

**Simulação do potencial solar em ambiente urbano e sua  
calibração. Aplicação a um caso de estudo.**

**Filipa Rosário Dias**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Paula Martins Falcão Flor

**Júri**

Presidente: Prof. Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Doutora Maria João dos Santos Rodrigues

**Outubro 2020**



## Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço em especial às minhas orientadoras. À Professora Maria da Glória Gomes, pelo seu apoio ao longo destes meses, pelos conhecimentos transmitidos, pela constante dedicação e disponibilidade demonstrada e pela confiança transmitida em todos os momentos, que muito contribuiu para a realização desta dissertação. E, à Professora Ana Paula Falcão agradeço pela paciência, motivação e constante dedicação, pela sua alegria contagiante e positividade, que sempre me motivou nas adversidades que foram aparecendo ao longo desta dissertação.

Um obrigada à Júlia Pereira pela sua disponibilidade e por todos os conhecimentos transmitidos especialmente relativos ao programa. Um obrigada à Rita Machete pela “passagem de testemunho” e ajuda inicial neste trabalho.

Agradeço à minha prima Carolina e ao meu primo Nelson pela ajuda ao longo desta dissertação.

Agradeço aos meus pais, em especial à minha mãe pela força, paciência e apoio incondicional ao longo de toda a minha vida. Ao meu pai, pela leveza com que encara a vida e por todos os conhecimentos transmitidos, em especial, nestes anos de faculdade. Sem eles não teria sido possível chegar até aqui.

Agradeço também aos meus irmãos, ao Diogo e ao Miguel, e toda a minha família que sempre se mostrou interessada e me apoiaram ao longo do meu percurso académico.

Agradeço de forma especial ao António que me acompanhou ao longo de todos estes anos e, nestes últimos meses, pelo seu apoio incondicional para que conseguisse chegar ao fim, por todo o seu tempo, carinho, motivação, amor e especialmente por tudo aquilo que representa para mim.

Finalmente, agradeço aos meus colegas e amigos de curso que tornaram estes anos inesquecíveis, momentos e vivências que vou levar sempre comigo. Em especial à Ana Filipa, ao Valdemiro, à Carolina, ao Lucas e ao David Francisco.

A todos, o meu sincero obrigada!



## Resumo

Para alcançar as metas da União Europeia de redução das emissões de gases de efeito de estufa e descarbonização, a implementação padronizada de edifícios com energia quase nula (NZEB) até ao final de 2020 é crucial. Esta recomendação tem motivado investigação com vista à exploração e otimização do potencial solar recorrendo ao uso crescente de tecnologias de energia renovável, promovendo um uso mais eficiente dos recursos naturais. Neste contexto, a avaliação do potencial solar é particularmente importante quando se pretende gerar energia nos edifícios a partir da energia solar nas coberturas e fachadas.

O objetivo principal deste estudo é avaliar o impacto das variáveis do modelo, na simulação do potencial solar para um caso de estudo de geometria complexa, calibrando com resultados experimentais obtidos *in situ*. A modelação foi realizada em *CityEngine* e recorreu-se ao programa *EnergyPlus* para as simulações. Primeiramente, foi realizada uma campanha experimental com recolha *in situ* de irradiâncias nas fachadas e pátio da Vila Luz, uma habitação operária em Lisboa, durante três períodos distintos: equinócio, solstício de verão e solstício de inverno. Para calibração do modelo de simulação, os valores preditos e experimentais de irradiância foram comparados, e os parâmetros mais influentes foram identificados (por exemplo, parâmetros climáticos externos; ambiente urbano circundante; discretização das fachadas; absorvância solar dos materiais da envolvente dos edifícios; e albedo do pátio).

O estudo revela a importância da definição do ambiente urbano circundante, nomeadamente quando na presença de malhas urbanas densas. A definição detalhada do contexto urbano é essencial particularmente quando o sol está numa posição relativamente baixa e os raios solares são perpendiculares às fachadas.

**Palavras-chave:** Potencial solar, Fachadas, Contexto urbano, Calibração experimental, Modelos de simulação, Irradiância.



## Abstract

In order to achieve European Union's targets of greenhouse gas emissions reduction and decarbonization, the standardized implementation of nearly zero-energy buildings (NZEB) by the end of 2020 is crucial. This has motivated investigation aiming towards solar potential exploitation and optimization, with growing implementation of renewable energy technologies, and thus promoting a more efficient use of natural resources. In this regard, the evaluation of solar potential is particularly important when focusing on generating energy on buildings from solar energy on the roofs and façades.

The main purpose of this study is the simulation and experimental calibration of solar potential on buildings. The modelling was made in CityEngine and the program EnergyPlus was used in the simulations. Firstly, an experimental campaign was carried out with *in situ* collection of irradiance on the facades and in the courtyard of "Vila Luz", a heritage working class housing in Lisbon, for three distinct periods of the year: equinox, summer solstice and winter solstice. For calibration of the simulation model, predicted and experimental values of irradiance were compared, and the most influencing parameters were identified (e.g. outdoor climatic parameters; surrounding urban environment; discretization of the facades; absorptance of the buildings' envelope and courtyard albedo).

The study reveals the importance of defining the surrounding urban environment, namely when considering dense urban networks. Detailed definition of the urban context is essential, in particular when the sun is in a lower position and the sun's rays are perpendicular to the façades.

**Keywords:** Solar potential, Building facades, Urban context, Experimental calibration, Simulation models, Irradiance.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
1.2. Enquadramento.....	1
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estrutura.....	3
<b>2. ESTADO DE ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1. Tecnologias de aproveitamento solar.....	5
2.2. Radiação e geometria solar.....	6
2.3. Modelação da radiação solar em ambientes urbanos.....	8
2.4. Estudos anteriores.....	10
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
<b>4. CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>17</b>
4.1. Habitação operária.....	17
4.1.1. Contextualização histórica.....	17
4.1.2. Caracterização tipológica.....	17
4.2. Localização do caso de estudo.....	19
4.3. Soluções e elementos construtivos da Vila.....	20
4.4. Materiais constituintes.....	21
<b>5. ESTUDO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>23</b>
5.1. Procedimento experimental.....	23
5.1.1. Preparação da monitorização.....	23
5.1.2. Campanhas experimentais.....	25
5.2. Resultados experimentais.....	26
5.2.1. Edifício 1.....	26
5.2.2. Edifício 2.....	27
5.2.3. Edifício 3.....	29
5.2.4. Pátio.....	31

<b>6.</b>	<b>SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....</b>	<b>33</b>
6.1.	Geometria 3D em SketchUp .....	33
6.2.	Descrição geral do programa EnergyPlus .....	34
6.3.	Campos de entrada EnergyPlus .....	35
6.3.1.	Simulation Parameters .....	35
6.3.2.	Location and Climate.....	36
6.3.3.	Surface Construction Elements .....	36
6.3.4.	Thermal Zones and Surfaces .....	36
6.4.	Ficheiro climático .....	37
6.5.	Campos de saída EnergyPlus (Output) .....	38
<b>7.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
7.1.	Estudo do impacto das variáveis de input .....	40
7.1.1.	Modelo base.....	40
7.1.2.	Influência dos parâmetros climáticos .....	43
7.1.3.	Influência da semântica do objeto .....	45
7.1.4.	Influência do contexto urbano .....	46
7.1.5.	Influência da geometria intrínseca ao próprio modelo.....	49
7.1.6.	Influência da absorvância solar das superfícies.....	52
7.2.	Análise final.....	54
7.2.1.	Pátio .....	54
7.2.2.	Edifício 1 .....	59
7.2.3.	Edifício 2 .....	60
7.2.4.	Edifício 3 .....	63
7.2.5.	Discretização do modelo .....	66
7.3.	Calibração do modelo .....	68
7.4.	Análise do potencial solar dos envidraçados da Vila Luz para os dias de campanha .....	71
7.5.	Análise do potencial solar anual dos envidraçados, das fachadas e das coberturas .....	73
7.6.	Tempo de simulação.....	77
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>78</b>
8.1.	Conclusões .....	78
8.2.	Desenvolvimentos futuros.....	80
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>85</b>
	Anexo A – Influência do ficheiro climático.....	89
	Anexo B – Influência da semântica do objeto.....	99
	Anexo C – Influência do contexto urbano.....	101

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Quadro síntese dos estudos analisados .....	11
Tabela 4.1 - Materiais constituintes e características da envolvente opaca do caso de estudo.....	21
Tabela 7.1 – Irradiância obtida na fachada do Edifício 1 para o equinócio, solstício de verão e solstício de inverno às 09:00H, 12:00H e 15:00H. Valores expressos em W/m <sup>2</sup> .....	41
Tabela 7.2 – Irradiância obtida no pátio e nas fachadas dos Edifícios 2, 3 para o equinócio, solstício de verão e solstício de inverno às 09:00H, 12:00H e 15:00H. Valores expressos em W/m <sup>2</sup> .....	42
Tabela 7.3 - CV(RMSE) e MBE para o ficheiro climático do IST e do EP para todas as campanhas. ....	45
Tabela 7.4 - Valores de refletância e absorptância solar medidos experimentalmente.....	52
Tabela 7.5 - Valores de Cv(RMSE) e de MBE para a campanha do equinócio para cada edifício e para o pátio.....	69
Tabela 7.6 - Valores de Cv(RMSE) e de MBE para a campanha do solstício de verão para cada edifício e para o pátio. ....	70
Tabela 7.7 - Valores de Cv(RMSE) e de MBE para a campanha do solstício de inverno para cada edifício e para o pátio.....	70
Tabela 7.8 – Quadro síntese com exemplos de algumas simulações realizadas e o correspondente tempo de simulação. ....	77



# Lista de figuras

Figura 1.1 - Radiação global anual na Europa. ....	2
Figura 2.1 - Edifício Solar XXI.....	6
Figura 2.2 - Centro de Controlo Operacional da Brisa .....	6
Figura 2.3 - Movimento do Sol em Portugal para os vários períodos do ano. ....	7
Figura 2.4 - Representação da variação da radiação solar global em envidraçados com orientações diferentes, na estação de inverno e na estação de verão. ....	8
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia .....	15
Figura 4.1 - Localização e identificação do caso de estudo. ....	20
Figura 5.1 – Registos fotográficos da Vila Luz: a) Edifício 1; b) pátio; c) Edifício2 (lado esquerdo) e Edifício 3 (lado direito); d) Edifício 2. ....	24
Figura 5.2 – Ilustração e localização dos pontos de registo das irradiâncias: a) edifício 1; b) edifício 2; c) edifício 3; e d) pátio.....	25
Figura 5.3 - Piranómetro em plano vertical na fachada de um dos edifícios: a) localização do sensor na parede ; b) detalhe da localização do sensor. ....	25
Figura 5.4 - Irradiâncias médias no Edifício 1 no equinócio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ). ....	26
Figura 5.5 - Irradiância média no Edifício 1 no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470.0 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ). ....	27
Figura 5.6 – Irradiâncias médias no Edifício 1 no solstício de inverno: a) 9h00 ( $E_g^h=60.0 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=55.9 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=57.5 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=56.5 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=49.5 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=48.3 \text{ W/m}^2$ ). ....	27
Figura 5.7 - Irradiâncias médias no Edifício 2 no equinócio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ). ....	28
Figura 5.8 - Irradiâncias médias no Edifício 2 no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ). ....	28

Figura 5.9 - Irradiâncias médias no Edifício 2 no solstício de inverno: a) 9h00 ( $E_g^h=60.0 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=55.9 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=57.5 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=56.5 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=49.5 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=48.3 \text{ W/m}^2$ ). .....	29
Figura 5.10 - Irradiâncias médias no Edifício 3 no equinócio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ). .....	30
Figura 5.11 - Irradiâncias médias no Edifício 3 no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ). ....	30
Figura 5.12 - Irradiâncias médias no solstício de inverno no Edifício 3: a) 9h00 ( $E_g^h=60.0 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=55.9 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=57.5 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=56.5 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=49.5 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=48.3 \text{ W/m}^2$ ). .....	31
Figura 5.13 - Irradiâncias médias no equinócio no Pátio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ). .....	31
Figura 5.14 - Irradiâncias médias no Pátio no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ). ....	32
Figura 5.15 - Irradiâncias médias no Pátio no solstício de inverno: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ; $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ). ....	32
Figura 6.1 - Criação do modelo de simulação .....	33
Figura 6.2 - Implementação do modelo digital de superfície e criação do modelo de caso de estudo	34
Figura 7.1 - Vista principal das fachadas dos edifícios de Vila Luz. a) Edifício 1; b) Edifícios 2 e 3, respetivamente, esquerda e direita.....	40
Figura 7.2 - Denominação de cada elemento após discretização da fachada do Edifício 1. ....	41
Figura 7.3 - Modelo Base para as simulações do potencial solar: a) Edifício 1; b) Pátio. ....	42
Figura 7.4- Modelo Base para as simulações do potencial solar: a) Edifício 2; b) Edifício 3.....	42
Figura 7.5 - Representação gráfica da irradiância no Pátio no solstício de verão às 15:00H, com o ficheiro climático do IST. ....	43
Figura 7.6 - Representação gráfica da irradiância no Pátio no solstício de verão às 15:00H, com o ficheiro climático do EP. ....	43
Figura 7.7 - Representações gráficas de irradiância no Edifício 2 para as 15:00H no solstício de verão: a) e b) simulação com o ficheiro climático do IST para o primeiro andar e rés-do-chão, respetivamente ; c) e d) simulação com o ficheiro climático do EP para o primeiro andar e rés-do-chão, respetivamente. ....	44
Figura 7.8 – Representação gráfica da irradiância no Pátio como tipo de superfície <i>Floor</i> às 12:00H, na campanha de equinócio. ....	45
Figura 7.9 - Representação gráfica da irradiância no Pátio como tipo de superfície <i>Wall</i> às 12:00H, na campanha de equinócio. ....	46

Figura 7.10 - Representação gráfica da irradiância obtida no Pátio como uma superfície do tipo <i>Roof</i> pelas 12:00H, no equinócio.....	46
Figura 7.11 - Modelo apenas com os elementos laterais do Pátio.....	47
Figura 7.12 -Valores de irradiância obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 09:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão. ....	47
Figura 7.13 – Valores de irradiância obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 12:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão. ....	48
Figura 7.14 – Valores de irradiância obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 15:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão. ....	48
Figura 7.15 - Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 09:00 horas em que, com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão.....	50
Figura 7.16 - Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 12:00 horas em que: (i) com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; (ii) Sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão. ....	51
Figura 7.17 - Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 15:00 horas em que, com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão.....	51
Figura 7.18 – Representação gráfica dos valores de irradiância obtidos pelas 09:00 no equinócio em que: a) simulação com a absorptância solar referente à literatura ; b) absorptância solar referente à medida no local. ....	53
Figura 7.19 - Representação gráfica dos valores de irradiância obtidos pelas 12:00 no equinócio em que: a) simulação com a absorptância solar referente à literatura ; b) absorptância solar referente à medida no local. ....	53
Figura 7.20 - Representação gráfica dos valores de irradiância obtidos pelas 15:00 no equinócio em que: a) simulação com a absorptância solar referente à literatura ; b) absorptância solar referente à medida no local. ....	53
Figura 7.21 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados do Pátio na simulação de equinócio pelas: a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H. ....	55
Figura 7.22 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados do Pátio na simulação de solstício de verão pelas: a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H.....	56
Figura 7.23 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados do Pátio na simulação de solstício de inverno pelas: a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H. ....	57

Figura 7.24 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados no Edifício 1 na simulação de solstício de verão pelas: a) 09:00H ; b) 12:00H; c) 15:00H.....	59
Figura 7.25 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados no Edifício 1 na simulação de solstício de inverno pelas: a) 09:00H ; b) 12:00H; c) 15:00H.....	60
Figura 7.26 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de equinócio pelas: a) e b) 09:00H ; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.....	60
Figura 7.27 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de solstício de verão pelas: a) e b) 09:00H ; c) e d) 12:00H; e) e f)15:00H. ..	61
Figura 7.28 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de solstício de inverno pelas: a) e b) 09:00H ; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H. ....	62
Figura 7.29 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de equinócio pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.....	64
Figura 7.30 – Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de solstício de verão pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H. ...	64
Figura 7.31 – Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de solstício inverno pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H. ....	65
Figura 7.32 - Divisão da fachada do Edifício 2 em superfícies menores. ....	67
Figura 7.33 - Variabilidade dos pontos do Edifício 2 no equinócio às 12h00 em que: a) 39; b) 38; c) 37; d) 36 .....	67
Figura 7.34 – Variabilidade dos pontos do Edifício 2 no equinócio às 12h30 em que: a) 39; b) 38; c) 37; d) 36 .....	68
Figura 7.35 - Energia recebida nos envidraçados da Vila Luz no equinócio.....	72
Figura 7.36 - Energia recebida nos envidraçados da Vila Luz no solstício de verão .....	72
Figura 7.37 - Energia recebida nos envidraçados da Vila Luz no solstício de inverno .....	72
Figura 7.38 – Irradiância global mensal nos envidraçados dos edifícios da Vila Luz .....	74
Figura 7.39 - Irradiância global mensal nas fachadas dos edifícios da Vila Luz .....	75
Figura 7.40 – Irradiância global mensal nas coberturas dos edifícios da Vila Luz.....	75
Figura 7.41 - Irradiância global anual nos envidraçados, nas fachadas e nas coberturas da Vila Luz: a) kWh/m <sup>2</sup> ; b) MWh .....	76

# Lista de siglas, acrónimos e símbolos

BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic</i>
BIPVT	<i>Building Integrated Photovoltaic Thermal</i>
BIST	<i>Building Integrated Solar Thermal</i>
CE	Comissão Europeia
CML	Câmara Municipal de Lisboa
DDEE	Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios 2010/31/UE
DEE	Diretiva Eficiência Energética 2012/27/UE
GEE	Gases de Efeito Estufa
INETI	Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação
IST	Instituto Superior Técnico
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
nZEB	<i>Nearly Zsero Energy Buildings</i>
PCE	Pacto Ecológico Europeu
PV	Painéis Fotovoltaicos
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UE	União Europeia
3D	Tridimensional
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono



# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

As alterações climáticas, e as suas consequências a nível social, económico e ambiental, são atualmente um dos maiores desafios da Humanidade. Estão fortemente associadas à dependência de fontes de energia não renováveis, nomeadamente combustíveis fósseis, que são responsáveis por grande parte das emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE). A União Europeia (UE) propôs algumas metas a serem alcançadas na área das alterações climáticas e energia, até ao final de 2020 (Parlamento Europeu, 2002; Parlamento Europeu, 2010; Parlamento Europeu, 2012), e, a longo prazo, a Comissão Europeia (CE) pretende atingir a neutralidade climática até 2050 (Parlamento Europeu, 2018). Desta forma, os governos têm sido pressionados a encontrar alternativas menos poluentes, e que ao mesmo tempo consigam satisfazer as necessidades energéticas crescentes. Durante as últimas décadas a energia solar evoluiu como uma das maiores fontes alternativas às energias fósseis, tanto para produção de energia elétrica, como de aquecimento e arrefecimento de edifícios, e ainda aquecimento de águas sanitárias. A avaliação do potencial solar no ambiente urbano tornou-se assim uma necessidade emergente, com vista à redução do consumo de energias primárias e da emissão de GEE. Desta forma, esta área tem sido alvo de grande investigação por parte da comunidade científica.

## 1.2. Enquadramento

Os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo de energia da UE e 36% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Parlamento Europeu, 2010). São, portanto, o maior consumidor de energia da Europa. Atualmente, cerca de 35% dos edifícios da UE têm mais de 50 anos e cerca de 75% são energeticamente ineficientes. Além disso, apenas 1% do material utilizado na construção é renovado por ano. A renovação de edifícios existentes pode levar a uma significativa economia de energia, uma vez que pode reduzir em 5-6% o consumo total de energia da UE, e reduzir cerca de 5% as emissões de CO<sub>2</sub> (Comissão Europeia, 2019).

A UE tem como prioridade a mitigação das alterações climáticas, reduzindo as emissões de GEE e a dependência em importações de combustíveis fósseis. Para isso, tem sugerido medidas para a utilização mais recorrente de energias renováveis e melhorar a eficiência energética (Comissão Europeia, 2019).

O setor da construção é um dos principais setores a ter em conta para atingir as metas 20/20/20 da UE. As metas propostas na área de alterações climáticas e energia, até ao final de 2020, são as seguintes: redução de 20% nas emissões de GEE (em relação os níveis de 1990); aumentar em 20% a energia proveniente de fontes renováveis; e aumentar em 20% a eficiência energética (Comissão Europeia, 2020). Para além das metas definidas para 2020, também foram definidas metas a atingir

pela UE até 2030: em 2014, o Conselho Europeu aprovou o objetivo na redução das emissões de GEE em 40% comparativamente aos níveis de 1990; e em 2018 as medidas a tomar até 2030 foram revistas no sentido de aumentar, pelo menos, 32% a energia proveniente de fontes renováveis; e aumentar, pelo menos, 32.5% a eficiência energética (Comissão Europeia, 2020). A longo prazo, a Comissão Europeia pretende atingir a neutralidade carbónica até 2050, isto é, zero emissões líquidas de GEE, para a qual apresentou o Pacto Ecológico Europeu (PCE). O PCE permitirá às empresas e aos cidadãos europeus beneficiar de uma transição ecológica sustentável, alcançando a neutralidade carbónica, retardando o aquecimento global e atenuando os seus efeitos (Comissão Europeia, 2020). Dado que o setor da construção é crucial para atingir os objetivos ambientais e de energia da UE, esta estabeleceu um quadro legislativo para aumentar o desempenho energético dos edifícios, que inclui: a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios (DDEE) (Parlamento Europeu, 2010); e a Diretiva 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Outubro de 2012, relativa à eficiência energética (DEE) (Parlamento Europeu, 2012). Ambas as diretivas foram alteradas em 2018, em particular a DDEE, que introduz novos elementos e reforça o compromisso da UE na modernização do setor da construção, nomeadamente, na melhoria tecnológica e no aumento da renovação de edifícios. A DDEE (Parlamento Europeu, 2018) estabelece que, até ao final de 2020, todos os novos edifícios devem ter necessidades quase nulas de energia (Nearly Zero Energy Buildings – nZEB) e a DEE (Parlamento Europeu, 2018) estabelece estratégias para aumentar a eficiência energética, a longo prazo, na renovação de edifícios. Ao possuírem necessidades de energia quase nulas ou relativamente baixas, os nZEB são edifícios com um desempenho energético muito elevado. Os consumos de energia, que se pretende serem reduzidos, devem ainda ser colmatados com fontes de energias renováveis, fontes essas que devem ser produzidas no local ou nas proximidades (Parlamento Europeu, 2010).

Atendendo à crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e eficiência energética, e em linha com as orientações da UE, a investigação no setor da construção tem evoluído também nesse sentido, ou seja, pela procura de soluções mais rentáveis e que satisfaçam as necessidades energéticas de um edifício residencial e/ou comercial de forma cada vez mais eficiente.

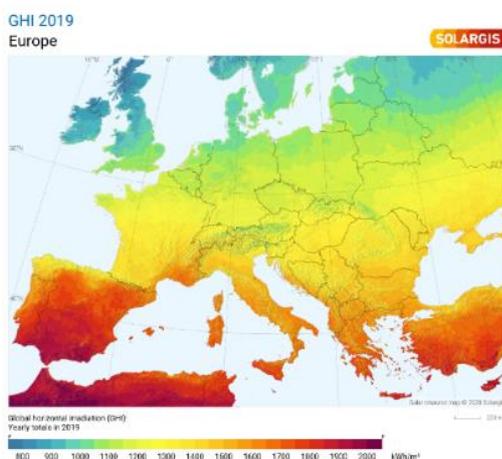


Figura 1.1 - Radiação global anual na Europa (SolarGIS, 2019).

A energia solar, que utiliza o Sol como fonte de energia, é uma energia renovável e sustentável e, por isso, o seu aproveitamento é um dos pontos chave para implementar as medidas propostas pela UE. Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar devido à sua localização geográfica. No ano de 2019, Portugal recebeu aproximadamente 1750 kWh/m<sup>2</sup> de radiação solar global (SolarGIS, 2019). Neste contexto, é crucial conduzir estudos sobre o potencial solar em ambiente urbano que potencie a utilização de tecnologias de aproveitamento solar nos edifícios.

## 1.3. Objetivos

Nesta dissertação pretende-se avaliar o impacto das variáveis do modelo, na simulação do potencial solar para um caso de estudo de geometria complexa, calibrando com resultados experimentais obtidos *in situ*. Numa primeira fase, proceder-se-á a uma campanha experimental onde serão recolhidos os valores de irradiâncias em diferentes superfícies da envolvente de um conjunto de edifícios pertencentes a um caso de estudo - Vila Luz, uma vila operária em Lisboa. De seguida, pretende-se simular, recorrendo-se ao programa *EnergyPlus*, e com base nas características reais do caso de estudo, o potencial solar dos edifícios, procedendo-se à calibração do modelo de simulação com os resultados obtidos na campanha experimental. Por fim, pretende-se analisar o potencial solar anual nos diferentes elementos existentes no caso de estudo, em particular, fachadas, coberturas e envidraçados.

## 1.4. Estrutura

A presente dissertação divide-se em oito capítulos:

- **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta a motivação e o enquadramento do tema, os objetivos da dissertação e como esta se encontra estruturada;
- **Capítulo 2 – Estado da Arte:** descreve algumas das tecnologias de aproveitamento solar existentes atualmente. Inicia-se com uma breve descrição da radiação solar e da geometria solar, seguida da identificação dos diferentes modelos digitais de superfícies e, por fim, apresenta alguns estudos realizados anteriormente neste âmbito;
- **Capítulo 3 – Metodologia:** neste capítulo, é descrita a metodologia adotada na presente dissertação;
- **Capítulo 4 – Caso de estudo:** no início do capítulo, faz-se um breve enquadramento da habitação operária em Portugal, mais propriamente em Lisboa, descrevendo-se de seguida o caso de estudo (Vila Luz).
- **Capítulo 5 – Estudo experimental:** é descrito o procedimento experimental adotado neste trabalho, e são apresentados os principais resultados obtidos durante as campanhas experimentais;
- **Capítulo 6 – Simulação numérica:** é apresentada uma breve descrição do programa de simulação e os campos a ter em consideração neste tipo de simulações;
- **Capítulo 7 – Análise e discussão de resultados:** inicialmente, é feita uma análise da influência de diferentes variáveis de entrada do modelo, seguindo-se a calibração do mesmo. Depois, é feita uma comparação dos resultados experimentais com os resultados de simulação e, por fim, é apresentada a análise do potencial solar anual;
- **Capítulo 8 – Conclusões e desenvolvimentos futuros:** apresentam-se as principais conclusões e desenvolvimentos futuros.



## 2. Estado da Arte

### 2.1. Tecnologias de aproveitamento solar

A energia solar tem atraído cada vez mais a atenção da comunidade científica nos últimos anos devido aos benefícios que esta fonte de energia pode oferecer para a crescente população urbana, como eficiência, economia e impacto ambiental. O processo de otimização solar é composto por duas etapas: i) capturar o máximo possível de radiação solar nas principais superfícies dos edifícios; e ii) utilizar a quantidade máxima de energia solar capturada como iluminação natural e/ou convertida em calor (coletor solar térmico), eletricidade (painéis fotovoltaicos – PV) ou eletricidade e energia térmica (painéis fotovoltaicos e térmicos – PV/T) (Chow, et al., 2014).

A utilização de tecnologias de aproveitamento solar, nomeadamente coletores solares térmicos e painéis fotovoltaicos, está muito associada à instalação nas coberturas dos edifícios. A implementação destas soluções é já bastante comum, uma vez que são opções práticas e com grande facilidade de integração em qualquer tipo de cobertura (Debbarma, et al., 2017). No entanto, para além da instalação nas coberturas, o uso de tecnologias em fachadas apresenta cada vez mais interesse, uma vez que combina a produção de energia com funções dos próprios edifícios, como o isolamento térmico, impermeabilização, controlo de luminosidade (usando módulos fotovoltaicos semi-transparentes nas janelas) e até resistência estrutural (Chen, et al., 2016). Estes tipos de soluções fazem parte integrante do edifício, substituindo elementos construtivos e materiais de construção convencionais (como por exemplo telhas), tendo apresentado um desenvolvimento significativo nos últimos anos (Debbarma, et al., 2017). Estas tecnologias são conhecidas como *Building Integrated Photovoltaic (BIPV)*, *Building Integrated Photovoltaic Thermal (BIPVT)* e *Building Integrated Solar Thermal (BIST)*.

A integração de sistemas solares no invólucro do edifício é vista como uma solução arquitetónica valiosa, contribuindo para o desempenho de edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB), através da geração e utilização direta da energia. Contudo, estes sistemas ainda constituem um desafio para o projeto de edifícios, tanto a nível arquitetónico como operacional (Bot, et al., 2020).

O sistema BIPV, converte a energia solar em energia elétrica para o edifício. No caso de um sistema BIPV estar integrado na fachada de um edifício, o ar exterior entra no sistema pela parte inferior e sai pela parte superior. Durante esse processo, o ar que entra absorve o calor dos módulos fotovoltaicos, reduzindo a temperatura, o que resulta numa melhoria da sua eficiência e durabilidade. Em alguns casos, são implementados ventiladores e condutas no sistema, com o objetivo de introduzir o ar aquecido para o interior do edifício, reduzindo a carga de aquecimento no inverno, estes sistemas são conhecidos por BIPVT. Assim, os sistemas BIPVT beneficiam da energia solar tanto para produção de energia elétrica como energia térmica (Biyik, et al., 2017).

Os sistemas térmicos solares integrados em edifícios (BIST) podem ser definidos como sistemas multifuncionais, apresentando as seguintes funções: i) de aquecimento e arrefecimento de um edifício; ii) de aquecimento de águas sanitárias; iii) de geração de energia; iv) de isolamento térmico; e v)

estética. Este tipo de sistemas difere dos painéis solares convencionais, distinguindo-se por oferecer uma vasta gama de soluções arquitetónicas (seja cor, textura e forma), diversas aplicabilidades, desde a substituição de materiais de construção à produção de energia proveniente da radiação solar. Os sistemas BIST de coletores solares permitem a recolha eficaz da radiação solar e respetiva conversão em calor para fins de produção de água quente e aquecimento do ambiente interior (Zhang, et al., 2015) sendo, geralmente, os dispositivos térmicos solares mais usados em edifícios.

Em Portugal, existem alguns exemplos de edifícios sustentáveis com o objetivo de otimizar as suas necessidades energéticas. Um exemplo de sistemas BIPVT é o Edifício Solar XXI (Figura 2.1) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), construído em 2004, em Lisboa. Este edifício é um nZEB, com um balanço de energia a aproximar-se do objetivo “zero”, garantindo assim, que as condições de conforto térmico no interior sejam satisfeitas durante todo o ano. Desta forma, foram instalados painéis fotovoltaicos na fachada Sul, permitindo que o calor produzido pelos painéis no período de inverno, seja aproveitado para o aquecimento do ar ambiente dos espaços e, na cobertura, foram instalados coletores solares (Gonçalves, et al., 2012). Em Carcavelos, o Centro de Controlo Operacional da Brisa (Figura 2.2), construído em 2004 e projetado pelo Arq.º Carrilho da Graça, é um exemplo de sistemas BIST. Neste edifício, foram instalados coletores solares na cobertura e nas fachadas, Sul, Este e Oeste de forma a otimizar as necessidades energéticas do edifício.



Figura 2.1 - Edifício Solar XXI (JEAM2014, 2014)

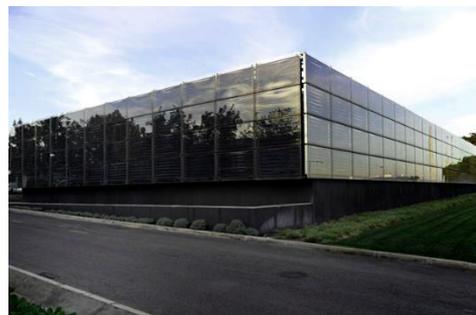


Figura 2.2 - Centro de Controlo Operacional da Brisa (Guias de Arquitetura, S.D)

## 2.2. Radiação e geometria solar

O Sol constitui a principal fonte de energia do planeta Terra. Esta energia é produzida no centro deste astro por uma reação termonuclear de átomos de hidrogénio em Hélio. A energia irradiada é então emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas que, ao atravessar a atmosfera terrestre, sofrem uma diminuição considerável de energia devido a fenómenos físicos com reflexão, difusão e absorção. Da totalidade de radiação solar que chega à atmosfera, 32% é enviada novamente para o espaço por difusão, 15% é absorvida pela atmosfera (nuvens, etc.) e 6% e 47% é refletida e absorvida, respetivamente, pela superfície terrestre (Moita, 1988).

O espectro eletromagnético é composto por sete tipos de ondas eletromagnéticas diferentes, onde ondas rádio, micro-ondas, infravermelho e radiação visível apresentam comprimentos de onda maiores e, em oposição, raios ultravioleta, raios X e raios gama correspondem a comprimentos de ondas menores. Posto isto, a radiação solar que atinge a superfície terrestre é composta por aproximadamente 50% de luz visível, 45% de radiação infravermelha, e 5% de radiação ultravioleta (Villalva, 1983), compreendendo comprimentos de onda de 100nm a 1000nm, sendo que a maior intensidade que radiação solar atinge situa-se no comprimento de onda de 500nm (Teixeira, 2019)

Desta forma, a radiação global que atinge qualquer superfície presente na Terra pode ser decomposta em três parcelas: a radiação direta, que atravessa unidireccionalmente a atmosfera e é o tipo de radiação mais intensa; a radiação difusa, que sofre múltiplos desvios antes de atingir uma superfície devido à presença de moléculas de água e partículas em suspensão existentes na atmosfera; e a radiação refletida por uma superfície ou por um corpo, expressa pelo albedo. O albedo é a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre a mesma. Este depende das propriedades físicas dos materiais (nomeadamente, da rugosidade e da cor), variando entre 3% e 85% da radiação total incidente (Faustino, 2012).

A Terra movimenta-se em torno do Sol descrevendo uma órbita elíptica, e, portanto, a distância entre ambos varia ao longo do ano atingindo a distância máxima no solstício de verão, a mínima no solstício de inverno, e distância intermédia nos equinócios, no hemisfério norte. A inclinação do eixo de rotação da Terra faz um ângulo de  $23^{\circ}27'$  que se mantém constante com o plano da elíptica, provocando variações da altura do Sol ao longo do ano. Esta variação origina diferentes ângulos de incidência dos raios solares na superfície sendo responsável pelas diferentes estações do ano (Moita, 1988).

No solstício de verão, o Sol nasce a Nordeste e põe-se a Noroeste, sendo o percurso do Sol próximo do zénite. Em contrapartida, no solstício de inverno, o Sol nasce sensivelmente a Sudeste e põe-se a Sudoeste, apresentado um percurso mais afastado do zénite. Por outras palavras, o Sol no inverno apresenta uma altura solar mais baixa em relação à superfície terrestre, possibilitando a entrada dos raios solares perpendicularmente aos envidraçados de uma fachada orientada a Sul, no hemisfério Norte (Faustino, 2012). De modo a facilitar a compreensão dos conteúdos descritos, a Figura 2.3 representa de forma esquemática as posições do sol no decorrer de um dia em Portugal, para o período de verão, de inverno e de primavera/outono.

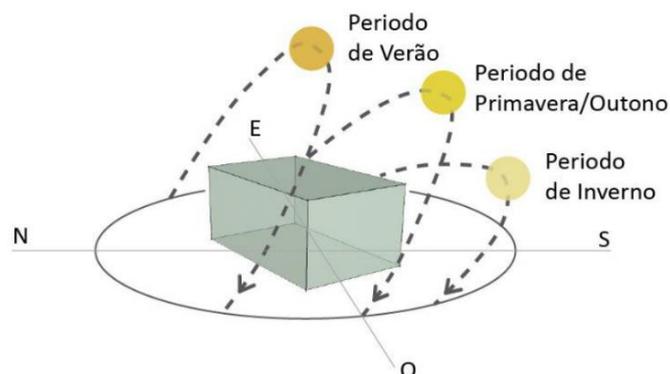


Figura 2.3 - Movimento do Sol em Portugal para os vários períodos do ano (Faustino, 2012).

A intensidade da radiação solar depende de vários fatores, nomeadamente: a época do ano; a altura do dia; as condições meteorológicas; a latitude do lugar; e o ângulo da radiação solar com a superfície incidente. Deste modo, a nebulosidade ao longo do dia faz variar muito a intensidade da radiação global. A título de exemplo, num dia de céu limpo sem nuvens, a radiação direta pode corresponder a 90% e a difusa a 10% da radiação global solar; já em dias de céu consideravelmente encoberto, a radiação global pode corresponder a 100% de radiação difusa (Moita, 1988).

Conhecendo o movimento diário do sol e a orientação dos envidraçados numa habitação, que por sua vez têm um papel fundamental no conforto térmico da mesma, a radiação solar global num envidraçado será mais ou menos intensa. Por isso, pode prever-se a radiação solar que incide nas janelas para as várias estações do ano. A Figura 2.4 mostra a variação da intensidade da radiação solar através dos envidraçados orientados de formas diferentes num dia de inverno e num dia de verão.

