_{max}[m] = Z_{base} + H \cdot P \quad (3.3)$$

De acordo com as especificações do MDS enunciadas na secção 2.2.2, no intervalo entre estas duas cotas encontram-se três pontos do modelo. O impulso inicial seria identificar o vão apenas como a célula intermédia, porém, mais uma vez numa ótica de minimização de erros, preservaram-se os pontos localizados imediatamente acima e abaixo do mencionado. Assim, cada vão é localizado por uma malha de 9 valores igualmente distribuídos pelos 3 hiperpontos como representado na Figura 3.3.

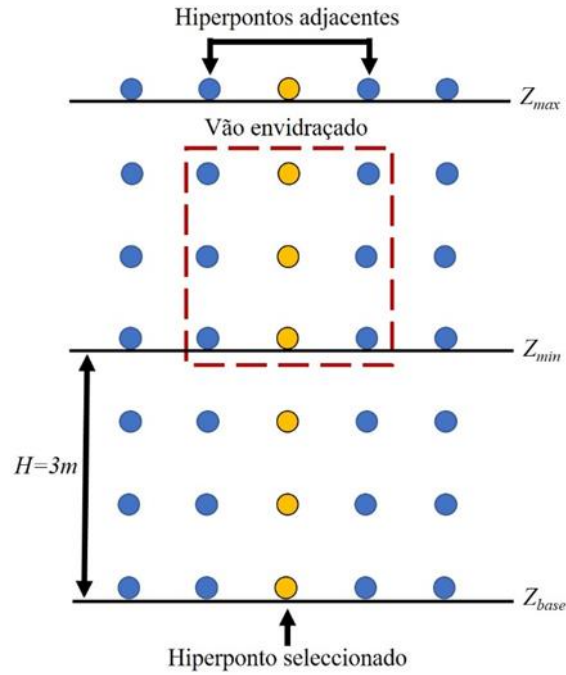


Figura 3.3: Localização do vão envidraçado nos hiperpontos do MDS.

O reconhecimento do vão envidraçado no MDS constitui um processo demorado e não automatizado. Apesar de cada hiperponto se encontrar definido por um número de identificação (ID) que o caracteriza inequivocamente no modelo, é impossível apenas com esta informação cruzar a posição do envidraçado com o modelo. O acesso às plantas do edifício permite a identificação do vão no MDS a partir de uma proporção evidenciada na equação (3.1), porém, acaba por aumentar a extensão do processo constituindo um entrave à automatização do método. Considerando estudos à escala do edifício, em que o cálculo de F_s é efetuado ao longo de uma ou mais fachadas (e.g. análise de zonas sombreadas), este método torna-se mais eficiente e completamente automatizado ao dispensar o processo enunciado nesta secção.

3.4.2. Remoção de pontos auto-sombreados

Identificado o vão no modelo, é necessário remover os pontos auto-sombreados existentes, ou seja, as situações em que este se encontra sombreado pela própria fachada. Para tal é feita uma análise do mapa horário de radiação solar direta incidente em cada um dos pontos correspondentes ao vão, associando o azimute solar (ψ) calculado através das equações (3.4) a (3.7), onde δ representa a declinação solar, J corresponde ao dia no calendário Juliano, α_s simboliza a altura solar, ω o ângulo horário e t a hora do dia. A latitude, representada por φ , tem o valor de $38,76^\circ$ para a cidade de Lisboa.

$$\psi[^\circ] = \cos^{-1} \left(\frac{(\sin \delta - \sin \alpha_s) \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \right) \quad (3.4)$$

$$\delta[^\circ] = 23,45 \sin \left(\frac{360(J + 284)}{365} \right) \quad (3.5)$$

$$\alpha_s[^\circ] = \sin^{-1} (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (3.6)$$

$$\omega[^\circ] = 15(t - 12) \quad (3.7)$$

Um ponto encontra-se sombreado pelo próprio plano da fachada sempre que a amplitude entre os azimutes do Sol e da visada é superior a 90° ou inferior a -90° , como ilustrado na Figura 3.4. Assim, todos os pontos que satisfaçam esta condição são excluídos, sendo os restantes frutos de obstruções do horizonte e de elementos do edifício concordantes com a definição de fator de sombreamento.

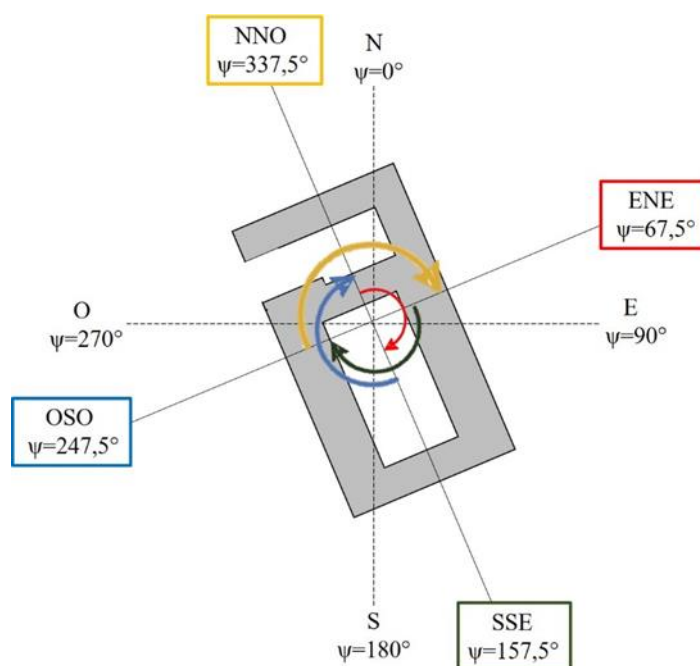


Figura 3.4: Demonstração dos limites de exclusão dos pontos auto-sombreados.

A correta remoção de pontos auto-sombreados é de extrema importância na implementação desta metodologia. Este processo simples, automatizado e de rápida execução permite dissociar as noções de sombra indiferenciada e de sombreamento provocado por obstruções concordantes com a definição de fator de sombreamento. Apesar da necessidade de cálculo do azimute solar para cada ficheiro de dados, a rotina torna-se muito mais rápida em termos de processamento, uma vez que é negligenciada uma grande parte dos ficheiros por não corresponderem aos limites ilustrados na nomeadamente nos vãos localizados nas fachadas NNO, ENE e OSO, onde existe um menor de horas de incidência de radiação solar.

3.4.3. Cálculo do fator de sombreamento

A última etapa do método envolve o cálculo do fator de sombreamento, dado pela equação (3.8), que representa o quociente entre a radiação solar global incidente, em W/m^2 , num determinado ponto (I_g) e a mesma que atingiria esse local se este não se encontrasse obstruído ($I_{g,s}$). Em termos práticos, corresponde a uma razão entre a média da radiação global que efetivamente atinge o ponto de estudo e a média dessa mesma radiação descartando todas as situações em que a componente direta é nula, ou seja, considerando uma situação ideal em que não existem quaisquer fontes de sombreamento.

$$F_s = \frac{I_g}{I_{g,s}} \quad (3.8)$$

O cálculo é realizado para cada um dos 9 pontos da malha do MDS representativa do vão envidraçado, sendo o valor final do fator de sombreamento correspondente à média dos mesmos.

A metodologia LiDAR tem como único *input* da rotina descrita um MDS previamente associado aos dados de radiação global e direta utilizados no cálculo de F_s . Ao utilizar um modelo representativo da morfologia urbana, este método permite o cálculo não só pontual, como à escala das fachadas do edifício, dado que não são necessários registos no local de estudo. A natureza do cálculo promove a obtenção de fatores de sombreamento num determinado vão e a possibilidade de criação de mapas para identificação de zonas com elevada exposição solar. Porém, o automatismo do processo é apenas garantido para estudos a larga escala, dado que a identificação de um ponto no MDS carece de um procedimento manual efetuado que é oferecido como *input* do algoritmo de cálculo. No que toca ao tempo de execução da rotina, este revela-se significativamente baixo para cálculos pontuais tornando-se progressivamente mais extenso à medida que é alargado o âmbito do estudo a várias células do MDS. Uma outra vantagem deste método é possibilidade de cálculo do fator de sombreamento em qualquer ponto desejado sem necessidade de acesso ao local.

3.5. Fotografia *fisheye*

O cálculo do fator de sombreamento a partir de fotografias *fisheye* constitui a última metodologia a aplicar no âmbito desta dissertação. Consiste na aquisição de fotografias panorâmicas, processamento de imagem e sobreposição de um modelo de radiação solar importado, sendo desenvolvido na sua totalidade com recurso ao *software* Matlab [30]. Na Figura 3.5 encontra-se um esquema representativo das diversas etapas do processo de construção do método.

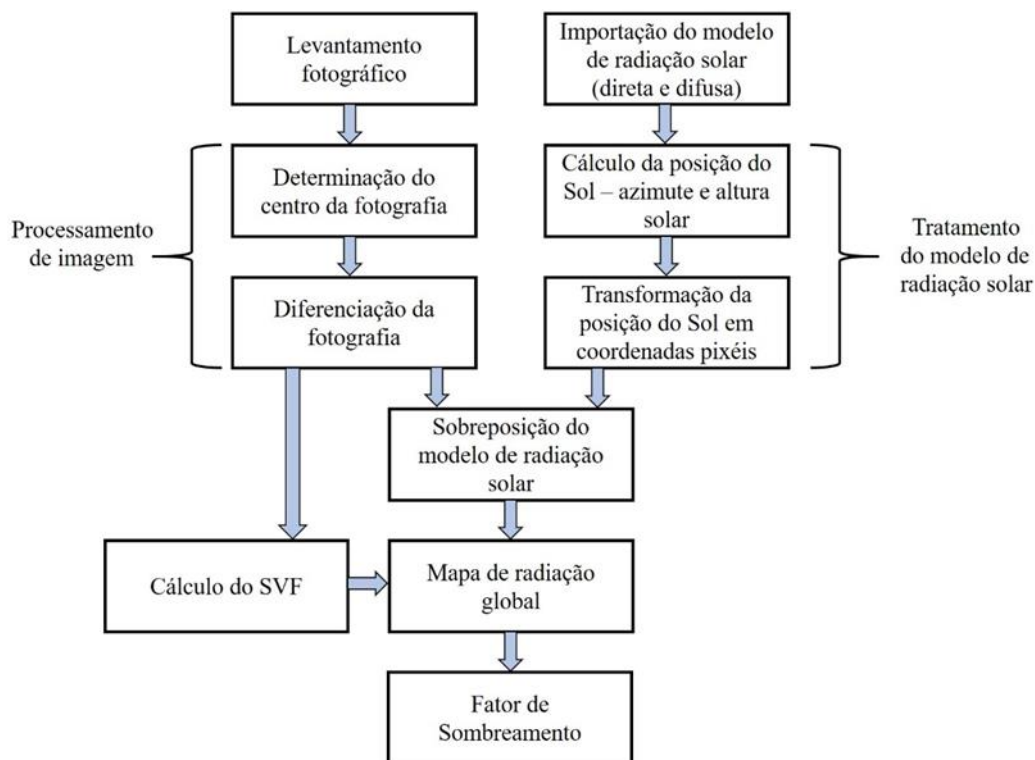


Figura 3.5: Etapas da construção do método *fisheye* para o cálculo do fator de sombreamento.

3.5.1. Equipamento utilizado

Para a aplicação deste método foi necessária uma pesquisa prévia de lentes *fisheye* que permitissem ser acopladas a um dispositivo móvel, neste caso um telemóvel. Os filtros desta pesquisa basearam-se em três fatores: binómio preço/qualidade, finalidade e compatibilidade.

Existe uma grande variedade de lentes no mercado, desde as mais dispendiosas com reconhecida qualidade de imagem, às mais economicamente viáveis com um défice no que toca à qualidade da fotografia comparativamente a outros dispositivos. A finalidade também é um fator a ter em conta, isto é, se a intenção é utilizar uma câmara fotográfica convencional a escolha recai para uma lente mais robusta e com um preço elevado, por outro lado, se o intuito é a garantia de portabilidade com dispositivos móveis, como *smartphones* ou *tablets*, a lente mais económica e com qualidade média é a solução ideal. No que diz respeito à compatibilidade com o telemóvel a utilizar, esta foi assegurada de modo a garantir a adequação da lente adquirida optando-se pelo modelo Set HD Fisheye lens (Figura 3.6) da K&F [31]. Na Tabela 3.2 encontram-se as propriedades óticas úteis para o desenvolvimento deste método.