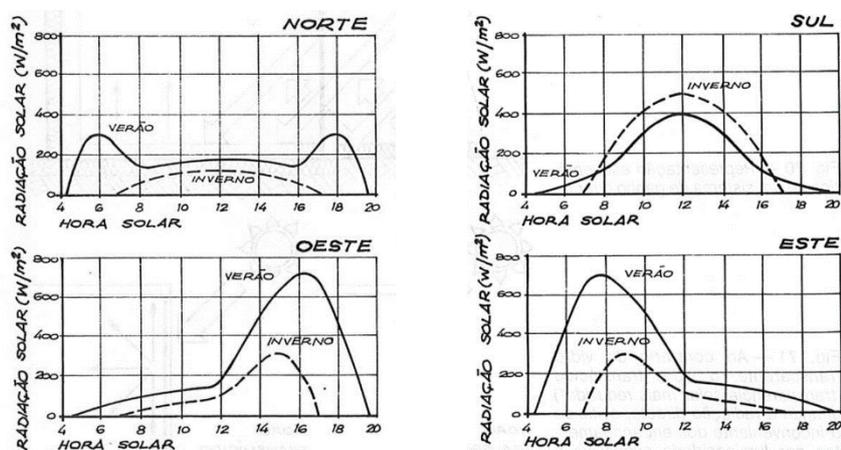


Figura 2.4 - Representação da variação da radiação solar global em envidraçados com orientações diferentes, na estação de inverno e na estação de verão [adaptado de (Moita, 1988)].

### 2.3. Simulação da radiação solar em ambiente urbano

Existem vários modelos disponíveis para a análise da radiação solar que assumem abordagens 2.5D e 3D, sendo especializados em diferentes níveis de cobertura geográfica e consideração volumétrica.

A abordagem 2.5D era, até há uns anos atrás, a principal abordagem utilizada para a avaliação da radiação solar. Em modelos 2.5D, para cada valor de (x,y) existe um valor de altitude correspondente (z), não sendo possível identificar elementos distintos dos diferentes planos que compõem o objeto representado. Desta maneira, não é possível distinguir valores de radiação para esses planos, resultando em apenas um valor de radiação solar para casa (x,y). Esta abordagem é mais adequada para análises em elementos de cobertura. Em modelos 3D, para cada valor de (x,y) podem corresponder diferentes valores de altitude (z), sendo adequada quer para elementos de cobertura quer de fachada. Nestes modelos, os valores de radiação solar são calculados para cada superfície permitindo valores diferentes em altitudes diferentes para a mesma posição (x, y) (Machete, et al., 2018). Na presente dissertação utiliza-se a abordagem 3D.

A construção de Modelos Digitais de Superfície (MDS) em ambiente urbano pode ser feita a partir de dois métodos distintos: i) através de uma nuvem de pontos 3D que permite a reconstrução geométrica dos elementos; e ii) através de modelação paramétrica.

A modelação a partir de nuvem de pontos 3D pode ser feita com base no levantamento de fotografias aéreas, sistemas não tripulados de recolha de dados (UAV – *unmanned aerial vehicle*) ou sistemas LIDAR (da sigla em inglês *Light Detection and Ranging*). A tecnologia mais comum é a tecnologia LIDAR, a qual permite determinar a distância desde um emissor laser até um objeto ou superfície utilizando um feixe laser por impulso, garantindo assim uma alta precisão na obtenção da nuvem de pontos 3D. Esta tecnologia apresenta várias vantagens, entre as quais se destacam: i) a alta qualidade dos dados obtidos, independentemente das condições atmosféricas; ii) o baixo custo; e iii) a grande aplicabilidade (Kong, 2019). Adicionalmente, esta tecnologia torna-se especialmente relevante para edifícios em áreas urbanas uma vez que possibilita a rápida aquisição de modelos de superfícies. Não obstante, deverão ser tidos alguns cuidados na obtenção e interpretação dos dados sendo que, no primeiro caso, se recomenda que os pontos sejam combinados com outras ferramentas de classificação geográfica por forma a reduzir possíveis erros e, no segundo caso, pontos cuja variação altimétrica seja significativamente diferente dos pontos circundantes poderão ser considerados como pontos a remover (nomeadamente, pássaros, árvores e veículos) (Carneiro, et al., 2008).

A modelação paramétrica é realizada com base nos valores dos atributos dos seus elementos, geralmente organizados em bases de dados e combinados com a informação relativa ao Modelo Digital do Terreno (MDT). Algumas das suas vantagens são: i) permite a criação de modelos com recurso a intervenção humana reduzida, tendo a capacidade para gerar uma grande variedade de conteúdo detalhado; ii) abrange uma ampla variedade de técnicas que produzem automaticamente determinado conteúdo específico com base num conjunto de parâmetros de entrada; iii) possibilita a criação computacional de uma grande variedade de modelos e objetos com características particulares com base em parâmetros de entrada e regras de transformação simples (Smelik, et al., 2014); iv) ao configurar um modelo geométrico tridimensional (3D), permite a alteração da forma da geometria do modelo aquando da modificação dos parâmetros, evitando o total redesenhar do modelo e garantindo assim uma maior eficiência no processo (Machete, et al., 2018).

Na modelação paramétrica, o modelo 3D de ambiente urbano é resultado da associação de informação geográfica e das regras de modelação procedimental, geralmente designado por *City Information Model* (CIM) (Machete, 2016). Os modelos CIM, gerados através da conjugação dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dos *Building Information Models* (BIM), agregam informação geométrica dos elementos urbanos e respetivas características numa base de dados de informação da cidade. Com estes tipos de modelos é possível produzir variados níveis de detalhe, nomeadamente: i) elementos volumétricos simples; ii) elementos volumétricos texturizados através da projeção de fotografias ou de gráficos; e iii) elementos volumétricos parametrizados com regras, como por exemplo partes integrantes das fachadas, resultado da divisão de parcelas elementares que por sua vez são associadas a um modelo exterior dando, assim, origem a elementos arquitetónicos de elevada complexidade (Machete, 2016).

Um dos *softwares* usados para a criação de modelos 3D de edifícios e zonas urbanas é o *CityEngine*, disponibilizado pela ESRI Portugal. Este *software* permite a criação de modelos CIM através de modelação procedimental utilizando a linguagem de programação *Computer Generated Architecture* (CGA). A CGA consiste num conjunto de regras de geração de modelos que permitem, de forma eficaz e automática, modelar edifícios com elevado nível de detalhe para um período de tempo reduzido. Adicionalmente, o *CityEngine* possibilita a criação de zonas urbanas em 3D com base em SIG existentes, respetivos atributos e regras parametrizadas (Zupan, et al., 2018), como é exemplo da regra que cria volume resultando da extrusão de polígonos de implantação.

A utilização de MDS para a análise e avaliação do potencial solar de edifícios é de elevada importância. A literatura existente identifica diversos estudos que modelam o ambiente urbano através de uma nuvem de pontos 3D, dos quais se destacam Catita et al (2014), Brito et al (2019) e Zhu et al (2020). Alternativamente, Peronato et al. (2018) e Machete et al (2018), realizaram os seus estudos através de modelação paramétrica em edifícios, enquanto que Shiota et al. (2015) utilizaram a modelação paramétrica para estudar o potencial solar ao nível de terrenos agrícolas e de telhados.

## 2.4. Estudos anteriores

O estudo do potencial solar em edifícios tem assumido uma relevância cada vez mais preponderante, especificamente quando aplicado a ambientes urbanos reais, uma vez que permite estudar a influência que o contexto urbano tem na radiação solar incidente em determinada superfície (coberturas, fachadas, envidraçados, entre outros). Este tipo de estudos é particularmente relevante, por exemplo, aquando da análise da viabilidade de instalação de tecnologias de aproveitamento solar. Ainda que, tipicamente, os coletores solares e os painéis fotovoltaicos sejam colocados nas coberturas dos edifícios, hoje em dia, as fachadas apresentam também elevado potencial desde que o tempo de exposição solar seja suficiente.

De seguida, apresentam-se vários estudos organizados por tipo de análise e tendo em consideração o contexto urbano no qual estão inseridos, dos quais se destacam os seguintes: Catita et al. (2014); Machete et al. (2018); Peronato et al. (2018); Brito et al. (2019); Zhu et al. (2020). Adicionalmente, note-se que o estudo realizado por Machete et al. (2018) apresenta também a exposição solar no edifício de forma isolada e que o estudo desenvolvido por Heidarinejad et al. (2016) foi realizado tendo em consideração um modelo fictício. Na Tabela 2.1, apresenta-se um resumo dos estudos analisados.

- **Escala local/urbana**

Catita et al. (2014) realizou um estudo ao nível da escala urbana onde a modelação das fachadas dos 19 edifícios foi feita por meio de hiperpontos através da modelação de dados LIDAR. Nesse mesmo estudo Catita et al. (2014) identificou o edifício com maior potencial, tanto ao nível da cobertura como ao nível das fachadas, a partir da base de dados SIG e estimou a radiação solar global anual nos envidraçados da fachada com maior exposição solar. Outro estudo onde se analisou a radiação solar

Tabela 2.1 - Quadro síntese dos estudos analisados

Autores	Ano	MDS	Programa utilizado (simulação)	Contexto urbano	Escala local/urbana	Densidade urbana	Detalhes arquitetônicos	Discretização das superfícies	Propriedades óticas dos materiais	Validação experimental
Catita et al.	2014	Dados LIDAR	Algoritmo SOL para cálculo das sombras.	Considera	Urbana e local	Não avalia	Sim, considera janelas e varandas	Sim, através de hiperpontos espaçados de 1 a 1 metro	Não considera	Não
Shiota et al.	2015	Modelação paramétrica	ArcGIS Spatial Analysis	Considera	Urbana	Não avalia	Sim, considera janelas e varandas	Não	Não considera	Sim
Heidarinejad et al.	2016	-	EnergyPlus; Daysim; Radiance	Considera, mas é um modelo fictício.	Local	Sim, avalia 6 densidades urbanas distintas.	Não	Sim, avalia 3 níveis (1x1m <sup>2</sup> , 2x1.5m <sup>2</sup> e 10x3m <sup>2</sup> )	Sim, valores padrão recomendados na literatura	Não
Peronato et al.	2018	Modelação paramétrica	Daysim	Considera	Urbana	Sim	Não	Sim, avalia 5 níveis (espaçamento entre sensores: 0.5, 1, 2, 3, e 4m)	Sim, valores padrão recomendados na literatura	Não
Machete et al.	2018	Modelação paramétrica	ArcGIS; ECOTECH	Considera; Não considera	Local	Não avalia	Sim, considera janelas	Sim, painéis 3x3m <sup>2</sup>	Sim, considera também dos edifícios vizinhos	Não
Brito et al.	2019	Dados LIDAR	Algoritmo SOL para cálculo das sombras	Considera	Urbana e local	Não avalia	Não	Sim. 1. Edifício por inteiro; 2. por superfícies; 3. por hiperponto	Não considera	Sim
Zhu et al.	2020	Nuvem de pontos 3D	ArcGIS (Points Solar Radiation)	Considera	Urbana	Sim, avalia cidades em zonas densas e zonas residenciais	Não	Não	Sim, valores padrão recomendados na literatura	Não

na cobertura e nas fachadas foi o estudo desenvolvido por Machete et al. (2018), neste caso, para um edifício na baixa da cidade de Lisboa. Enquanto que o estudo desenvolvido por Catita et al. (2014) avalia um ano inteiro de exposição solar, Machete et al. (2018) foca a sua análise nos dias específicos do solstício de verão e solstício de inverno, onde a posição do Sol atinge o seu máximo e mínimo, respetivamente.

- **Análise da densidade urbana**

De entre os estudos analisados, destacam-se dois que avaliam a influência da densidade urbana na estimativa do potencial solar e, conseqüentemente, como os edifícios circundantes podem afetar a radiação solar que atinge os edifícios. Heidarinejad et al. (2016) considerou seis níveis de densidade urbana: na menor densidade constaram que a presença dos edifícios vizinhos não tem qualquer influência; na maior densidade verificaram sombreamento parcialmente nas superfícies do edifício em estudo. Complementarmente, Heidarinejad et al. (2016) estudaram a influência de alturas superiores nos edifícios circundantes. Neste âmbito, concluíram que, quando a densidade urbana é elevada e é conjugada com alturas dos edifícios vizinhos duas vezes superiores ao edifício em análise, os valores de irradiância obtidos nas superfícies com incidência direta do Sol (no solstício de verão e no equinócio) são significativamente menores quando comparados com os valores obtidos em edifícios com alturas iguais. Por outro lado, para valores de densidade mais reduzidos, tanto no equinócio como no solstício de verão, os valores de irradiância são similares para as diferentes alturas. Já no estudo realizado por Peronato et al. (2018), conclui-se que um dos parâmetros que influência os resultados é a densidade

de construção. Zhu et al. (2020) realizaram o seu estudo para dez cidades, modeladas através de nuvens de pontos 3D, e escolhidas considerando as mais diversas características: i) cidades com áreas urbanas mais densas, outras menos densas; ii) cidades pertencentes a vários climas distintos; iii) cidades localizadas numa ampla faixa de latitudes; e iv) cidades representadas em duas áreas de estudo diferentes, centros da cidade com edifícios densos e relativamente mais altos e áreas residenciais com edifícios espaçados e relativamente baixos. Zhu et al. (2020) concluiu que uma cidade tende a ter uma maior capacidade solar quando esta possui uma maior densidade de edifícios altos e uma flutuação errática das alturas dos edifícios.

- **Detalhe arquitetónicos das superfícies – janelas e varandas**

A maioria dos estudos observados apresentam um nível de detalhe reduzido, isto é, consideram o invólucro dos edifícios apenas como um volume tridimensional sem consideração das características arquitetónicas (por exemplo, janelas e varandas), como são o caso de Heidarinejad et al. (2016), Peronato et al. (2018), Brito et al. (2019) e Zhu et al. (2020). Quando um estudo se foca numa área urbana em particular, a consideração destes elementos torna-se, em parte, ineficiente pelo facto de ser um trabalho moroso e traduzir-se num aumento considerável do tempo de processamento computacional. Assim, quando o objeto de estudo recai sobre uma análise à escala local, a definição do nível de detalhe apresenta um papel fundamental na precisão dos resultados obtidos, razão pela qual a definição do nível de detalhe deve ser cuidadosamente estabelecida, conforme demonstrado por Catita et al. (2014) e Machete et al. (2018).

- **Discretização dos elementos das superfícies**

Outro fator importante aquando da criação de modelos é a divisão, ou não, das superfícies dos edifícios visto que a avaliação da obtenção de radiação solar é tanto mais cuidada e detalhada quanto maior a divisão destes elementos. Enquanto alguns estudos consideram que os edifícios são representados apenas com uma única superfície por orientação, como é o caso de Zhu et al. (2020), outros caracterizam as fachadas e/ou coberturas subdivididas em elementos com dimensões menores, como é o caso de Machete et al (2018) onde foram considerados elementos de  $3 \times 3 \text{m}^2$ , e de Catita et al. (2014) onde foram analisadas as fachadas e as coberturas dos edifícios através de hiperpontos espaçados de metro a metro, e Brito et al. (2019) que discretizou o seu modelo em três análises: i) por edifício inteiro; por superfície (fachada e coberturas); e por hiperpontos.

Adicionalmente, o grau de discretização das superfícies a adotar num modelo apresenta também uma significativa importância uma vez que na determinação da radiação solar de um edifício, a definição de uma grelha mais refinada poderá afetar os resultados obtidos. Além disso, é importante perceber em que medida a envergadura do modelo poderá condicionar o tempo computacional da análise. Neste âmbito, Heidarinejad et al. (2016) avaliaram três tamanhos diferentes de superfícies ( $1 \times 1 \text{m}^2$ ,  $2 \times 1.5 \text{m}^2$  e  $10 \times 3 \text{m}^2$ ), para três dias distintos (equinócio, solstício de verão e solstício de inverno) e para três horas ao longo do dia (09:00H, 12:00H e 15:00H), onde determinaram a irradiância nas fachadas. Assim, concluíram que a consideração de painéis com dimensões maiores demonstram um padrão diferente comparativamente a painéis menores quando o ângulo do Sol é baixo e a densidade urbana

é alta. Outro estudo realizado recentemente (Peronato, et al., 2018), avaliou o impacto da resolução da grelha de sensores considerando cinco níveis de resolução (0.5, 1, 2, 3, e 4m), correspondentes ao espaçamento entre os pontos do sensor, e três grelhas (grelha estruturada, grelha não estruturada e centro da superfície). Este estudo concluiu que um espaçamento superior a dois metros deve ser evitado, dada a influência que a dimensão da grelha exerce sobre os resultados obtidos (principalmente durante o inverno), motivada pelo facto dos painéis PV geralmente serem inferiores a 2 metros de comprimento, e a maior sensibilidade das fachadas, face às coberturas, quanto à resolução da grelha escolhida.

- **Propriedades óticas dos materiais**

As propriedades óticas dos materiais constituintes dos edifícios, especialmente o albedo e/ou a absorptância, permitem uma avaliação mais realista do potencial solar no edificado por considerarem os fenómenos naturais que ocorrem nos bairros urbanos, onde os raios solares emitidos pelo sol e os raios refletidos nas superfícies interagem entre si (Heidarinejad, et al., 2016). Tanto Heidarinejad et al. (2016), como Peronato et al. (2018) e Zhu et al. (2020) consideraram valores de albedo padrão, conforme normalmente reconhecidos na literatura. Machete et al. (2018), por seu turno, concluiu que as características dos materiais no cálculo da radiação solar refletida é apenas preponderante quando os materiais de revestimento dos edifícios circundantes têm características refletivas extremas, como é o caso de edifícios constituídos inteiramente por envidraçados espelhados ou materiais metálicos, uma vez que a definição dos materiais constituintes requer um trabalho acrescido e moroso acoplado a um tempo computacional extenso.

- **Validação experimental**

Ainda que, na literatura existente, a análise do potencial solar com o recurso a diversos *software* seja frequente, a sua validação experimental é ainda praticamente inexistente. Em 2015 foi realizado um estudo no Japão (Shiota, et al., 2015) com o intuito de analisar possíveis zonas para a instalação de tecnologias de aproveitamento solar, nomeadamente painéis fotovoltaicos. Uma dessas zonas, é a cidade de Kitakyushu, para a qual foi desenvolvido um modelo utilizando SIG e MDS de forma a determinar a quantidade de energia solar que atinge os terrenos e as coberturas dos edifícios. Para além da simulação da radiação solar incidente, Shiota et al. (2015) quis confirmar a precisão dos resultados obtidos tendo, para isso, colocado um piranómetro no topo de um dos edifícios. Desta forma, conseguiu confirmar a precisão dos resultados obtidos através da simulação para um dia de céu limpo, concluindo que é possível determinar a quantidade de radiação solar e identificar os telhados e terrenos adequados para a geração de energia elétrica. Porém, o estudo apenas comparou um único ponto para uma única cobertura da cidade, o que limita a qualidade dos resultados obtidos traduzindo-se, por isso, em um estudo pouco conclusivo. O modelo apresentado por Brito et al. (2019) valida os seus resultados com medições experimentais de produção de energia fotovoltaica numa fachada virada a Sul do Edifício Solar XXI. A comparação dos valores simulados com os experimentais foram realizados para um mês de verão e para um mês de inverno, concluindo-se que os erros maiores foram

observados durante o mês de inverno devido à necessidade de uma renderização mais fina das sombras.

Desta forma, a necessidade emergente de desenvolver estudos que comparem os valores registados *in-situ* com valores de simulação numéricos é do interesse da comunidade científica, por forma a contribuir para a melhoria constante dos modelos adotados e garantindo, assim, a correta adequação dos mesmos à realidade.

### 3. Metodologia

Neste capítulo, é apresentada a metodologia do trabalho que, dada a sua natureza, pretende analisar o potencial solar aplicado a um caso de estudo e efetuar a sua comparação com valores registados *in situ*. Como tal, foi necessário definir o modelo selecionado para a construção 3D da zona urbana pretendida, analisar a influência da morfologia urbana no cálculo da radiação solar das coberturas, das fachadas verticais e do pátio exterior. Desta forma, a metodologia proposta neste estudo envolve as seguintes etapas: i) realização de uma campanha experimental para diferentes fases do ano – equinócio, solstício de verão e solstício de inverno; ii) construção do modelo 3D, com recurso ao *CityEngine*; iii) estimativa da radiação solar, utilizando o programa *EnergyPlus*; iv) impacte das variáveis de simulação; v) calibração dos valores experimentais com os numéricos; e vi) aplicação do modelo e análise do potencial solar ao nível das envidraçados, fachadas e coberturas para um ano genérico.

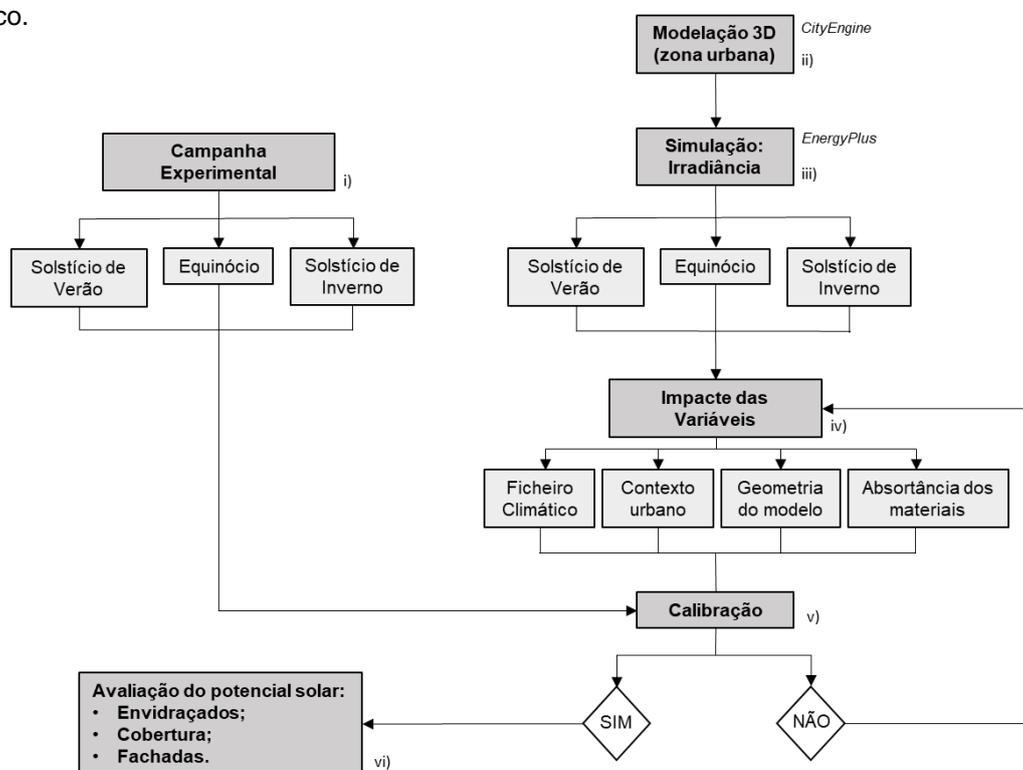


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia

Como um dos objetivos principais deste trabalho é a calibração de um modelo de simulação do potencial solar em ambiente urbano na cidade de Lisboa, a recolha de dados registados *in situ* é crucial para a realização deste estudo. Desta forma, foram realizadas medições de irradiância com recurso a um piranómetro em diferentes pontos no local. Por outro lado, a escolha dos dias de campanha experimental é também essencial para a realização de uma análise cuidada e bem fundamentada. Neste sentido, foram selecionados três dias diferentes, o equinócio, o solstício de verão e o solstício de inverno, de forma a considerar a diferente geometria solar ao longo de um ano (altura do Sol intermédia, máxima e mínima, respetivamente), uma vez que contribuem de forma diferente para a radiação solar nas superfícies dos edifícios. Adicionalmente, escolheram-se três horas para representar cada um dos dias selecionados – as 09:00 horas, as 12:00 horas e as 15:00 horas –

possibilitando acolher as diferentes interações que o ângulo do Sol tem nas superfícies ao longo de um dia.

Para a construção do modelo de cidade, recorreu-se à modelação paramétrica utilizando a ferramenta *CityEngine* do *ArcGIS*. Os dados geográficos necessários para a criação do modelo 3D foram fornecidos pela Câmara Municipal de Lisboa (CML) no sistema de coordenadas Hayford Gauss – Datum73 a partir de polígonos de implantação com informação adicional sobre os atributos, nomeadamente: a área; o perímetro; o número de pisos; e o tipo de uso (residencial ou comercial). Em primeiro lugar, a modelação da zona começa com a importação do MDT, seguido do respetivo ajuste às infraestruturas rodoviárias e posterior aplicação das regras CGA com vista à construção automática de níveis distintos de detalhe. Para o presente estudo considerou-se pertinente a criação dos seguintes níveis de detalhe: i) envolvente dos edifícios, gerado a partir da extrusão dos polígonos de implantação em função dos atributos altura do piso e o número de andares; ii) divisão das superfícies em painéis, nomeadamente, coberturas e fachadas; iii) definição dos detalhes arquitetónicos específicos dos vários edifícios da Vila (envidraçados, portas e varandas) através do *SketchUp* após a construção do modelo 3D no *ArcGIS*; e iv) criação de uma malha de painéis retangulares idênticos de 1.20x1.00m<sup>2</sup> nas fachadas principais dos edifícios.

Na modelação tridimensional, a constituição interior dos edifícios não foi considerada por não apresentar relevância para o presente estudo. A modelação da envolvente dos edifícios permite que as superfícies exteriores fiquem sujeitas às condições de exposição solar possibilitando, assim, a sua total avaliação bem como a projeção das sombras criadas pelos os edifícios vizinhos. Ademais, o facto das superfícies serem divididas em partes menores permite uma análise mais refinada do potencial solar nas superfícies dos edifícios e, conseqüentemente, da perceção dos locais mais favoráveis à colocação de sistemas de aproveitamento solar. Outro aspeto relevante à melhoria da qualidade dos resultados é a definição dos materiais constituintes das superfícies visto fazerem parte integrante dos cálculos da radiação solar. Adicionalmente, note-se que os edifícios circundantes ao caso de estudo foram modelados com base na cota mais alta dos elementos existentes, como por exemplo, chaminés caso existam.

O modelo tridimensional criado no *CityEngine* foi importado para o *SketchUp*, onde se realizaram os respetivos ajustes através do *plug-in Euclid 9.3.0*. De seguida, o ficheiro foi trabalhado no *EnergyPlus* (EP) e, após a definição de todos os elementos necessários, procedeu-se à execução das várias simulações com vista à obtenção da irradiância no espaço em estudo. Neste sentido, foi estudado o impacto das seguintes variáveis: i) ficheiro climático; ii) semântica do objeto; iii) contexto urbano; iv) geometria intrínseca ao próprio modelo (nomeadamente, varandas); e v) absortância solar das superfícies. Seguido da calibração do modelo de simulação do potencial solar nos edifícios e pátio da Vila Luz.

Por fim, após a calibração do modelo, procede-se à análise do potencial solar anual ao nível dos envidraçados, das fachadas e das coberturas.

## 4. Caso de estudo

Neste capítulo, é apresentada uma breve contextualização histórica das vilas operárias em Portugal, mais especificamente em Lisboa, bem como a apresentação das diversas tipologias de habitação operária. Serão apresentados os detalhes relativos à localização do caso de estudo e, por fim, listados os seus materiais e elementos constituintes.

### 4.1. Habitação operária

#### 4.1.1. Contextualização histórica

A cidade de Lisboa, nos anos 70 do século XIX, assiste a um grande crescimento da população em resultado da expansão do setor industrial, fenómeno ao qual se dá o nome de Industrialização. Com este surto demográfico, fez-se sentir uma grande necessidade de alojar as famílias operárias que chegavam de todas as partes do país à capital, para trabalharem nas indústrias em desenvolvimento. Estas famílias começaram primeiramente por se instalar em bairros antigos, e só depois procuraram locais improvisados como conventos e palácios em ruínas e, maioritariamente, pátios insalubres (Pereira, 1994). Os movimentos humanistas na Europa e também em Portugal tiveram um papel preponderante neste fenómeno, dado que foram estes movimentos que começaram a questionar esta forma de viver, visto que a população vivia em condições habitacionais muito degradadas que criavam grandes problemas de salubridade. Foi a partir desse período que se criaram as novas habitações com melhores condições, multifamiliares, dando assim origem ao surgimento da vila operária. Em Portugal este tipo de habitação não existe só na cidade de Lisboa, espalhou-se um pouco por vários sítios do país, nomeadamente no Porto onde são chamadas *ilhas* (Teixeira, 1992).

#### 4.1.2. Caraterização tipológica

As vilas operárias têm sido alvo de estudo por vários autores durante as últimas décadas destacando-se o extenso trabalho desenvolvido pelo Arquiteto Nuno Teotónio Pereira, essencial para a compreensão deste tema.

Nuno Teotónio Pereira (1994) caraterizou as seguintes tipologias distintas de alojamento operário: i) os pátios; ii) prédios em correnteza e vilas; iii) vilas formando pátios; iv) vilas construídas atrás de prédios; v) vilas formando ruas; vi) vilas ligadas diretamente à produção; vii) vilas de escala urbana; viii) bairros operários e económicos. Esta caraterização de alojamentos operários, que se apresenta de seguida, foi definida com base na evolução dos edifícios de habitação que foram surgindo ao longo dos tempos em função do período de construção.

##### i) Pátios

Os pátios surgem a partir de meados do século XIX, com a necessidade de alojar as classes mais pobres que emigravam de zonas rurais do país. Neste período, as famílias operárias foram obrigadas

a procurar alojamentos em espaços desocupados e onde as condições de salubridade eram escassas. Muitos deles eram antigos prédios abandonados e/ou devolutos, conventos e palácios em ruínas, que, mediante o pagamento de uma renda ao proprietário, a população operária se acomodava de qualquer maneira (Pereira, 1994).

### **ii) Vilas em correnteza**

Este tipo de edificação surgiu nos bairros mais antigos e mais pobres da cidade de Lisboa, na forma de pequenas construções com um piso e dois fogos (casas bifamiliares). Contudo, com o aumento da densidade populacional foram adicionados novos pisos sobre os originais e, conseqüentemente, começaram-se a construir filas de casas deste tipo às quais se dá o nome de correntezas (Pereira, 1994). Esta tipologia pode apresentar-se de duas formas distintas: edifício alongado ou bloco com quatro fachadas livres e acesso central, que normalmente acompanhavam a via pública. Este género de alojamento acomodava as famílias cujos rendimentos eram baixos, providos apenas com o essencial à habitação, sendo desta forma embrionária que surgiram as vilas no final do século XIX (Pereira, 1994).

### **iii) Vilas formando pátios**

As vilas eram construídas à volta do terreno ocupando todo o seu perímetro e os fogos tinham dimensões reduzidas, conseguindo assim construir nesse espaço o maior número possível de habitações. O acesso à vila era feito por um corredor central e desafogado ainda que, para os pisos superiores o acesso fosse feito por galerias exteriores construídas em estruturas de ferro de maneira a reduzir espaços não rentáveis (Pereira, 1994). Estas vilas eram construídas essencialmente para as classes mais pobres, com exceção de alguns casos como a Vila Berta e a Vila Santos, Estas últimas eram habitadas pela classe da pequena burguesia onde existia uma preocupação por um projeto mais elaborado, por materiais de construção de melhor qualidade e por uma decoração mais rica. Muitas destas vilas eram acompanhadas por uns letreiros em chapa metálica por cima dos portões da entrada com o seu próprio nome (Pereira, 1994).

### **iv) Vilas construídas atrás de prédios**

Este tipo de vila pode constituir duas tipologias distintas num mesmo lote de terreno, um prédio para a burguesia junto à rua e, por trás deste, um pátio ou vila destinado a famílias operárias. O acesso a estas vilas poderia ser feito de três formas distintas: i) por um corredor lateral ao edifício principal a céu aberto; ii) por um eixo central do lote, também a céu aberto com ligação ao pátio; ou iii) através de uma arcada aberta que atravessa o próprio edifício. Todavia, a entrada na vila apresenta-se sempre distinta da principal entrada do edifício principal. Estas vilas, apesar de não visíveis da rua, eram também acompanhadas por um letreiro metálico na parte superior do portão em ferro, usualmente com o nome do proprietário (Pereira, 1994). Um exemplo deste tipo de vilas que ainda hoje está presente na cidade de Lisboa é a Vila Luz, na Rua Pascoal de Melo, em Lisboa.

#### **v) Vilas formando ruas**

As vilas formando ruas surgiram em zonas amplas, desimpedidas e junto a fábricas que eram construídas na segunda metade do século XIX. Este tipo de vila, como é exemplo a Vila Berta, apresenta uma forma alongada, o seu acesso é feito por uma ou duas entradas distintas (Ildefonso, 2008) e apresenta ruas próprias entre as duas filas de habitação geralmente dispostas em correnteza.

#### **vi) Vilas de escala urbana**

Com a crescente construção de vilas, as tipologias foram-se alterando no seu tamanho, no seu volume e na sua própria estrutura, começando a integrar um sistema viário e a ganhar uma dimensão à escala urbana (Pereira, 1994). A vila à escala urbana pode-se diferenciar em dois tipos: as vilas de um ou dois pisos, unidades de habitação horizontal; ou conjuntos massivos em blocos (Ildefonso, 2008).

#### **vii) Bairro operário e económico**

O bairro operário e económico é morfologicamente semelhante à vila de escala urbana mas a uma escala relativamente superior em consequência da criação de sociedades e cooperativas de construção e habitação por parte do proletariado industrial. É exemplo o Bairro operário dos Bardadinhos, na freguesia de Santa Engrácia, que apresenta uma arquitetura simples e austera relatando a escassez de recursos com que foi construído (Pereira, 1994). Tanto as vilas de escala urbana como os bairros operários e económicos apresentam um carácter autónomo, incluindo edifícios de utilização coletiva como, escolas, lugares de convívio, comércios de primeira necessidade, tanques e lavadouros públicos, sanitários e, em alguns casos, pequenas oficinas (Ildefonso, 2008).

#### **viii) Vilas diretamente ligadas à produção**

A determinada altura, a escassez de alojamento para as famílias operárias começou a manifestar-se prejudicando o desenvolvimento industrial. Foi então que algumas empresas tomaram a iniciativa de promover alojamento aos seus funcionários, próximos aos seus locais de trabalho ou, em certos casos, integrados nas próprias instalações fabris. Dentro desta categoria, distinguem-se as habitações destinadas aos trabalhadores com cargos superiores que viviam em andares construídos sobre os armazéns. Nas zonas de maior industrialização, particularmente Xabregas e Alcântara, foi onde este fenómeno se manifestou mais intensamente (Pereira, 1994). Em 1873, a Companhia de Fiação e Tecidos de Lisbonenses foi a primeira unidade fabril a construir uma vila operária para os seus funcionários (Teixeira, 1992), disponibilizando aos seus habitantes escola primária, creche e quartel de bombeiros (Rodrigues, 2016).

## **4.2. Localização do caso de estudo**

O caso de estudo localiza-se na Rua Pascoal de Melo n.º 111, em Lisboa, e é conhecida como Vila Luz. Segundo a descrição tipológica apresentada em 4.1, esta antiga vila operária terá sido construída no início do século XX e encaixa-se na tipologia das vilas construídas atrás de prédios. Tendo por base as características anteriormente descritas para este tipo de vilas destaca-se: a sua entrada em portão

de ferro e com letreiro em azulejo identificando o nome da vila; o acesso à vila pelo eixo central do lote a céu aberto que liga ao pátio; o pátio liga os diferentes edifícios que estão construídos por detrás do edifício principal e que não são visíveis da rua principal; o acesso aos pisos superiores, é feito por galerias exteriores construídas em estruturas de ferro; e, por fim, a correnteza das casas tem apenas rés-do-chão e primeiro andar.

A Vila Luz é constituída por três edifícios – o Edifício 1, o Edifício 2 e Edifício 3 – e pelo seu elemento de ligação – o Pátio. A Figura 4.1 representa uma imagem retirada do sítio da internet *Google Maps* (2020) onde se mostra a localização da vila, identificando cada um dos edifícios e a sua orientação.

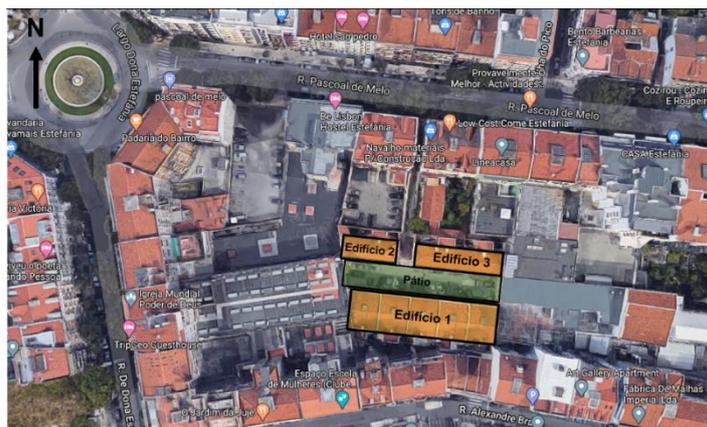


Figura 4.1 - Localização e identificação do caso de estudo (Google Maps, 2020)

### 4.3. Soluções e elementos construtivos da Vila

Ainda que o ano de construção da Vila Luz seja incerto, sabe-se que o mesmo remota ao início do século XX, pelo que as soluções construtivas utilizadas na altura são bastante distintas das adotadas atualmente. Na medida em que não foi possível identificar todas as soluções construtivas, foram consideradas as seguintes:

- paredes exteriores: em alvenaria de pedra irregular, vulgarmente de pedra calcária, atendendo à predominância deste tipo de rocha na região de Lisboa; argamassa de cal e areia, também conhecida por argamassa bastarda (Brito e Flores-Colen, 2003). Espessura: reboco de 2 cm; alvenaria de pedra de 40 cm; reboco de 2 cm;
- paredes divisórias: em tabiques de madeira rebocados e estucados, vulgo “tabiques ordinários”; revestidas em ambas as faces com reboco de argamassa de cal e areia (Pinho, 2011). Espessura: reboco de 2 cm; tabiques de 4 cm; reboco de 2 cm;
- piso térreo: enrocamento em alvenaria de pedra sobre o qual assenta uma camada de desgaste em laje de pedra; revestido com ladrilhos cerâmicos (Andrade, 2011). Espessura, do interior para o exterior: laje de pedra de 40 cm; argamassa de assentamento de 3 cm; ladrilho cerâmico de 1.2 cm;
- pisos intermédios: em soalho, assentes em vigas de madeira e teto de esteira de camisa e saia (por simplificação, optou-se por considerar o mesmo tipo de madeira – soalho); Solução:

soalho com espessura de 3.5 cm; caixa-de-ar com 20cm; teto de esteira de camisa saia em soalho com espessura de 3.5 cm (Costa, 1955).

- cobertura: cobertura inclinada em estrutura de madeira sem isolamento térmico (considerou-se uma solução apresentada no ITE-50, Figura II.17) (Matias, et al., 2006);
- pavimento exterior (pátio): em calçada, com sub-base de 15 cm de *tout-venant*, base de 8 cm de pó de pedra e, por fim, 6 cm de calçada (Rocha, 2016);
- envidraçado: vidro simples de 4 mm de espessura e caixilho de alumínio sem corte térmico;
- portas: em madeira com 4 cm de espessura.

## 4.4. Materiais constituintes

As características dos materiais das soluções e dos elementos construtivos que constituem a envolvente opaca da Vila Luz estão definidos na Tabela 4.1 - Materiais constituintes e características da envolvente opaca do caso de estudo.. Os materiais são definidos no campo de entrada *Material* presente no *Surface Construction Elements* do IDF Editor.

Tabela 4.1 - Materiais constituintes e características da envolvente opaca do caso de estudo.

Material	Rugosidade	Espessura [m]	Condutibilidade e térmica [W/(m°C)]	Massa Volúmica [Kg/m³]	Calor Específico [J/(Kg.°C)]	Absortância Térmica	Absortância Solar	Absortância Visível
Alvenaria de pedra calcária	Rugoso	0,4	1,4	1850	1000	0,9	0,4	0,7
Reboco	Rugoso	0,02	0,8	1600	1000	0,9	0,4	0,7
Ladrilho cerâmico	Moderadamente suave	0,012	1,3	2300	800	0,9	0,5	0,7
Argamassa de assentamento	Rugoso	0,03	0,8	1600	1000	0,9	0,5	0,7
Laje de pedra calcária	Rugoso	0,4	1,7	2100	1000	0,9	0,5	0,7
Madeira tabique	Moderadamente rugoso	0,04	0,159	721	1260	0,9	0,8	0,7
Soalho	Moderadamente suave	0,035	0,159	721	1260	0,9	0,8	0,7
Calçada	Moderadamente rugoso	0,06	1,7	2100	1000	0,9	0,4	0,7
Pó de pedra	Moderadamente suave	0,08	1,7	2700	1000	0,9	0,5	0,7
Tout-venant	Muito rugoso	0,15	1,7	2650	1000	0,9	0,5	0,7
Porta de madeira (exterior)	Moderadamente suave	0,04	0,23	800	1260	0,9	0,5	0,7

Para definir a condutibilidade térmica e a massa volúmica dos materiais apresentados recorreu-se, maioritariamente, às tabelas do ITE-50 do LNEC (Matias, et al., 2006). Contudo, para definir a massa volúmica de alguns dos materiais, nomeadamente pó de pedra e *tout-venant*, utilizaram-se valores retirados de catálogos de fabricantes. O calor específico foi consultado no documento Propriedades de Materiais (NIST, 2010), a absorptância solar foi retirada do RCCTE (RCCTE, 2006), as paredes exteriores de cor amarela e a calçada branca presente no pátio foram ambas consideradas de cor clara e com um coeficiente de absorção solar de 0.4. As portas de madeira são pintadas de vermelho escuro tendo sido considerada uma cor média com valor de absorptância solar de 0.5. Já para a absorptância térmica e para a absorptância visível, optou-se por adotar os valores por defeito do programa, 0.9 e 0.7, respetivamente.

Apesar de muitos parâmetros definidos na Tabela 4.1 - Materiais constituintes e características da envolvente opaca do caso de estudo. não serem necessários para o cálculo da irradiância nas superfícies exteriores dos edifícios, por motivos de potenciais conflitos com o programa optou-se por preenchê-los na sua totalidade. Por exemplo, ainda que não sejam calculados os ganhos internos nos edifícios, a condutibilidade térmica, a massa volúmica e o calor específico foram considerados por forma a evitar eventuais erros que pudessem surgir no decorrer das simulações.

Para a cobertura inclinada em madeira e sem isolamento térmico, utilizou-se uma solução apresentada no ITE-50 em que o coeficiente de transmissão térmica tem um valor de  $3.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , por ser uma esteira horizontal leve e com sentido do fluxo de calor ascendente. Tendo em conta que o sentido do fluxo é ascendente, a partir do Despacho (extrato) nº15793-K/2013 (Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 2013), sabe-se que a resistência térmica exterior ( $R_{se}$ ) tem um valor de  $0.04 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$  e a resistência térmica interior ( $R_{si}$ ) de  $0.10 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ , sendo assim possível determinar a resistência térmica da solução adotada para a cobertura pela equação 4.1:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad [4.1]$$

Por conseguinte, a resistência térmica da cobertura é  $0.123 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ , como definido no campo de entrada *Material:NoMass* presente no *Surface Construction Elements* do IDF Editor.

## 5. Estudo experimental

### 5.1. Procedimento experimental

Um dos principais objetivos da presente dissertação é a calibração do modelo de simulação do potencial solar com o recurso ao *CityEngine* para modelação geométrica do ambiente urbano, do *EnergyPlus* para a simulação da radiação solar e do *SketchUp* para a interligação entre os dois modelos anteriores. Para isso, foi realizada uma campanha experimental onde se aferiu a radiação solar *in situ* com recurso ao piramómetro LI-COR LI200R, que mede a irradiância observada no momento de medição (em  $W/m^2$ ), com um grau de incerteza de  $\pm 3\%$  (LI-COR, 2020). Para a determinação da refletância solar no local da campanha foi utilizado o piranómetro BF5 Sunshine Sensor Delta-T Devices, que permite aferir a radiação solar difusa (com grau de incerteza  $\pm 20 W/m^2 \pm 15\%$ ) e a radiação solar global (com grau de incerteza  $\pm 5 W/m^2 \pm 12\%$ ) (BF5, 2020).

A radiação solar tem uma componente direta e uma componente difusa sendo que as duas estão presentes num dia de céu limpo e apenas a difusa em dias de céu encoberto. Neste caso, a avaliação da radiação solar incidente nas superfícies foi realizada em dias de céu limpo, isto é, sem nenhuma nuvem visível no céu. A campanha experimental foi dividida em três fases de monitorização da radiação solar por forma a considerar os diferentes ângulos do Sol ao longo de um ano:

- solstício de inverno (declinação solar de  $-23.45^\circ$ );
- solstício de verão (declinação solar de  $23.45^\circ$ );
- equinócio, de primavera ou de outono (declinação solar de  $0^\circ$ ).

As medições foram efetuadas, sempre que possível, o mais próximo das datas de referência (mais especificamente a 3 de abril, a 14 de julho e a 14 de janeiro) estando sujeitas às limitações relativas às condições meteorológicas e à disponibilidade do equipamento. Estas medições realizaram-se em três momentos distintos ao longo do dia: i) às 09H00, ii) às 12H00 e iii) às 15H00. No caso das medições realizadas na parte da manhã e na parte da tarde, estas foram concretizadas em momentos simétricos em relação ao meio-dia solar, contemplando assim a componente diária e sazonal do Sol, permitindo também a comparação entre os três períodos do dia. Note-se que como a declinação do Sol é igual em ambos os equinócios, apenas foi necessário realizar medições para um destes, no presente estudo em abril.

#### 5.1.1. Preparação da monitorização

Um dos principais fatores chave para o bom desempenho de uma campanha experimental consiste numa adequada preparação da sua monitorização. Neste sentido, numa primeira instância foram realizadas algumas visitas ao local e efetuados registos fotográficos do espaço para facilitar a escolha da localização dos pontos para recolha dos dados relativos à radiação solar. A Figura 5.1 apresenta alguns registos fotográficos realizados aquando das visitas realizadas ao espaço, desta forma, estão representados os vários elementos a analisar.



a)



b)



c)



d)

Figura 5.1 – Registos fotográficos da Vila Luz: a) Edifício 1; b) pátio; c) Edifício2 (lado esquerdo) e Edifício 3 (lado direito); d) Edifício 2.

Seguidamente, procedeu-se à distribuição dos pontos para recolha dos dados relativos à radiação solar atendendo à geometria do espaço e de maneira a que os pontos ficassem distribuídos de forma equidistante entre si. Ainda que apenas tenha sido possível aferir a radiação solar para o rés-do-chão do Edifício 1, devido ao acesso ao piso superior estar condicionado pela entrada nas frações, foram atribuídos 11 pontos ao Edifício 1. Ao Edifício 2, atribuíram-se 6 pontos repartidos de igual forma entre o piso inferior e superior. Relativamente ao Edifício 3, foram atribuídos 16 pontos, 8 pontos no piso térreo e 8 pontos no primeiro andar. Por fim, foram atribuídos 31 pontos ao Pátio, 15 dos quais definidos de forma homogénea ao longo do eixo central e os restantes nas zonas laterais.

A Figura 5.2 representa os três edifícios e o pátio modelados no *SketchUp*, onde estão identificados a localização de todos os pontos para os quais foram aferidos os valores de irradiância durante a campanha experimental. Note-se que a representação do pátio (Figura 5.2.d)) está em planta e, identificando-se com um retângulo cinzento mais escuro a entrada do pátio que liga à rua principal.

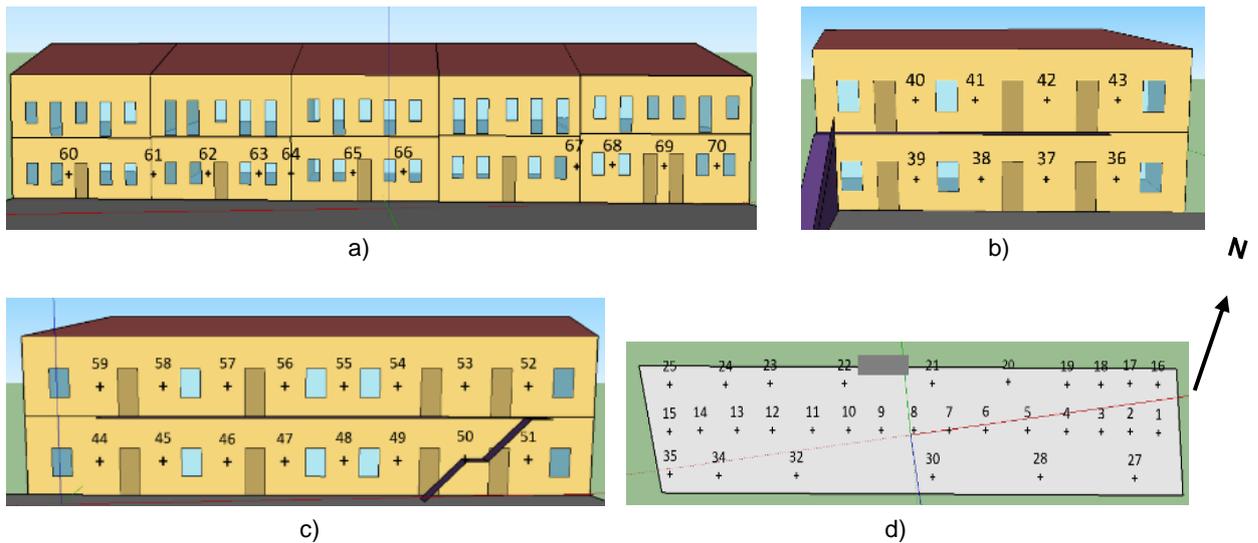


Figura 5.2 – Ilustração e localização dos pontos de registo das irradiâncias: a) edifício 1; b) edifício 2; c) edifício 3; e d) pátio

### 5.1.2. Campanhas experimentais

Durante a campanha experimental, a radiação solar foi medida através do piranómetro LI200R colocado na vertical na fachada exterior dos edifícios conforme mostra a Figura 5.3. No caso do pátio, o cuidado no manuseamento do piranómetro foi fundamental porque a aferição da radiação solar nesta zona foi realizada a 70 centímetros do pavimento e com o sensor posicionado na palma da mão. A recolha dos 66 pontos foi executada com a maior brevidade possível por forma a evitar um movimento significativo da posição do Sol entre a primeira e a última medição. Não obstante, importa destacar que a recolha da totalidade dos pontos em cada campanha durou cerca de uma hora e, foi realizada para três momentos do dia: 09:00H, 12:00H e 15:00H.

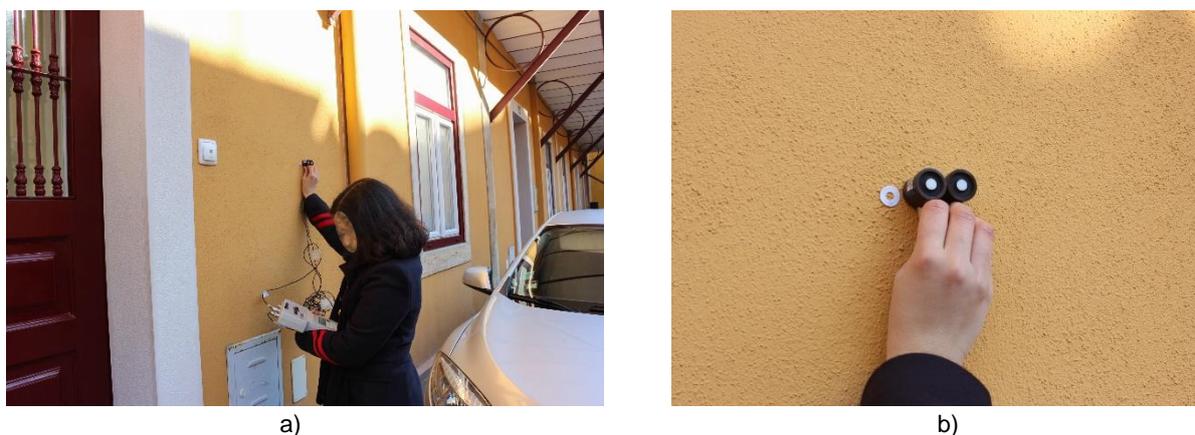


Figura 5.3 - Piranómetro em plano vertical na fachada de um dos edifícios: a) localização do sensor na parede ; b) detalhe da localização do sensor.

## 5.2. Resultados experimentais

Os valores de irradiância recolhidos durante a campanha experimental foram trabalhados no programa *Surfer*. O *Surfer* é um programa de mapeamento baseado em grelhas que interpola dados XYZ com grelhas de espaçamento regular e irregular. Neste caso específico, a partir dos dados fornecidos, o programa permite visualizar de uma forma clara e atrativa a irradiância nas fachadas dos edifícios e no pátio a partir da interpolação e extrapolação dos dados fornecidos. Ainda assim, importa salientar que as ilustrações representam a radiação solar para toda a fachada e para toda a área de implantação do pátio, o que na realidade é meramente representativo dado que o programa, além da interpolação, permite ainda a extrapolação dos valores de irradiância medidos pontualmente no local.

### 5.2.1. Edifício 1

A Figura 5.4 à Figura 5.6 correspondem ao alçado do Edifício 1 com a identificação e localização dos pontos para os quais foi aferida a radiação solar no equinócio, no solstício de verão e no solstício de inverno, respetivamente. Cada ilustração expõe duas representações, a primeira relativa à irradiância em formato de curvas de nível e a segunda numa escala de cores. Pelos resultados das Figuras 5.4 à Figura 5.6, pode concluir-se que a fachada analisada do Edifício 1 apresenta-se em qualquer altura do ano e período do dia sujeita a incidência de radiação solar difusa (à sombra), o que se justifica pela orientação aproximadamente a Norte da fachada do Edifício 1.

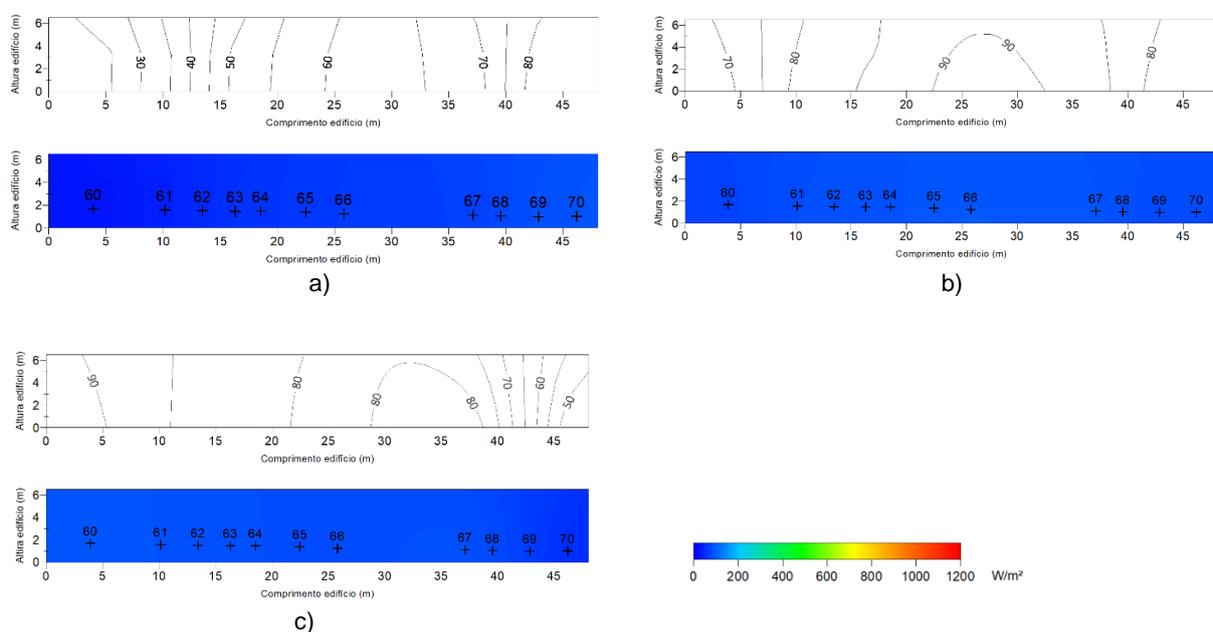


Figura 5.4 - Irradiâncias médias no Edifício 1 no equinócio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ).

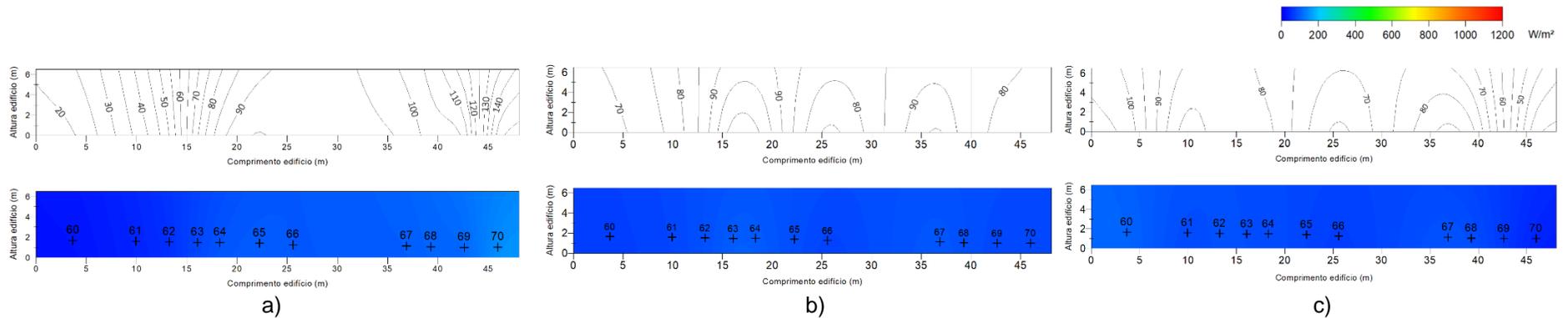


Figura 5.5 - Irradiância média no Edifício 1 no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470.0 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ).

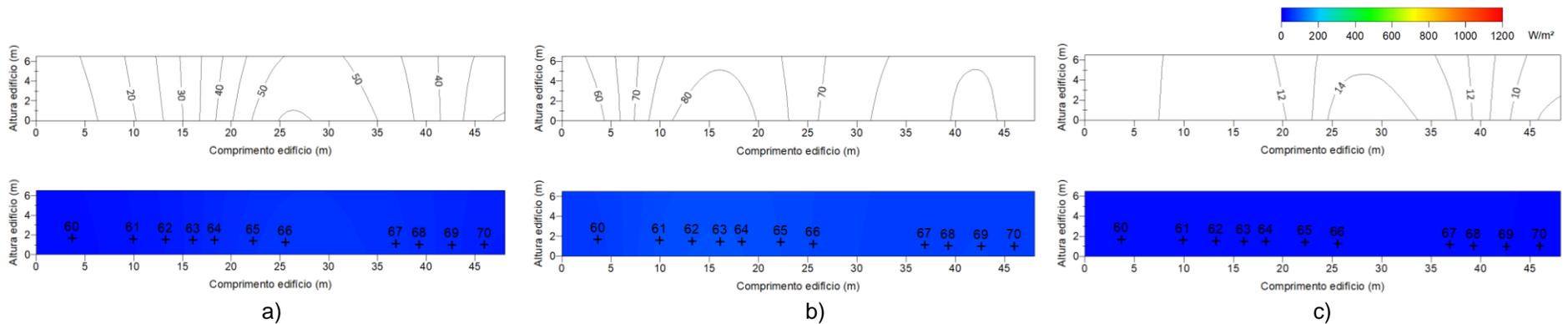


Figura 5.6 – Irradiâncias médias no Edifício 1 no solstício de inverno: a) 9h00 ( $E_g^h=60.0 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=55.9 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=57.5 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=56.5 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=49.5 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=48.3 \text{ W/m}^2$ ).

## 5.2.2. Edifício 2

A Figura 5.7, a Figura 5.8 e a Figura 5.9 correspondem ao alçado do Edifício 2 com a identificação e localização dos pontos para os quais foi aferida a radiação solar no equinócio, no solstício de verão e no solstício de inverno, respetivamente. Verifica-se (Figuras 5.7 a 5.9) que a irradiância na fachada monitorizada do Edifício 2 em qualquer período do ano é sempre maior às 12:00H, uma vez que esta fachada está orientada aproximadamente a Sul, sendo a incidência do Sol mais directa próximo do meio dia solar. Os valores mais elevados de irradiância às 12:00H foram registados o solstício de inverno porque durante esse período a altura solar é mais baixa e logo mais perpendicular à fachada.

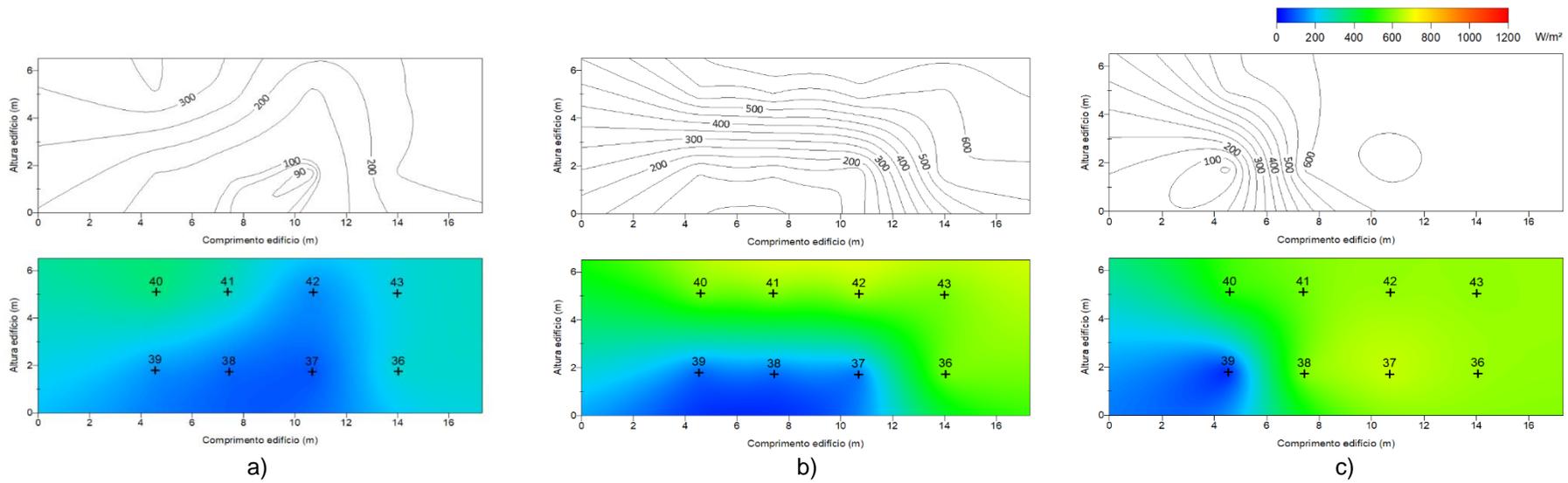


Figura 5.7 - Irradiâncias médias no Edifício 2 no equinócio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ).

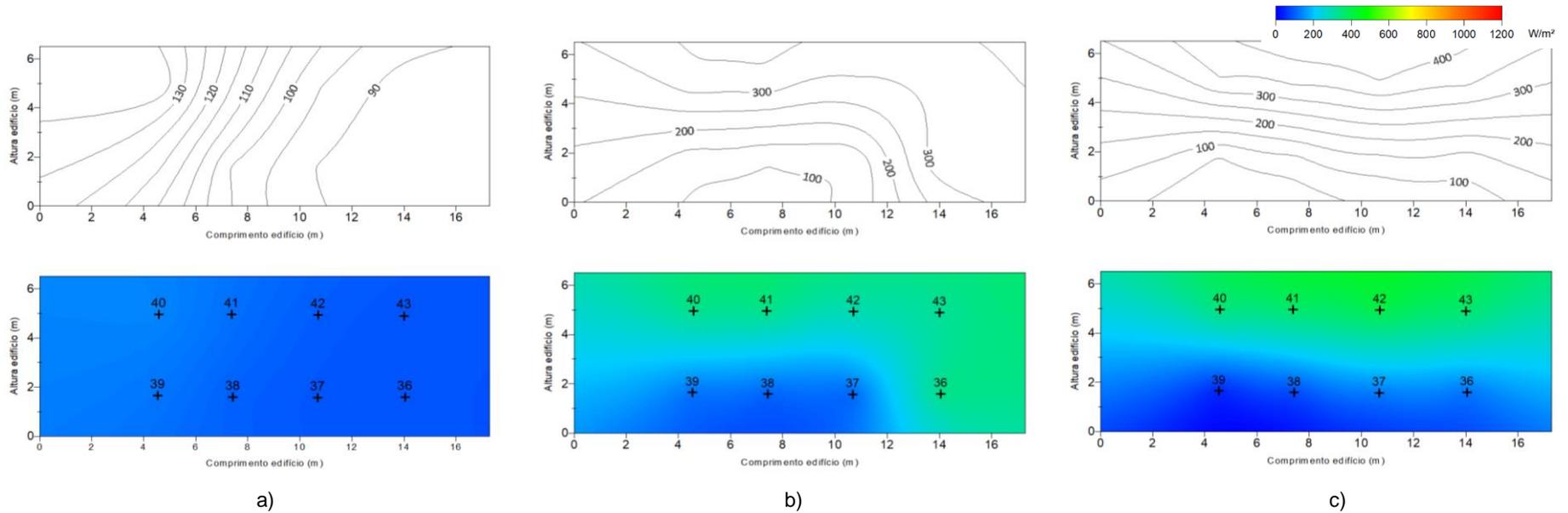


Figura 5.8 - Irradiâncias médias no Edifício 2 no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ).

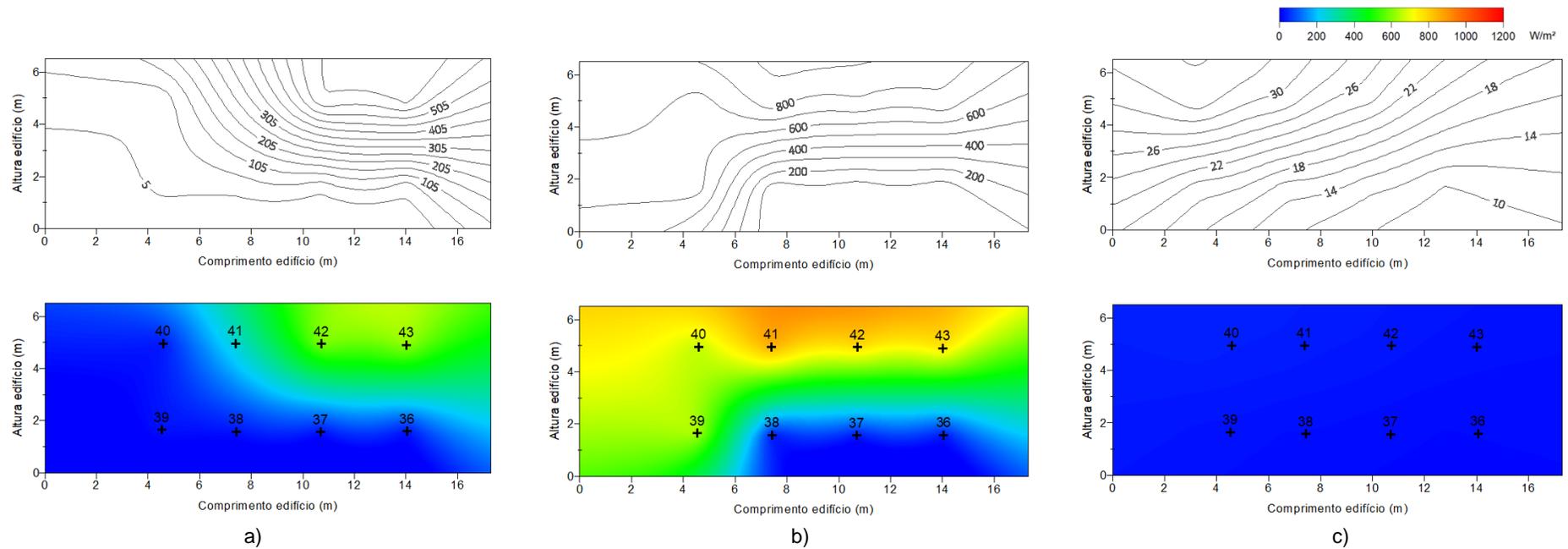


Figura 5.9 - Irradiâncias médias no Edifício 2 no solstício de inverno: a) 9h00 ( $E_g^h=60.0 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=55.9 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=57.5 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=56.5 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=49.5 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=48.3 \text{ W/m}^2$ ).

### 5.2.3. Edifício 3

A Figura 5.10, a Figura 5.11 e a Figura 5.12 correspondem ao alçado do Edifício 3 com a identificação e localização dos pontos para os quais foi aferida a radiação solar no equinócio, no solstício de verão e no solstício de inverno, respetivamente. Também para esta fachada registaram-se os valores mais elevados de irradiância no solstício de inverno às 12:00H, pelas mesmas razões apresentadas para o Edifício 2, uma vez que as fachadas monitorizadas do Edifício 2 e 3 têm a mesma orientação solar (aproximadamente a sul) e são complanares. Verifica-se que no solstício de verão o efeito da varanda é notório, uma vez que as irradiâncias às cotas mais baixas (rés-do-chão) são inferiores comparativamente às cotas mais altas (1.º andar).

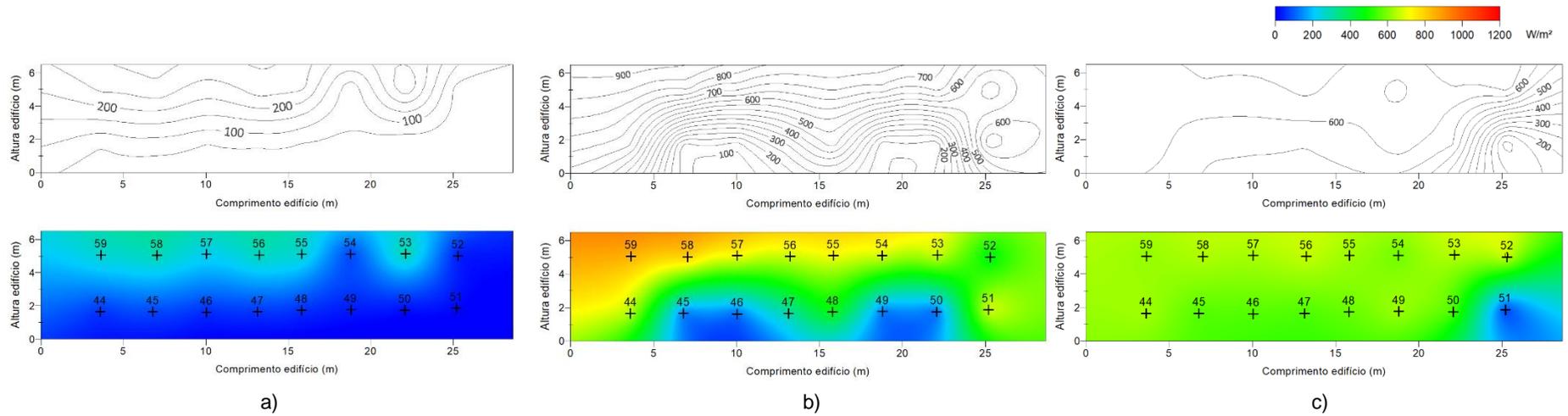


Figura 5.10 - Irradiâncias médias no edifício 3 no equinócio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7$  W/m²;  $E_d^h=38.4$  W/m²); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4$  W/m²;  $E_d^h=138.7$  W/m²); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1$  W/m²;  $E_d^h=165.1$  W/m²).

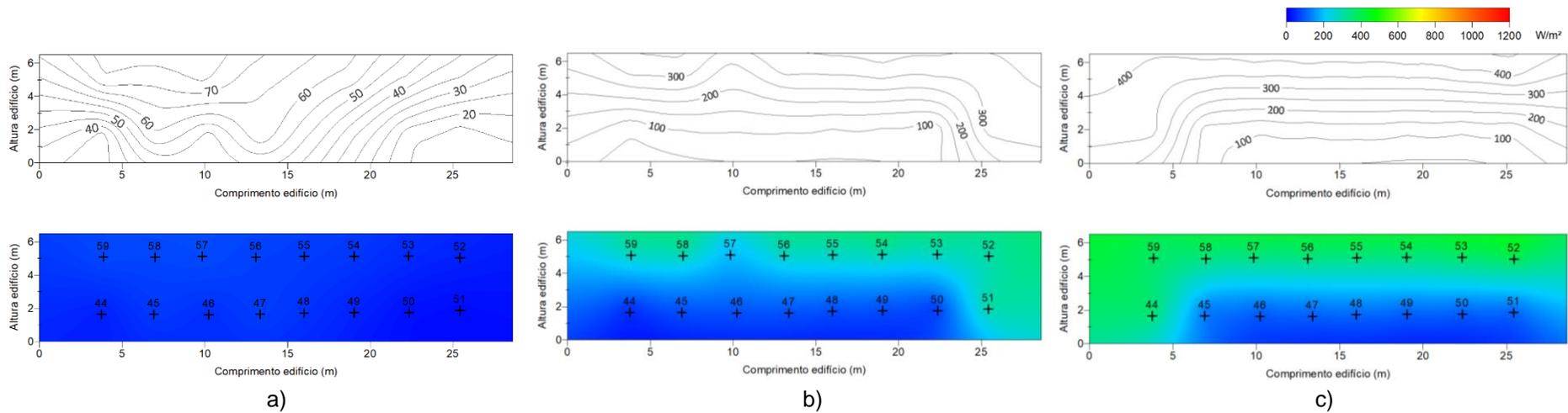


Figura 5.11 - Irradiâncias médias no edifício 3 no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470$  W/m²;  $E_d^h=68.1$  W/m²); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1$  W/m²;  $E_d^h=45.7$  W/m²); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2$  W/m²;  $E_d^h=45.4$  W/m²).