Figura 3.6: Esquema de montagem da lente *fisheye* num dispositivo móvel [31].

Tabela 3.2: Propriedades óticas dos dispositivos utilizados.

Parâmetro ótico	Valor
Distância focal da lente <i>fisheye</i> (f_{lente})	19 mm
Tipo de projeção da lente	Equidistante
Distância focal da câmara traseira do <i>smartphone</i> (f_{smart})	3,79 mm
Comprimento do sensor da câmara (C_{cam})	4,71 mm
Largura do sensor da câmara (L_{cam})	3,54 mm

3.5.2. Aquisição e processamento de imagem

Os ensaios fotográficos foram realizados nos locais de interesse com o dispositivo na horizontal e centrado com o envidraçado. Procurou-se colocar o *smartphone* o mais próximo possível de um plano paralelo ao da fachada de modo a minimizar erros no cálculo da posição do Sol. Este levantamento fotográfico foi efetuado nos 7 pontos identificados no piso 2, mas apenas nos vãos 10 e 13 referentes ao piso 4 (Figura 3.1) devido à impossibilidade de acesso aos restantes. Na Figura 3.7 encontra-se a fotografia *fisheye*, retirada no piso 2 correspondente ao vão 6 na fachada SSE, com uma resolução de 4608 x 3456 pixéis. Observa-se um corte no topo e fundo da fotografia, causado pelo tamanho do sensor

da câmara do telemóvel, que não possui largura suficiente para captar a totalidade da imagem circular. No que toca às regiões laterais, o comprimento do dispositivo revela a capacidade de compreender o raio da fotografia. O levantamento fotográfico foi realizado em condições de céu limpo, sendo o processamento de imagem orientado nesse sentido. Não existem certezas quanto ao funcionamento correto do método para situações em que se verifiquem períodos de céu nublado.



Figura 3.7: Fotografia *fisheye* original retirada no vão SSE2.

Adquiridas as fotografias, estas são sujeitas a um extenso processamento que começa com a determinação dos centros da imagem circular e da fotografia no sistema de coordenadas pixéis. Este último (Xp_o, Yp_o) corresponde a metade de cada uma das dimensões da figura, já o primeiro é obtido através de um método inspirado no trabalho de Holmer et al. (2000) [32] no cálculo do SVF, no qual se determinam três pontos em qualquer parte da circunferência (Xp_i, Yp_i) de modo a calcular o raio (R) e as coordenadas do centro (Xp_c, Yp_c) com recurso à equação circular (3.9). Para obter um melhor ajuste do círculo aos pontos calculados foi garantido que cada semi-circunferência (esquerda e direita) possuía pelo menos uma das coordenadas previstas.

$$(Xp_i - Xp_c)^2 + (Yp_i - Yp_c)^2 = R^2 \quad (3.9)$$

A determinação dos pontos da circunferência é procedida analisando os pixéis constituintes das regiões vizinhas no espaço de cores RGB (*Red, Green, Blue*) para cada semi-circunferência, onde qualquer cor é definida pela sua quantidade de vermelho, verde e azul nos canais 1, 2 e 3, respetivamente, numa gama de valores compreendida entre 0 e 255. Em termos práticos, a imagem é uma resultante da sobreposição de três mapas de cores sendo cada imagem representada através do mesmo número de matrizes, contendo informação sobre a localização do píxel e o indicador de canal. Por exemplo um ponto amarelo numa imagem I é descrita em RGB da seguinte forma:

$$\begin{cases} R = I(x, y, 1) = 255 \\ G = I(x, y, 2) = 255 \\ B = I(x, y, 3) = 0 \end{cases}$$

Pela Figura 3.7 observa-se uma região significativamente mais escura que a fotografia *fisheye* em si, o que se traduz numa zona com valores RGB bastante mais baixos. A melhor forma de obter coordenadas de um píxel pertencente à semi-circunferência esquerda que delimita essa região, é fixar uma determinada ordenada da imagem, percorrendo uma linha horizontal até que o ponto imediatamente a seguir sofra uma descontinuidade abrupta em cada um dos indicadores dos canais. Após vários testes, a conjugação das condições seguintes permite obter as coordenadas desejadas na região circular (Xp_i, Yp_i) à esquerda do eixo central vertical:

$$\begin{cases} I(x, y+1, 1) \cap I(x, y+1, 2) \cap I(x, y+1, 3) < 60 \\ I(x, y, 1) \cup I(x, y, 2) \cup I(x, y, 3) < 15 \end{cases}$$

No caso da semi-circunferência direita o processo é invertido, visto que o píxel mais escuro se encontra à direita do ponto da região circular.

Após o cálculo do raio e centro da imagem circular é possível desprezar qualquer parte da fotografia que não tenha interesse para o método utilizado, isto é, todos os pontos que se encontrem a uma distância do centro superior ao raio da circunferência. Optou-se por modificar a cor destes pontos para cinza RGB (192,192,192) apenas para agilizar a construção do algoritmo. A Figura 3.8 representa o estágio de desenvolvimento do método até este momento.



Figura 3.8: Determinação do centro da fotografia *fisheye* retirada no vão SSE₂.

Para finalizar o processamento de imagem resta diferenciar os pontos que constituem obstruções dos que representam céu concedendo aos mesmos as cores preta e branca, respetivamente. Com vista à

identificação destas duas regiões foram efetuadas diversas simulações considerando as mais variadas operações algébricas entre cada um dos três canais. A subtração entre os tons de azul e verde, em cada pixel da imagem, revelou um padrão entre todas as fotografias retiradas no local permitindo identificar a tipologia definida como “céu”. Determinou-se que nas zonas em que a diferença entre os indicadores dos canais azul e verde é superior a 30 encontram-se maioritariamente pixéis que representam o céu. Esta é uma condição bastante eficaz na definição de grande parte da tipologia na imagem, porém, em regiões da fotografia mais próximas do perfil de obstrução, a diferença entre os referidos canais é pouco sensível face a uma tonalidade branca da dita porção do céu. Para ultrapassar essa limitação uma segunda condição é imposta considerando uma diferença superior a 10 apenas para os pixéis que tenham uma quantidade de vermelho maior que 120. Os restantes pixéis que não satisfaçam estas condições e que não tenham a cor cinza definida anteriormente, isto é, que façam parte dos limites da imagem circular, constituem obstruções sendo representados com a cor preta.

$$\begin{cases} I(x, y, 3) - I(x, y, 2) > 30 \\ I(x, y, 3) - I(x, y, 2) > 10 \cap I(x, y, 1) > 120 \end{cases} \rightarrow I(x, y, 1) = I(x, y, 2) = I(x, y, 3) = 255$$

Para concluir a diferenciação da fotografia corrigem-se pontos que foram atribuídos incorretamente a cada tipologia através da inscrição de um polígono, desenhado na imagem pelo utilizador, identificado por cada um dos seus vértices. Na Figura 3.9 observa-se um exemplo do resultado do processamento de imagem efetuado. Verifica-se que o Sol é representado na fotografia como uma obstrução, sendo necessária a remoção do mesmo através da inscrição do polígono. Existem algumas zonas pontuais na tipologia obstrução que não influenciam de forma significativa o resultado final da aplicação do método, porém, estes são corrigidos de forma análoga para melhorar a precisão dos dados.

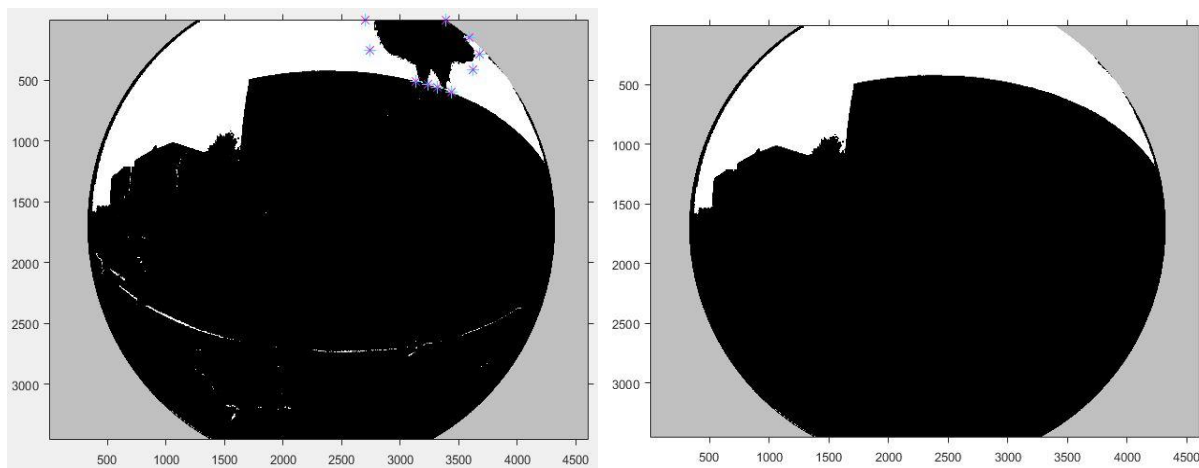


Figura 3.9: Correção de pontos indesejados (esquerda) e resultado final do processamento de imagem efetuado (direita).

3.5.3. Importação, tratamento e sobreposição do modelo de radiação solar

A importação do modelo de radiação solar constitui o primeiro passo pós-processamento de imagem. Desenvolvendo um algoritmo capaz de extrair dados da plataforma PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) tendo em conta a latitude local e um plano vertical com azimute concordante com a orientação do vão em estudo, é possível obter um perfil diário das radiações direta (I_{dir}) e difusa (I_{dif}),

em W/m^2 , para cada mês do ano com valores intervalados de 15 minutos. Os dados são posteriormente reproduzidos tantas vezes quanto o número de dias do mês correspondente criando um perfil de radiação incidente para todo o ano. Assim, inicialmente todos os dias pertencentes a um dado mês possuem valores de I_{dir} e I_{dif} iguais para uma mesma hora, diferindo apenas nas suas coordenadas hemisféricas, isto é, no par azimute e altura solar calculados através das equações (3.4) a (3.7) descritas na secção 3.4.2. Os dados são atribuídos por fim às estações de aquecimento e arrefecimento de acordo com os pressupostos enunciados na secção 3.2.

Importado o modelo é necessário sobrepor o trajeto do Sol na fotografia *fisheye*, isto implica uma transformação das coordenadas azimute e altura solar em pontos Xp e Yp em pixéis. Para isso, numa primeira fase, é calculada a posição do astro no sistema cartesiano $(X_{sol}, Y_{sol}, Z_{sol})$ tendo em conta o esquema da Figura 3.10 e o sistema de equações (3.10), onde θ corresponde ao ângulo entre a direção definida pelo azimute (ψ) e o eixo do X (Este) no sentido anti-horário e r representa um fator de escala de 1 metro, valor definido arbitrariamente.

$$\begin{cases} X_{sol}[m] = r \cos(\alpha_s) \cos(\theta) \\ Y_{sol}[m] = r \cos(\alpha_s) \sin(\theta) \\ Z_{sol}[m] = r \sin(\alpha_s) \end{cases} \quad (3.10)$$

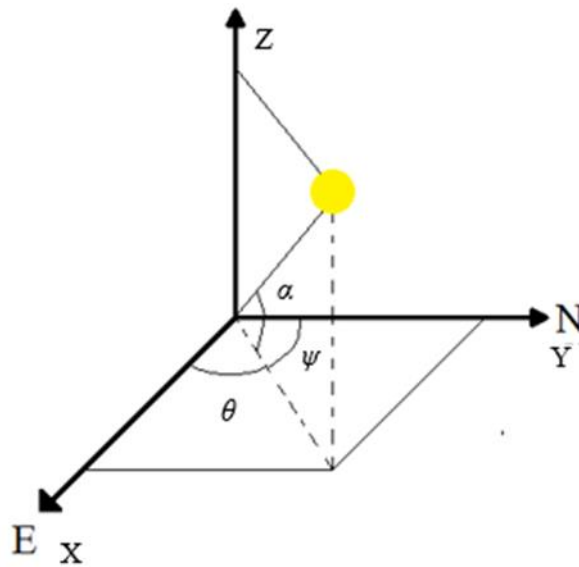


Figura 3.10: Posição do Sol no sistema de coordenadas do objeto.