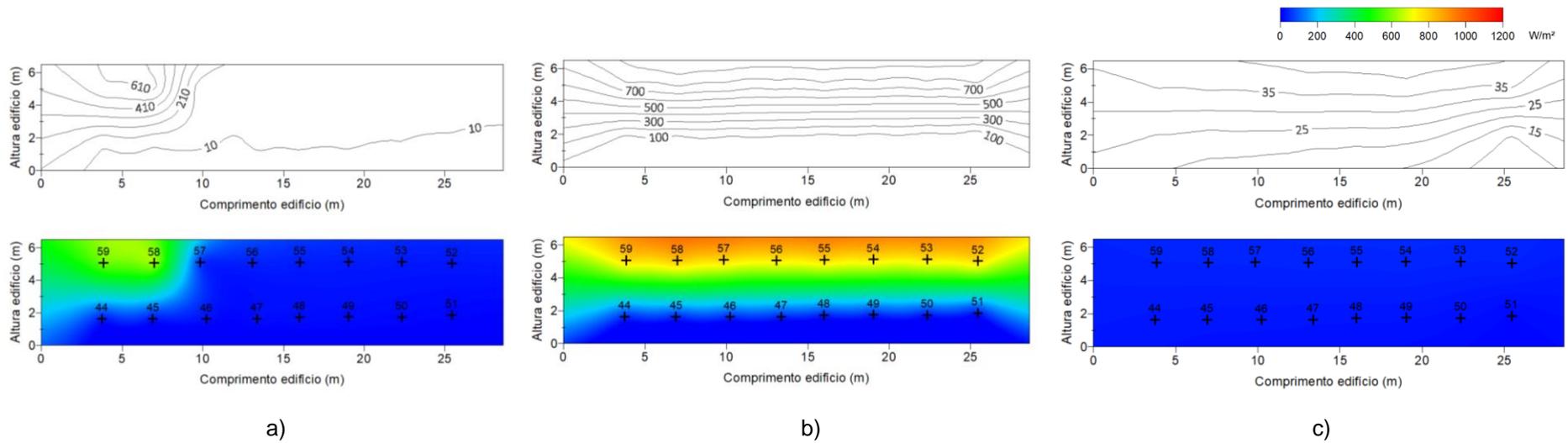


Figura 5.12 - Irradiâncias médias no solstício de inverno no edifício 3: a) 9h00 ( $E_g^h=60.0 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=55.9 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=57.5 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=56.5 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=49.5 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=48.3 \text{ W/m}^2$ ).

## 5.2.4. Pátio

A Figura 7.11, a Figura 5.14 e a Figura 7.13 correspondem ao Pátio com a identificação e localização dos pontos para os quais foi aferida a radiação solar no equinócio, no solstício de verão e no solstício de inverno, respectivamente.

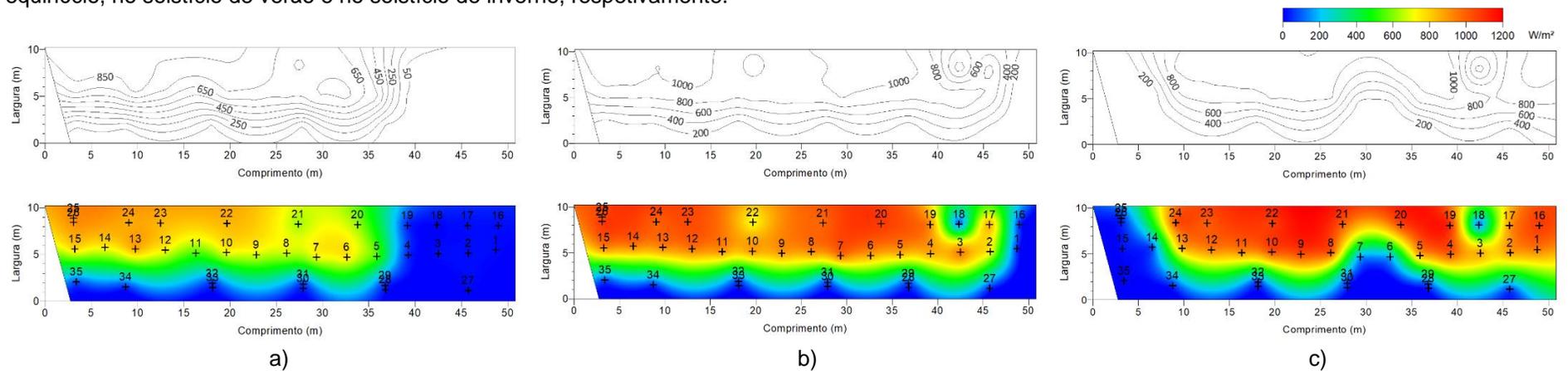


Figura 5.13 - Irradiâncias médias no equinócio no Pátio: a) 9h00 ( $E_g^h=363.7 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=38.4 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=972.4 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=138.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=914.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=165.1 \text{ W/m}^2$ ).

Os resultados mostram de forma clara o efeito de sombreamento dos edifícios no pátio durante o solstício de inverno (quando o sol está com uma altura solar menor). No solstício de verão e equinócio, com alturas solares superiores, o efeito de sombreamento do pátio é bastante inferior, sendo maior na zona a Este às 09H00, pelo facto de existirem edifícios adjacentes de maior altura nessa orientação e o Sol às 09H00 ter orientação Este e uma altura solar inferior.

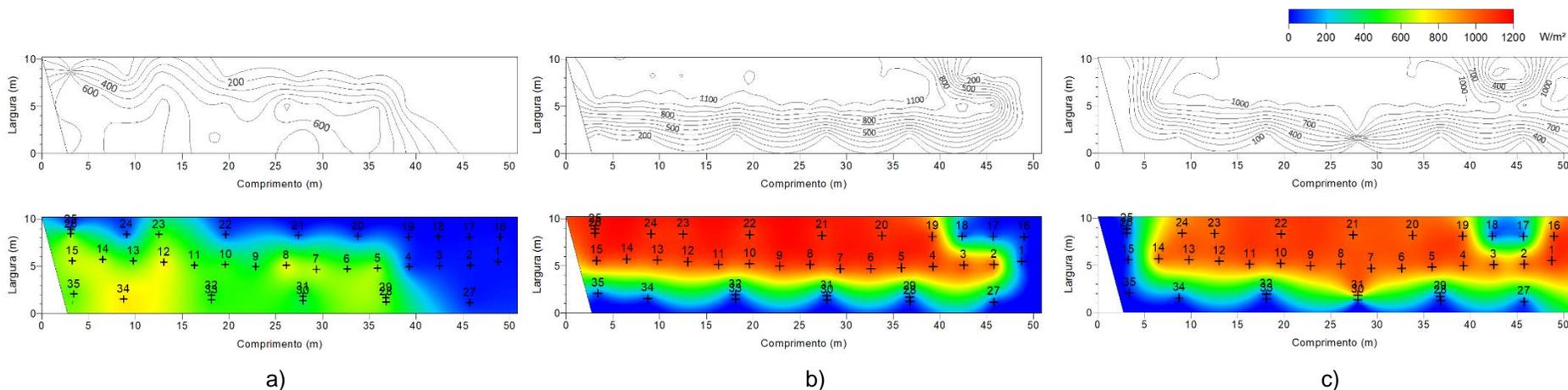


Figura 5.14 - Irradiâncias médias no Pátio no solstício de verão: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ).

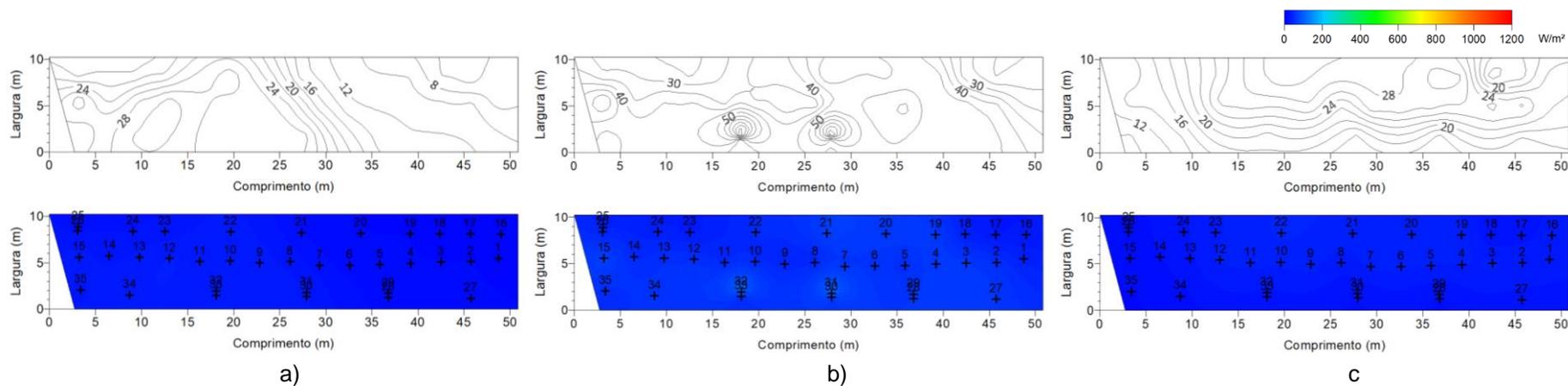


Figura 5.15 - Irradiâncias médias no Pátio no solstício de inverno: a) 9h00 ( $E_g^h=470 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=68.1 \text{ W/m}^2$ ); b) 12h00 ( $E_g^h=913.1 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.7 \text{ W/m}^2$ ); c) 15h00 ( $E_g^h=948.2 \text{ W/m}^2$ ;  $E_d^h=45.4 \text{ W/m}^2$ ).

## 6. Simulação numérica

Neste capítulo apresenta-se, numa primeira fase, uma breve descrição da modelação 3D recorrendo ao software *SketchUp*, seguido da descrição do programa de simulação, *EnergyPlus* (EP), utilizado nesta dissertação. Seguidamente, serão descritos todos os campos de entrada (*inputs*) necessários às simulações e que permitem a obtenção de resultados. Por fim, serão apresentados os campos de saída (*outputs*) que, depois de devidamente tratados, permitem calibrar o modelo experimental em estudo e efetuar a sua validação. A Figura 6.1 apresenta de forma esquemática a criação e a implementação do modelo de simulação do caso de estudo.

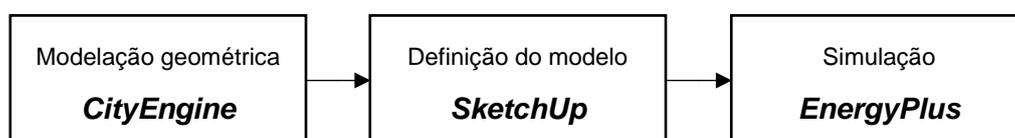


Figura 6.1 - Criação do modelo de simulação

### 6.1. Geometria 3D em SketchUp

A modelação 3D da vila foi criada no *CityEngine*, seguidamente o modelo foi importado para o *Sketchup*, onde estavam apenas representados tridimensionalmente os elementos verticais (fachadas) e horizontais (cobertura) por edifício (Figura 6.2.a)). A escolha do programa *SketchUp* está relacionada com o facto de este *software* permitir a associação ao *EnergyPlus* a partir da instalação gratuita do *plug-in Euclid*. A junção destes permite criar e editar a geometria de um ou mais edifícios, fazendo com que as alterações sejam automaticamente incluídas nos campos de entrada do *EnergyPlus*. Para além disso, o *SketchUp* permite a visualização 3D do modelo a simular.

A implementação das diversas superfícies no EP foi realizada a partir da criação de seis zonas térmicas diferentes, por piso e por andar (O termo “zona térmica” identifica determinado volume onde a temperatura no seu interior é constante). Ao transferir as superfícies para as zonas térmicas, a interface *Euclid* reconhece automaticamente o tipo de superfície, categorizando as paredes com a cor amarelo e as coberturas com a cor vermelho. Os restantes elementos adjacentes (edifícios circundantes à Vila Luz) foram considerados como superfícies de sombreamento para as quais, à semelhança da criação das zonas térmicas, foi necessário criar grupos de sombreamento onde as superfícies são reconhecidas imediatamente como superfícies de sombreamento, ficando os elementos representados com a cor roxo (Figura 6.2b)).

Por fim, foram implementados os detalhes arquitetónicos (Figura 6.c)) específicos de todos os edifícios da Vila, particularmente, portas e janelas. Numa primeira fase foi realizado um levantamento *in-loco* destes elementos e, conseqüentemente, foram desenhados no *SketchUp* com o auxílio da ferramenta fita métrica. Automaticamente, a interface *Euclid* deduz o tipo de subsuperfície, distinguindo entre portas

– onde a identificação é realizada com base na localização da subsuperfície na superfície e em que apenas uma das suas fronteiras é coincidente com uma fronteira da superfície base, resultando na representação das portas a castanho – e janelas – onde nenhuma das fronteiras da subsuperfície pode ser coincidente com as fronteiras da superfície na qual está inserida, resultando na representação das janelas a cor translúcida.

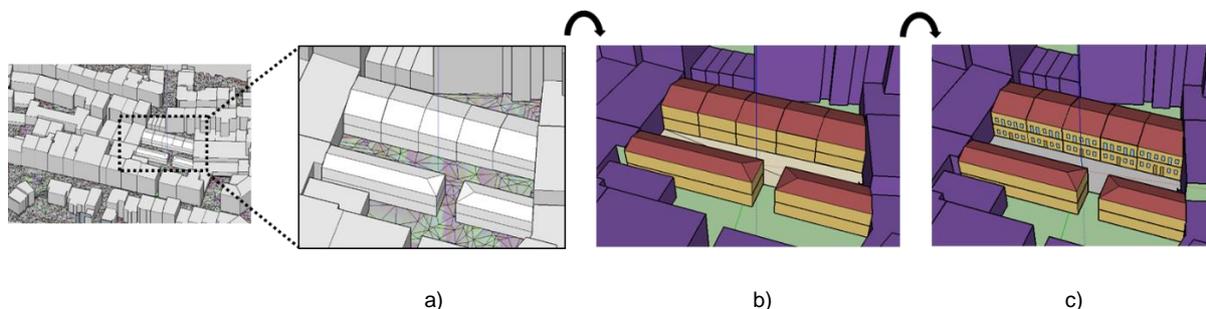


Figura 6.2 - Implementação do modelo digital de superfície (a) e criação do modelo de caso de estudo com diferentes níveis de detalhe (b e c).

## 6.2. Descrição geral do programa EnergyPlus

O *EnergyPlus* (EP) é um *software* de acesso livre que permite a simulação do comportamento e desempenho energético de edifícios ou de parte específicas de edifícios. Foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*US Department of energy – USDOE*) e a versão utilizada na elaboração da presente dissertação é a versão 8.7.0.

Importa desde já destacar que uma das limitações do EP é a inexistência de uma interface gráfica, o que representa um desafio adicional à definição da geometria dos objetos de estudo. A colmatar este obstáculo, foi utilizado o *SketchUp* que possibilita a visualização, o desenho e a definição da geometria de uma forma rápida e intuitiva. De modo a associar estas duas ferramentas, recorreu-se ao *plug-in Euclid*, disponível no sítio da internet *Big Ladder Software* (<https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>), com a versão *Euclid 0.9.3*.

Os parâmetros de entrada e saída do EP deverão ser apresentados num ficheiro em formato de texto e com a extensão IDF (*input data file*). O IDF-Editor, acessível através do EP-Launch, permite o preenchimento dos respetivos parâmetros, bem como a inserção e/ou modificação dos dados referentes ao modelo. Cada simulação terá por base um ficheiro climático referente a determinada localização que, neste caso, respeita à cidade de Lisboa. Os ficheiros climáticos serão também introduzidos através da ferramenta EP-Launch, com a extensão EPW. Após a introdução destes dois ficheiros, do IDF e do EPW, poderá dar-se início à simulação.

Os ficheiros de *output* com maior relevância para o presente estudo são: i) o ficheiro de erros “.err”, com informação sobre todos os erros que ocorreram durante a simulação; e ii) o ficheiro “.csv”. com informação referente aos valores das variáveis de *output* especificadas no programa pelo utilizador. Relativamente ao primeiro, existem três tipos de erros: *Warnings* (avisos de situações indesejáveis,

mas que permitem que a simulação ocorra), *Severe* (apesar de não impossibilitarem a execução da simulação, são erros graves e devem ser corrigidos) e *Fatal* (erros que têm obrigatoriamente de ser corrigidos sob pena de resultarem no aborte imediato da simulação em curso).

## 6.3. Campos de entrada EnergyPlus

Nesta secção são descritos os campos de entrada do *EnergyPlus* necessários à simulação do caso de estudo. Atente-se que, o *EnergyPlus* é um programa muito completo do ponto de vista da simulação energética, pelo que nem todos os campos foram preenchidos, por não serem relevantes para as simulações realizadas ou por já se encontrarem definidos por defeito no programa e não comprometem a qualidade dos resultados.

### 6.3.1. Simulation Parameters

O primeiro grupo de campos de entrada a preencher no EP é o *Simulation Parameters*, onde são introduzidos os parâmetros gerais de simulação e os parâmetros gerais para a definição do caso de estudo, tais como: *SimulationControl*; *Building*; *ShadowCalculation*; e *Timestep*.

O campo *SimulationControl* permite especificar o tipo de cálculos que uma determinada simulação executará através do preenchimento de cinco parâmetros com *YES/NO*. No presente caso de estudo foram seleccionados os campos *Run Simulation for Sizing Periods*, relativo aos períodos de simulação, e *Run Simulation for Weather File Run Periods* relativo ao ficheiro climático utilizado que será descrito no *Run Period*.

O campo *Building* permite definir o modelo de forma detalhada tendo em consideração fatores como o tipo de ambiente em que os edifícios se encontram (uma vez que estão inseridos num ambiente urbano, definiu-se *Terrain* como sendo do tipo *City*); e o tipo de distribuição solar (considerou-se a opção *FullExteriorWithReflections* com vista ao cálculo não só das sombras nas superfícies externas causadas por sombreamentos de saliências e/ou edifícios vizinhos, como também da radiação solar refletida das superfícies externas para as superfícies dos edifícios).

O campo *ShadowCalculation* assume uma particular relevância no processo de obtenção de resultados, uma vez que com base nos dados da radiação presentes no ficheiro climático em determinado dia e para os vários momentos do dia em análise, procede à determinação do sombreamento existente. Considerando que se pretende que as simulações sejam realizadas para dias específicos, o método de cálculo definido neste campo deverá corresponder ao *TimestepFrequency* que, por contraponto ao método pré-definido (*AverageOverDayIn Frequency*), apresenta um tempo de simulação e detalhe superior.

Por fim, o campo *Timestep* define o número de intervalos de tempo, compreendidos numa hora, nos quais a simulação apresenta resultados. O número de intervalos de tempo deverá corresponder a um número divisor de 60 sendo que, quanto maior o divisor maior a frequência de apresentação de

resultados e maior o tempo de simulação. Neste caso, optou-se por um *Timestep* de 12 exibindo, assim, os resultados de cinco em cinco minutos.

### **6.3.2. Location and Climate**

No grupo de campos de entrada *Location and Climate*, é possível introduzir os dados referentes à localização do caso de estudo, mais especificamente: a longitude; a latitude; o fuso horário; e a altitude.

Note-se que a utilização de um ficheiro climático afasta a necessidade de preenchimento do campo *Site:Location* uma vez que esta informação já consta do referido ficheiro. Desta forma, o único campo de entrada a definir neste grupo é o *RunPeriod*, respeitante à data de início e de fim da simulação. Como referido anteriormente, a campanha experimental foi realizada em três momentos distintos de um ano, pelo que se torna necessário definir os três dias de simulação pretendidos: um para o equinócio, um para o solstício de verão e outro para o solstício de inverno.

### **6.3.3. Surface Construction Elements**

No grupo *Surface Construction Elements*, são definidos os materiais de construção que constituem a envolvente interior e exterior dos edifícios bem como as suas propriedades físicas. Para isso, neste grupo é necessário proceder ao preenchimento de quatro parâmetros: *Material*; *Material:NoMass*; *WindowMaterial:Glazing*; e *Construction*.

No objeto *Material*, apenas é possível caracterizar os materiais opacos. Neste campo são introduzidas as características dos materiais que constituem uma superfície, nomeadamente: a rugosidade (numa escala qualitativa); a espessura; a condutibilidade térmica; a massa volúmica; o calor específico; e as absorptâncias (térmica, solar e visível). Os materiais presentes neste campo de entrada foram definidos conforme exposto no Capítulo 4.

O parâmetro *Material:NoMass* respeita à resistência térmica da solução construtiva adotada para determinada superfície. Neste caso, a única solução construtiva adotada no preenchimento deste parâmetro foi a cobertura.

O campo *WindowMaterial:Glazing* define o material do envidraçado onde é necessário indicar a sua espessura e as suas propriedades óticas. Por se tratar de um edifício antigo, os envidraçados são de pano simples optando-se por realizar esta mesma parametrização.

Por fim, no campo *Construction*, são definidos, por camada e por ordem de colocação da face exterior para a face interior, os materiais que compõem determinada superfície como são exemplo as paredes, as coberturas, os envidraçados e os pavimentos.

### **6.3.4. Thermal Zones and Surfaces**

No grupo *Thermal Zones and Surfaces*, é possível definir as características da(s) zona(s) térmica(s), os detalhes de cada superfície do(s) edifício(s) a modelar e a(s) superfície(s) de sombreamento. Todos os parâmetros definidos neste grupo são iguais para a totalidade das simulações efetuadas.

O campo de entrada *Zone* define como um conjunto de espaços se encontram submetidos ao mesmo controlo térmico, isto é, a mesma zona térmica apresenta temperatura constante no seu interior. Deste modo, definiram-se sete zonas térmicas distintas, uma para cada andar de edifício (seis zonas térmicas) e, uma zona térmica para o pátio. A definição destas zonas foi realizada com o auxílio do *Euclid* no *SketchUp* e, posteriormente, carregada no EP. De notar que a definição de zonas independentes não é relevante para a análise, uma vez que não são estudados o conforto térmico interior de um edifício, as trocas térmicas entre o interior e o exterior de um edifício, e as trocas térmicas entre zonas diferentes.

No campo de entrada *BuildingSurface:Detailed*, definem-se as superfícies às quais são atribuídos os elementos construtivos previamente definidos em *Construction*. Este campo é preenchido automaticamente pelo ficheiro elaborado no *SketchUp* para parâmetros como: o nome da superfícies; o tipo; o nome do elemento de construção; a zona; as condições de fronteira exteriores; a exposição solar; a exposição ao vento; e as coordenadas dos vértices de cada elemento. Contudo, é necessário um trabalho cuidadoso na definição dos elementos e das suas características no *SketchUp*, de forma estarem corretamente definidos no *EnergyPlus*.

Ainda que o parâmetro *FenestrationSurface:Detailed* possa ser usado para subsuperfícies de até cinco tipos, no modelo apenas constam subsuperfícies do tipo janela (de duas dimensões distintas) e porta. A atribuição de uma subsuperfície (janela ou porta) a uma superfície (parede) permite que as características presentes na superfície, como é exemplo a exposição solar, fiquem também associadas às subsuperfícies pois o EP apenas considera uma subsuperfície se esta estiver complanar a uma superfície e estas não tiverem em comum mais do que uma fronteira. Na secção 7.1.1 do capítulo 7 é apresentada a divisão realizada nas fachadas dos edifícios e a distribuição das janelas e as portas nas superfícies.

Finalmente, o último campo do grupo *Thermal Zones and Surfaces*, foi o campo de entrada *Shading:Building:Detailed* cujo preenchimento é feito diretamente no *SketchUp* através da criação de zonas de sombreamento. Todos os elementos que se encontram a roxo na Figura 6.2 correspondem a zonas de sombreamento específicas, sendo que cada superfície corresponde a uma zona diferente de sombreamento. Os objetos identificados neste grupo são os edifícios vizinhos e as varandas existentes nos pisos superiores dos Edifícios 2 e 3.

## 6.4. Ficheiro climático

Para o presente estudo, foram utilizados dois ficheiros climáticos distintos: i) o ficheiro climático EPW disponibilizado no sítio da internet do *EnergyPlus* ([https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT//PRT\\_Lisboa.085360\\_INETI](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI)); e ii) o ficheiro climático criado a partir dos registos da estação meteorológica do Instituto Superior Técnico (IST), localizado no topo da Torre Norte (<https://meteo.tecnico.ulisboa.pt/>, 2020).

Quanto ao primeiro ficheiro climático, as informações meteorológicas são referentes a um conjunto de dados sintéticos com base na interpolação espacial de dados climáticos públicos publicados pelo Instituto de Meteorologia 1951-80, combinados com dados do Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação (INETI) e outras fontes de dados disponíveis. O ficheiro representa um ano meteorológico tipo criado em 2005 pelo INETI e disponibilizado publicamente no sítio da internet do *EnergyPlus* ([https://energyplus.net/weatherlocation/europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT//PRT\\_Lisboa.085360\\_INETI](https://energyplus.net/weatherlocation/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI)).

No que respeita ao ficheiro climático criado a partir dos registos na estação meteorológica do IST (<https://meteo.tecnico.ulisboa.pt/>, 2020), a escolha desta estação deveu-se ao facto de esta ser a mais próxima da Vila Luz assegurando, assim, uma melhor aproximação às características meteorológicas reais. Este ficheiro permitiu utilizar os registos meteorológicos correspondentes ao dia e ao ano exato de cada campanha, isto é, o ficheiro climático utilizado para a calibração do modelo de simulação foi criado exatamente com os dados climáticos reais dos dias observados *in situ*. Importa desde já salientar que os dados meteorológicos facultados não podem ser inseridos no formato original (.dat) no *EP-Launch*, pelo que necessitam de ser previamente tratados. Para isso, recorreu-se ao programa *Elements*, ferramenta gratuita desenvolvida pela *Big Ladder Software* (<https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>), onde se pode criar ou editar arquivos climáticos personalizados para a modelação energética de edifícios. Numa primeira fase, procedeu-se à abertura do ficheiro climático do *EnergyPlus* no *Elements* e, de seguida, alteraram-se os valores apresentados para os dias de campanha pelos valores registados na estação meteorológica do IST quanto a: radiação solar global; humidade relativa; pressão atmosférica; temperatura exterior; temperatura de ponto de orvalho; e a velocidade do vento. Note-se que a estação meteorológica localizada no IST apenas regista a radiação solar global, a qual engloba a radiação solar normal e difusa, pelo que ao introduzi-la no *Elements* é necessário fixar uma destas. Neste caso, fixou-se a radiação solar normal o que possibilita a obtenção da radiação solar difusa.

## 6.5. Campos de saída EnergyPlus (Output)

Com o propósito de obter os resultados de saída do EP é fundamental o preenchimento do grupo *Output Reporting* do IDF Editor. Neste grupo foram preenchidos os seguintes três campos: *Output:VariableDictionary*; *Output:Variable*; e *Output:Diagnostics*.

O primeiro campo a definir, *Output:VariableDictionary*, corresponde ao formato sobre o qual se pretende obter os resultados de simulação. O formato escolhido foi do tipo IDF.

Em segundo lugar, no grupo *Output Reporting*, deveram ser solicitadas as variáveis que se pretendem analisar, ainda que apenas seja possível visualizar a lista de variáveis de *output* após a realização de uma primeira simulação. Para determinar a radiação solar incidente nas fachadas dos edifícios e do pátio é também necessário preencher o campo de entrada *Output:Variable*, com a seguinte variável: *Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area [W/m<sup>2</sup>]*. A radiação total incidente numa superfície exterior respeita à soma dos seguintes fatores:

- **Surface Outside Face Incident Beam Solar Radiation Rate per Area** - radiação solar incidente no exterior de uma superfície externa, que inclui os efeitos de sombra caso existam. Tem em consideração os raios provenientes diretamente do Sol e são excluídos todos aqueles que são refletidos por obstruções ou por outras superfícies;
- **Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Solar Radiation Rate per Area** - radiação solar difusa que incide no exterior de uma superfície externa, que inclui os efeitos de sombreamento se presentes;
- **Surface Outside Face Incident Ground Diffuse Solar Radiation Rate per Area** - radiação solar difusa no exterior de uma superfície externa que surge da reflexão dos raios solares e da radiação solar difusa que atinge o solo, ou seja, a soma das variáveis *Surface Outside Face Incident Beam To Diffuse Ground Reflected Solar Radiation Rate per Area* e *Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Ground Reflected Solar Radiation Rate per Area*. Presume-se que a radiação solar refletida do solo seja difusa e isotrópica, uma vez que a opção *Reflections* foi escolhida no campo *Solar Distribution* no objeto *BUILDING*, o programa determina os efeitos da sombra incluindo a variação temporal no plano do solo pelo próprio edifício.
- **Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Surface Reflected Solar Radiation Rate per Area** - radiação solar difusa que incide numa superfície externa, que surge da reflexão da radiação solar difusa de uma ou mais obstruções. Este valor será diferente de zero, dado que a opção *Reflections* foi escolhida no objeto *BUILDING*.
- **Surface Outside Face Incident Beam To Beam Surface Reflected Solar Radiation Rate per Area** – radiação solar direta que incide no exterior de uma superfície que surge da reflexão da radiação solar direta de uma ou mais obstruções. Este valor será diferente de zero, pela escolha da opção *Reflections* no objeto *BUILDING*.
- **Surface Outside Face Incident Beam To Diffuse Surface Reflected Solar Radiation Rate per Area** - a radiação solar difusa que incide no exterior de uma determinada superfície que surge da radiação solar refletida direta-difusa de persianas ou superfícies de edifícios. Este valor será diferente de zero porque se considerou a opção *Reflections* no objeto *BUILDING*.

Por último, o campo *Output:Diagnositics* permite que para cada simulação realizada seja apresentada uma mensagem de erros/avisos que estão correlacionados com as definições tidas em consideração no modelo. De forma a possibilitar um diagnóstico de erros/avisos mais extenso, definiu-se neste campo a opção *DisplayExtraWarnings*.

## 7. Análise e discussão de resultados

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos resultados de simulação do potencial solar para o caso de estudo da Vila Luz, em conformidade com o descrito no Capítulo 4. Inicia-se com a análise da influência de diferentes variáveis de entrada do modelo nos resultados, seguindo-se a calibração do modelo com os resultados obtidos experimentalmente *in situ* (Capítulo 5). Por fim, procede-se, numa primeira fase, à simulação, análise e discussão dos resultados de irradiância nas fachadas e pátio nos períodos de equinócio, solstício de verão e solstício de inverno e, numa segunda fase, à análise do potencial solar anual, ao nível dos envidraçados, fachadas e cobertura da Vila Luz.

### 7.1. Estudo do impacte das variáveis de *input*

Neste subcapítulo, será analisada a influência das variáveis geométricas e climáticas de *input*. Com essa finalidade, procedeu-se à calibração do modelo de simulação, comparando-se os resultados de irradiância ao nível do pátio e das fachadas estimados numericamente com os obtidos experimentalmente nos períodos de equinócio e solstício de inverno e verão. Durante a calibração do modelo foi analisada a influência dos seguintes parâmetros: (i) nível de discretização do modelo, isto é, a repartição do espaço em elementos/painéis de menores dimensões, com o objetivo de obter resultados o mais próximos possível dos obtidos experimentalmente; (ii) geometria intrínseca ao próprio modelo, em particular, a presença ou ausência de varandas/palas nos pisos superiores; (iii) a geometria do espaço urbano que envolve o caso em estudo; (iv) a semântica do objeto, que corresponde à definição do tipo de superfícies no *Sketchup* e no *EnergyPlus*, especificamente: chão, telhado e parede; (v) e, por fim, as propriedades óticas dos materiais.

#### 7.1.1. Modelo base

Primeiramente, foi realizada uma simulação com o modelo base da Vila Luz considerando o contexto urbano em que está inserida. Cada um dos elementos avaliados (fachadas dos edifícios e pátio) constituem no modelo base uma única superfície do modelo em *Sketchup*, como se pode observar na Figura 7.1, obtendo-se assim um único valor de irradiância para cada uma das superfícies a cada hora pretendida. Quanto às propriedades óticas dos materiais, foram consideradas as propriedades descritas no Capítulo 4.

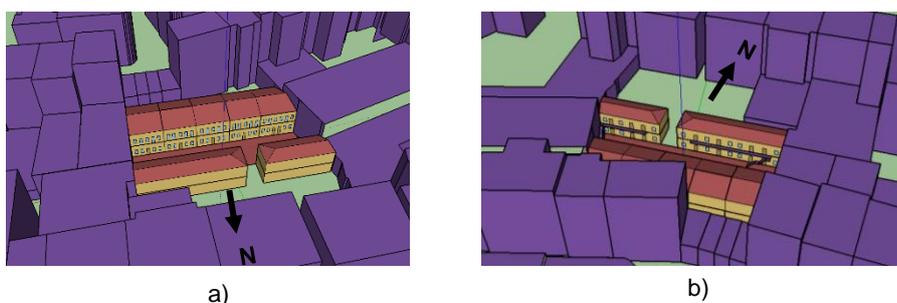


Figura 7.1 - Vista principal das fachadas dos edifícios de Vila Luz. a) Edifício 1; b) Edifícios 2 e 3, respetivamente, esquerda e direita.

Os Edifícios 2 e 3 estão divididos por pisos distinguindo-se entre piso superior e inferior. Por sua vez, o Edifício 1, Figura 7.1a), encontra-se dividido em cinco blocos distintos, cada um deles dividido em dois pisos, prefazendo um total de dez elementos, cinco no piso superior e cinco no inferior. Para a designação dos elementos, considerou-se a seguinte nomenclatura: *FacE-P#*, em que: *E* representa número do edifício (podendo tomar os valores de 1, 2 ou 3); *P* representa o piso (assumindo a nomenclatura RC ou 1, para o rés-do-chão ou primeiro piso, respetivamente); e *#* representa o número de identificação dos blocos somente existentes no Edifício 1, que estão numerados de 1 a 5, de Este para Oeste (Exemplo: *Fac1-RC1* representa a fachada do Edifício 1, rés-do-chão, primeiro bloco). A Figura 7.2 corresponde a uma representação esquemática do alçado principal do edifício 1, com a identificação de cada elemento após discretização da fachada, de acordo com a nomenclatura supracitada.

<b>ESTE</b>	Fac1-1.1	Fac1-1.2	Fac1-1.3	Fac1-1.4	Fac1-1.5	<b>OESTE</b>
	Fac1-RC1	Fac1-RC2	Fac1-RC3	Fac1-RC4	Fac1-RC5	

Figura 7.2 - Denominação de cada elemento após discretização da fachada do Edifício 1.

Neste sentido, a Tabela 7.1 e a Tabela 7.2 contêm os valores de irradiância obtidos por simulação em cada elemento avaliado, para o equinócio, solstício de verão e solstício de inverno. Enquanto que a primeira se referente ao Edifício 1 nos vários períodos do dia em análise, a segunda apresenta os valores calculados para o pátio, para o rés-de-chão e para o primeiro andar dos Edifícios 2 e 3. Estas simulações foram realizadas com recurso ao ficheiro climático EPW do *EnergyPlus*.

Tabela 7.1 – Irradiância obtida na fachada do Edifício 1 para o equinócio, solstício de verão e solstício de inverno às 09:00H, 12:00H e 15:00H. Valores expressos em  $W/m^2$ .

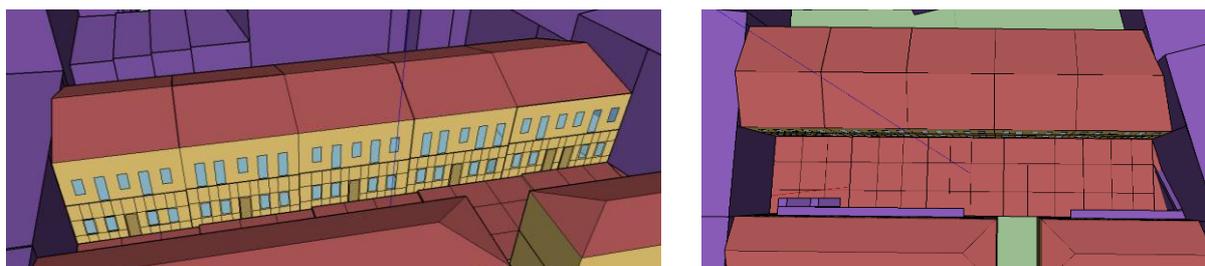
	Hora / Fachada	Fac1-RC1	Fac1-RC2	Fac1-RC3	Fac1-RC4	Fac1-RC5	Fac1-1.1	Fac1-1.2	Fac1-1.3	Fac1-1.4	Fac1-1.5
<b>Equinócio</b>	9h00	37,56	56,79	77,6	75,89	69,41	40,52	62,82	78,57	82,6	73,38
	12h00	92,41	105,44	118,2	102,22	108,53	94,51	112,94	126,11	117,28	116,35
	15h00	76,99	89,61	94,33	82,01	70,21	89,34	95,27	102,78	92,46	78,24
<b>Solstício de verão</b>	9h00	57,81	147,69	69,26	156,06	148,83	77,47	115,92	126,72	124,88	114,84
	12h00	99,34	116,40	123,86	117,08	110,09	90,25	113,20	120,04	117,74	103,92
	15h00	97,67	103,97	108,10	100,95	82,80	95,39	105,44	110,68	104,88	86,35
<b>Solstício de inverno</b>	9h00	25,58	28,62	30,61	27,88	26,05	30,00	32,17	33,30	32,81	30,00
	12h00	48,06	76,85	84,22	47,32	38,09	57,40	73,57	81,88	57,89	48,55
	15h00	26,29	29,35	30,56	28,01	25,92	29,98	33,24	33,96	34,19	31,45

Tabela 7.2 – Irradiância obtida no pátio e nas fachadas dos Edifícios 2 e 3 para o equinócio, solstício de verão e solstício de inverno às 09:00H, 12:00H e 15:00H. Valores expressos em W/m<sup>2</sup>.

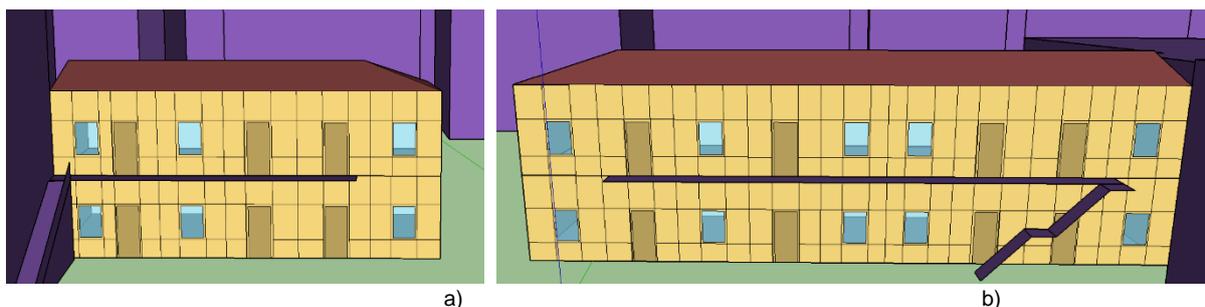
	Hora / Fachada	Fac2-RC	Fac2-1	Fac3-RC	Fac3-1	Pátio
Equinócio	9h00	186,79	217,98	94,29	187,19	242,37
	12h00	366,31	497,86	334,04	488,41	361,07
	15h00	148,70	253,89	269,37	376,77	195,04
Solstício de verão	9h00	101,60	83,08	69,26	85,30	359,69
	12h00	213,08	304,49	188,83	309,26	612,26
	15h00	102,12	170,68	143,11	219,56	328,29
Solstício de inverno	9h00	18,88	25,68	18,64	29,55	35,01
	12h00	27,73	77,99	103,81	370,10	53,26
	15h00	19,28	25,39	19,86	28,12	31,99

Como os resultados obtidos nas simulações consideram as superfícies de cada elemento por inteiro, apenas se extrai um único valor numérico de irradiância não tendo em consideração eventuais dissonâncias na radiação solar incidente dentro de uma mesma superfície. Por esta razão, estes valores não representam o que se verifica nos pontos considerados experimentalmente, impossibilitando assim a sua a comparação. De maneira a colmatar esta incompatibilidade procedeu-se ao aumento do grau de detalhe do modelo base.

Desta forma, as fachadas e o pátio foram divididos em elementos mais reduzidos, aproximadamente 1.20x1.00m<sup>2</sup>, que o programa identifica como superfícies independentes, e cujo centro se aproxima da localização do ponto da campanha experimental. Estas divisões encontram-se representadas na Figura 7.3 e na Figura 7.4, realizadas em *SketchUp* para cada edifício e para o pátio da Vila Luz. Este será o modelo base para as simulações do potencial solar a ser considerado deste ponto em diante.



a) b)  
Figura 7.3 - Modelo Base para as simulações do potencial solar: a) Edifício 1; b) Pátio.



a) b)  
Figura 7.4- Modelo Base para as simulações do potencial solar: a) Edifício 2; b) Edifício 3.

## 7.1.2. Influência dos parâmetros climáticos

Com base no modelo estabelecido anteriormente, e de forma a perceber a influência dos parâmetros climáticos na obtenção dos valores pretendidos, foram efetuadas simulações por base em dois ficheiros climáticos distintos: (i) o ficheiro climático EPW, disponibilizado pelo sítio da internet do *EnergyPlus* ([https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT//PRT\\_Lisboa.08536\\_0\\_INETI](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.08536_0_INETI)); e (ii) o ficheiro climático criado a partir dos dados da estação meteorológica do IST (<https://meteo.tecnico.ulisboa.pt/>, 2020). Deste modo, foi possível averiguar se a escolha do ficheiro é ou não determinante para a qualidade dos resultados obtidos em cada simulação considerando, para tal, as características dos materiais adotados conforme consta do Capítulo 4.

De forma a não tornar extensa a demonstração dos resultados, apenas são apresentados os valores experimentais e de simulação para o solstício de verão no pátio à hora genérica 15:00H. Os restantes resultados poderão ser consultados no Anexo A.

A Figura 7. e a Figura 7. representam os valores de irradiância obtidos no pátio, sendo que a primeira tem por base o ficheiro climático do EP e, a segunda, o ficheiro climático do IST. Para a hora genérica 15:00H, o gráfico de barras representa os valores experimentais e o gráfico de linhas representa os valores numéricos. Para efeitos da presente simulação, a hora genérica é avaliada em três horas parcelares distintas, considerando um intervalo de trinta minutos entre elas (ou seja, às 14:30H, 15:00H e 15:30H), tendo em conta que os valores recolhidos experimentalmente demoram em média uma hora a ser recolhidos. Da análise comparativa da Figura 7. e da Figura 7. conclui-se que a simulação com o ficheiro climático do IST produz os valores mais próximos dos experimentais.

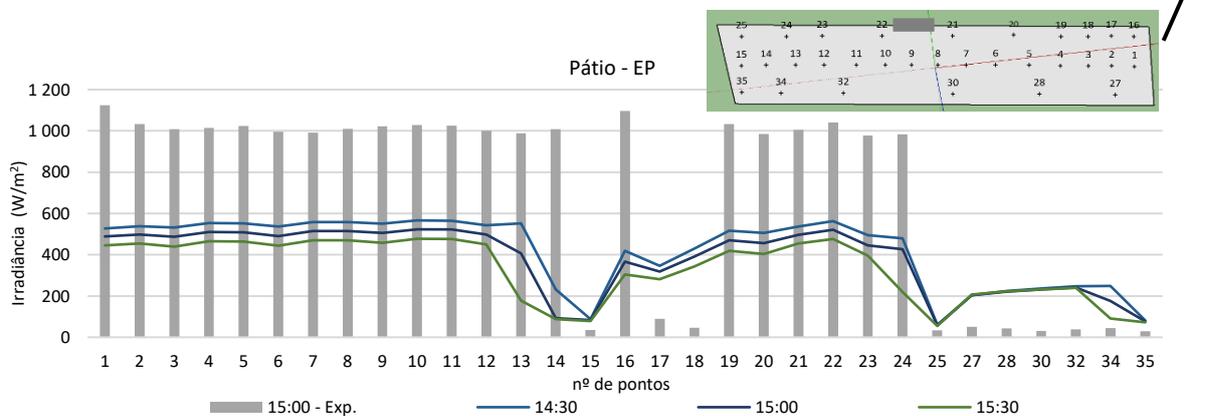


Figura 7.5 - Representação gráfica da irradiância no Pátio no solstício de verão às 15:00H, com o ficheiro climático do EP.

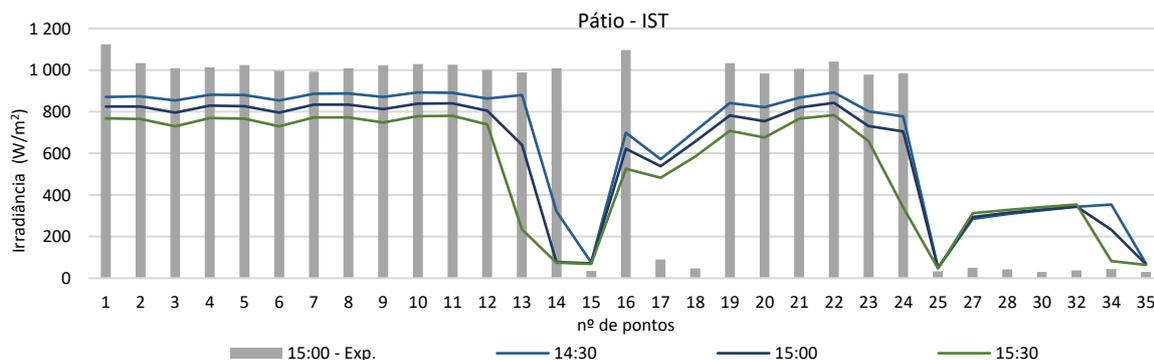


Figura 7.6 - Representação gráfica da irradiância no Pátio no solstício de verão às 15:00H, com o ficheiro climático do IST.

As representações gráficas expostas na Figura 7.5 representam a irradiância observada para cada ponto da fachada do Edifício 2 pelas 15:00 horas, em que: a) representa o primeiro andar utilizando o ficheiro climático do IST; b) o rés-do-chão utilizando o ficheiro climático do IST; c) o primeiro andar utilizando o ficheiro climático do EP; d) o rés-do-chão utilizando o ficheiro climático do EP. Os restantes edifícios e as restantes horas constam no Anexo A.

Observando agora os resultados obtidos para Edifício 2, para cada um dos ficheiros climáticos, constata-se que não é claro qual o ficheiro climático que melhor representa a situação real: para o rés-do-chão, o ficheiro climático EP apresentou melhores resultados; por outro lado, o ficheiro do IST é o que demonstra melhor desempenho no primeiro piso.

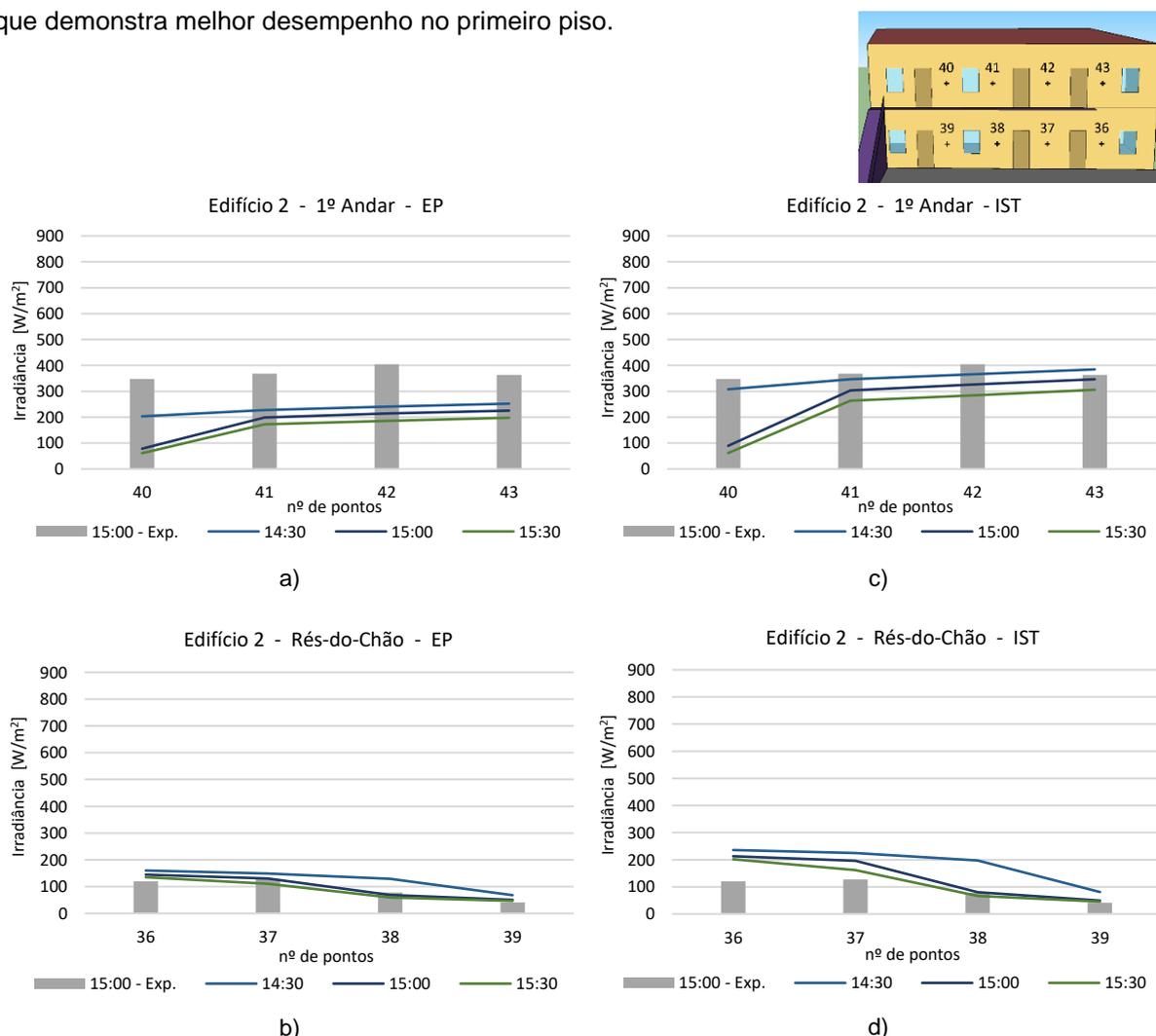


Figura 7.5 - Representações gráficas de irradiância no Edifício 2 para as 15:00H no solstício de verão: a) e b) simulação com o ficheiro climático do IST para o primeiro andar e rés-do-chão, respetivamente ; c) e d) simulação com o ficheiro climático do EP para o primeiro andar e rés-do-chão, respetivamente.

De modo a melhor compreender qual o ficheiro mais adequado para futuras simulações, a Tabela 7.3 resume, a partir de MBEn e de Cv(RMSE), a tendência do modelo em subestimar ou sobrestimar os valores calculados, e o erro absoluto associado a cada ficheiro, respetivamente. Na secção 7.3 são explicados os índices estatísticos utilizados para esta análise considerando todos os valores obtidos nas três campanhas que se encontram em anexo (Anexo A). Os resultados obtidos por MBEn com valor negativo indicam subestimação da simulação, enquanto que os resultados com valor positivo,

indicam sobrestimação da simulação. Através de Cv(RMSE), os valores assumem sempre carácter positivo, sendo que, quanto mais elevados, pior a aproximação ao real. Desta forma, verifica-se que o ficheiro climático IST tanto no equinócio como no solstício de verão, de um modo geral, apresenta erros inferiores aos erros das simulações com o ficheiro climático EP. Analisando por exemplo as 15:00H no solstício de verão, verifica-se um Cv(RMSE) de 50.00% e MBEn de -8.80% para o ficheiro do IST e para o ficheiro EP os erros são bastante superiores (Cv(RMSE) de 76.48% e MBEn de -41.07%). Conclui-se assim que a utilização do ficheiro climático do IST apresenta um melhor desempenho.

Tabela 7.3 - CV(RMSE) e MBEn para o ficheiro climático do IST e do EP para todas as campanhas.

	Equinócio de Primavera				Solstício de Verão				Solstício de Inverno			
	IST		EP		IST		EP		IST		EP	
	CV(RMSE)	MBEn	CV(RMSE)	MBEn	CV(RMSE)	MBEn	CV(RMSE)	MBEn	CV(RMSE)	MBEn	CV(RMSE)	MBEn
9h/9h30	58,38%	-8,43%	53,11%	2,31%	70,04%	29,55%	66,55%	17,66%	236,42%	-45,11%	236,40%	-44,95%
12h/12h30	58,64%	-4,08%	60,69%	-16,12%	45,92%	12,90%	48,81%	-1,69%	126,72%	-44,71%	126,94%	-45,83%
15h/15h30	66,65%	-35,36%	78,19%	-51,12%	50,00%	-8,80%	76,48%	-41,07%	45,64%	19,22%	47,02%	21,56%

### 7.1.3. Influência da semântica do objeto

O *plug-in Euclid* no *SketchUp* permite a definição semântica de quatro tipos de superfície dos objetos, concretamente: *Floor*, *Roof*, *Wall* e *Ceiling*.

Numa primeira análise, considerou-se a definição da superfície Pátio como do tipo *Floor*, cujos resultados constam da Figura 7.6. Como se pode verificar, os resultados obtidos com recurso à semântica *Floor*, são demasiado reduzidos para que seja evidente a sua visualização no gráfico.

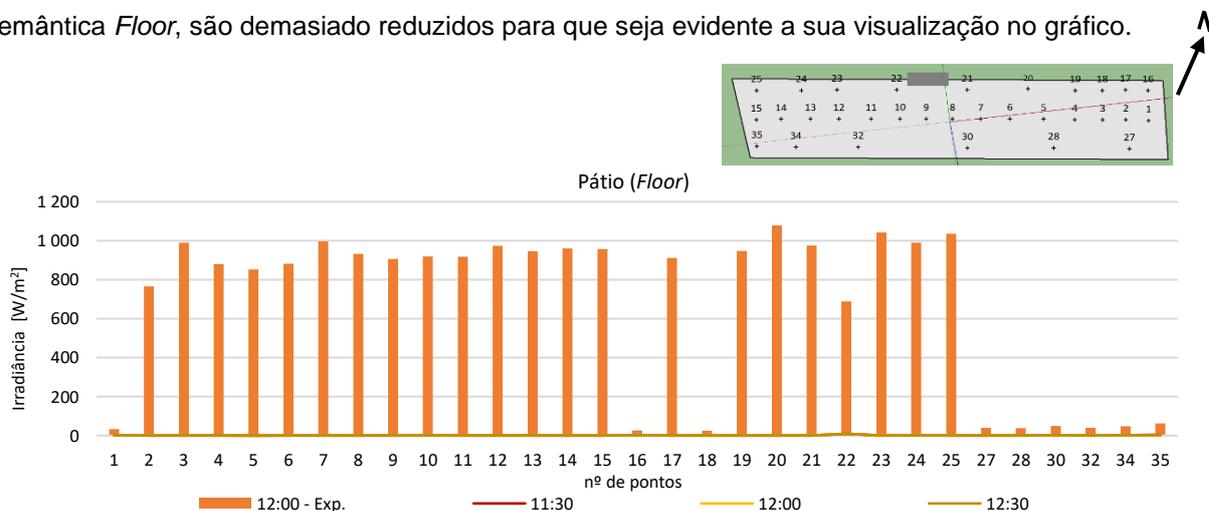


Figura 7.6 – Representação gráfica da irradiação no Pátio como tipo de superfície *Floor* às 12:00H, na campanha de equinócio.

Porém, note-se que a superfície *Floor*, por defeito, é indicada para zonas interiores, como por exemplo, uma laje de piso térreo que está em contacto com o solo. Desta forma, e considerando os resultados acima apresentados, deverá optar-se por definir esta superfície como sendo do tipo *Roof* ou *Wall*, uma vez que só assim será possível obter observações que considerem corretamente a radiação solar incidente no exterior. A Figura 7.7 e a Figura 7.8 apresentam os resultados obtidos considerando a superfície Pátio como sendo do tipo *Wall* e *Roof*, respetivamente.

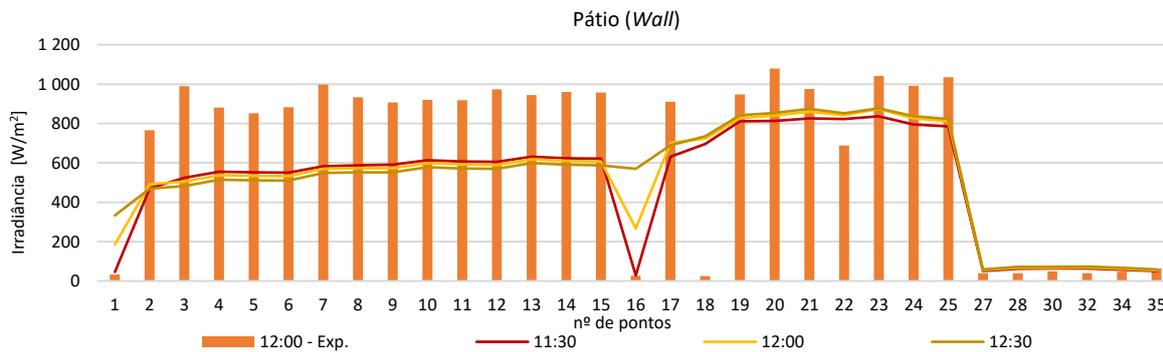
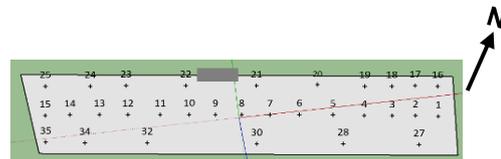


Figura 7.7 - Representação gráfica da irradiância no Pátio como tipo de superfície *Wall* às 12:00H, na campanha de equinócio.

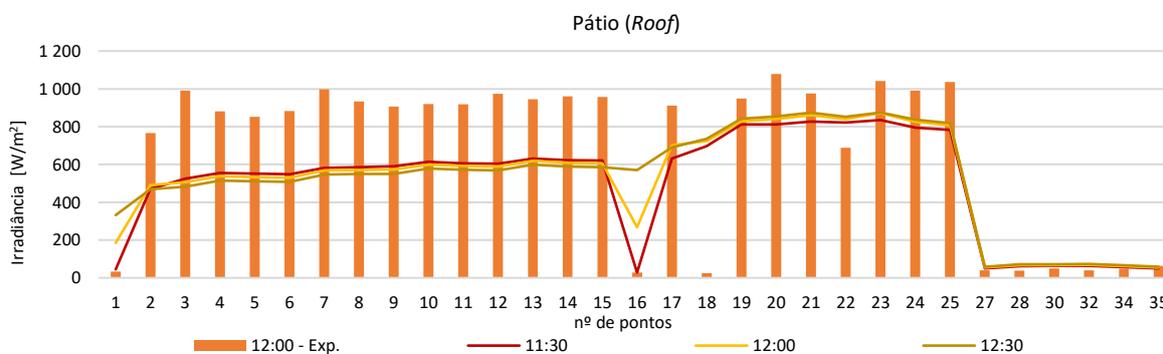


Figura 7.8 - Representação gráfica da irradiância obtida no Pátio como uma superfície do tipo *Roof* pelas 12:00H, no equinócio.

Apesar de a Figura 7.6, Figura 7.7 e Figura 7.8 - Representação gráfica da irradiância obtida no Pátio como uma superfície do tipo *Roof* pelas 12:00H, no equinócio apenas apresentarem os resultados obtidos no equinócio para a hora genérica 12:00H, não se evidenciam dissimilaridades entre as superfícies do tipo *Wall* e *Floor*. Os resultados obtidos para as restantes horas genéricas para esta mesma simulação (equinócio), que poderão ser consultados em maior detalhe no Anexo B permitem concluir que também não se evidenciam diferenças entre o tipo de superfície *Wall* e *Roof*. De igual forma, para as restantes campanhas, solstício de verão e solstício de inverno, os resultados são sobreponíveis.

Concluindo-se que o procedimento mais correto consiste em utilizar uma destas duas semânticas, optou-se pela semântica do tipo *Roof* nas futuras simulações, dado que, sendo uma superfície horizontal, será a melhor denominação a considerar.

#### 7.1.4. Influência do contexto urbano

De forma a avaliar o impacto que a definição do contexto urbano tem na análise do potencial solar e respetiva aproximação do modelo à realidade, para cada campanha, foi realizada uma simulação considerando: i) a Vila Luz de forma isolada – isto é, apenas o modelo base e os elementos verticais que circunscrevem o pátio, especificamente, as paredes dos edifícios adjacentes entre o Edifício 1 e 3 e o Edifício 1 e 2, representadas a roxo na Figura 7.9; e ii) a Vila Luz inserida no contexto urbano que

a envolve. Note-se que as características adotadas para os materiais presentes nos elementos da vila foram os mencionados no Capítulo 4.

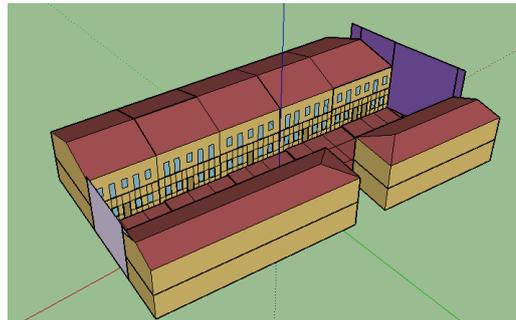


Figura 7.9 - Modelo apenas com os elementos laterais do Pátio

A Figura 7.10, a Figura 7.11 e a Figura 7.12 apresentam os valores de irradiância obtidos na fachada do Edifício 3 no solstício de inverno para as duas simulações mencionadas, para as 09:00H, as 12:00H e as 15:00H, respetivamente. Para cada figura: a) e b) correspondem à simulação para a vila isolada, sendo a) referente ao primeiro andar e b) rés-do-chão; c) e d) apresentam os valores de irradiância obtidos na simulação da vila inserida no contexto urbano envolvente em que c) é referente ao primeiro andar e b) ao rés-do-chão.

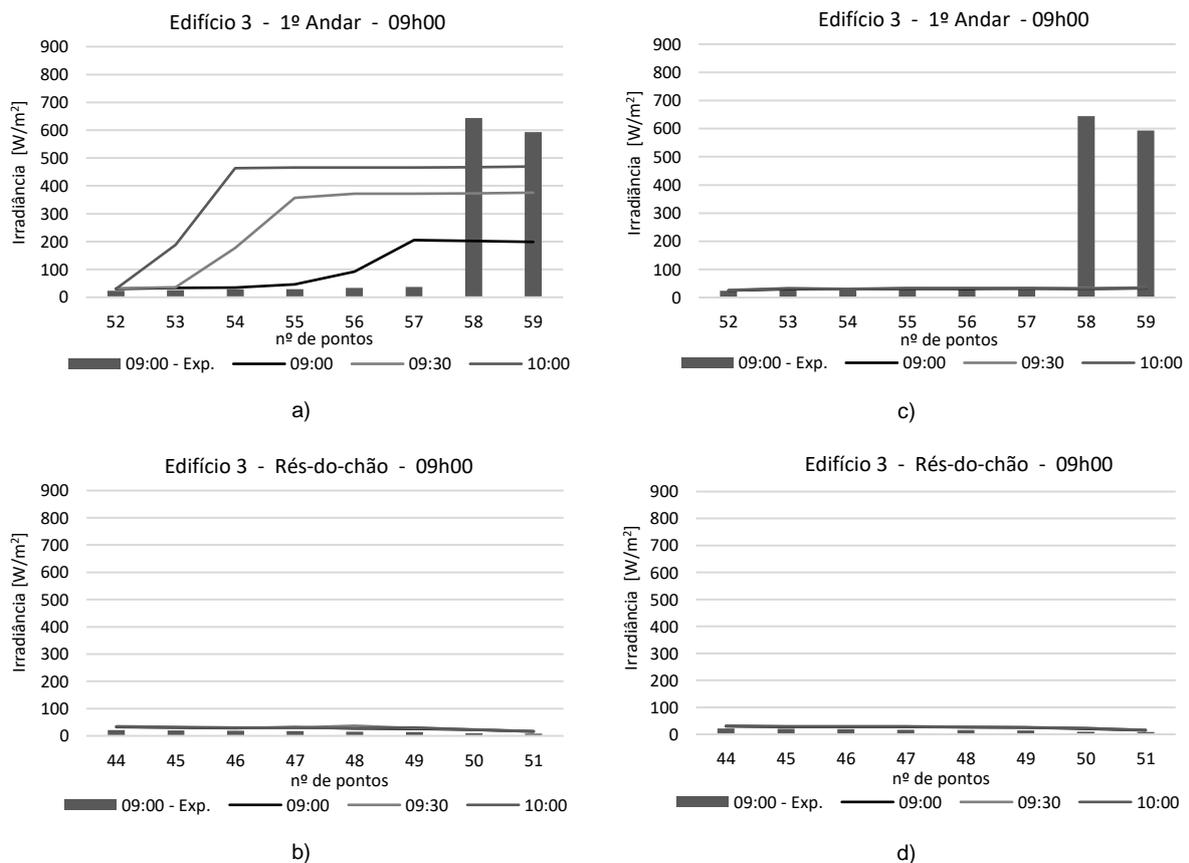
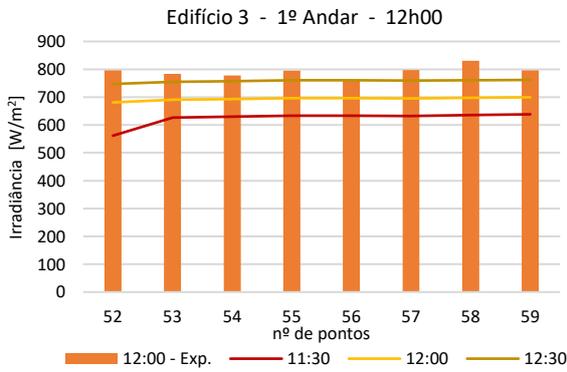
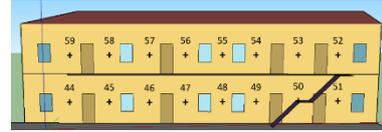
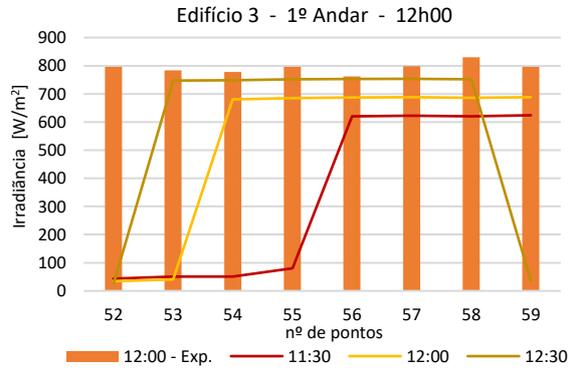


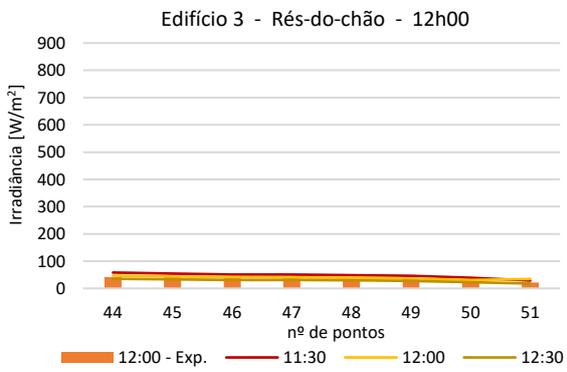
Figura 7.10 -Valores de irradiância obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 09:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão.



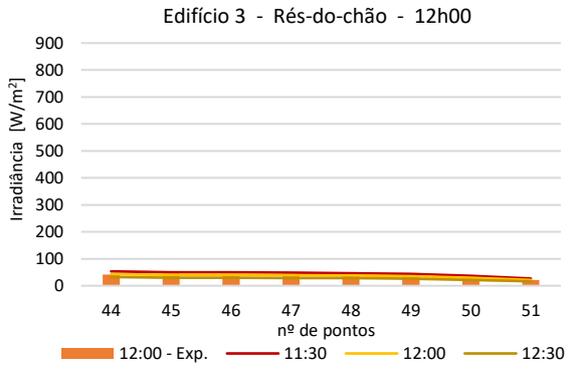
a)



c)

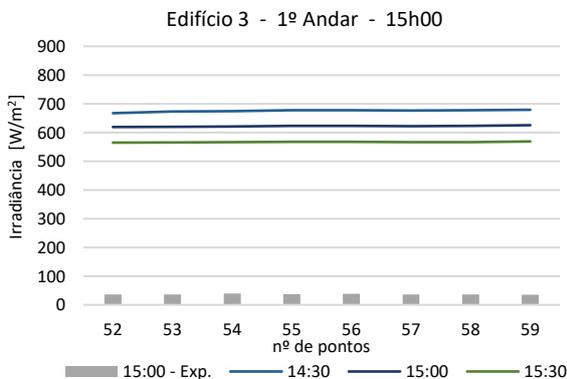


b)

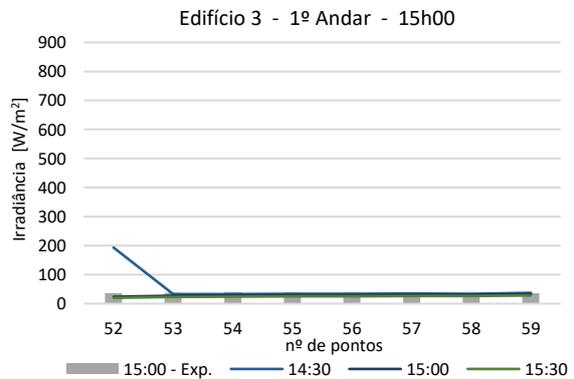


d)

Figura 7.11 – Valores de irradiância obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 12:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão.



a)



c)

Figura 7.12 – Valores de irradiância obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 15:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão.

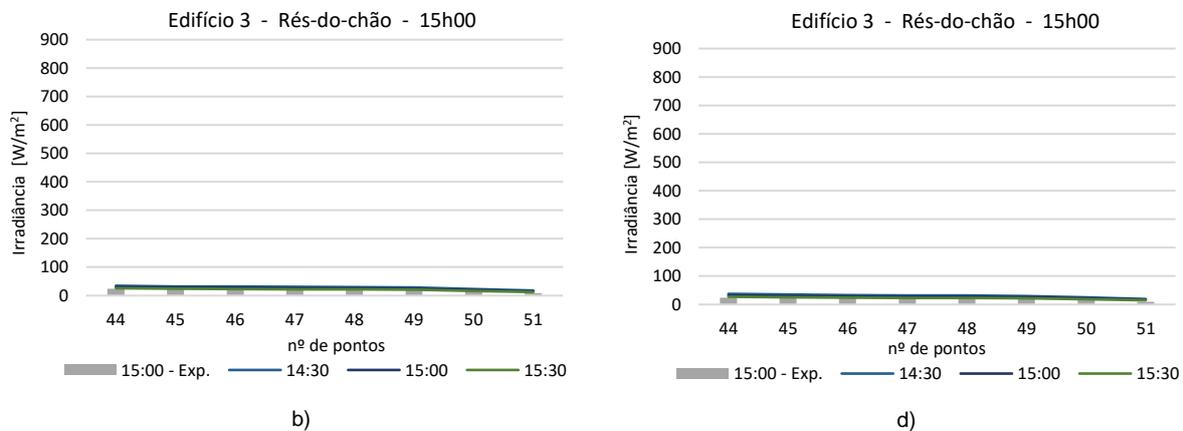
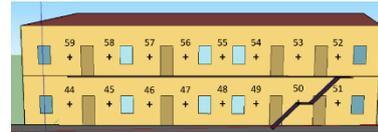


Figura 7.14 – (Continuação) Valores de irradiação obtidos no Edifício 3 no solstício de inverno pelas 15:00 horas em que: a) vila isolada, primeiro andar; b) vila isolada, rés-do-chão; c) vila inserida no contexto urbano, primeiro andar; e d) vila inserida no contexto urbano, rés-do-chão.

Nesta subsecção, a título de exemplo, apenas foi apresentado um edifício com vista à avaliação da definição da geometria envolvente, estando os restantes resultados representados no Anexo C. Pela análise da Figura 7.10, da Figura 7.11 e da Figura 7.12 conclui-se que, para o solstício de inverno, existem implicações relevantes inerentes à consideração dos edifícios vizinhos.

A maior diferença entre as simulações verifica-se às 15:00H, altura em que o Sol se encontra mais baixo e os edifícios vizinhos provocam maior sombreamento no primeiro andar. No entanto, quer tendo ou não em conta os edifícios envolventes verifica-se que os pisos inferiores se encontram sempre em sombra.

Já para as simulações efetuadas para o solstício de verão e equinócio, pelo contrário, a consideração do contexto envolvente não tem impacto nos resultados obtidos para a irradiação nas fachadas e no pátio. Isto deve-se ao facto de o Sol estar a uma altura superior por comparação ao solstício de inverno, e os edifícios vizinhos não criarem zonas de sombreamento para além das verificadas com a definição dos próprios edifícios constituintes da Vila. Os resultados que suportam esta conclusão encontram-se detalhados Anexo C.

### 7.1.5. Influência da geometria intrínseca ao próprio modelo

A orientação dos edifícios é determinante à geometria intrínseca do próprio modelo, dado que é a característica com maior importância para a determinação da quantidade de radiação solar que incide numa fachada. Como o Edifício 1 está virado a Norte nunca recebe radiação solar direta, pelo que se optou por apenas considerar o Edifício 2, virado a Sudoeste, para efeitos da análise deste fator.

Atente-se que a existência de varandas ou galerias neste tipo de edificações terá necessariamente impacto sobre as observações relativas ao rés-do-chão, razão pela qual se revelou necessário realizar

uma nova simulação sem a presença da varanda e, assim, avaliar a sua efetiva influência no edifício. Esta nova simulação foi realizada no solstício de verão, visto que é nesta altura que a varanda cria uma zona de maior sombreamento na fachada. Mantiveram-se constantes as características dos respetivos materiais e elementos construtivos, conforme descrito no Capítulo 4.