As coordenadas do Sol são posteriormente transformadas em coordenadas da câmara com o auxílio da matriz de rotação espacial (R_e). Esta permite determinar a posição do objeto no sistema de coordenadas da câmara constituindo um passo a ter em conta antes de proceder a qualquer projeção com recurso às propriedades óticas do aparelho. Na Figura 3.11 é possível perceber o modo como se relacionam estes sistemas de coordendas numa determinada fotografia *fisheye*.

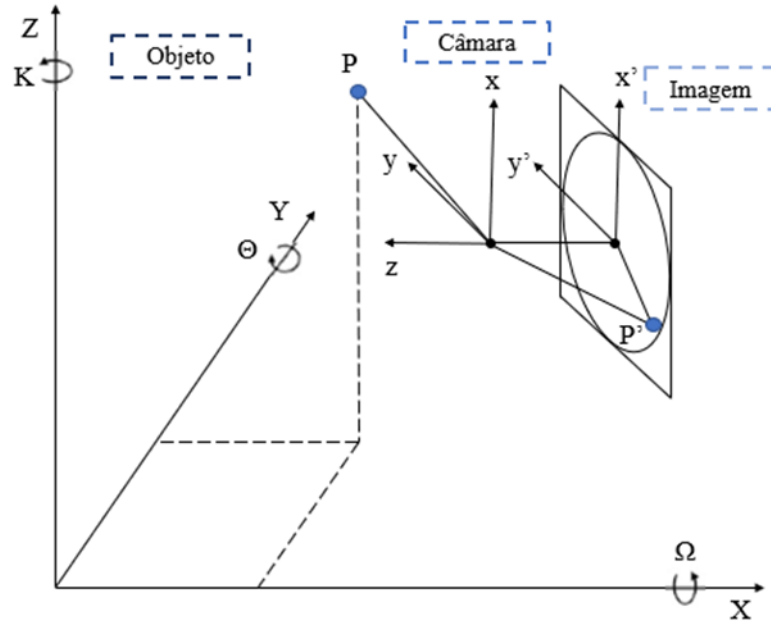


Figura 3.11: Modelo geométrico da câmara fisheye [33].

A matriz de rotação espacial é função de três parâmetros (Ω , Θ e K) que variam consoante a rotação imprimida pelo utilizador ao longo dos três eixos considerando como referência o sensor da câmara fotográfica (ou o telemóvel em si visto que este se encontra solidário com o sensor). Neste caso, o *smartphone* é utilizado na horizontal, daí que em todas as fotografias seja efetuada uma rotação $\Omega = -90^\circ$. Atentando na Figura 3.11 é possível afirmar que como não existe qualquer movimento do sensor ao longo do eixo vertical do telemóvel, o valor de Θ é igual 0° . O valor de K varia consoante a orientação da fachada correspondendo ao azimute da visada (ψ_{visada}) subtraída de 90° , isto é, o ângulo entre um plano paralelo ao sensor e o azimute de referência de 0° (Norte). Os coeficientes da matriz de rotação espacial são dados pelas seguintes expressões:

$$R_e = \begin{bmatrix} \cos\Theta \cos K & -\cos\Theta \sin K & \sin\Theta \\ \cos\Theta \sin K + \sin\Omega \sin\Theta \cos K & \cos\Omega \cos K - \sin\Omega \sin\Theta \sin K & -\sin\Omega \cos\Theta \\ \sin\Omega \sin K - \cos\Omega \sin\Theta \cos K & \sin\Omega \cos K + \cos\Omega \sin\Theta \sin K & \cos\Omega \cos\Theta \end{bmatrix}$$

Simplificando:

$$R_e = \begin{bmatrix} \cos(\Psi_{visada} - 90) & -\sin(\Psi_{visada} - 90) & 0 \\ \sin(\Psi_{visada} - 90) & 0 & 1 \\ -\sin(\Psi_{visada} - 90) & -\cos(\Psi_{visada} - 90) & 0 \end{bmatrix}$$

Assim, a posição do Sol no sistema de coordenadas câmara é dado pela equação (3.11) abaixo mencionada onde R_e^{-1} representa a inversa da matriz de rotação espacial.

$$\begin{bmatrix} x[m] \\ y[m] \\ z[m] \end{bmatrix} = R_e^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{sol} \\ Y_{sol} \\ Z_{sol} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Obtidas as coordenadas câmara é possível transformá-las em pontos do sistema de coordenadas imagem fazendo uso das propriedades óticas do conjunto câmara-lente. Nesta etapa ocorre uma transposição para um plano 2D semelhante ao da fotografia *fisheye*. Sabendo que a lente possui uma projeção do tipo equidistante, a posição do Sol é definida na imagem através das suas coordenadas câmara com o auxílio das equações (3.12) e (3.13), onde f corresponde à distância focal do conjunto câmara-lente dado pela expressão (3.14) e x_o' e y_o' os desfasamentos entre os centros da fotografia circular e da figura nos eixos horizontal e vertical, dados pelas equações (3.15) e (3.16), respetivamente.

$$x'[m] = f \frac{\arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} + x_o' \quad (3.12)$$

$$y'[m] = f \frac{\arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} + y_o' \quad (3.13)$$

$$f[m] = \frac{1}{\frac{1}{f_{lente}} + \frac{1}{f_{smart}}} \quad (3.14)$$

Sendo Nx_{pix} e Ny_{pix} o número de píxeis constituintes dos eixos Xp e Yp do sistema de coordenadas da fotografia *fisheye*, tem-se que:

$$x_o'[m] = (Xp_c - Xp_o) \frac{C_{cam}}{Nx_{pix}} \quad (3.15)$$

$$y_o'[m] = (Yp_c - Yp_o) \frac{L_{cam}}{Ny_{pix}} \quad (3.16)$$

Como se pode observar na Figura 3.11, a transformação em coordenadas imagem altera a percepção da posição real de determinado ponto numa dada figura. Isto deve-se ao fenómeno de obtenção de uma fotografia, ilustrado na Figura 3.12, no qual são criadas imagens invertidas através da penetração da luz na lente. Todos os aparelhos fotográficos, tal como o olho humano, possuem a capacidade de corrigir esta deformação apresentando uma visão da realidade instantaneamente. Para introduzir um ponto representativo numa dada imagem, é necessário efetuar este procedimento de forma manual. Como tal é aplicada uma dupla simetria em relação aos eixos x' e y' evidenciada na Figura 3.12.

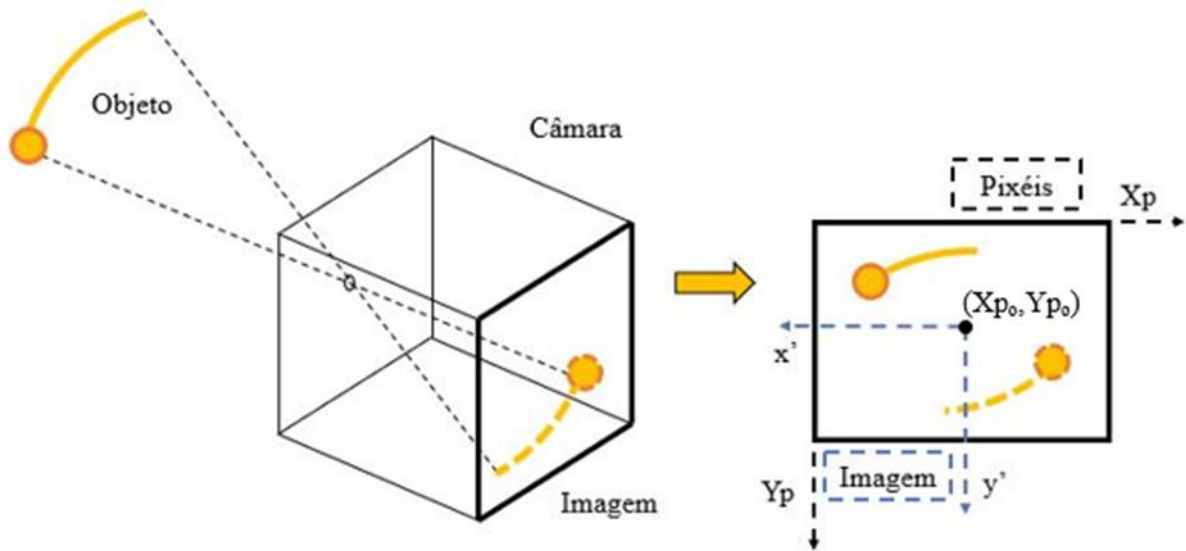


Figura 3.12: Relação entre a posição do Sol e os sistemas de coordenadas utilizados.

Por último, é dada uma transformação da imagem da posição do astro em coordenadas do sistema de pixels característico de uma fotografia. A unidade utilizada deixa de ser o metro procedendo-se a uma conversão para pixels com o auxílio das equações (3.17) e (3.18).

$$Xp = Xp_o - \frac{x'}{C_{cam}} Nx_{pixels} \quad (3.17)$$

$$Yp = Yp_o + \frac{y'}{L_{cam}} Ny_{pixels} \quad (3.18)$$

A partir deste ponto a representação da posição do Sol passa a ser possível e a fusão entre o modelo de radiação solar e a fotografia processada é atingida, sendo apresentada na Figura 3.13.

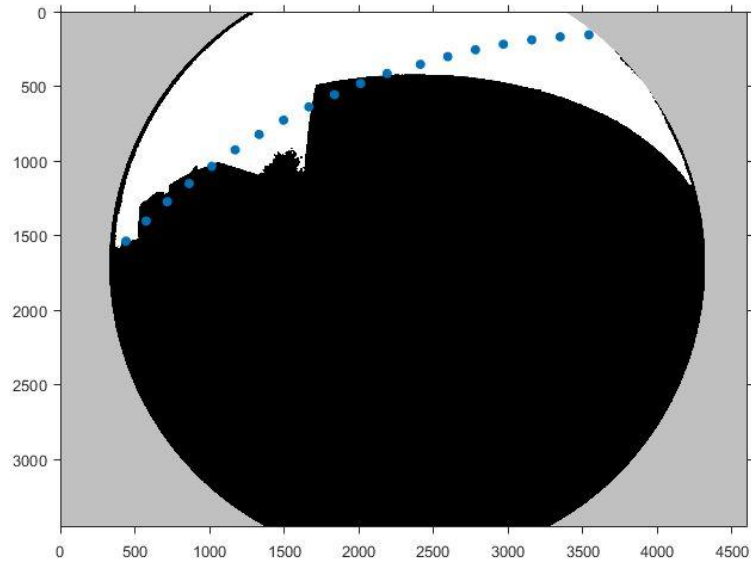


Figura 3.13: Sobreposição do modelo solar para o dia 21 de Dezembro na vista do vão SSE₂.

3.5.4. Cálculo do fator de sombreamento

Após a sobreposição do diagrama é necessário modificar o modelo de radiação solar com as novas informações provenientes do processamento de imagem. Criando um mapa binário da fotografia processada no qual os pixéis que caracterizam obstrução (pretos) possuem o valor 0 e os que apresentam a tipologia de céu (brancos) correspondem a 1, é possível multiplicar esta matriz pela componente I_{dir} com vista a corrigir a mesma considerando o vão envidraçado em estudo. Tendo em conta o modelo da radiação difusa isotrópico, a contribuição I_{dif} permanece inalterável independentemente do facto de o Sol se encontrar obstruído.

Sendo assim, a radiação global incidente é dada pela equação (3.19), uma função do nível de obstrução existente e do SVF . Este parâmetro é quantificado através da expressão (3.20) analisando o número existente de pixéis pretos (Np_{obstr}) e brancos ($Np_{céu}$) na fotografia *fisheye*.

$$I_g [W / m^2] = I_{dir} + SVF \cdot I_{dif} \quad (3.19)$$

$$SVF = \frac{Np_{céu}}{Np_{céu} + Np_{obstr}} \quad (3.20)$$

Por fim, o fator de sombreamento é calculado de forma semelhante à metodologia anterior, assumindo os mesmos pressupostos enunciados na secção 3.4.3 e fazendo uso da equação (3.8).

Apesar da implementação da metodologia *fisheye* ser bastante complexa, a aplicação da mesma é simplificada pelo trabalho realizado na construção do modelo. Este método tem como *inputs* os parâmetros da câmara fotográfica e da lente enunciados na Tabela 3.2, o azimute da fachada na qual se insere o vão envidraçado (ψ_{visada}) e a fotografia *fisheye* retirada, tornando o acesso ao local obrigatório. Esta abordagem revela um tempo de execução baixo apesar do processamento de imagem extenso, importa e trata automaticamente o modelo de radiação solar e fornece como *output*, além do valor do fator de sombreamento pretendido, informação adicional como diagramas solares do local. A correção

de alguns pixéis defeituosos na fase final do processamento de imagem e a necessidade de obtenção do azimute da fachada constituem barreiras ao completo automatismo do método.

As metodologias LiDAR e *fisheye* revelam-se dois métodos promissores no cálculo do fator de sombreamento em edifícios, porém com naturezas de cálculo distintas. A maior vantagem do método LiDAR reside nos estudos à escala de todo o edifício, onde pode maximizar as potencialidades do MDS realizando o cálculo para diversos pontos de interesse. Por outro lado, torna-se moroso para estudos pontuais ao necessitar de um processo auxiliar para identificação de pontos no modelo. De salientar ainda que a criação de um MDS é um processo dispendioso podendo constituir um entrave ao desenvolvimento do mesmo. Em oposição, a metodologia *fisheye* tem o potencial de se revelar como uma ferramenta bastante útil pela sua facilidade de uso, viabilidade económica e adequação ao cálculo de F_s em ambiente de certificação energética. A maior desvantagem deste método é a necessidade de acesso ao local que pode constituir um problema para casos em que tal não seja possível.

4. Resultados

Para proceder a uma análise correta da precisão de cada uma das abordagens é necessário ter em conta as condições em que foi efetuado o estudo. O edifício C6 possui apenas vãos envidraçados sem palas horizontais e verticais adjacentes aos mesmos. Como tal, a análise de resultados é apenas válida para obstruções do horizonte e prolongamentos do edifício. A importância deste pressuposto deve-se à impossibilidade da parte do MDS de reter informação sobre palas adjacentes ao vão, que tipicamente têm medidas inferiores face à resolução dos dados LiDAR. Tendo em conta este fator e pela representação da morfologia urbana através de um modelo tridimensional detalhado, o MDS criado através dos dados LiDAR afigura-se como o método mais preciso de cálculo do fator de sombreamento no âmbito do caso de estudo desta dissertação. Para auxiliar a análise da precisão de cada uma das abordagens é calculado o erro relativo (ER) face à metodologia LiDAR através da equação (4.1), onde $F_{s,i}$ representa o valor do fator de sombreamento do método em análise e $F_{s,LiDAR}$ corresponde ao fator obtido através da metodologia de referência.

$$ER [\%] = \frac{F_{s,i} - F_{s,LiDAR}}{F_{s,LiDAR}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Para efetuar uma análise cuidada é necessário ter em conta o nível de detalhe que cada abordagem fornece. Como enunciado na secção 2.4.1.2, os vãos em estudo não devem ter, no âmbito da aplicação da metodologia de cálculo, um produto $F_o \cdot F_f$ superior a 0,9. Atentando na Figura A.1 a Figura A.9, observa-se que o método *fisheye* possui a capacidade de detetar o contorno do vão em estudo e de o tomar como fonte de sombreamento. Por outro lado, ao possuir uma resolução de 1x1 m², o levantamento LiDAR não consegue obter a representação do contorno do vão no modelo tridimensional. De modo a ultrapassar esta limitação, sempre que a metodologia de cálculo é comparada com o método LiDAR, é negligenciada a regra que traduz o efeito de sombreamento do contorno do vão externo à caixilharia. Nas restantes abordagens esta nuance permanece aplicável. Os valores de F_s obtidos por cada uma das metodologias nas estações de aquecimento e arrefecimento podem ser consultados na Tabela A.1 e Tabela A.2, respetivamente.

4.1. Metodologias presentes na legislação portuguesa versus Método LiDAR

No que diz respeito à metodologia de cálculo, como descrito na metodologia enunciada na secção 3.3.1, foram obtidas as três contribuições de sombra para cada um dos 13 locais de estudo, com vista ao cálculo do fator de sombreamento com recurso à equação (3.1). Para tal foi necessário o levantamento dos perfis de obstrução de cada vão envidraçado que se encontra detalhado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Perfil de obstrução dos vãos envidraçados em estudo.

Vão envidraçado	Ângulos de obstrução [°]			
	Horizonte (α)	Pala vertical esquerda (β_{esq})	Pala vertical direita (β_{dir})	Pala horizontal (γ)
NNO_2	10	0	0	0
NNO_4	6	0	0	0
NNO_J2	32	21	50	0
NNO_J4	16	21	50	0
ENE_2	15	0	0	0
ENE_4	9	0	0	0
OSO_2	18	0	0	0
OSO_4	12	0	0	0
OSO_P2	21	46	43	0
SSE_2	18	0	0	0
SSE_4	13	0	0	0
SSE_J2	32	32	0	0
SSE_J4	16	32	0	0

Como seria de esperar os ângulos de horizonte dos vãos localizados no segundo piso são superiores face aos identificados no piso 4. De forma geral se deduz que o fator de sombreamento desta contribuição é menor para pontos situados em níveis mais inferiores comparativamente a outros que se encontrem dois pisos acima. No que diz respeito aos ângulos de obstrução por palas verticais, estes são causados apenas por extensões do próprio edifício nas zonas do pátio e jardim, logo os mesmos são iguais para toda a janela semelhante que se situe na mesma faixa vertical do plano da fachada, isto é, desde que todos os vãos apresentem a mesma tipologia, o ângulo de pala vertical no segundo piso é exatamente igual ao de uma janela situada nos pisos imediatamente acima.

Aplicando a metodologia de cálculo, o fator de sombreamento de cada um dos vãos identificados é resultado da contabilização rigorosa de todas as fontes de sombra detalhadas na Tabela 4.1. Atualmente é a avaliação mais rigorosa presente na legislação para o cálculo deste parâmetro, porém considerando que este é apenas um dos fatores que corrigem os ganhos solares num determinado vão envidraçado, torna-se um processo demasiado moroso face à sua finalidade. É nessa ótica que as regras de simplificação se revelam vantajosas, descartando a exigência da metodologia de cálculo e necessitando apenas da aplicação das normas no local evidenciadas na secção 3.3.2. Na Figura 4.1 e Figura 4.2 observa-se os fatores de sombreamento obtidos através dos dois métodos propostos na regulamentação portuguesa considerando as estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Nestas é possível fazer uma análise comparativa averiguando a viabilidade da aplicação das mesmas face à metodologia LiDAR.

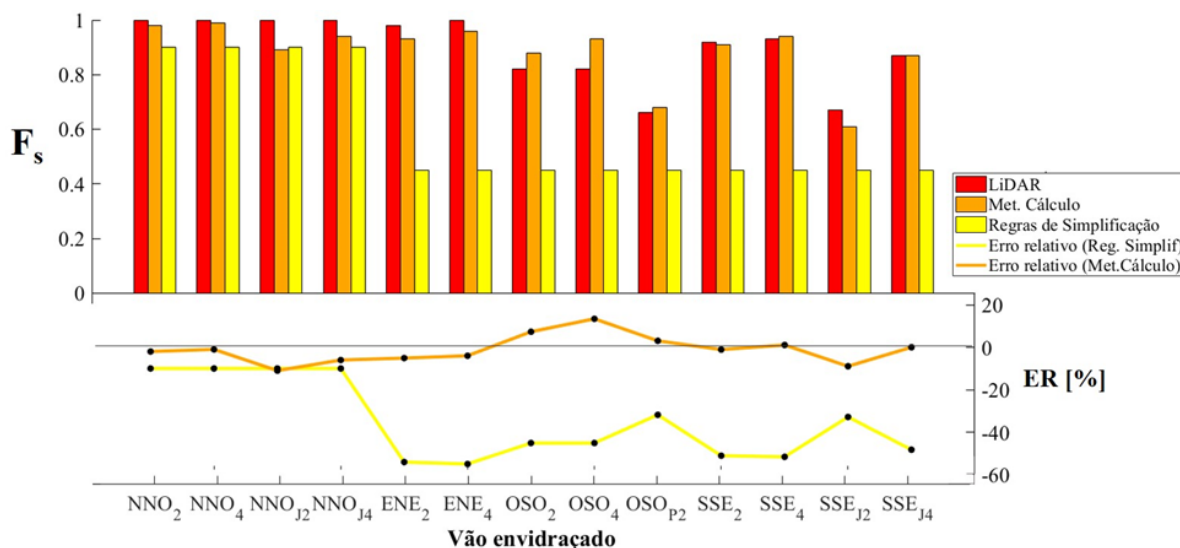


Figura 4.1: Fatores de sombreamento obtidos através do método LiDAR e das metodologias previstas na legislação na estação de aquecimento.

Atentando na Figura 4.1 verifica-se que os valores de F_s calculados através dos dois métodos propostos na legislação portuguesa tendem a subestimar os resultados obtidos a partir do LiDAR para a estação de aquecimento. Exceção à regra no caso dos vãos orientados a OSO, que aplicando a metodologia de cálculo apresentam um fator de sombreamento superior comparativamente aos valores de referência. Este método revela uma boa precisão na larga maioria dos 13 casos apresentados podendo alguma diferença justificar-se pela consideração da parte do LiDAR de todas as obstruções num alcance de 90° para cada um dos lados da normal do envidraçado, ao passo que a metodologia de cálculo apenas tem em conta a maior obstrução num limite máximo de 60° . Esta questão pode revelar-se um problema pois não só são negligenciadas obstruções que podem ser relevantes para o cálculo de F_s como podem ser tomados como determinantes obstáculos que não contribuem como fonte de sombreamento.

No que diz respeito às regras de simplificação, na estação de aquecimento, estas revelam-se suficientemente precisas para vãos orientados a NNO, porém nos restantes casos é um método muito penalizador ao considerar como bastante relevantes, obstruções com ângulos de horizonte relativamente baixos face ao limite da regra de aplicação. Observando o perfil de obstrução de cada vão enunciado na Figura 4.1, os ângulos calculados são bastante inferiores aos 45° que constituem o valor limite da regra (Tabela 2.6), sugerindo que o método da simplificação com três classes de sombreamento acaba por atribuir uma maior importância a pequenos obstáculos que não têm um comportamento tão significativo como causadores de sombra como esta faz transparecer.

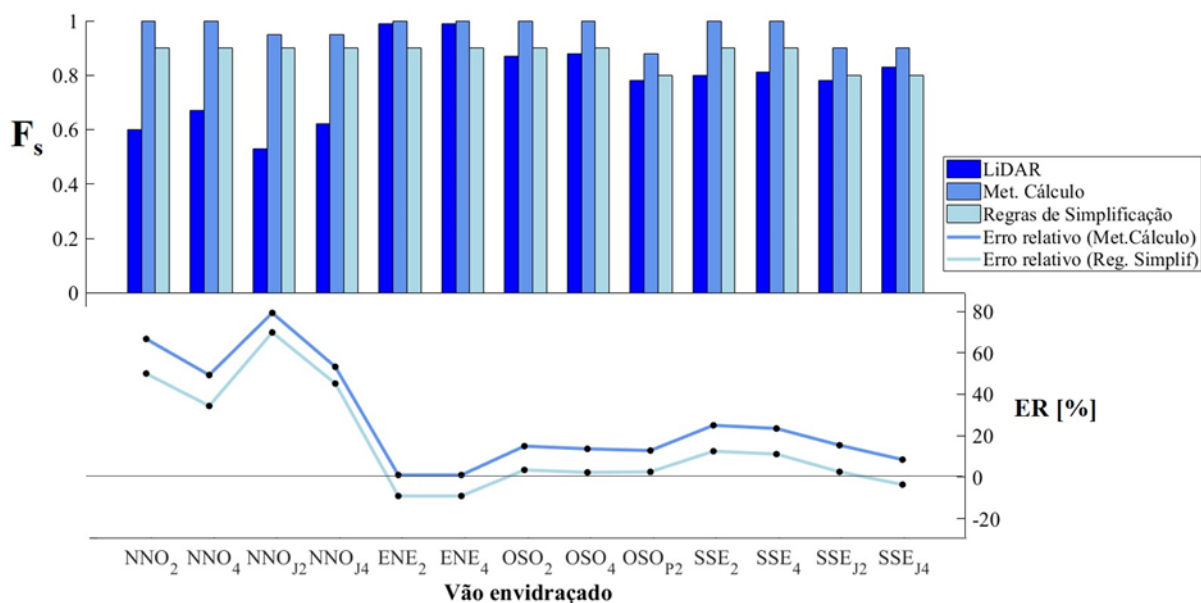


Figura 4.2: Fatores de sombreamento obtidos através do método LiDAR e das metodologias previstas na legislação na estação de arrefecimento.