Nas representações gráficas, os valores representados como barras correspondem aos valores medidos experimentalmente, e os representados por linhas aos valores numéricos simulados. Cada figura encontra-se mapeada de a) a d), sendo que: a) e b) apresentam os resultados obtidos com varanda no primeiro andar e rés-do-chão, respetivamente; c) e d) apresentam os resultados obtidos sem varanda primeiro andar e rés-do-chão, respetivamente.

Considerando a posição relativa do sol às 09:00H, Figura 7.13, a existência da galeria no primeiro andar do Edifício 2 não revela implicações nos resultados obtidos. Porém, e de acordo com os resultados apresentados abaixo, Figura 7.14 e Figura 7.15, o mesmo não se verifica para as horas genéricas 12:00H e 15:00H, respetivamente.

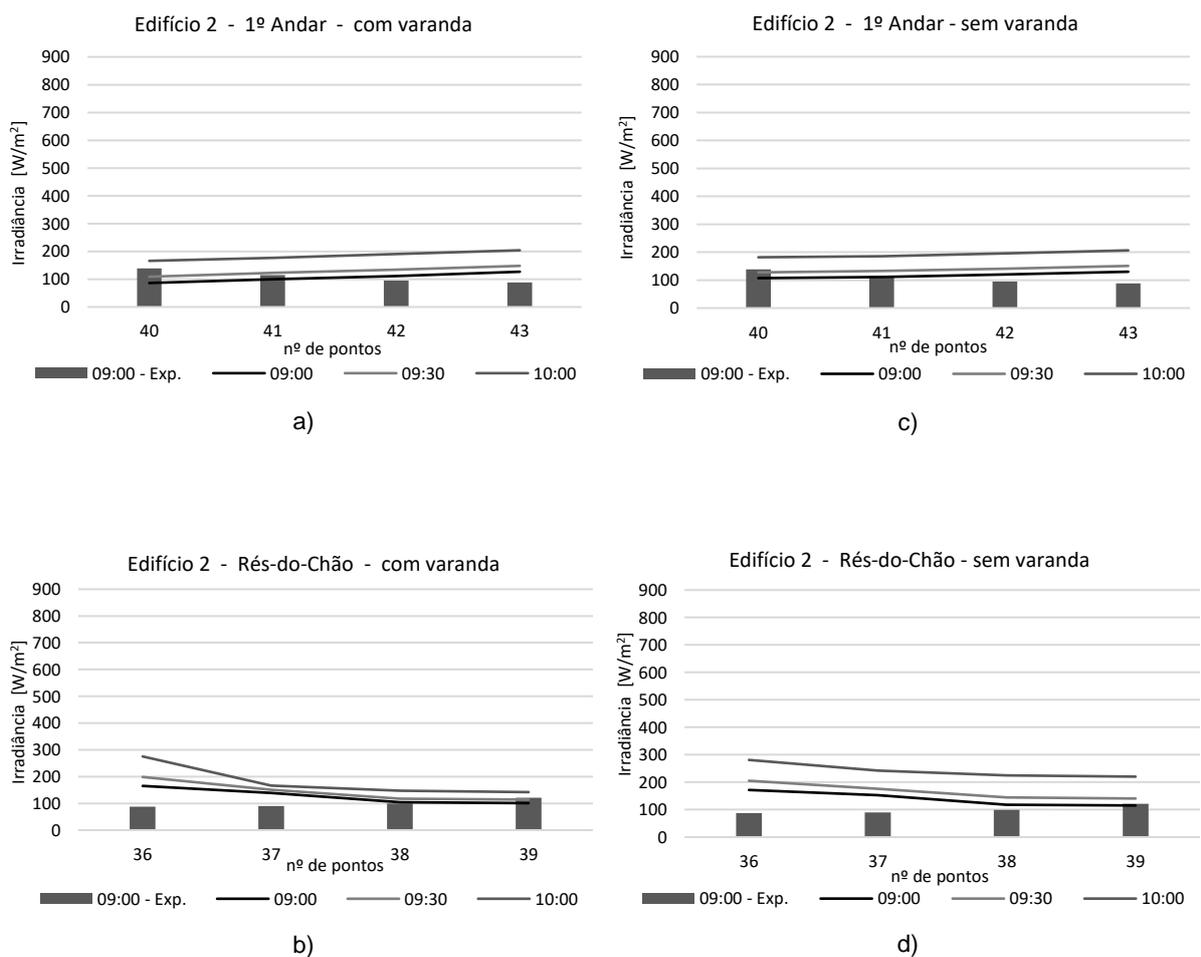
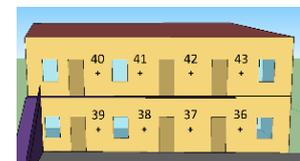
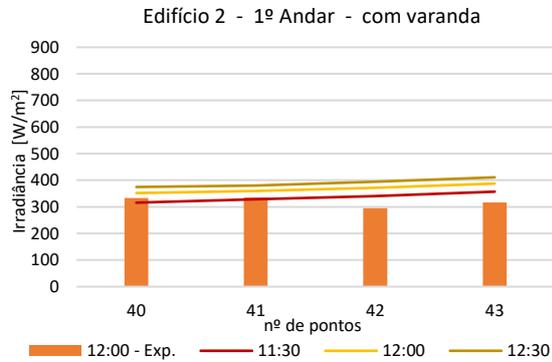
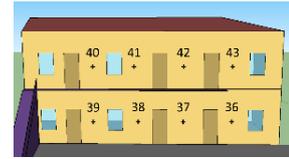
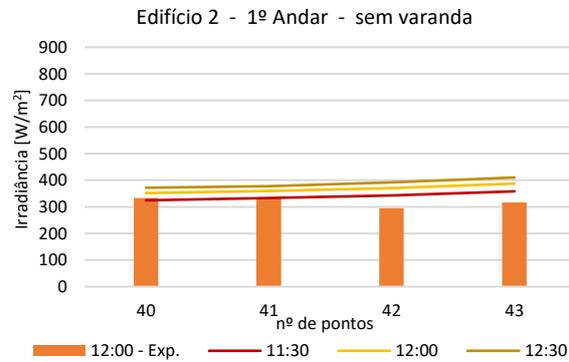


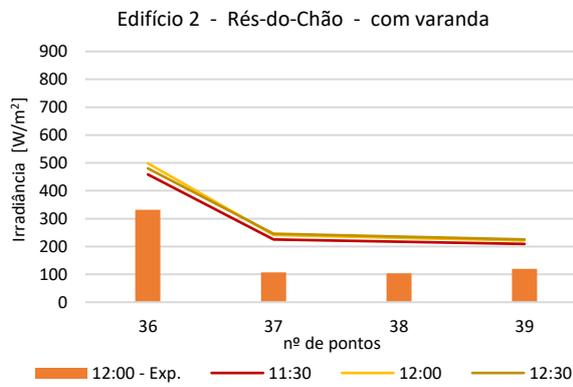
Figura 7.13 - Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 09:00 horas em que, com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão.



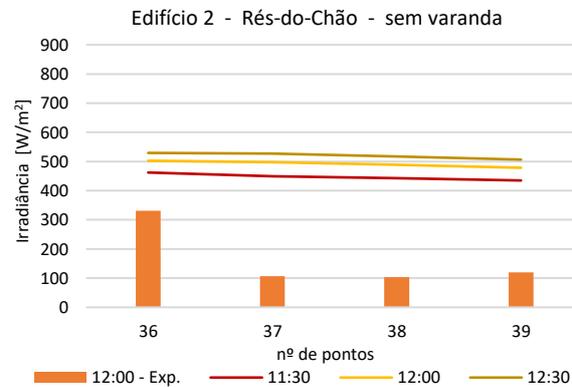
a)



c)

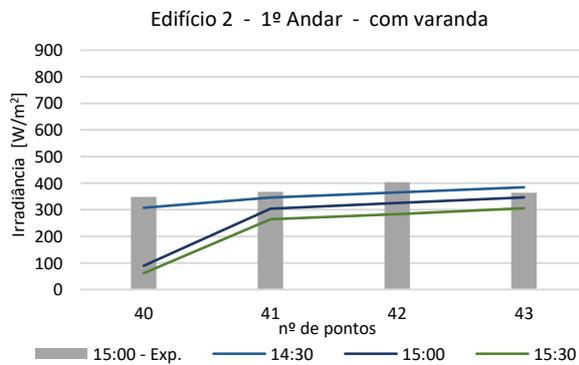


b)

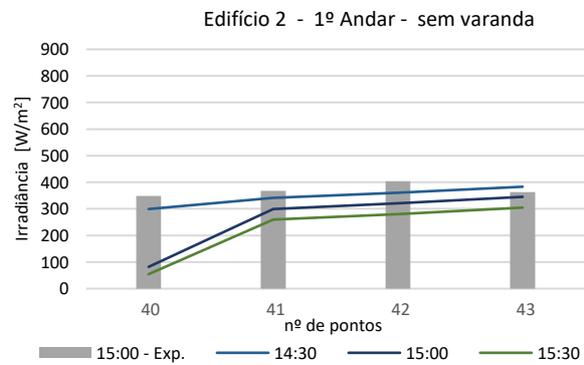


d)

Figura 7.14 - Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 12:00 horas em que: (i) com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; (ii) Sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão.



a)



c)

Figura 7.15 - Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 15:00 horas em que, com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão.

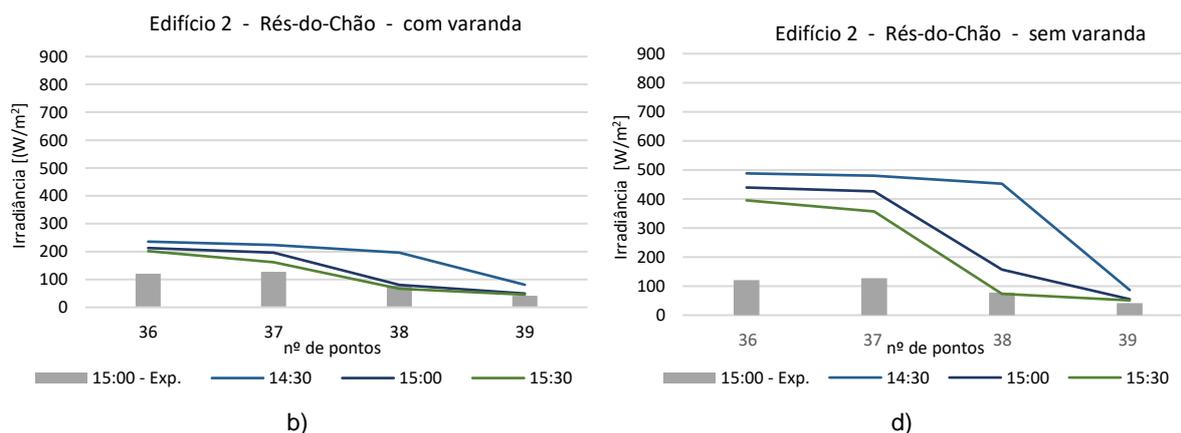


Figura 7.17 – (Continuação) Valores de irradiância obtidos no Edifício 2 no solstício de verão para as 15:00 horas em que, com varanda: a) primeiro andar e b) rés-do-chão; sem varanda: c) primeiro andar e d) rés-do-chão.

Conclui-se, assim, que a presença da varanda é determinante na radiação solar que incide num edifício, daí a importância e relevância da sua definição no modelo.

### 7.1.6. Influência da absorvância solar das superfícies

A absorvância solar das superfícies é um fator fundamental para a determinação da radiação solar incidente numa determinada superfície. O valor da radiação solar incidente e da radiação solar refletida nas diferentes superfícies do caso de estudo foram medidas para as três fases de campanha, com recurso ao piranómetro LICOR LI200R (LI-COR, 2020) Assim, com os resultados obtidos no local, é possível determinar o valor da absorvância solar de cada superfície. As zonas onde foram medidas as radiações incidente e a refletida são as seguintes: no Ponto 22 no pátio; na parede exterior amarela; e numa das portas exteriores vermelha. Os valores médios obtidos para refletância solar e para a absorvância solar são os apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Valores de refletância e absorvância solar medidos experimentalmente.

	Pátio	Paredes exteriores	Porta exterior
Refletância solar	0,24	0,47	0,25
Absorvância solar	0,76	0,53	0,75

De forma a melhor compreender a influência que a absorvância solar exerce sobre os resultados obtidos, realizou-se a simulação de equinócio para o Edifício 1. Nas figuras que se seguem, pode observar-se a comparação entre a simulação com as características dos materiais utilizando: a absorvância descrita pela literatura (Capítulo 4); e a absorvância medida no local. Para esta última, as características dos materiais presentes no grupo de campo de entrada *Surface Construction Elements* dentro do parâmetro *Material* foram corrigidas à luz dos valores de absorvância solar obtidos experimentalmente e representados na Tabela 7.4.

A Figura 7.16, a Figura 7.17 e a Figura 7.18 são referentes às horas genéricas 09H00, 12H00 e 15H00, respectivamente, em que: a) simulação com as absorptâncias solares determinadas pela literatura; b) simulação com as absorptâncias solares determinadas no local.

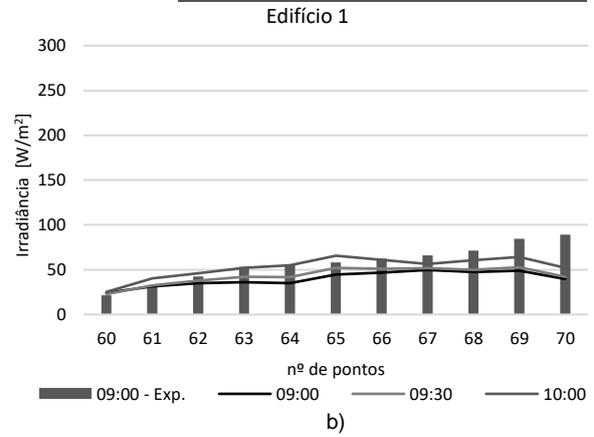
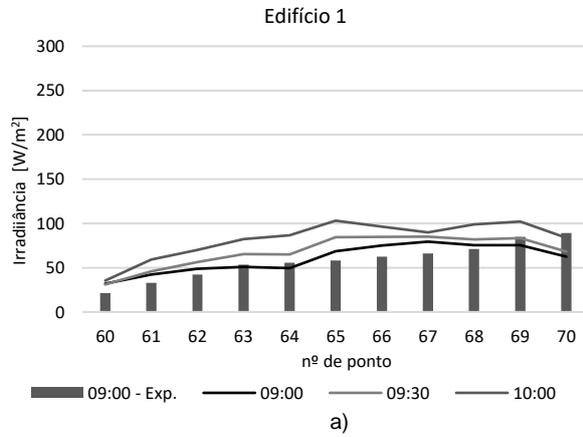


Figura 7.16 – Representação gráfica dos valores de irradiação obtidos pelas 09:00H no equinócio no Edifício 1 em que: a) simulação com a absorptância solar referente à literatura ; b) absorptância solar referente à medida no local.

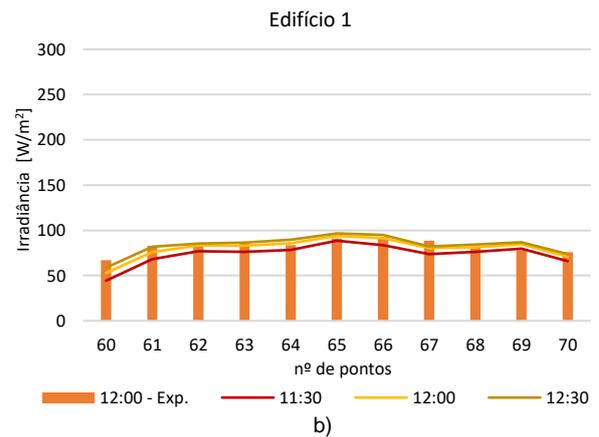
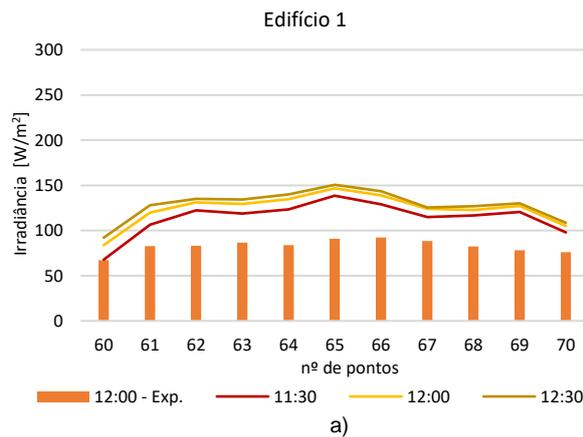


Figura 7.17 - Representação gráfica dos valores de irradiação obtidos pelas 12:00H no equinócio no Edifício 1 em que: a) simulação com a absorptância solar referente à literatura ; b) absorptância solar referente à medida no local.

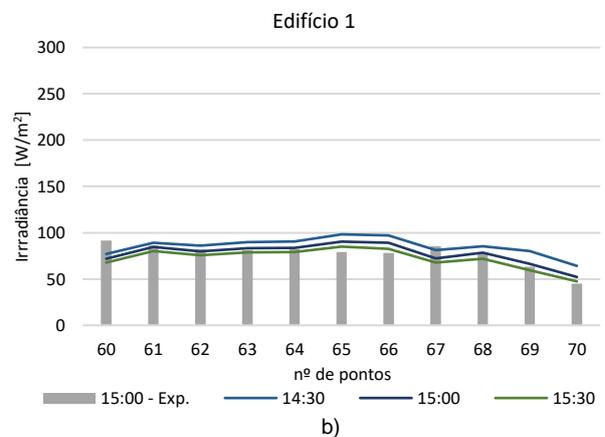
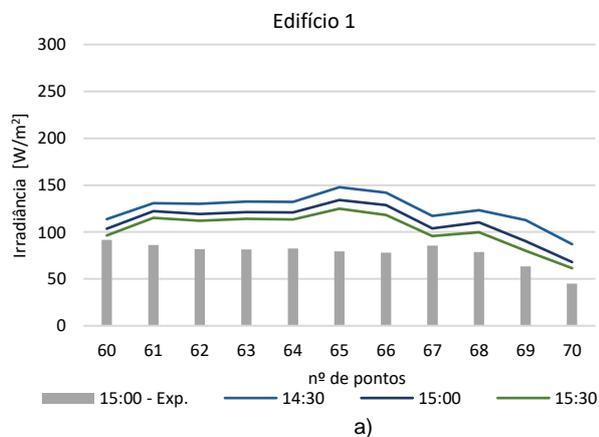


Figura 7.18 - Representação gráfica dos valores de irradiação obtidos pelas 15:00H no equinócio no Edifício 1 em que: a) simulação com a absorptância solar referente à literatura ; b) absorptância solar referente à medida no local.

Assim, conclui-se que ao usar a absorptância solar medida no local em vez da recomendada pela literatura, os resultados obtidos no Edifício 1 são mais favoráveis, pois apresentam uma maior aproximação aos resultados experimentais.

## **7.2. Análise final**

Decorrente da análise realizada no subcapítulo 7.1, onde foi feita a análise detalhada da influência que cada variável provoca nos resultados de irradiância obtidos nas fachadas e no pátio, onde foi possível concluir quais as variáveis que impactam nos resultados

Deste modo, estipulou-se que para a análise final serão considerados os seguintes fatores:

- o ficheiro climático do Instituto Superior Técnico (IST);
- geometria detalha dos edifícios constituintes da Vila (em particular, varandas);
- vila inserida no contexto urbano envolvente;
- a absorptância solar dos materiais medida no local.

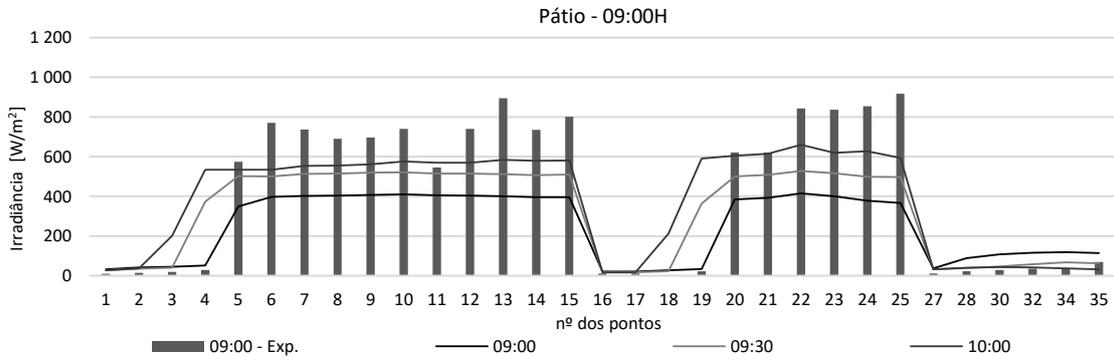
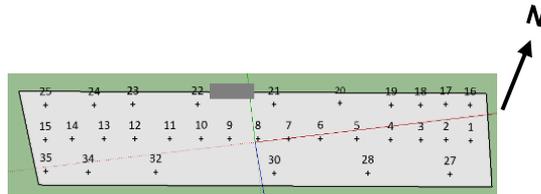
Nesta secção, em primeiro lugar, serão apresentados os resultados obtidos nas simulações nos vários elementos em estudo para as três fases de campanhas em estudo (equinócio, solstício de verão e de inverno). Os resultados serão apresentados em formato de gráfico e, para cada ponto identificado nas fachadas e no pátio (66 pontos), serão apresentados os valores observados experimentalmente e os correspondentes valores numéricos de forma a ser possível identificar as diferenças entre ambos.

A representação gráfica em barra corresponde aos valores recolhidos experimentalmente e a representação gráfica em linha corresponde aos valores obtidos na simulação numérica. No local, foram efetuadas medições para três horas genéricas distintas do dia (09H00, 12H00 e 15H00). No entanto, a recolha da totalidade dos 66 pontos observados demora cerca de uma hora para cada, pelo que se optou por, em cada hora genérica, considerar três horas parcelares distintas, com um intervalo de trinta minutos entre elas (ou seja, para as 15H00 – às 14:30H, 15:00H e 15:30H), permitindo observar as diferenças/tendências num mesmo período.

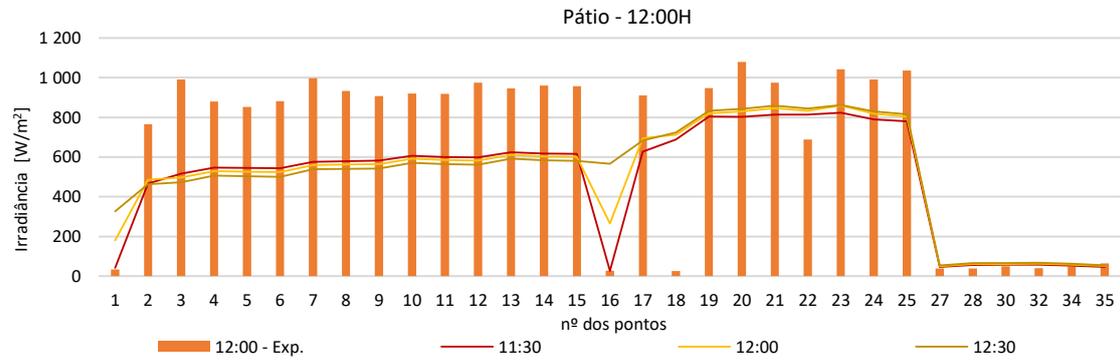
Em último lugar, nesta secção, será apresentada uma simulação realizada para quando o nível de detalhe é superior. Porém, essa análise será apenas realizada para o piso térreo do Edifício 2 para o equinócio.

### **7.2.1. Pátio**

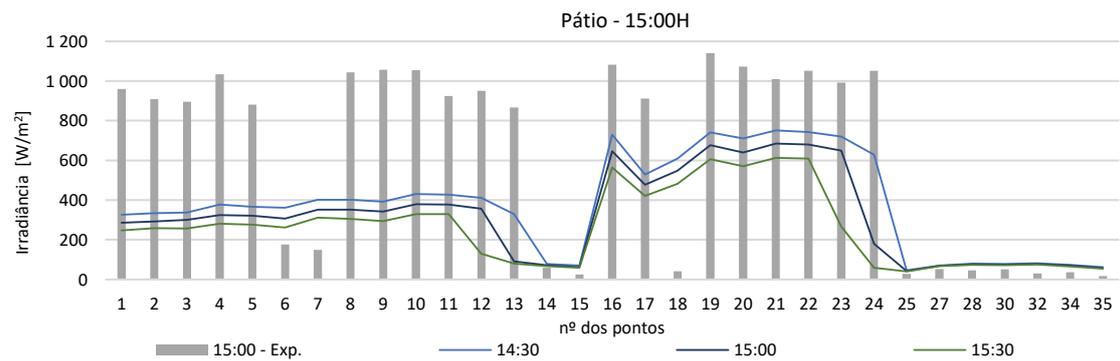
Nesta secção, estão representados os valores de irradiância obtidos para os vários pontos no pátio para equinócio, o solstício de verão e o solstício de inverno, respetivamente Figura 7.19, Figura 7.20 e Figura 7.21..



a)

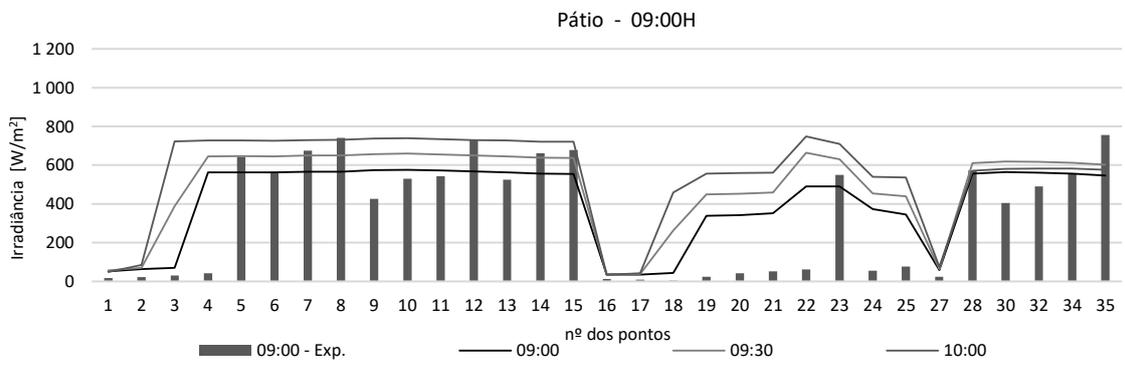
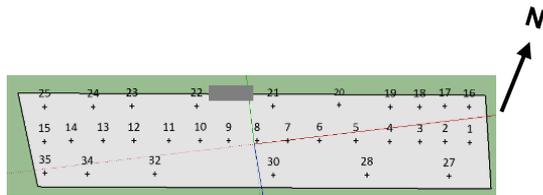


b)

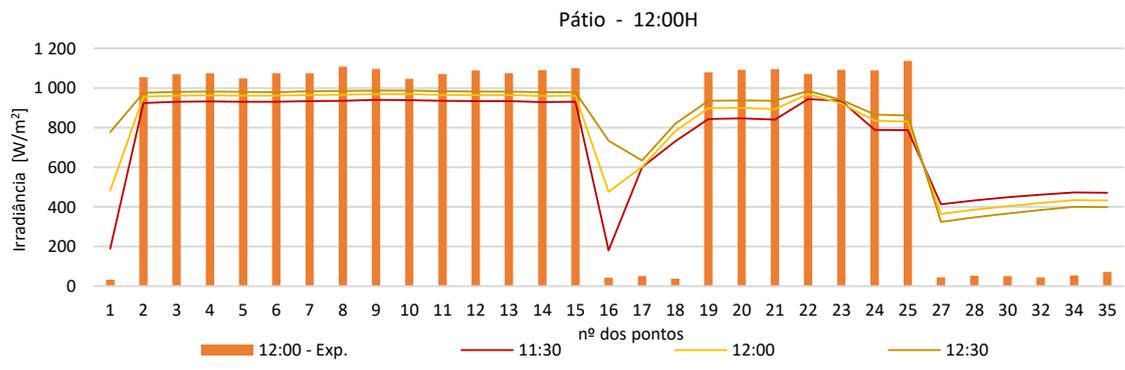


c)

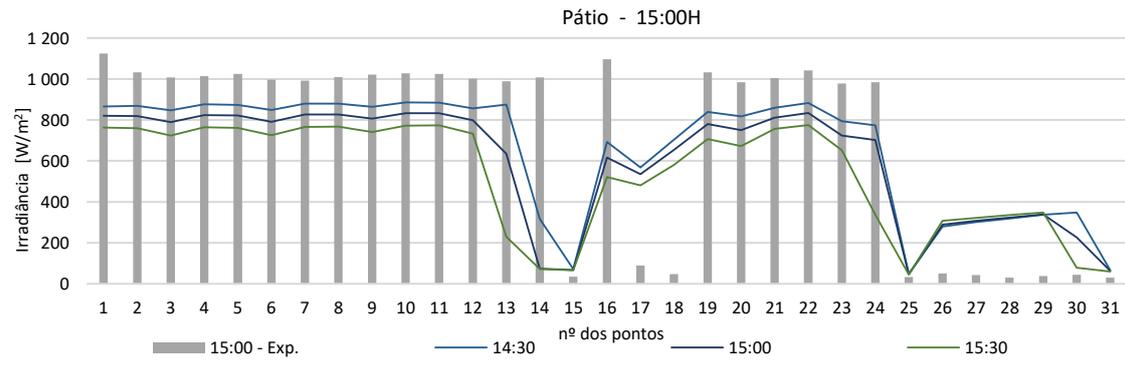
Figura 7.19 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados do Pátio na simulação de equinócio pelas:  
 a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H.



a)

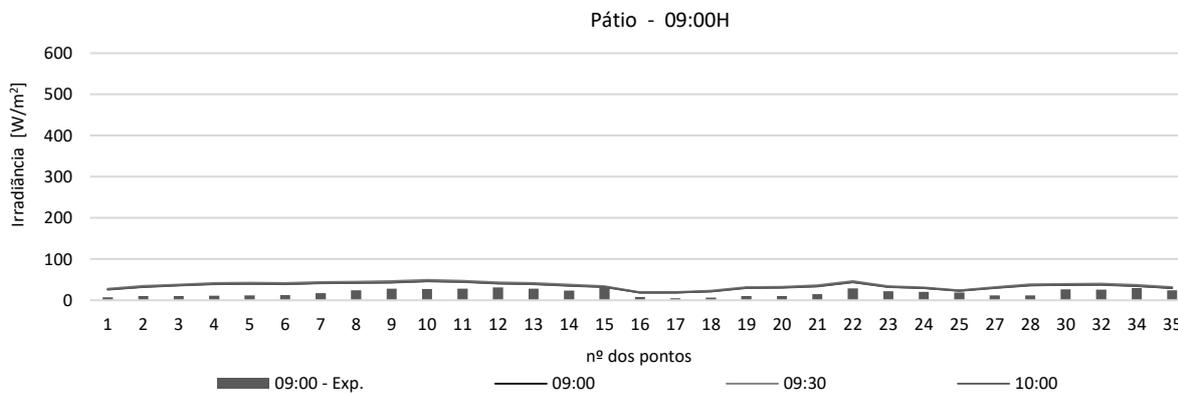
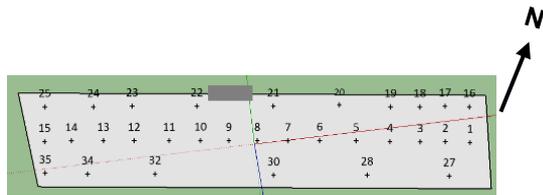


b)

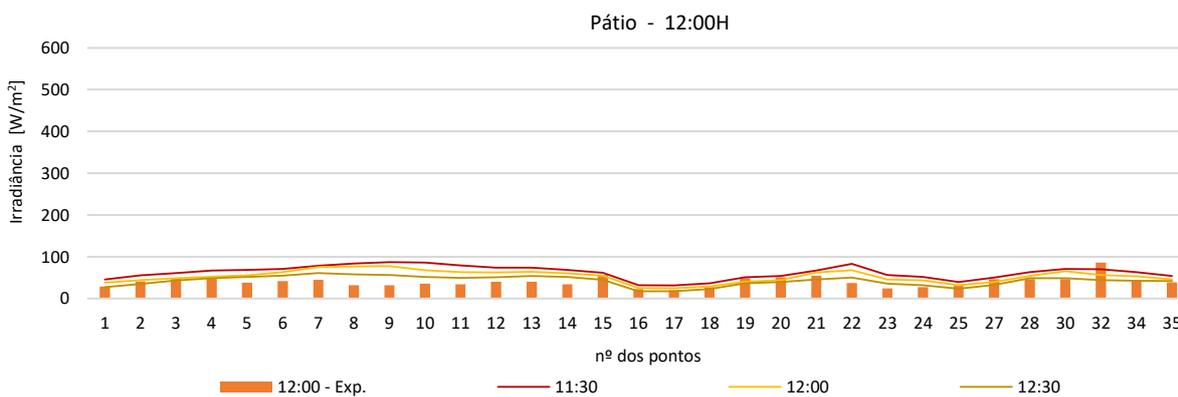


c)

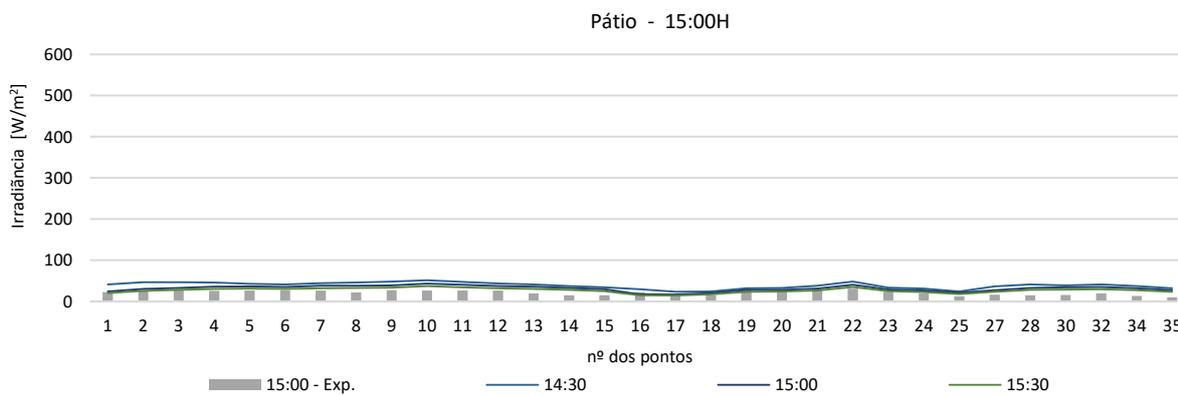
Figura 7.20 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados do Pátio na simulação de solstício de verão pelas: a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H.



a)



b)



c)

Figura 7.21 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados do Pátio na simulação de solstício de inverno pelas: a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H.

Começando por analisar os resultados obtidos nas três simulações do pátio, verifica-se que os valores simulados apresentam sempre grande divergência comparativamente aos valores experimentais (ver Figura 7.19, Figura 7.20 e Figura 7.21 ). Estas divergências poderão dever-se ao facto de:

- no local, os valores experimentais terem sido medidos a uma altura de 70 centímetros acima da cota do pavimento, resultando na necessidade de elevar o pátio para essa mesma cota na realização das simulações, por forma a aproximar o modelo à realidade;
- a radiação que é refletida na calçada do pátio não ter sido considerada nos cálculos de irradiância nas superfícies do pátio;
- o pátio ser um local onde os moradores estacionam os seus veículos cujas superfícies são bastante refletoras da radiação solar, contribuindo para um eventual aumento dos valores recolhidos no local;
- não poder ser descartada a hipótese de erros associados ao fator humano devido à importância que a estabilidade com que se fixa o sensor representa;
- a localização dos pontos ser uma variável de significativa importância para esta análise. Uma vez que localização do centro das superfícies aos pontos não assenta numa metodologia exata, mas sim numa tentativa no sentido de um centro de cada superfície corresponder às coordenadas de cada ponto.

Posto isto, observando os valores numéricos obtidos no pátio, verifica-se que no equinócio (Figura 7.19) há maior discrepância entre os valores experimentais comparativamente aos valores observados no solstício de verão (Figura 7.20) e no solstício de inverno (Figura 7.21).

No equinócio às 09:00H, os valores experimentais que se encontram expostos diretamente à radiação solar rodam os  $600\text{W/m}^2$ , sendo, portanto, similares aos valores recolhidos durante a campanha para os pontos 5, 11, 20 e 21. Assim como, os pontos que se encontram sombreados durante a campanha experimental. Não obstante, os restantes pontos observados durante a campanha experimental de equinócio, apresentam valores de irradiância superiores aos valores numéricos, estas diferenças podem ser explicadas pelas razões enumeradas acima. Tomando agora especial atenção para as 12:00H e para as 15:00H, respetivamente, Figura 7.19b) e Figura 7.19c), verifica-se que os pontos localizados no eixo central do pátio (1 ao 15) apresentam valores numéricos significativamente inferiores aos experimentais. No entanto, durante a realização da campanha de equinócio constatou-se que os pontos localizados junto ao Edifício 1 (pontos: 27, 28, 30, 32, 34 e 35), nunca recebiam radiação solar direta, tal como foi verificado aquando da realização da simulação.