Observando a Figura 4.2 é notória uma sobrestimação do valor de F_s por parte das metodologias previstas na regulamentação portuguesa. Tal ocorrência se deve à não contabilização, da parte destes dois métodos, das fontes de sombreamento do horizonte na estação de arrefecimento. Sendo esta a principal componente causadora de sombra no edifício em estudo, revela-se pouco benéfico negligenciar este parâmetro que acaba por, em última análise, majorar os ganhos solares através do vão envidraçado calculados para a estação de arrefecimento.

Os vãos situados no jardim orientados a NNO (NNO_{J2} e NNO_{J4}) são aqueles que revelam o maior nível de obstrução existente no edifício, como evidenciado pela Tabela 4.1 e Figura 4.2. Estes são exemplos da falta de sensibilidade da metodologia de cálculo e das regras de simplificação, na estação de arrefecimento, para situações em que o perfil de obstrução é significativo no que diz respeito à orientação referida.

De forma geral, na estação de arrefecimento, os dois métodos convencionais constituem uma boa aproximação aos valores de referência à exceção dos vãos praticamente orientados a Norte.

4.2. Metodologia *fisheye* versus Método LiDAR

A metodologia *fisheye* foi a última abordagem tida em conta no desenvolvimento desta dissertação. Na Figura A.1 a Figura A.9 é possível conferir todas as fotografias retiradas na construção do método, bem como o resultado final do processamento de imagem e da sobreposição do diagrama solar de um dia típico de cada período de simulação. Na Figura 4.3 e Figura 4.4 é possível comparar os resultados obtidos pelas duas metodologias que constituem alternativas às abordagens convencionais discutidas anteriormente.

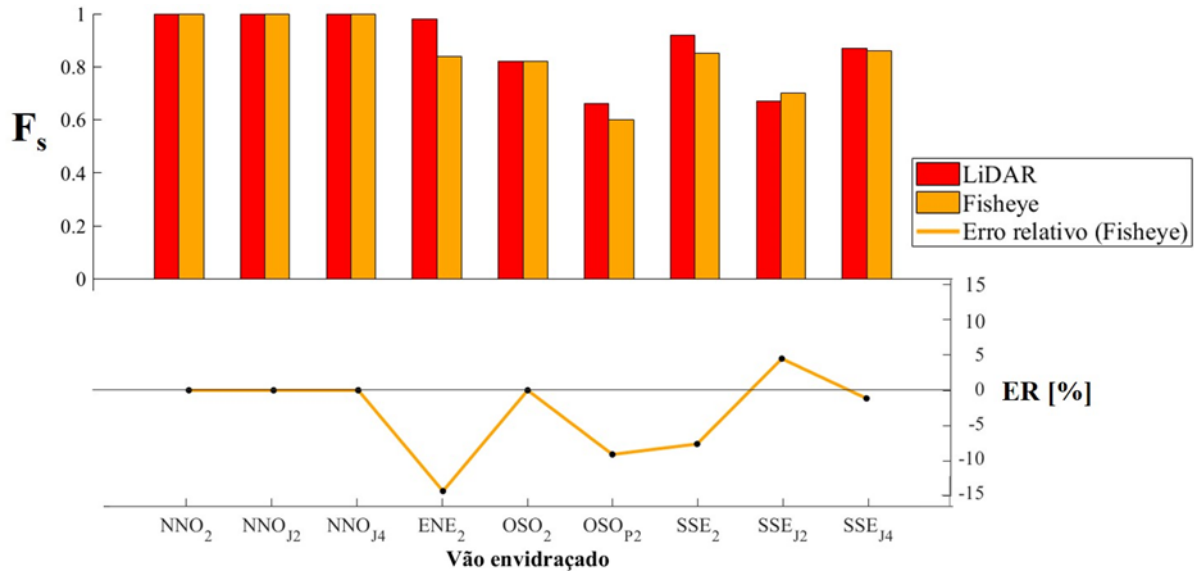


Figura 4.3: Fatores de sombreamento obtidos através dos métodos LiDAR e *fisheye* na estação de aquecimento.

Procedendo a uma análise semelhante à efetuada no ponto anterior, verificou-se que existe maioritariamente uma subestimação do fator de sombreamento calculado através do método *fisheye*, compreendendo o período correspondente à estação de aquecimento. Uma possível razão para esta tendência observada pode estar na capacidade da lente de captar parte do contorno do vão externo à caixilharia, contabilizando um maior sombreamento do vão. Outra hipótese reside no próprio modelo de radiação solar do *fisheye*, que considera um intervalo de tempo entre cada posição do Sol de 15 minutos face ao método horário do LiDAR, o que pode traduzir num maior rigor na definição de obstruções, e consequentemente, no cálculo do fator de sombreamento.

Atentando na figura acima reproduzida, constata-se a existência de uma boa aproximação para todos os vãos estudados, validando-se o uso da metodologia *fisheye* como uma alternativa fiável ao cálculo deste parâmetro pelos métodos convencionais no período de simulação em causa.

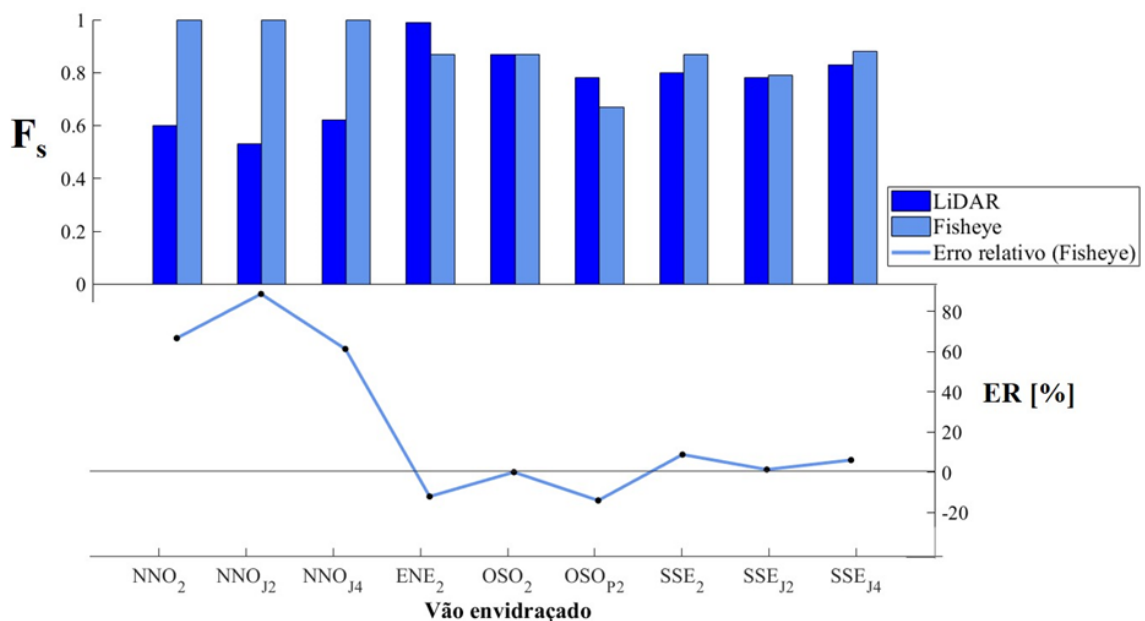


Figura 4.4: Fatores de sombreamento obtidos através dos métodos LiDAR e *fisheye* na estação de arrefecimento.

No que diz respeito à estação de arrefecimento, pela Figura 4.4, observa-se uma tendência de majoração do fator de sombreamento aplicando a metodologia *fisheye*. É visível que esta é uma abordagem que revela precisão no cálculo de F_s para todas as orientações à exceção de NNO. A causa pode ser encontrada analisando a Figura 4.5, da qual se retira que o método *fisheye* não representa o diagrama solar correspondente dentro do enquadramento da fotografia circular, tal ocorrência é devida à incerteza sobre o ângulo de abertura da lente que pode não totalizar os 180° pretendidos para o cálculo do fator nestas ocasiões particulares. Esta situação pode ser desvalorizada na ótica da obtenção dos ganhos solares, visto que a energia solar média incidente numa superfície com a orientação NNO, ao longo desta estação, é bastante reduzida.

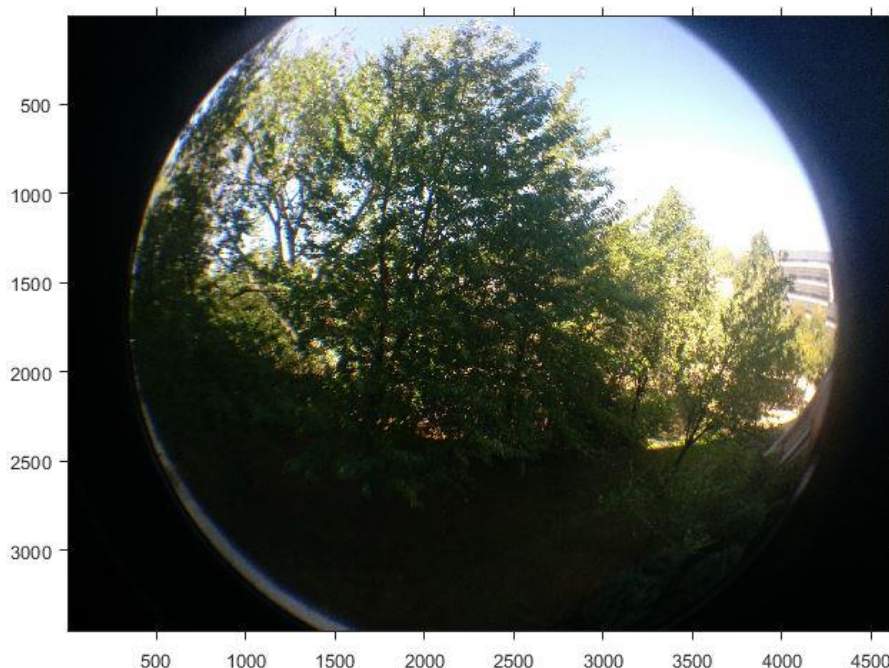


Figura 4.5: Fotografia *fisheye* retirada no vão NNO₂.

No que diz respeito aos vãos com orientações ENE e OSO, estes são mais uma prova de um modelo de radiação solar superior face ao encontrado no método LiDAR. A definição de um intervalo de tempo menor permite uma maior precisão na identificação de momentos em que o astro se encontra obstruído pelo horizonte, fundamental para envidraçados com orientações próximas de Este e Oeste, isto é, azimutes onde o sol tem uma menor altura solar e elevada probabilidade de se encontrar obstruído.

4.3. Benchmarking

A abordagem mais rigorosa praticada atualmente no contexto da lei portuguesa corresponde à metodologia de cálculo. Tendo a mesma como referência, é pertinente comparar os restantes métodos entre si investigando qual a solução que representa o maior benefício energético, isto é, que conduza a um desempenho superior pois será essa que o perito qualificado tenderá a escolher. De notar que é vantajoso investir num método mais complexo, sobretudo se esse conduzir a uma melhor estimativa dos ganhos solares, nomeadamente se os mesmos forem superiores na estação de aquecimento e inferiores na estação de arrefecimento. Assim, para averiguar a viabilidade de cada um dos métodos, é calculada a Diferença face à Metodologia de Cálculo (*DMC*) entre os valores de F_s obtidos por cada uma das abordagens ($F_{s,i}$) e a referência tida neste contexto ($F_{s,MC}$) para ambas as estações. Pelas razões

enunciadas no início do capítulo foi de novo negligenciada a regra, nos termos de comparação com o método LiDAR, que traduz o efeito de sombreamento do contorno do vão externo à caixilharia no âmbito da aplicação da metodologia de cálculo.

$$DMC [\%] = \frac{F_{s,i} - F_{s,MC}}{F_{s,MC}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Na Figura 4.6 e Figura 4.7 encontram-se os resultados obtidos para as estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, lembrando que nos vãos NNO₄, ENE₄, OSO₄ e SSE₄ não foi possível obter o fator de sombreamento através do método *fisheye* pela inacessibilidade ao local.