Observando os resultados de solstício de verão para a hora genérica 09:00H, Figura 7.20.a), verifica-se no eixo central do pátio (ponto 1 ao ponto 15) e junto ao Edifício 1 (ponto 27 ao ponto 35) aos valores numéricos acompanham os valores experimentais. Todavia, verifica-se uma grande disparidade nos valores dos pontos 19, 20, 21, 22, 24 e 25, na campanha experimental estes pontos encontram-se sombreados e, na simulação, com exposição direta do Sol. Observando agora as 12:00H e as 15:00H, pode-se afirmar que os valores obtidos na simulação não são muito díspares dos valores

recolhidos no local (nomeadamente na zona central e na zona junto aos Edifícios 2 e 3), exceto nos pontos localizados junto ao Edifício 1, em que a simulação sobrestima os valores de irradiância.

Note que, durante a realização da campanha de solstício de verão, verificaram-se valores muito baixos de irradiância, para as 12:00H e para as 15:00H, em pontos específicos, nomeadamente: no ponto 17 e no 18 (localizados por debaixo das escadas no Edifício 3); e no 25 (por debaixo das escadas do Edifício 2). Uma vez que se tratam de umas zonas com características mais atípicas, as simplificações adotadas no modelo podem condicionar os resultados nessas zonas para além das razões já mencionadas anteriormente.

Por último, analisando os resultados da simulação de solstício de inverno, Figura 7.21, aparentemente apresentam-se resultados semelhantes às três observações feitas durante a campanha experimental (9:00H, 12:00H e 15:00H), isto porque, o pátio está sempre à sombra nesta fase do ano.

## 7.2.2. Edifício 1

Nesta secção, estão representados os valores de irradiância obtidos na simulação de equinócio, de solstício de verão e de solstício de inverno, para os vários pontos do Edifício 1, respetivamente Figura 7.17, Figura 7.22 e Figura 7.23. Tal como acontece nas figuras representadas anteriormente, as representações em formato de barra correspondem aos valores medidos no local e as representações em formato de linha correspondem aos valores obtidos nas simulações.

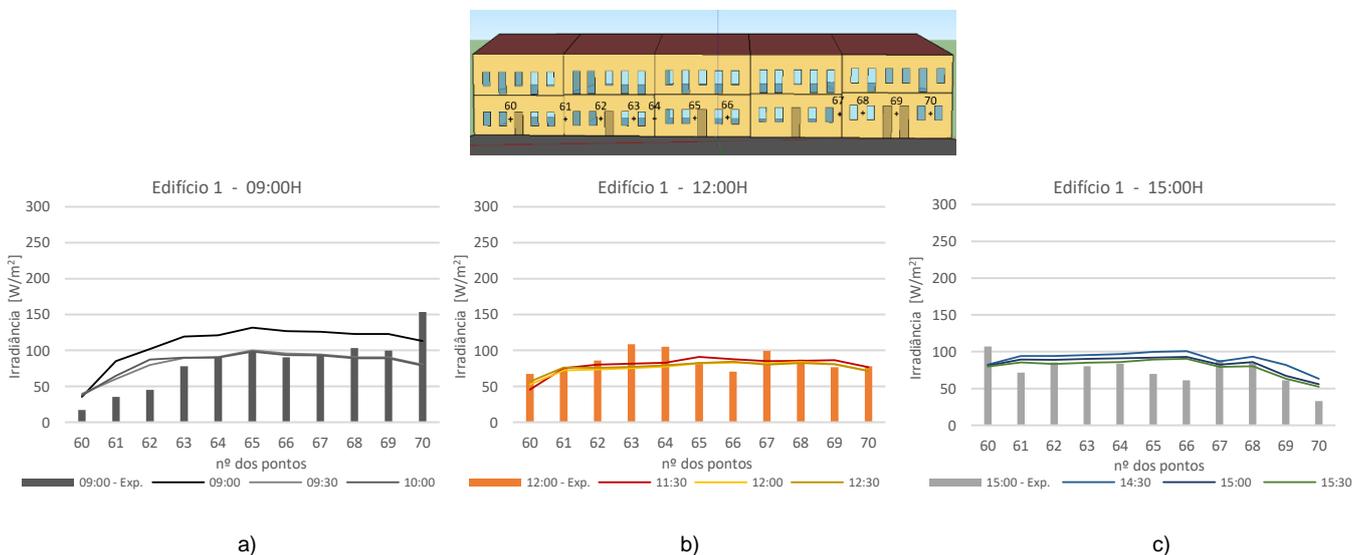


Figura 7.22 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados no Edifício 1 na simulação de solstício de verão pelas: a) 09:00H ; b) 12:00H; c) 15:00H.

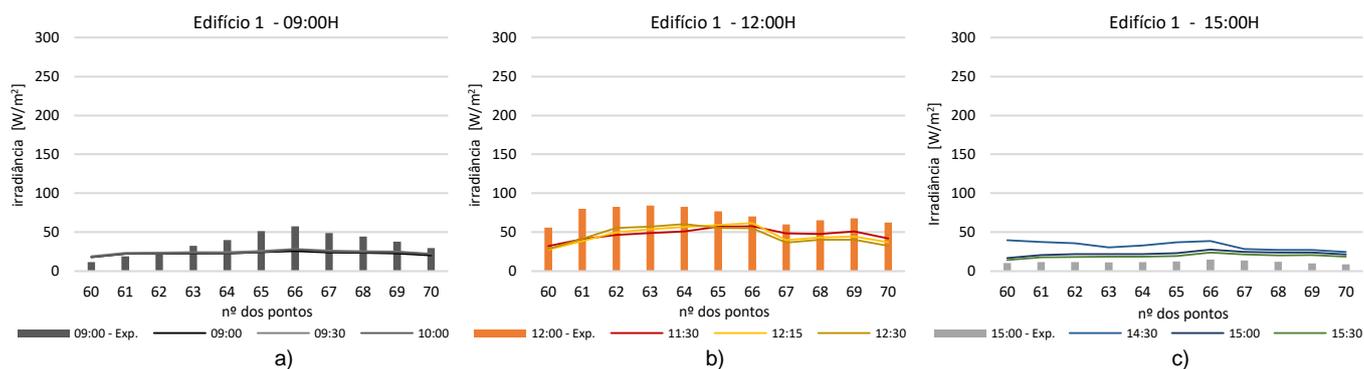


Figura 7.23 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados no Edifício 1 na simulação de solstício de inverno pelas: a) 09:00H; b) 12:00H; c) 15:00H.

Os resultados obtidos na simulação de equinócio no Edifício 1 foram apresentados na secção 7.1.6, Figura 7.17, de modo a melhor compreender a influência que as propriedades óticas dos materiais têm na obtenção de resultados. Por essa razão, não estão representados nesta secção de forma a não existir repetição de resultados.

De um modo geral, pela análise da Figura 7.19, da Figura 7.22 e da Figura 7.23, pode concluir-se que, o modelo apresenta um bom desempenho relativamente aos valores obtidos no Edifício 1 face aos restantes edifícios independentemente do período do ano que se está a analisar. Isto porque, a fachada está virada a Norte e nunca dispõe de radiação solar direta, apenas radiação solar difusa e radiação refletida proveniente do pátio e das fachadas dos Edifícios 2 e 3.

### 7.2.3. Edifício 2

Seguidamente, serão apresentados os valores de irradiância resultantes das simulações de equinócio (Figura 7.24), de solstício de verão (Figura 7.25) e de solstício de inverno (Figura 7.26) para o Edifício 2, onde é possível comparar com os resultados obtidos experimentalmente.

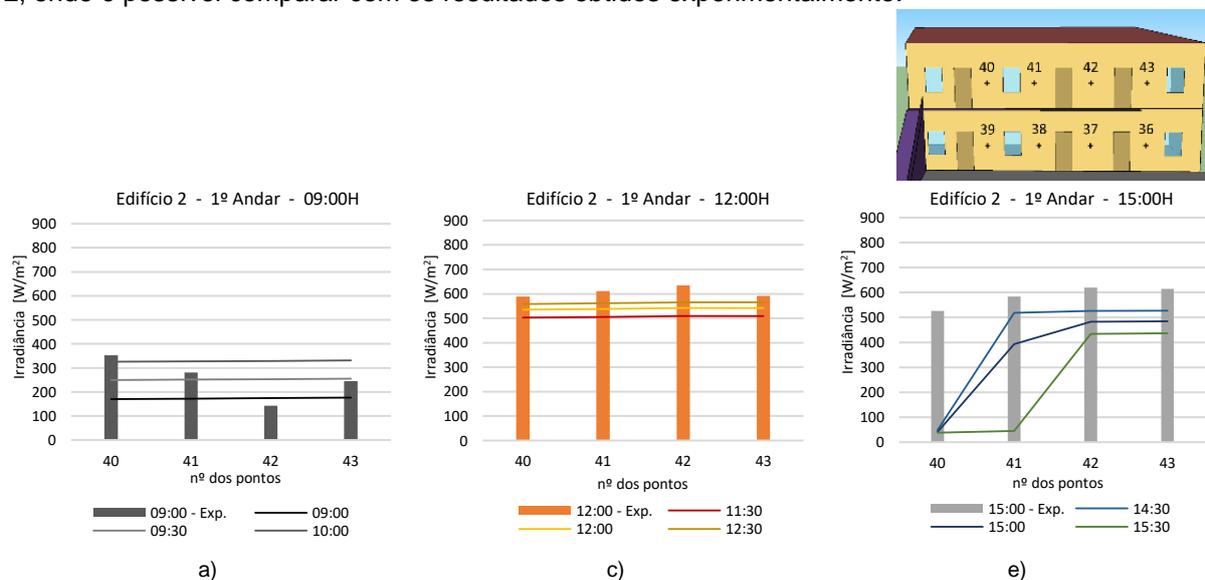


Figura 7.24 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de equinócio pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.

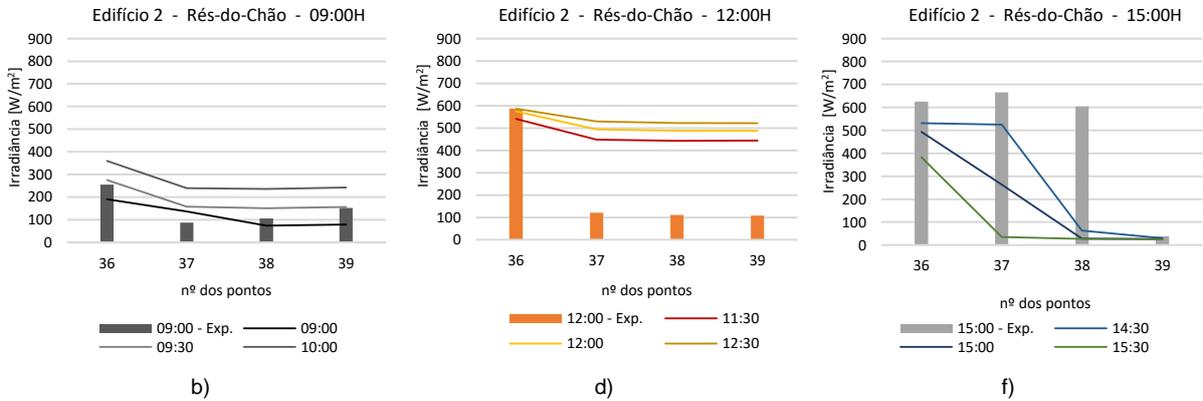
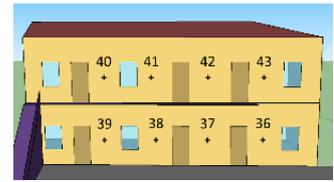


Figura 7.26 (Continuação) - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de equinócio pelas: a) e b) 09:00H ; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.

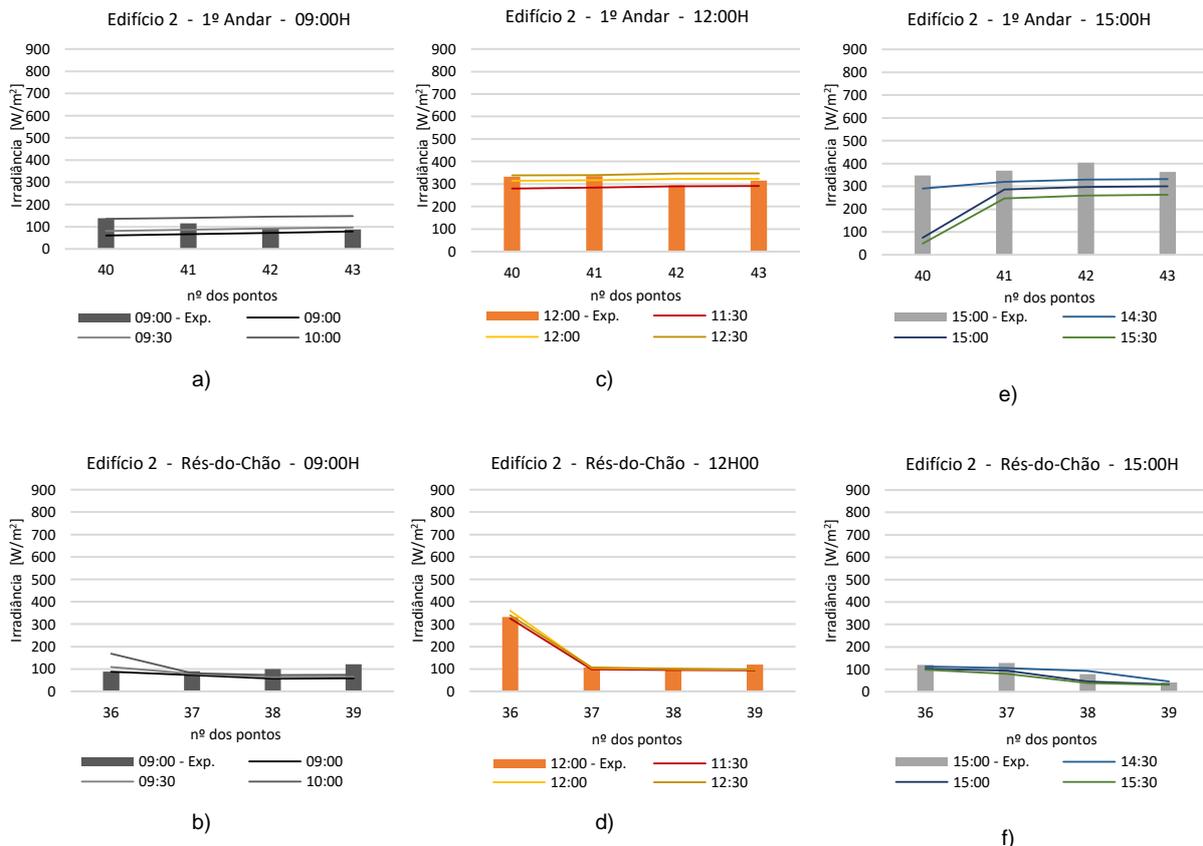


Figura 7.25 - Representação gráfica da irradiância nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de solstício de verão pelas: a) e b) 09:00H ; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.

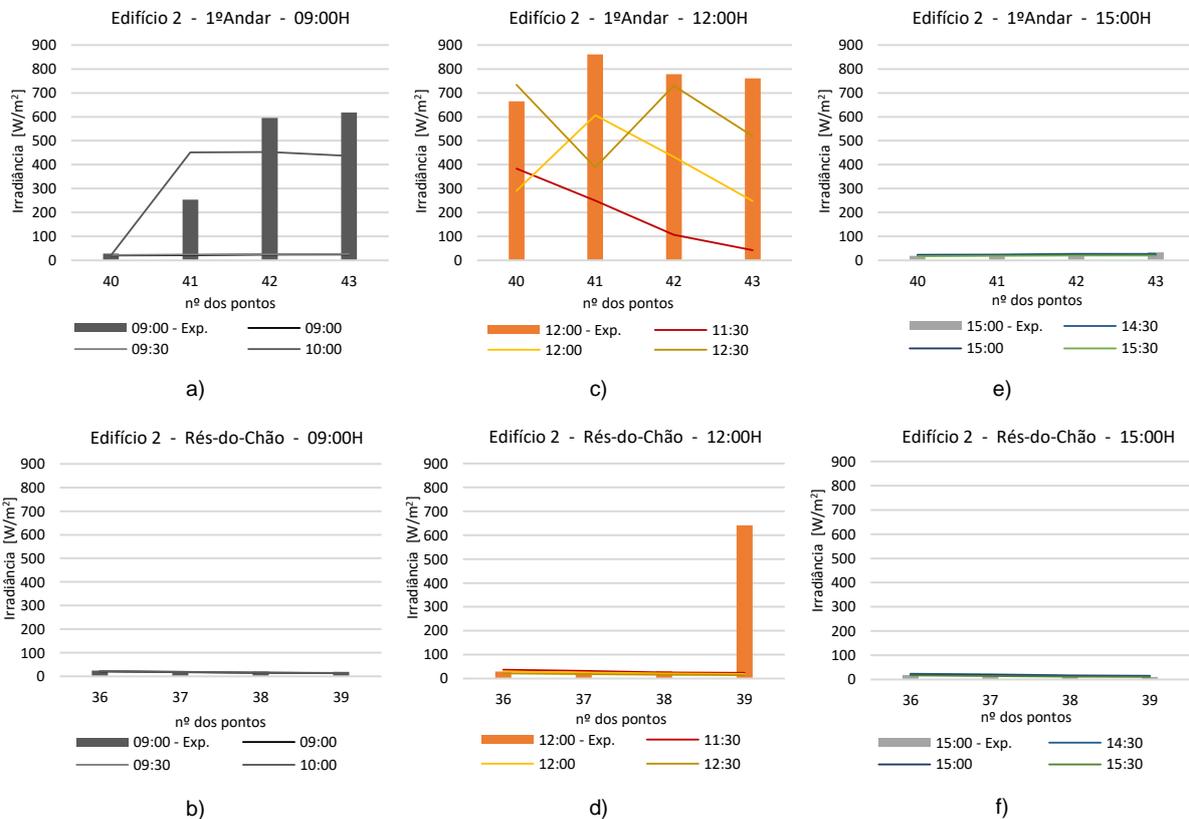
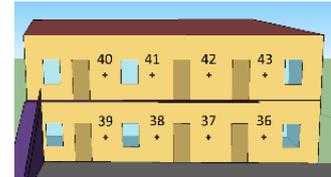


Figura 7.26 - Representação gráfica da irradiação nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 2 na simulação de solstício de inverno pelas: a) e b) 09:00H ; c) e d) 12:00H ; e) e f) 15:00H.

Começando a análise do Edifício 2 pelo equinócio, Figura 7.24, é possível observar diferenças nos valores de irradiação obtidos na simulação das 09:00H e das 10:00H e constatar como estes resultados variam entre os dois pisos (ver Figura 7.24a) e b)). Esta diferença pode ser explicada pelo tempo de recolha dos valores de irradiação nos pontos, e eventualmente, pelo início da recolha dos valores dos 66 pontos ter começado por outro edifício. Tomando agora especial atenção para as 12:00H, os valores numéricos são semelhantes aos registados experimentalmente para o rés-do-chão contudo, comparando os resultados apresentados para o 1º andar, verifica-se uma grande disparidade entre os valores numéricos e os experimentais. Esta diferença pode ser explicada pelo facto de, no *Sketchup*, se ter dividido a fachada em painéis de 1.65x1.00m<sup>2</sup>, apresentando assim uma área significativamente grande em relação ao ponto para o qual foi medido a irradiação no local. Além disso, o Sol no equinócio apresenta uma trajetória com altura intermédia e o grau de detalhe das fachadas neste período pode ser determinante para a fiabilidade dos resultados. Por fim, analisando as 15:00H (Figura 7.24.c)), verificam-se algumas diferenças entre os valores simulados e os valores

experimentais, nomeadamente no ponto 40, 39 e 38. Com a simulação verifica-se sombreamento causado pelos edifícios vizinhos do lado esquerdo (de frente para o Edifício 2), essa diferença pode ser explicada pela definição simplificada no desenho dos edifícios circundantes (em blocos). Adicionalmente, as diferenças podem também estar associadas ao facto de a divisão da fachada apresentar um grau de detalhe insuficiente. Deste modo, por forma a melhor compreender a razão das diferenças apresentadas nos valores de irradiância no Edifício 2 no equinócio, na secção 7.2.6 realizou-se uma simulação com painéis de fachada de menores dimensões.

Em seguida, analisando a simulação realizada no solstício de verão, os valores obtidos no Edifício 2 são muito semelhantes aos valores obtidos experimentalmente (Figura 7.25). Como é possível constatar na simulação das 12:00H os valores numéricos são congêneres aos valores experimentais, isto porque, a altura relativa do Sol no solstício de verão encontra-se na sua posição máxima e o sombreamento causado pela varanda torna-se evidente. Por esta razão é que a presença de palas nas fachadas oferece benefícios energéticos no verão. Pode concluir-se, de um modo geral, que o modelo de simulação apresenta um bom desempenho no solstício de verão para todas as horas avaliadas.

Atendendo à simulação de solstício de inverno, na hora genérica 09:00H (Figura 7.26a)), verifica-se que as linhas representativas das horas simuladas 09:00H e 09:30H identificam que o 1.º andar se encontra à sombra, contrariamente ao que se sucedeu durante a campanha. No entanto, pelas 10:00H os pontos 41, 42 e 43 já apresentam radiação solar incidente, tal como na campanha experimental. Observando as 15:00H (Figura 7.26.e) e d)), verifica-se que a simulação se aproxima da realidade, dado que nesta hora do dia o Sol encontra-se por detrás dos edifícios vizinhos. Por último, no que respeita à simulação de solstício de inverno, conclui-se que os valores numéricos correspondentes às 09:00H e às 12:00H, apresentam grande discrepância em relação aos valores experimentais, remetendo novamente para os seguintes factos: i) a altura a que o Sol nesta época do ano ser baixa; e ii) a simplificação adotada na modelação dos edifícios circundantes.

#### **7.2.4. Edifício 3**

Nesta secção estão representados os valores de irradiância obtidos para os vários pontos do identificados do Edifício 3 para o equinócio, o solstício de verão e o solstício de inverno, respetivamente Figura 7.27, Figura 7.28 e Figura 7.29.

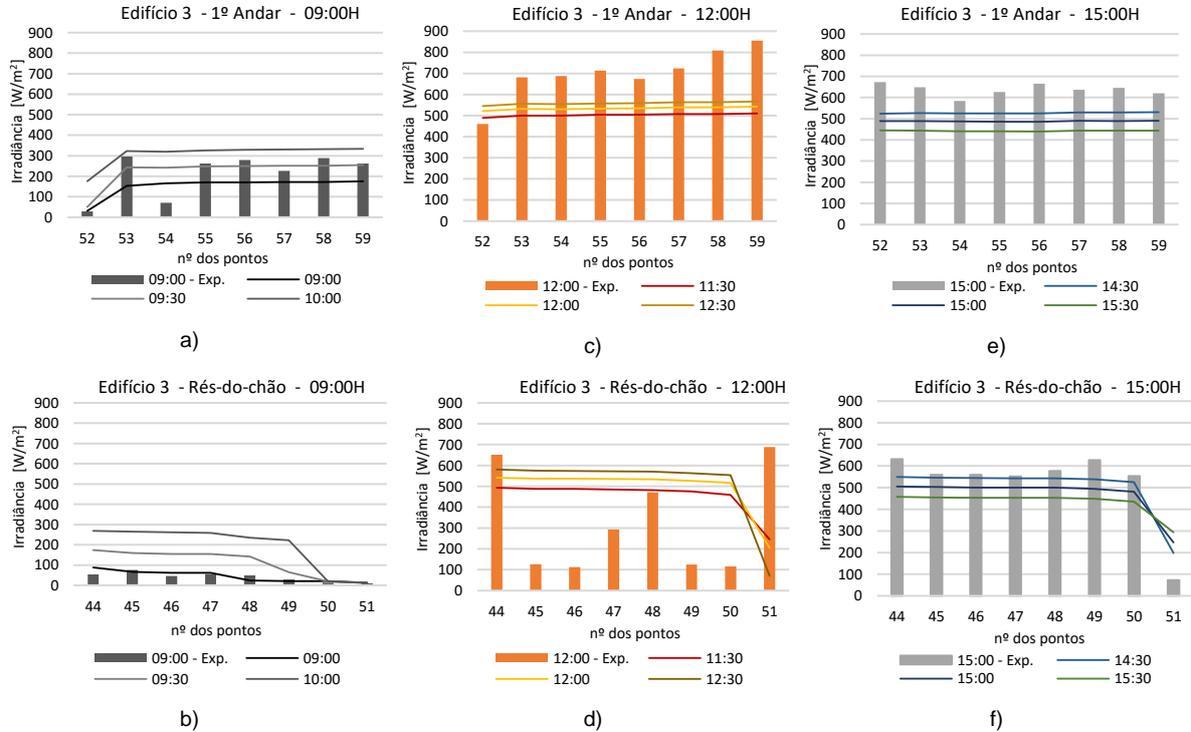
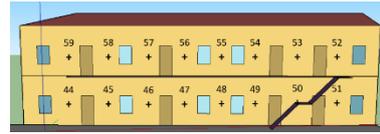


Figura 7.27 - Representação gráfica da irradiação nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de equinócio pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H

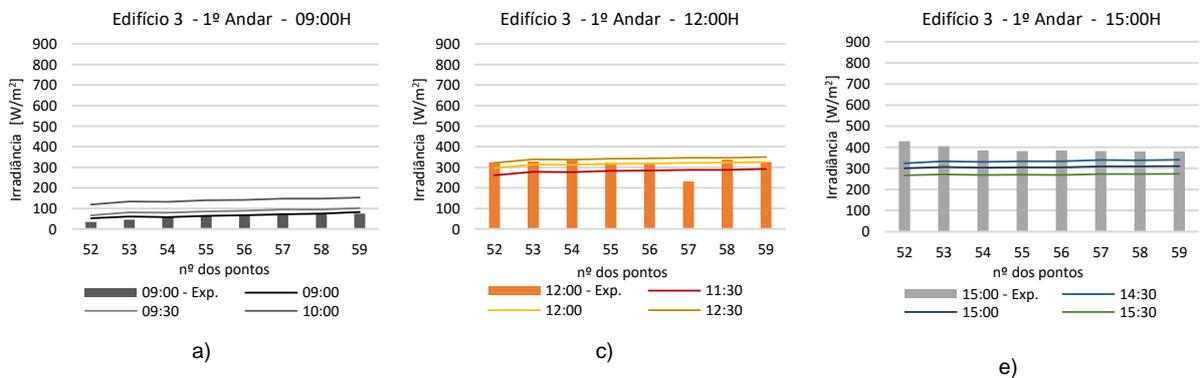


Figura 7.28 – Representação gráfica da irradiação nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de solstício de verão pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.

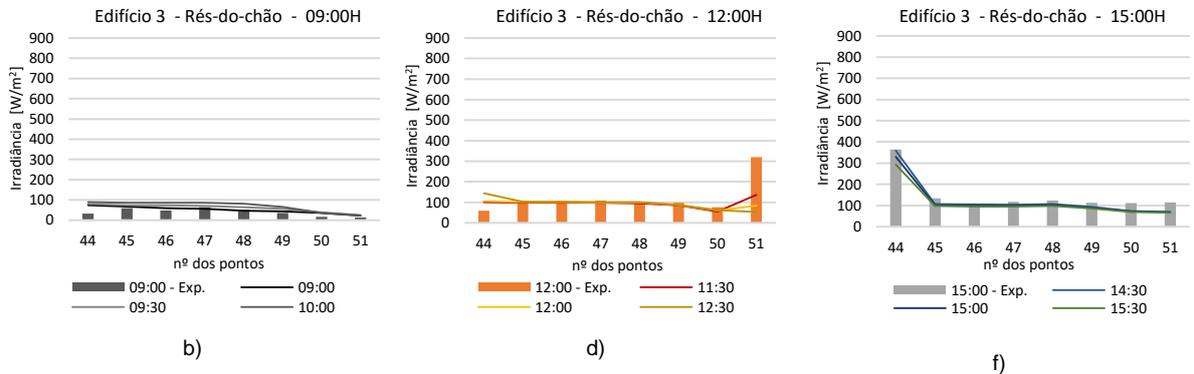
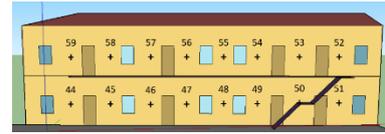


Figura 7.30 (Continuação) – Representação gráfica da irradiação nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de solstício de verão pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.

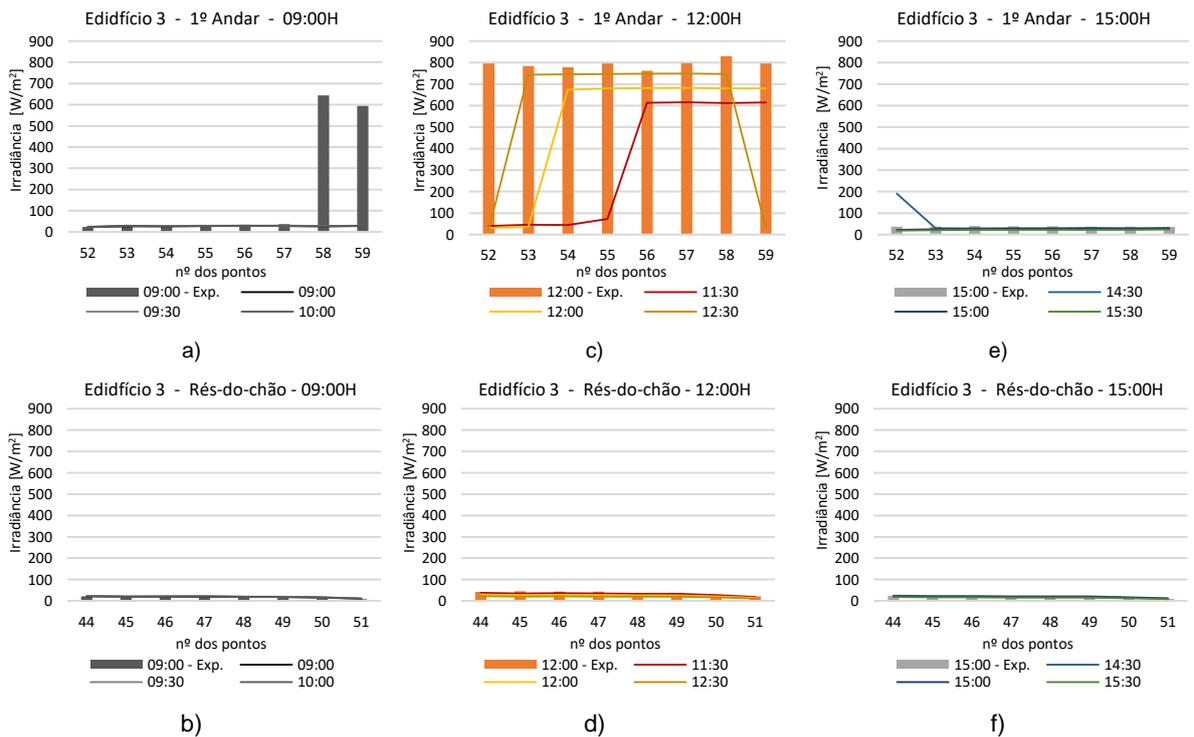


Figura 7.29 – Representação gráfica da irradiação nos vários pontos identificados na fachada do Edifício 3 na simulação de solstício inverno pelas: a) e b) 09:00H; c) e d) 12:00H; e) e f) 15:00H.

Os resultados obtidos no Edifício 3 nas três simulações realizadas são análogos aos resultados obtidos no Edifício 2, uma vez que ambos possuem características semelhantes, tais como a orientação e a geometria inerente ao próprio edifício (a presença de galeria/varanda no piso superior).

Analisando a simulação de equinócio realizada, verifica-se para os valores obtidos para as 09:00H, 12:00H e 15:00H, respetivamente Figura 7.27, têm a mesma aparência que os valores obtidos para as 09:00H, 12:00H e 15:00H no Edifício 2 (Figura 7.24). De forma particular, na Figura 7.27.d) é notória a grande divergência dos valores experimentais e numéricos. Porém, tal como foi mencionado na explicação do Edifício 2, o facto de o Sol estar numa posição intermédia e a fachada estar dividida em painéis com dimensões relativamente grandes, os resultados são desfavoráveis. As conclusões que serão apresentadas na secção 7.2.5, onde será realizada a discretização da fachada do Edifício 2, aplicar-se-iam também a este edifício.

No solstício de verão, o Edifício 3 (Figura 7.28) apresenta valores simulados muito próximos dos valores experimentais, tal como sucedeu no Edifício 2. Estas parecenças são relativas às características inerentes aos próprios edifícios bem como, à posição que o Sol se encontra no solstício de verão.

Por último, na simulação de solstício de inverno (Figura 7.29), os resultados obtidos para o 1.º andar para as 09:00H, nomeadamente, os pontos 58 e 59, encontram-se sombreados pelos edifícios vizinhos como foi constatado na Figura 7.10 da secção 7.1.4. A simplificação adotada aquando da modelação dos edifícios vizinhos (correspondente à cota mais elevada dos elementos pertencentes ao edifício, nomeadamente chaminés) provocaram as diferenças observadas. Para os valores obtidos na hora genérica 12:00H (Figura 7.29c)), verificam-se alterações significativas nos valores de irradiância para os pontos localizados na extremidade do edifício, entre as horas de simulação 11:30H, 12:00H e 12:30H. Desta forma, os valores dos pontos 52, 53, 54 e 55 mostram que à medida que os minutos passam e, conseqüentemente a posição do Sol varia, esta zona da fachada fica cada vez mais exposta à radiação solar, pelo que às 12:30H os valores de irradiância numéricos são mais próximos dos valores experimentais. Em contrapartida, todos os valores de irradiância determinados no rés-do-chão a partir da simulação são semelhantes aos valores experimentais. Concluindo-se que o modelo apresenta resultados favoráveis quando não há radiação solar direta na fachada.

### **7.2.5. Discretização do modelo**

A presente secção tem como objetivo a análise da influência que a discretização das fachadas tem na obtenção de resultados simulados e, conseqüentemente, a sua comparação com os experimentais. Por forma a melhor perceber o que realmente acontece nas várias fases da campanha realizada, optou-se por discretizar com maior detalhe o piso térreo do Edifício 2 na simulação de equinócio, uma vez que os resultados obtidos nesta fase do ano foram substancialmente díspares dos valores experimentais. Como se identificou na Figura 7.24, pelo meio-dia que é quando o Sol se encontra mais alto, os valores observados na simulação indicam que estão expostos a radiação direta do Sol, mas os valores experimentais para os pontos 39, 38 e 37 representam valores para os quais, em zonas exteriores, se encontram à sombra. Assim, é notória a importância da discretização nestas zonas para compreender a sua influência nos resultados.

Inicialmente, segundo o modelo base, a fachada apresenta quatro pontos para os quais foram medidos os valores de irradiância (pontos: 39, 38, 37 e 36). A zona que representa cada um dos pontos, está





$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})^2}{n}} \quad (7.3)$$

$$\bar{X}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i})}{n} \quad (7.4)$$

As equações 7.3 e 7.4 correspondem a cálculos intermédios necessários para determinar o Cv(RMSE) em que:  $X_{sim,i}$  são os dados simulados para o período  $i$ ;  $X_{exp,i}$  são os dados experimentais para o período  $i$ ;  $\bar{X}_{exp}$  é o valor médio experimental; e  $n$  o número de dados de entrada.

O parâmetro Cv(RMSE) é uma medida normalizada que determina como os valores de simulação se ajustam aos valores experimentais, considerando as diferenças positivas e negativas. Os valores mais baixos de Cv(RMSE) indicam uma menor dispersão entre a simulação e os dados experimentais. O parâmetro MBEn mede a proximidade entre os valores numéricos e os valores experimentais. A partir do MBEn é possível verificar a tendência do modelo em sobestimar e subestimar as irradiâncias calculadas.

A Tabela 7.5, a Tabela 7.6 e a Tabela 7.7, apresentam os valores de Cv(RMSE) e de MBEn, respetivamente, para a campanha de equinócio, de solstício de verão e de solstício de inverno. Para cada campanha estabeleceu-se calcular Cv(RMSE) e MBEn para o pátio e para cada edifício, uma vez que são elementos distintos e apresentam características próprias entre eles, nomeadamente, a sua geometria, a sua localização e a sua orientação. Do mesmo modo que os gráficos apresentados na análise final (secção 7.2) de cada campanha se optou-se por destacar três horas distintas de simulação, por forma a cobrir o tempo de campanha experimental, também para os valores de Cv(RMSE) e MBEn, e por apresentar os valores determinados para essas mesmas horas de simulação. De forma a facilitar a interpretação da Tabela 7.5 à Tabela 7.7, para cada hora experimental (09:00H, 12:00H e 15:00H), foi colorido a verde a hora simulada em que se obtiveram os menores valores de Cv(RMSE) e MBEn.

Tabela 7.5 - Valores de Cv(RMSE) e de MBEn para a campanha do equinócio para cada edifício e para o pátio.