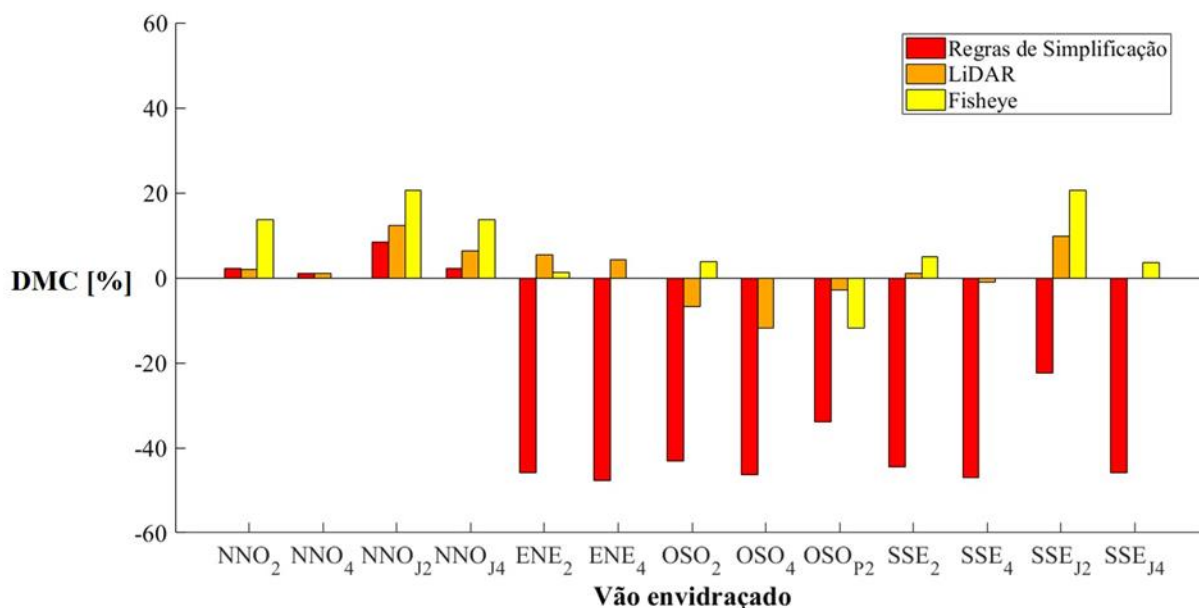


Figura 4.6: Comparação do DMC obtido nas três metodologias aplicadas no estudo para a estação de aquecimento.

Através da figura acima apresentada verifica-se que as regras de simplificação são muito penalizadoras para vãos que não se encontrem orientados no quadrante Norte. Uma utilização deste método, nas restantes orientações (mais relevantes sobretudo nesta estação), promove uma penalização muito elevada na contabilização dos ganhos solares de vãos envidraçados, podendo atingir valores entre os 40 e os 50% na maioria dos casos. Olhando para as duas alternativas propostas nesta dissertação, tem-se que o método *fisheye* é aquele que na estação de aquecimento, de forma geral, promove um maior benefício energético comparativamente à metodologia convencional. Vãos orientados a SSE revelaram resultados promissores com melhorias consideráveis em casos onde o perfil de obstrução é maior (pisos 2) atingindo os 20% de aumento nos ganhos solares.

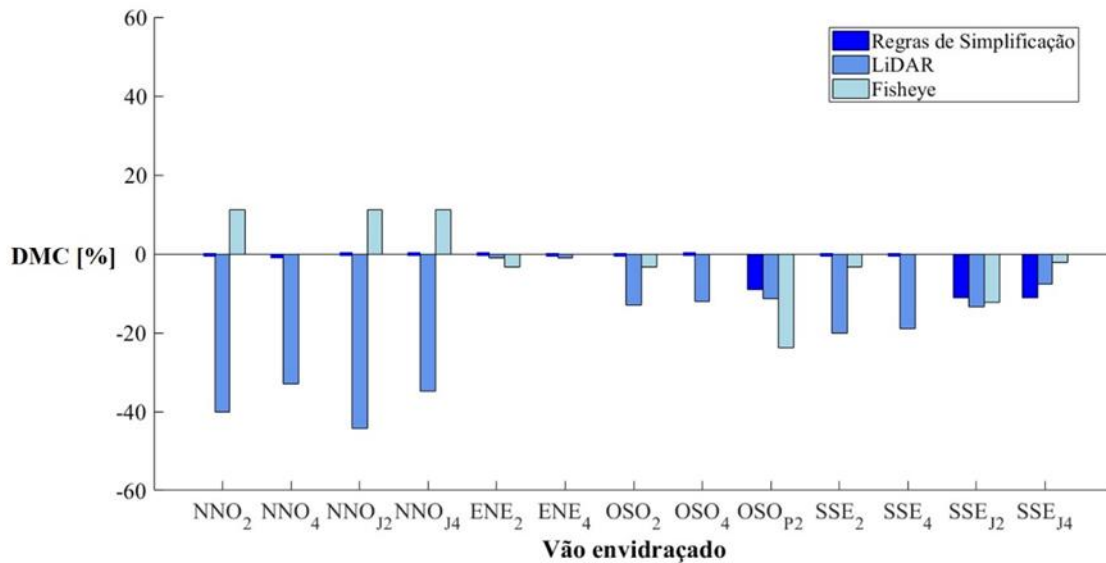


Figura 4.7: Comparação do DMC obtido nas três metodologias aplicadas no estudo para a estação de arrefecimento.

Atentando na Figura 4.7 constata-se que, na estação de arrefecimento, as regras de simplificação conduzem a ganhos solares inferiores para todas as direções estudadas, visto que a aplicação desta metodologia descarta os efeitos de obstrução do horizonte considerando apenas como fatores determinantes a orientação dos vãos e a existência de palas de sombreamento, elementos verticais que não têm particular influência no edifício em estudo. Ou seja, não existe um grande benefício ao considerar estas regras nesta estação face à aplicação da metodologia de cálculo, a não ser que os vãos em estudo possuam elementos horizontais ou verticais causadores de sombra, como é representado na Figura 4.7 em vãos como OSO_{P2}, SSE₁₂ e SSE₁₄. A facilidade de obtenção do fator a partir deste método comparativamente ao processo da metodologia de cálculo pode justificar a utilização destas regras sem comprometer os ganhos solares calculados.

Analisando as duas abordagens alternativas propostas, tem-se que o cálculo de F_s através do método LiDAR é mais vantajoso comparativamente à metodologia *fisheye* na larga maioria dos casos. A distribuição da Figura 4.7 é reflexo mais uma vez da grande vantagem deste método, a captação da posição do Sol num plano de 180°. Esta ocorrência é fundamental nesta estação onde o Sol nasce a azimutes mais baixos, melhorando o cálculo do fator para vãos localizados em fachadas orientadas a SSE em cerca de 20%. Por outro lado, o ocaso dá-se a azimutes mais elevados o que beneficia a obtenção deste parâmetro a NNO e, conseqüentemente, dos ganhos solares através dos envidraçados respetivos. Estas melhorias podem atingir os 40% nestas condições, ainda que não sejam tão relevantes quanto isso tendo em conta a radiação solar incidente na orientação em causa. Apesar da metodologia *fisheye* não permitir uma subestimação do F_s (e conseqüentemente dos ganhos solares) de forma tão significativa quanto o método LiDAR, este constitui uma boa alternativa à metodologia de cálculo prevista na lei portuguesa ao garantir uma boa aplicação em zonas onde o perfil de obstrução é significativo (ENE₂, OSO_{P2} e SSE₁₂) com melhorias de aproximadamente 20% face aos mesmos fatores calculados pelo método convencional.

5. Conclusões e trabalho futuro

O elevado crescimento populacional, a expansão dos centros urbanos e o desenvolvimento tecnológico reforçam cada vez mais a ideia de sustentabilidade urbana. Sendo o setor dos edifícios responsável por grande parte do consumo energético mundial, torna-se necessária a investigação de novas formas de intervir procurando a minimização da utilização dos recursos não-renováveis.

Uma das muitas formas de mitigar este impacto é a introdução de mecanismos de sombreamento que permitem a entrada de radiação solar através dos vãos envidraçados nos meses mais frios e bloqueiam a mesma, quando é indesejável, na época mais quente do ano. O fator de sombreamento surge como indicador deste binómio averiguando a adequação das obstruções e sistemas existentes no contexto da estação em causa. Atualmente existem dois métodos na legislação portuguesa para a obtenção do fator de sombreamento: a metodologia de cálculo, obrigatória para edifícios novos, que se revela um processo demorado envolvendo o cálculo dos ângulos de obstrução de três fontes de sombreamento, e as regras de simplificação que atribuem três classes de sombreamento a cada vão dependendo da estação, de uma análise do horizonte efetuada no local e da orientação da fachada.

De um modo geral, para o edifício em estudo na estação de aquecimento, o sistema de três classes das regras de simplificação revela uma penalização entre 40 e 50% face à metodologia de cálculo. Por outro lado, na estação de arrefecimento, o modo de obtenção rápido e intuitivo do fator a partir deste método comparativamente ao processo da metodologia de cálculo pode justificar a utilização destas regras sem comprometer os ganhos solares calculados. Esta oposição entre as duas regras previstas na lei permite concluir a necessidade de desenvolvimento de possíveis alternativas que sejam de simples aplicação e que apresentem um maior rigor no cálculo do fator de sombreamento.

As soluções propostas nesta dissertação, que incluem um MDS gerado a partir de LiDAR e um método fotográfico *fisheye*, apresentam uma precisão que lhes permite serem consideradas para o cálculo do fator de sombreamento em edifícios. De forma geral, a aplicação de ambos os métodos revela-se mais vantajosa comparativamente a qualquer uma das duas metodologias convencionais. Na estação de aquecimento, a metodologia *fisheye* acaba por conduzir a ganhos solares superiores, com diferenças a atingirem os 20%. Já na estação de arrefecimento, onde se quer minimizar a radiação solar incidente nos vãos envidraçados, o método LiDAR apresenta-se como aquele que conduz a ganhos solares inferiores, na grande maioria dos casos, entre 10 e 20% considerando as orientações mais relevantes. Os resultados apontam para que a lente *fisheye* não possua um ângulo de abertura de 180° como recomendado. Porém, este método utiliza um modelo de radiação solar que considera valores de 15 em 15 minutos em oposição ao intervalo de tempo horário do LiDAR. Assim é possível que, salvo algumas exceções, o *fisheye* seja tão ou mais preciso do que o método que faz uso do MDS.

O trabalho efetuado focou-se no cálculo do fator de sombreamento num edifício onde não existem palas verticais e horizontais adjacentes aos envidraçados. Assim, o estudo carece de uma validação ao nível deste tipo de obstruções, de modo a avaliar a precisão do método LiDAR em situações onde o levantamento deste tipo de dados dificilmente conseguiria registar esses mesmos detalhes do edifício. No que diz respeito à metodologia *fisheye*, o processamento das fotografias foi desenvolvido para dias de céu limpo, pelo que não existe a garantia de aplicabilidade da mesma na existência de nebulosidade.

Apesar da fiabilidade dos resultados obtidos através do método LiDAR, este envolve a criação de um MDS. Então, não existindo um modelo previamente criado, esta torna-se uma abordagem bastante

dispendiosa. Ainda assim para tornar o método de fácil utilização seria necessário criar um modo mais rápido e cómodo de identificar o vão pretendido no MDS, substituindo o uso das plantas do edifício.

No que diz respeito ao método *fisheye*, este para além de revelar uma precisão dos dados bastante aceitável, constitui uma abordagem incomparavelmente mais económica face aos levantamentos LiDAR. Esta metodologia encontra-se suficientemente automatizada sendo apenas necessária a introdução de melhorias no que toca ao processamento de imagem, na medida em que ainda é preciso corrigir pixéis que se encontram atribuídos incorretamente a uma dada tipologia. Uma outra barreira à completa automação do processo é a introdução manual do azimute da fachada como *input*. Ainda assim, considera-se um método promissor que, ao ser desenvolvido numa aplicação para dispositivos móveis, pode trazer benefícios ao nível da certificação energética e tornar-se a referência no que toca ao cálculo do fator de sombreamento em edifícios.

No âmbito desta dissertação foram desenvolvidos dois métodos para a determinação do fator de sombreamento em edifícios. A análise efetuada demonstrou que um método utilizando uma simples e económica lente *fisheye*, acoplada a uma câmara de um telemóvel convencional, permite erros na determinação do fator inferiores a 15% nas orientações mais relevantes.

Referências Bibliográficas

- [1] IOM, “World Migration Report,” Imprimerie Courand et Associés, França, 2015.
- [2] European Commission, “2020 climate & energy package,” 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en.
- [3] European Parliament, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast),” *Official Journal of the European Union*, pp. L153/13-L153/35, 2010.
- [4] Eurostat, “Final energy consumption by sector,” 2016.
- [5] International Energy Agency, “Modernising Building Energy Codes to Secure our Global Energy Future,” OECD/IEA, França, 2013.
- [6] P. Littlefair, “Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, pp. 303-326, 1998.
- [7] Ministério da Economia e do Emprego, “Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013,” *Diário da República*, 2.ª série - N.º 234, pp. 35088-(58)-35088-(87), 2013.
- [8] V. Corrado, Y. Cascone e V. Serra, “Calculation procedure of the shading factor under complex boundary conditions,” *Solar Energy*, pp. 2554-2539, 2011.
- [9] Ministério da Economia e do Emprego, “Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013,” *Diário da República*, 2.ª série — N.º 234, pp. 35088-(14) - 35088-(25), 2013.
- [10] University of Siegen, *SOMBRERO*.
- [11] A. Niewianda e F. Heidt, “SOMBRERO: A PC-Tool to calculate shadows on arbitrarily oriented surfaces,” *Solar Energy*, pp. 253-263, 1996.
- [12] A. Yezioro e E. Shaviv, ““Shading”: Analyzing mutual shading among buildings”.
- [13] Shadowfx, “Amethyst ShadowFX V3,” 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: <http://www.shadowfx.com/index.htm>.
- [14] TownScope, 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: <http://www.townscope.com/index.php?page=home&lang=EN&theme=default>.
- [15] SketchUp, 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: <http://www.sketchup.com/>.
- [16] R. Perez e R. Seals, “A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces,” *Solar Energy*, pp. 221-231, 1987.
- [17] S. Freitas, C. Catita, P. Redweik e M. Brito, “Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 915-931, 2014.
- [18] E. G. d. Melo, “Geração Solar Fotovoltaica: estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificações,” São Paulo, 2012.
- [19] C. Ratti, “Urban analysis for environmental prediction,” 2001.
- [20] GOSOL, 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: <http://www.gosol.de/gosol.htm>.
- [21] P. Redweik, C. Catita e M. Brito, “3D Local scale solar radiation model based on urban lidar data,” 2015.
- [22] A. Cristovão, “Análise de obstruções à radiação solar em contexto urbano,” 2016.
- [23] P. Redweik, C. Catita e M. Brito.
- [24] ESRI, “ArcGis,” 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: <https://www.arcgis.com/features/index.html>.

- [25] P. M. Rich, "Design and Implementation of the Solar Analyst an areview extension for modeling solar radiation at landscape scales," 2015.
- [26] Solmetric Corporation, *Solmetric SunEye*, 2010.
- [27] The Solar Design Company, *Panorama Master*, 2011.
- [28] Google, "GoogleEarth," 6 Fevereiro 2017. [Online]. Available: <https://www.google.com/earth/>.
- [29] Ministério da Economia e do Emprego, "Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013," *Diário da República*, 2.ª série — N.º 234, pp. 35088-(26) - 35088-(31), 2013.
- [30] MathWorks, "MATLAB," 14 Outubro 2017. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [31] K&F Concept, "Fisheye Lenses," 14 Outubro 2017. [Online]. Available: https://www.kentfaith.com/fisheye-lenses/KF23.011_3in1-lens-set-hd-fisheye-lens-macro-lens-super-wide-angle-lens.
- [32] B. Holmer, U. Postgård e M. Eriksson, "Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI," *Theoretical and Applied Climatology*, pp. 33-40, 2001.
- [33] D. Schneider, E. Schwalbe e H.-G. Maas, "Validation of geometric models for fisheye lenses," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 259-266, 2009.
- [34] ISO/FDIS 13790:2007(E), 2007.

A. Anexos

Anexo A - Levantamento fotográfico e pós-processamento pelo método *fisheye*

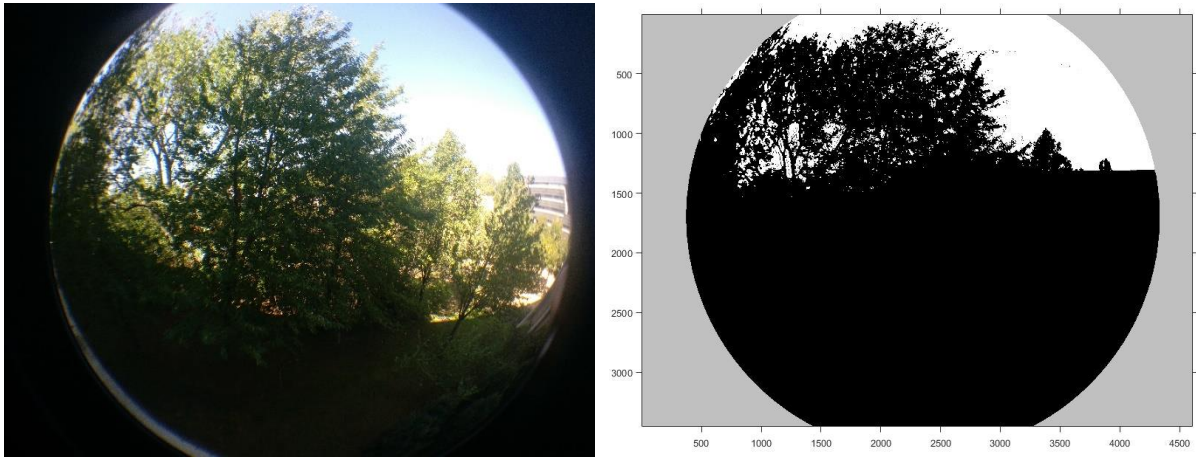


Figura A.1: Fotografia *fisheye* original retirada no vão NNO₂ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita).

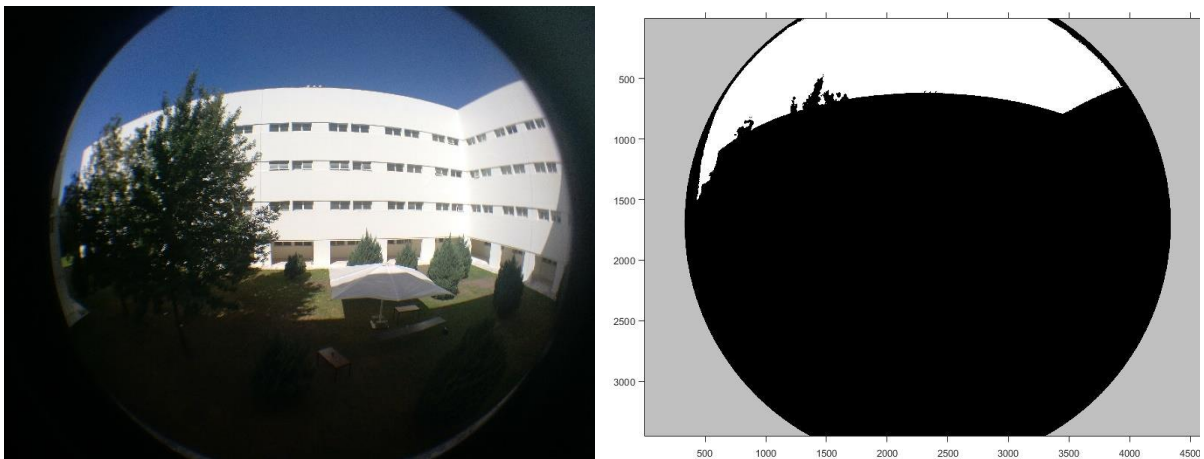


Figura A.2: Fotografia *fisheye* original retirada no vão NNO₂ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita).

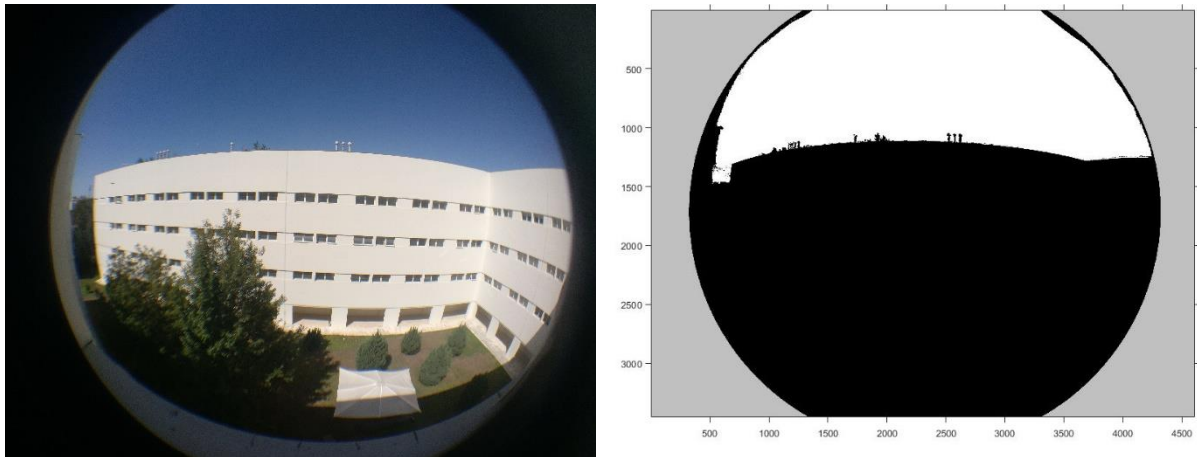


Figura A.3: Fotografia *fisheye* original retirada no vão NNO14 (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita).

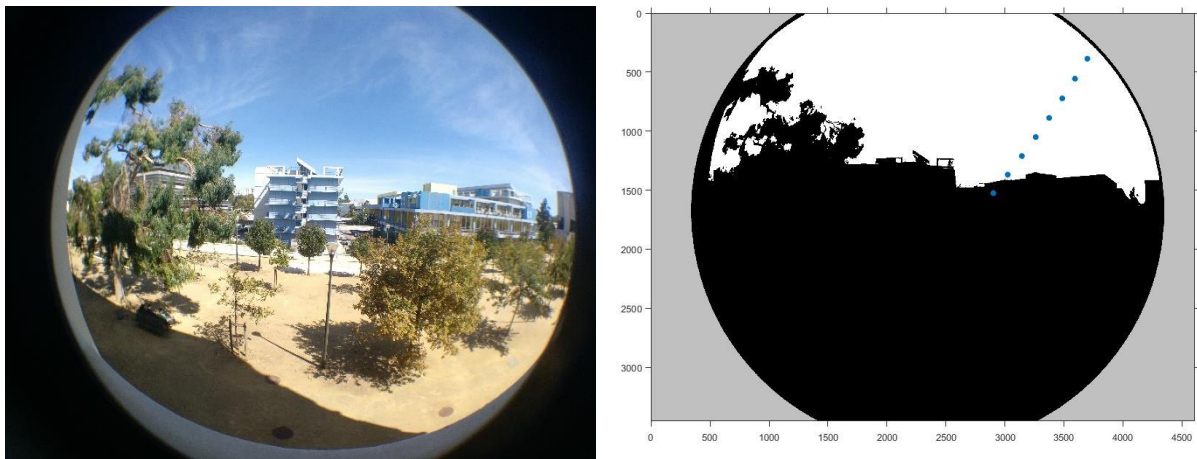


Figura A.4: Fotografia *fisheye* original retirada no vão ENE2 (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 20 de Abril.

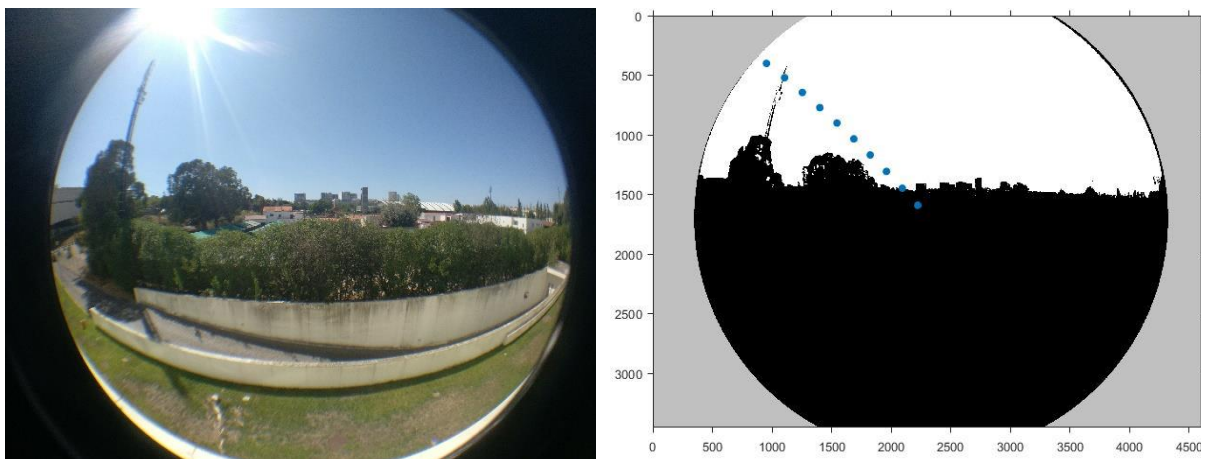


Figura A.5: Fotografia *fisheye* original retirada no vão OSO2 (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 4 de Fevereiro.

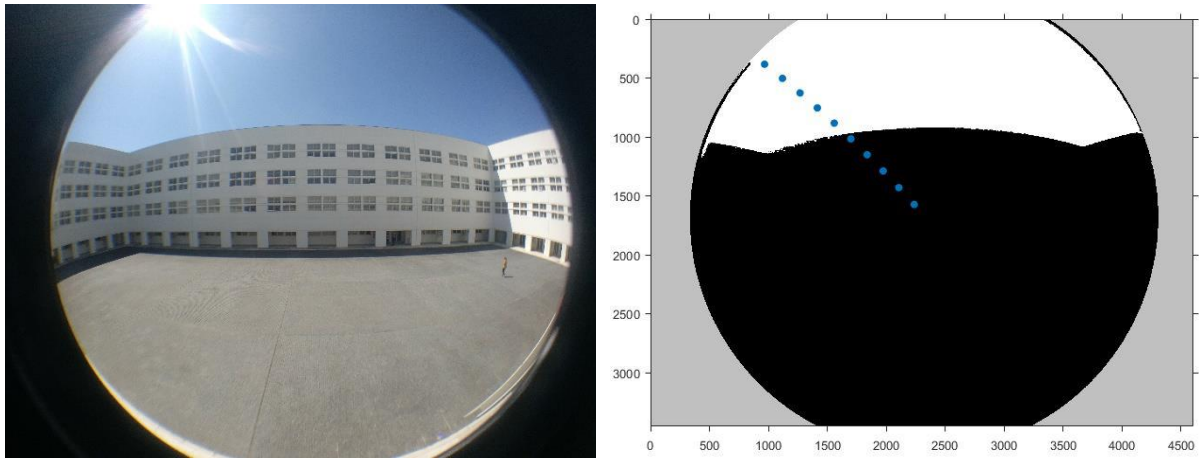


Figura A.6: Fotografia *fisheye* original retirada no vão OSO₂ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 4 de Fevereiro.

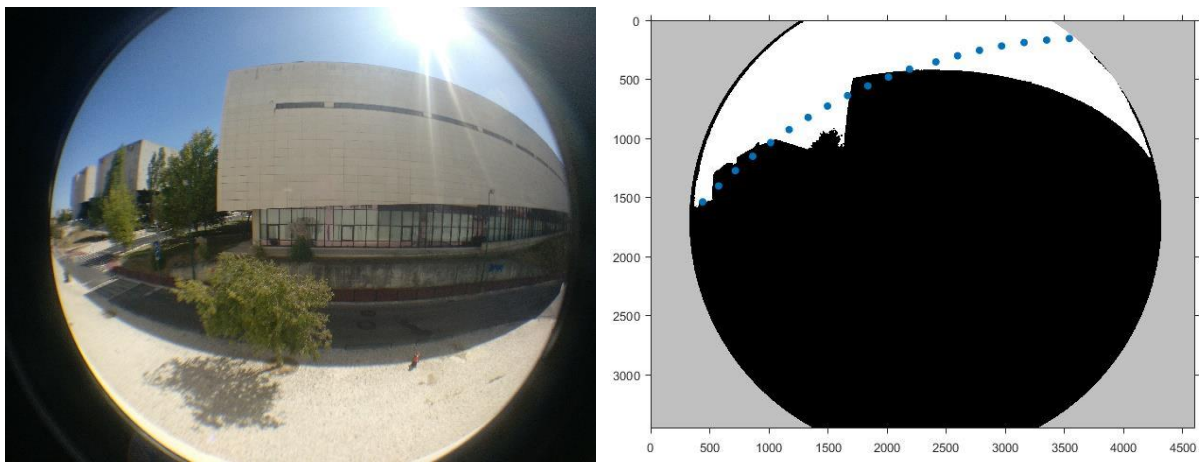


Figura A.7: Fotografia *fisheye* original retirada no vão SSE₂ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 21 de Dezembro.

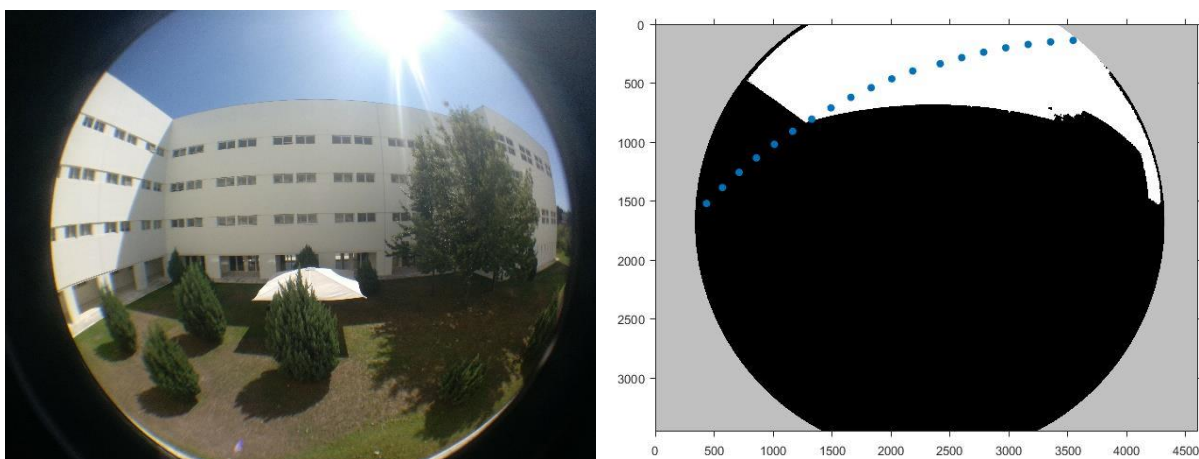


Figura A.8: Fotografia *fisheye* original retirada no vão SSE₁₂ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 21 de Dezembro.

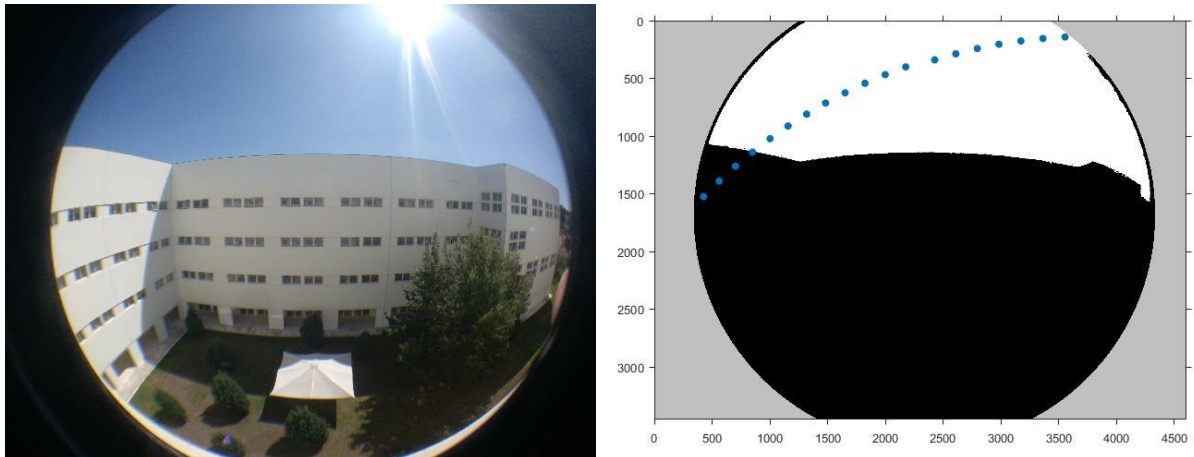


Figura A.9: Fotografia *fisheye* original retirada no vão SSE₁₄ (à esquerda) e sobreposição do modelo solar na respetiva vista do vão (à direita) no dia 21 de Dezembro.

Anexo B - Fatores de sombreamento dos vãos envidraçados obtidos pela aplicação da regulamentação portuguesa, método LiDAR e método *fisheye*

Tabela A.1: Fatores de sombreamento obtidos pelos diferentes métodos aplicados na estação de aquecimento.

Vão	Metodologia de Cálculo (sem regra contorno do vão)	Metodologia de Cálculo (com regra contorno do vão)	Regras de Simplificação	LiDAR	<i>Fisheye</i>
NNO ₂	0,98	0,88	0,90	1,00	1,00
NNO ₄	0,99	0,89	0,90	1,00	-----
NNO _{J2}	0,89	0,83	0,90	1,00	1,00
NNO _{J4}	0,94	0,88	0,90	1,00	1,00
ENE ₂	0,93	0,83	0,45	0,98	0,84
ENE ₄	0,96	0,86	0,45	1,00	-----
OSO ₂	0,88	0,79	0,45	0,82	0,82
OSO ₄	0,93	0,84	0,45	0,82	-----
OSO _{P2}	0,68	0,68	0,45	0,66	0,60
SSE ₂	0,91	0,81	0,45	0,92	0,85
SSE ₄	0,94	0,85	0,45	0,93	-----
SSE _{J2}	0,61	0,58	0,45	0,67	0,70
SSE _{J4}	0,87	0,83	0,45	0,87	0,86

Tabela A.2: Fatores de sombreamento obtidos pelos diferentes métodos aplicados na estação de arrefecimento.

Vão	Metodologia de Cálculo (sem regra contorno do vão)	Metodologia de Cálculo (com regra contorno do vão)	Regras de Simplificação	LiDAR	<i>Fisheye</i>
NNO ₂	1,00	0,90	0,90	0,60	1,00
NNO ₄	1,00	0,90	0,90	0,67	-----
NNO _{J2}	0,95	0,90	0,90	0,53	1,00
NNO _{J4}	0,95	0,90	0,90	0,62	1,00
ENE ₂	1,00	0,90	0,90	0,99	0,87
ENE ₄	1,00	0,90	0,90	0,99	-----
OSO ₂	1,00	0,90	0,90	0,87	0,87
OSO ₄	1,00	0,90	0,90	0,88	-----
OSO _{P2}	0,88	0,88	0,80	0,78	0,67
SSE ₂	1,00	0,90	0,90	0,80	0,87
SSE ₄	1,00	0,90	0,90	0,81	-----
SSE _{J2}	0,90	0,90	0,80	0,78	0,79
SSE _{J4}	0,90	0,90	0,80	0,83	0,88