Hora exp.	Hora sim.	Pátio		Edifício 1		Edifício 2		Edifício 3	
		Cv(RMSE)	MBEn	Cv(RMSE)	MBEn	Cv(RMSE)	MBEn	Cv(RMSE)	MBEn
09h00	09h00	64,88%	-41,60%	39,72%	-31,30%	43,98%	-27,48%	53,99%	-23,41%
	09h30	49,87%	-23,68%	34,52%	-25,24%	30,77%	7,98%	58,49%	30,65%
	10h00	48,06%	-8,99%	24,10%	-9,26%	56,38%	47,57%	116,03%	96,21%
12h00	11h30	42,37%	-26,63%	13,39%	-10,94%	51,54%	16,34%	52,72%	-6,69%
	12h00	43,70%	-24,31%	7,40%	-3,12%	56,34%	25,35%	55,32%	0,18%
	12h30	47,78%	-23,14%	6,07%	1,04%	60,65%	31,51%	60,17%	4,10%
15h00	14h30	64,88%	-40,31%	16,52%	10,04%	50,00%	-35,22%	15,99%	-11,12%
	15h00	74,78%	-49,65%	11,52%	-0,12%	59,83%	-48,23%	22,40%	-17,24%
	15h30	83,90%	-58,54%	12,76%	-6,67%	77,80%	-66,69%	30,06%	-24,27%

Tabela 7.6 - Valores de Cv(RMSE) e de MBE<sub>n</sub> para a campanha do solstício de verão para cada edifício e para o pátio.

Hora exp.	Hora sim.	Pátio		Edifício 1		Edifício 2		Edifício 3	
		Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>	Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>	Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>	Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>
09h00	09h00	56,04%	20,39%	44,16%	32,96%	41,55%	-33,69%	27,44%	15,17%
	09h30	73,92%	45,56%	32,93%	0,44%	32,60%	-19,58%	48,77%	44,97%
	10h00	95,42%	64,70%	34,89%	0,48%	43,16%	15,43%	118,01%	105,66%
12h00	11h30	37,95%	1,04%	17,32%	-6,39%	12,08%	-9,36%	27,24%	-13,92%
	12h00	37,88%	5,66%	18,59%	-10,90%	7,71%	-0,16%	30,10%	-6,88%
	12h30	41,18%	9,43%	17,67%	-9,64%	9,47%	3,97%	35,11%	-0,83%
15h00	14h30	37,75%	-6,91%	26,22%	17,28%	17,39%	-12,05%	17,14%	-14,37%
	15h00	44,19%	-14,95%	20,24%	9,59%	48,21%	-33,43%	24,13%	-20,95%
	15h30	52,86%	-24,89%	18,41%	5,20%	57,01%	-42,38%	33,52%	-28,86%

Tabela 7.7 - Valores de Cv(RMSE) e de MBE<sub>n</sub> para a campanha do solstício de inverno para cada edifício e para o pátio.

Hora exp.	Hora sim.	Pátio		Edifício 1		Edifício 2		Edifício 3	
		Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>	Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>	Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>	Cv(RMSE)	MBE <sub>n</sub>
09h00	09h00	96,10%	88,08%	49,79%	-37,41%	153,20%	-89,94%	217,27%	-76,79%
	09h30	105,85%	98,47%	45,43%	-32,24%	152,69%	-89,21%	216,54%	-74,96%
	10h00	91,80%	83,92%	47,52%	-35,40%	54,40%	-9,57%	217,10%	-76,12%
12h00	11h30	69,06%	55,57%	36,06%	-33,57%	100,00%	-76,25%	91,65%	-56,11%
	12h00	50,81%	31,04%	36,92%	-33,87%	73,57%	-55,92%	66,74%	-34,51%
	12h30	34,47%	5,78%	36,93%	-36,10%	61,58%	-35,66%	66,09%	-29,48%
15h00	14h30	82,63%	77,47%	186,61%	182,11%	21,94%	10,10%	136,72%	23,65%
	15h00	53,34%	44,31%	95,17%	93,83%	21,97%	-4,12%	29,89%	-23,85%
	15h30	35,77%	23,13%	66,97%	65,42%	30,16%	-18,88%	40,80%	-35,50%

Comparando as campanhas das Tabela 7.5, Tabela 7.6 e Tabela 7.7, é notório que a campanha de solstício de verão apresenta índices de Cv(RMSE) e MBE<sub>n</sub> mais baixos que as restantes, isto é, há uma menor dispersão entre os dados experimentais e os simulados. Tendo em conta os valores obtidos para os parâmetros que avaliam o erro da modelação, conclui-se que para as 12:00H no solstício de verão (Tabela 7.6) é quando os resultados numéricos se ajustam melhor à realidade.

Observando agora com detalhe a Tabela 7.5 referente ao equinócio, os índices estatísticos apresentam menores valores para o Edifício 1, existindo uma maior proximidade entre os valores numéricos e os experimentais. O modelo tende a subestimar as irradiâncias calculadas para este edifício. Para o Edifício 2 e 3, o parâmetro de Cv(RMSE) apresenta valores consideravelmente superiores ao Edifício 1, notando-se aqui uma maior dispersão entre a simulação e os dados experimentais. Esta diferença evidente deve-se ao facto de o Edifício 1 não receber radiação solar direta contribuindo para uma menor oscilação dos valores. No Pátio, também se observa uma grande dispersão dos valores numéricos e experimentais bem como, uma tendência do modelo para subestimar os valores de irradiância para as várias horas analisadas. Posto isto, conclui-se que, de um modo geral, o modelo

apresenta resultados melhores para o meio-dia, visto que, não há interferência de sombreamentos causados pelos edifícios vizinhos.

Analisando o solstício de inverno (Tabela 7.6), os valores obtidos para os índices estatísticos no Pátio apresentam valores relativamente elevados, exceto MBEn às 12:00H. Observando o parâmetro de MBEn no Pátio para todas as horas em estudo, verifica-se que o modelo, nesta fase do ano, tem tendência em sobrestimar os valores de irradiância nos pontos medidos. E, analisando o Cv(RMSE), percebe-se que existe grande diversidade nos valores simulados e nos dados experimentais. Por outro lado, para o Edifício 1, verifica-se que para as 09:00H e para as 12:00H, o modelo subestima os valores de irradiância, ainda assim, a dispersão entre resultados simulados e experimentais mantém-se grande. De igual modo para o Edifício 2 e 3, pela análise do MBE, verifica-se que o modelo também tem tendência para subestimar os valores de irradiância calculados, mas com maior evidência no Edifício 3. Por fim, analisando Cv(RMSE), também se verifica que estes dois edifícios apresentam um afastamento relevante entre os valores simulados e os valores experimentais.

Pode concluir-se que, o modelo de simulação apresenta resultados significativamente melhores para a campanha de solstício de verão e piores para o solstício de inverno. Quer isto dizer que, para as fases do ano em que o Sol se encontra a uma altura relativamente baixa, a pormenorização da envolvente ao caso de estudo, nomeadamente, os edifícios vizinhos, é crucial para o bom desempenho da simulação. Como se verificou no solstício de inverno, a simplificação na caracterização da envolvente condiciona o bom desempenho do modelo.

## **7.4. Análise do potencial solar dos envidraçados da Vila Luz para os dias de campanha**

Neste subcapítulo, como exemplo de aplicação do modelo já simulado anteriormente, analisou-se o potencial solar dos envidraçados dos edifícios da Vila Luz.

Em primeiro lugar foram realizadas simulações para cada dia de campanha utilizando o ficheiro climático do IST e, por sua vez, procedeu-se à análise da radiação incidente ao nível dos envidraçados nos vários períodos do ano. A quantidade de energia incidente nos envidraçados dos edifícios depende da área de envidraçados existente e depende também da orientação do edifício. O Edifício 1 apresenta 20 janelas ao nível do rés-do-chão com um total de 21.6 m<sup>2</sup> de envidraçados e o piso superior tem 26 janelas pelo que, dessas, 14 são janelas-porta, perfazendo um total de 37.18 m<sup>2</sup>. O Edifício 2 tem 3 janelas por piso, que corresponde a 4.35 m<sup>2</sup> de área de envidraçados por piso. Por fim, o Edifício 3 tem 5 janelas em cada piso equivalendo a 7.25 m<sup>2</sup> de envidraçados por piso.

Na Figura 7.33 à Figura 7.35, está representada a energia recebida nos envidraçados num dia, respetivamente, no equinócio, no solstício de verão e no solstício de inverno. Cada linha representada nos gráficos corresponde a um piso de um dos edifícios.

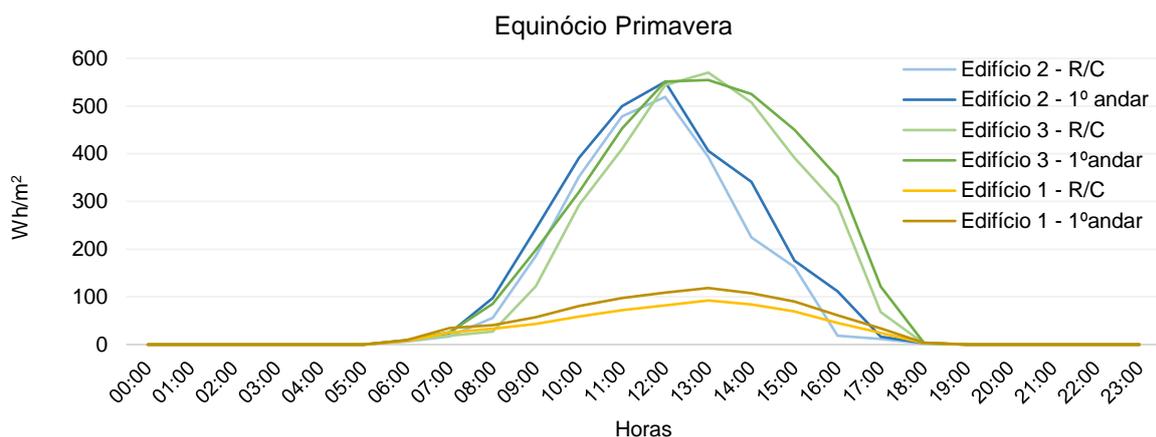


Figura 7.33 - Energia recebida nos envidraçados da Vila Luz no equinócio

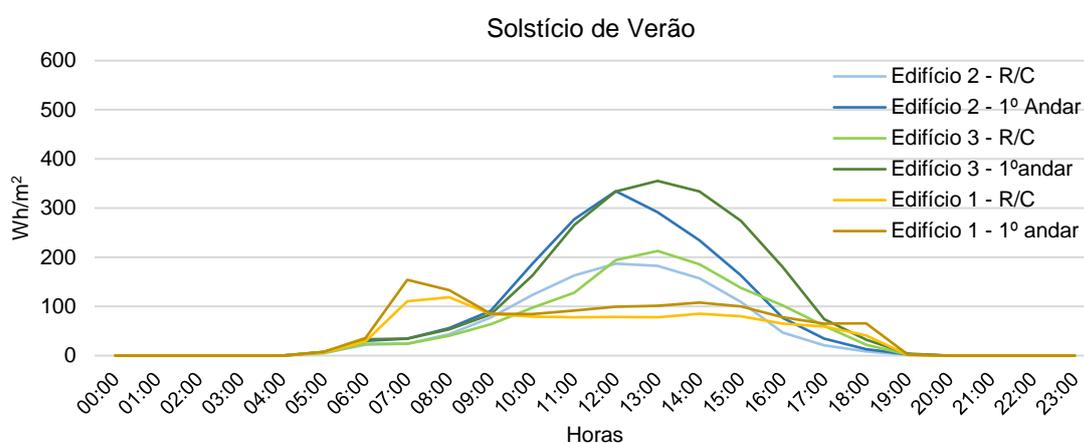


Figura 7.34 - Energia recebida nos envidraçados da Vila Luz no solstício de verão

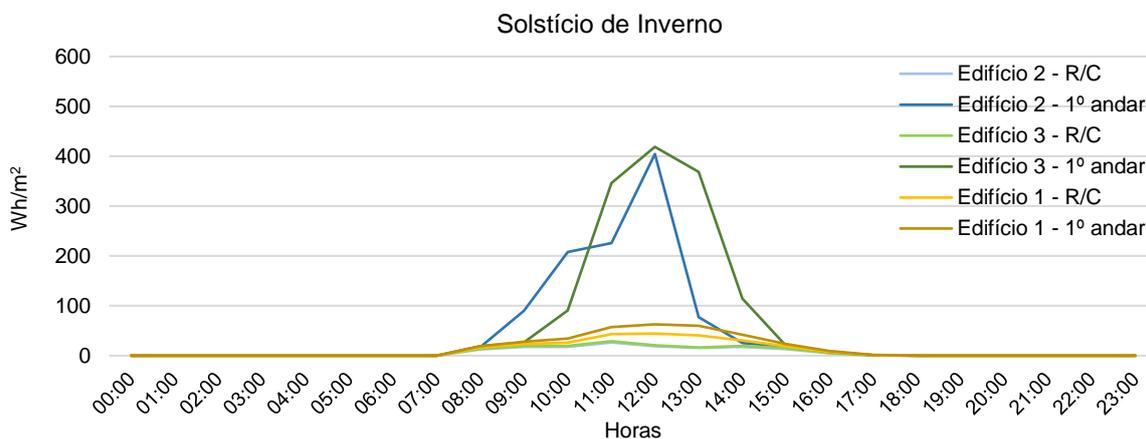


Figura 7.35 - Energia recebida nos envidraçados da Vila Luz no solstício de inverno

Os envidraçados são elementos fundamentais para o conforto térmico de uma habitação e, como se observa nos gráficos ilustrados [Figura 7.33 - Figura 7.35], a intensidade da radiação solar através das janelas varia segundo: i) a sua orientação; ii) a sua localização no edifício; e iii) o dia de análise (dia de inverno ou dia de verão). Pela análise das Figura 7.33 à Figura 7.35 verifica-se que os andares

superiores recebem maior quantidade de energia quando comparados com os andares inferiores, tal como era expectável.

A intensidade de radiação recebida nos envidraçados durante o equinócio é semelhante entre os pisos do mesmo edifício, como se observa na Figura 7.33, isto porque, o Sol no equinócio encontra-se a uma altura intermédia fazendo com que os dois andares recebam de forma similar a radiação solar. O Edifício 2 e 3 apresentam valores superiores comparativamente ao Edifício 1 devido à sua orientação (Sudoeste). O Edifício 1 por estar orientado a Norte recebe energia nos envidraçados pela reflexão da radiação solar incidente nos outros dois e no pátio.

Considerando agora o solstício de verão (Figura 7.34), é possível constatar um intervalo de tempo mais alargado para o qual os envidraçados recebem energia proveniente do Sol, consequência de os dias no verão serem mais longos. No entanto, verifica-se uma diminuição da radiação recebida pelos envidraçados dos Edifícios 2 e 3, em virtude de o Sol nesta fase do ano se encontrar na sua altura relativa máxima. A presença da varanda nestes edifícios reduz a radiação solar incidente ao nível das janelas devido ao sombreamento que estas provocam nas fachadas e, conseqüentemente, sobre os envidraçados. Porém, sucede que o Edifício 1 expressa um aumento da energia recebida nas primeiras horas da manhã face aos resultados obtidos no equinócio e, como é possível constatar, a radiação recebida nos envidraçados ao longo do dia, mantém-se sensivelmente constante a partir das 09:00H.

Observando agora o solstício de inverno (Figura 7.35), verifica-se que o período de receção de energia ao longo do dia pelos envidraçados é mais reduzido, em consequência de os dias serem mais curtos. Os envidraçados ao nível dos pisos superiores apresentam valores bastante superiores comparativamente aos envidraçados existentes no rés-do-chão, isto deve-se, aos raios solares não incidem diretamente nos pisos inferiores e por o Sol se encontrar a uma altura baixa nesta altura do ano, fazendo com que os edifícios vizinhos criem zonas de sombreamento ao nível do rés-do-chão. A intensidade de radiação recebida nos envidraçados do piso térreo do Edifício 2 e do Edifício 3 é semelhante, porque apresentam características também elas muito semelhantes.

Em suma, a intensidade máxima de radiação que atinge os envidraçados no inverno é superior à intensidade máxima de radiação no verão e, por sua vez, a intensidade da radiação no equinócio é superior a um dia de verão. A variação da radiação solar nos envidraçados para as várias orientações dos edifícios, num dia de inverno e num dia de verão, apresentam a mesma distribuição demonstrada pelo arquiteto português Francisco Moita na Figura 2.4 (Moita, 1988).

## **7.5. Análise do potencial solar anual dos envidraçados, das fachadas e das coberturas**

Como exemplo de aplicação do modelo já simulado, neste subcapítulo pretende-se estudar o potencial solar anual em diferentes elementos construtivos da envolvente dos edifícios que constituem a Vila

Luz. Os elementos considerados para este estudo são os seguintes: os envidraçados; as fachadas principais; e as coberturas.

Para a análise do potencial solar ao longo de um ano nos vários elementos da Vila foram realizadas simulações utilizando o ficheiro climático EPW tipo em Lisboa, Portugal, disponibilizado no sítio da internet do *EnergyPlus* ([https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT//PRT\\_Lisboa.085360\\_INETI](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI)). Tal como no subcapítulo anterior, os valores apresentados nas ilustrações gráficas estão por edifício e por andar.

A Figura 7.36 à Figura 7.38 mostram a irradiância global mensal recebida nos envidraçados, nas fachadas e nas coberturas, respetivamente. Na Figura 7.36 é possível constatar os períodos do ano em que os envidraçados recebem maior quantidade de radiação solar incidente, são nos equinócios para os envidraçados pertencentes às fachadas dos edifícios orientados a Sul pelo facto de no verão o Sol estar mais alto e logo menos perpendicular à fachada, e de no inverno, para além do menor número quer de horas de Sol quer de dias de céu limpo, o efeito de sombreamento dos edifícios em frente ser maior. Já o edifício virado a Norte (Edifício 1), como não recebe radiação direta do Sol, é no verão que atinge os valores mais altos pela reflexão da radiação solar incidente nos edifícios da frente (Edifício 2 e Edifício 3) e pelo número de horas de Sol ser substancialmente superior no verão.

De forma análoga ao potencial solar observado nos envidraçados, as fachadas dos três edifícios apresentam um comportamento idêntico no valor acumulado mensal de radiação solar ao longo de um ano (Figura 7.37). No entanto, a irradiância global mensal por unidade de área que atinge as fachadas do piso térreo é diferente dos envidraçados, sendo inferior nas fachadas. Esta observação pode ser explicada pelo facto da área das fachadas sombreada, em particular no rés-do-chão (extremidade das fachadas junto aos edifícios adjacentes e zonas por de trás das escadas que dão acesso aos pisos superiores) ser superior à área dos envidraçados sombreada.

Analisando por fim as coberturas dos edifícios da Vila Luz (Figura 7.38), verifica-se que, tal como esperado, as coberturas são os elementos da envolvente do edifício que têm maior potencial solar. Por

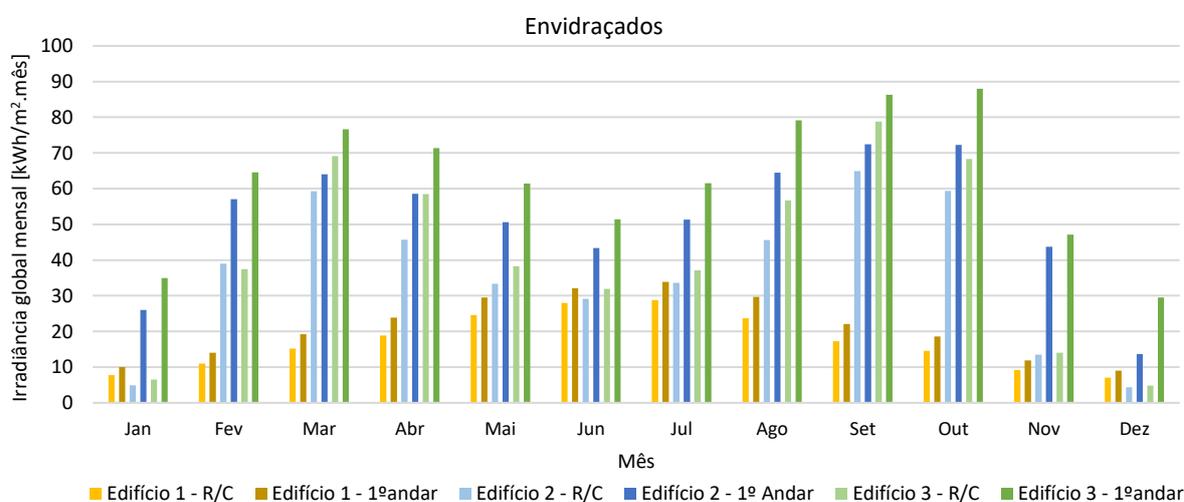
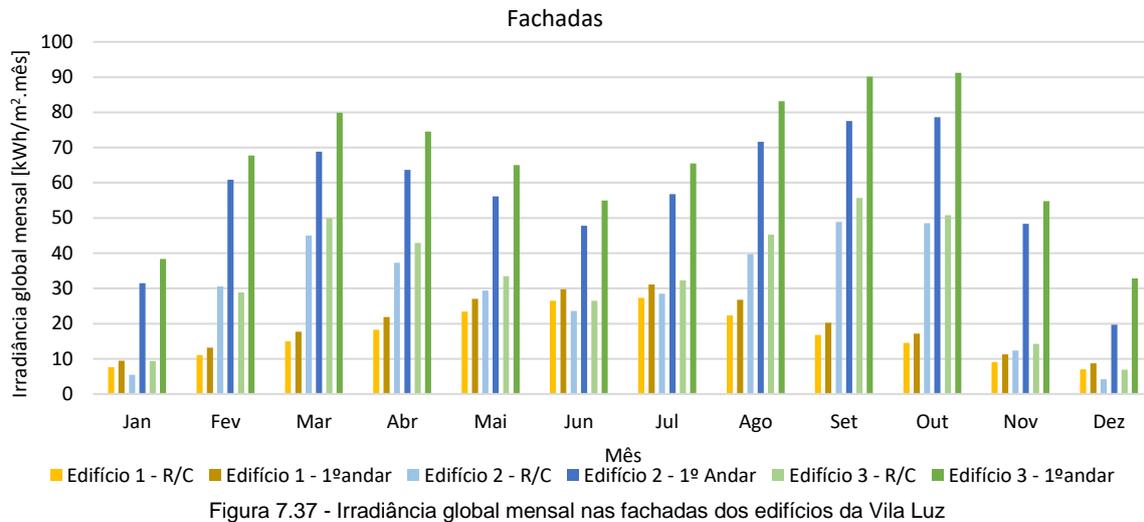
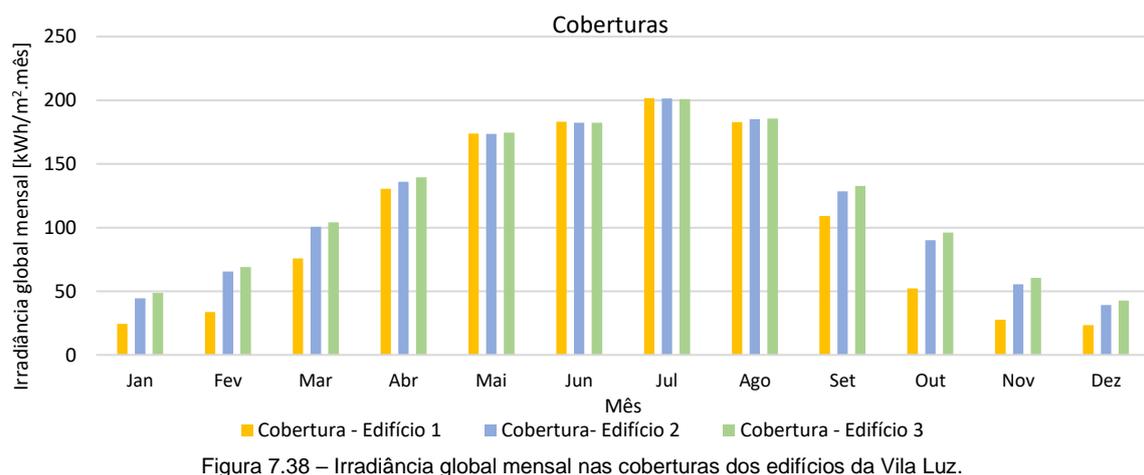


Figura 7.36 – Irradiância global mensal nos envidraçados dos edifícios da Vila Luz

essa razão é que a utilização de tecnologias de aproveitamento da energia proveniente do Sol tem grande aplicabilidade nas coberturas.



As coberturas são os elementos do edificado que se encontram à cota mais alta, menos sujeitos a efeitos de sombreamento e, conseqüentemente, são as superfícies que recebem maior radiação direta do Sol durante um maior período de tempo. Como se pode analisar na Figura 7.38, a radiação solar apresenta valores inferiores na estação de inverno (onde a altura solar é menor) relativamente à estação de verão (onde a altura solar é maior). No entanto, também se observa para esses mesmos meses, que a cobertura do Edifício 1 recebe menor radiação solar que os restantes edifícios. Efetivamente, a Vila Luz está inserida numa malha densa da cidade de Lisboa e está rodeada de edifícios com alturas bastante superiores, que por sua vez, provocam sombreamento na cobertura do Edifício 1, por este estar localizado mais próximo dos edifícios vizinhos a Sul.



Por fim, de forma a sintetizar os gráficos apresentados na Figura 7.36, na Figura 7.37 e na Figura 7.38 para cada elemento da envolvente do edifício avaliado, a Figura 7.39 representa de forma sumária a irradiância global anual nos envidraçados, nas fachadas e nas coberturas. Assim é possível analisar comparativamente a radiação solar incidente ao nível dos diversos elementos, e perceber qual o potencial de cada um. Na Figura 7.41.a) apresentam-se os resultados por unidade de área e na Figura

7.41.b) os valores totais de irradiância em cada elemento em função da área de cada um deles. Apesar de o potencial solar nas coberturas ser bastante superior às fachadas e aos envidraçados, como seria expectável, esta análise é importante uma vez que o interesse pela instalação de tecnologias de aproveitamento solar nas fachadas e envidraçados tem crescido significativamente nos últimos anos. Refira-se ainda que os valores associados às fachadas e envidraçados apresentados cingem-se às fachadas monitorizadas, ou seja que dão diretamente para o pátio.

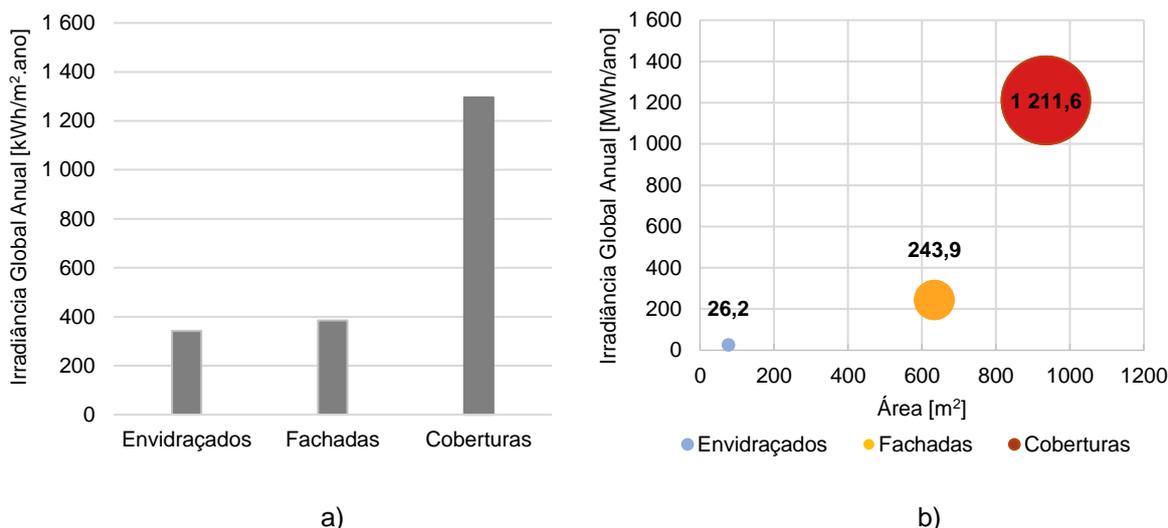


Figura 7.39 - Irradiância global anual nos envidraçados, nas fachadas e nas coberturas da Vila Luz: a) kWh/m² ; b) MWh

A primeira conclusão que se pode retirar do gráfico a) da Figura 7.39 é o facto de as coberturas dos edifícios serem as zonas com maior exposição da radiação solar, de seguida as fachadas e por último, os envidraçados. Pela análise da Figura 7.39.a) a irradiância global anual nos envidraçados corresponde a 341.55 kWh/m², a irradiância global anual nas fachadas corresponde a 385.31 kWh/m² e a irradiância global anual nas coberturas corresponde a 1295.83 kWh/m² (a consideração das fachadas e envidraçados induz um incremento de 30% e 26%, respetivamente, no potencial solar do caso de estudo). Estes valores estão de acordo com os valores apresentados por Brito et al. (2019) também para a cidade de Lisboa (de 396.79 kWh/m² nas fachadas e de 1231.21 kWh/m² nas coberturas). A radiação global anual obtida nas coberturas (cerca de 1300 kWh/m²) apresenta uma ligeira diferença em relação à radiação global anual em Portugal, em 2019, determinada pela SolarGIS (SolarGIS, 2019), na zona de Lisboa (1 700 – 1 750 kWh/m²). A diferença observada pode ser explicada pelo sombreamento causado pelos edifícios circundantes, a Vila Luz está rodeada por edifícios com alturas significativamente superiores diminuindo assim o tempo de exposição solar nas coberturas, especialmente na estação de inverno.

Esta análise foi realizada para a totalidade da área das superfícies que envolvem os edifícios, caso se pretendesse instalar painéis fotovoltaicos e/ou coletores solares adicionalmente à construção existente ou integrados nos edifícios, a área que efetivamente estaria livre para a sua instalação seria inferior. Além disso, a energia recebida pelos PV que é convertida em energia elétrica varia atualmente entre 10% a 40% (Dixit, 2020), dependendo da eficiência dos painéis PV.

## 7.6. Tempo de simulação

O tempo de simulação é um dos factores importantes a ter em consideração quando se pretende realizar este tipo de análises, uma vez que pode ser um fator determinante na concretização de um estudo. Por essa razão, elaborou-se a Tabela 7.8 como síntese das diferentes análises/simulações realizadas ao longo desta dissertação, dado que o tempo de simulação varia consoante a complexidade do modelo. Para o caso de estudo apresentado a complexidade do modelo depende principalmente dos seguintes fatores: o número de superfícies de elementos de construção; o número de superfícies dos elementos de sombreamento; e o período de simulação, que define o início e o término da simulação.

Tabela 7.8 – Quadro síntese com exemplos de algumas simulações realizadas e o correspondente tempo de simulação.

Cenário	Modelo	Contexto urbano	Figura/ Subcapítulo	Período de simulação	Tempo de simulação
Análise inicial para os dias de campanha	Modelo base inicial*	Sim	Figura 7.1	1 dia (3 abr.)	04min. 46s.
				1 dia (14 jul.)	05min. 04s.
				1 dia (14 jan.)	02min. 10s.
Análise da influência do ficheiro climático do IST	Modelo base**	Sim	Figura 7.3 e Figura 7.4	1 dia (3 abr.)	19min. 36s.
				1 dia (14 jul.)	25min. 38s.
				1 dia (14 jan.)	09min. 27s.
Análise sem os edifícios vizinhos (apenas elementos laterais do pátio)	Modelo base**	Não	Figura 7.9	1 dia (3 abr.)	10min. 49s.
				1 dia (14 jul.)	12min. 58s.
				1 dia (14 jan.)	02min. 04s.
Análise da influência da discretização da fachada	Modelo base discretizado***	Sim	Figura 7.30	1 dia (3 abr.)	60min. 03s.
Análise potencial solar nos envidraçados, para os dias de campanha	Modelo base**	Sim	Subcapítulo 7.4	1 dia (3 abr.)	12min. 52s.
				1 dia (14 jul.)	17min. 13s.
				1 dia (14 jan.)	03min. 53s.
Análise do potencial solar envidraçados num ano tipo	Modelo base**	Sim	Subcapítulo 7.5	1 ano inteiro	48 min. 10s.
Análise do potencial solar das fachadas num ano tipo	Modelo base**	Sim	Subcapítulo 7.5	1 ano inteiro	47 min. 37s.
Análise do potencial solar das coberturas num ano tipo	Modelo base**	Sim	Subcapítulo 7.5	1 ano inteiro	52 min. 02s.

### Nota:

\* corresponde ao modelo base inicial em que as fachadas dos edifícios sem divisão (superfície única).

\*\* corresponde ao modelo base utilizado na maioria das simulações, fachadas divididas em painéis de 1.20x1.00m<sup>2</sup>.

\*\*\* corresponde ao modelo base com discretização da fachada em painéis de menor dimensão (0.50x0.50m<sup>2</sup>), apresentado no subcapítulo 7.2.5

## 8. Conclusão e desenvolvimentos futuros

### 8.1. Conclusões

Nos últimos anos, a União Europeia propôs algumas metas a serem alcançadas no âmbito das alterações climáticas e energia, sendo a sustentabilidade energética um dos principais pontos na sua agenda. Dado que os edifícios representam uma parcela considerável dos consumos de energia dos países desenvolvidos, durante os últimos anos, a procura de soluções que satisfaçam as necessidades energéticas de um edifício residencial e/ou comercial recorrendo a fontes de energia renovável tem crescido, sendo a energia solar uma das maiores fontes alternativas às energias fósseis. Neste sentido, a avaliação do potencial solar é particularmente importante, não só ao nível das coberturas, mas também das fachadas, quando se pretende assegurar a energia nos edifícios a partir da energia solar.

Neste trabalho, simulou-se o potencial solar em ambiente urbano, considerando não só a geometria intrínseca do edificado em estudo mas de toda a envolvente. Numa primeira fase, foi realizada uma campanha experimental onde se registou a irradiância em três dias específicos – correspondentes aos dias dos solstícios de verão e inverno e ao equinócio da primavera, e em três períodos do dia diferentes – 9h00, 12h00 e 15h00. De seguida, procedeu-se à simulação do potencial solar do caso de estudo (fachadas e pátio), avaliou-se o impacto de diferentes fatores nos resultados e calibrou-se o modelo experimentalmente. Neste contexto, destacam-se alguns dos factores de influência analisados: nível de detalhe do modelo (grelha); influência do contexto urbano no qual o modelo está inserido; geometria intrínseca ao modelo, isto é, os detalhes arquitetónicos dos edifícios, nomeadamente as varandas; características dos materiais dos elementos construtivos; parâmetros climáticos considerados no ficheiro climático. Por fim, analisou-se o potencial solar anual nos diversos elementos da envolvente dos edifícios (envidraçados, fachadas e coberturas).

Dos resultados obtidos no presente estudo, destacam-se as seguintes conclusões:

- a escolha de um ficheiro climático com os registos meteorológicos medidos *in situ* ou próximo do caso de estudo e referentes ao dia de campanha experimental, e não a um ano tipo, revela-se importante quando se pretende calibrar um modelo de simulação. Por exemplo, as 15:00H no solstício de verão, verifica-se um Cv(RMSE) de 50.00% e MBEn de -8.80% para o ficheiro do IST e para o ficheiro EP os erros são bastante superiores com Cv(RMSE) de 76.48% e MBEn de -41.07%, verificando-se, neste caso, uma melhoria em 34.62% no parâmetro de Cv(RMSE) e de 78.58% no MBEn. Desta forma, deve escolher-se simular um modelo com os parâmetros climáticos registados numa estação meteorológica o mais próxima possível do caso de estudo.
- existe uma relação direta entre a qualidade dos resultados e as características do modelo 3D utilizado. Desta forma, quando se realiza uma análise focada num edifício ou num conjunto de edifícios (no presente estudo analisaram-se três edifícios), é importante que a geometria do modelo reproduza a realidade. A definição do ambiente circundante revelou-se, de forma

particular no solstício de inverno, preponderante na qualidade dos resultados obtidos por simulação. Por simplificação, a modelação dos edifícios circundantes foi realizada a partir da extrusão dos polígonos de implantação com recurso ao atributo da cota mais alta do edifício (e.g. chaminés caso existentes em vez da cota de cumieira) resultando assim, em resultados numéricos significativamente diferentes em zonas de fachada quando sujeitas à exposição direta da radiação solar nas fachadas. Desta forma, para futuros desenvolvimentos, a modelação dos edifícios vizinhos e seus elementos deve ser especialmente cuidada nas simulações nos meses de inverno.

- no caso do edifício ou conjunto edifícios estarem inseridos em ambiente urbano, verificou-se ser relevante não só a consideração da topografia e ambiente construído envolvente, nomeadamente dos edifícios adjacentes, mas também a presença de elementos pertencentes aos próprios edifícios como é o caso das varandas que demonstraram afetar a qualidade dos resultados, principalmente no solstício de verão (quando o sol está mais elevado provocando uma maior zona de sombreamento nas fachadas).
- as características dos elementos de envolvente, em particular dos materiais de revestimento exterior, mostraram também ser importantes. A medição *in situ* da refletância solar dos materiais de revestimento exterior da envolvente dos edifícios e do pátio revelou-se vantajosa para uma maior aproximação entre os valores simulados e os experimentais, concluindo-se que a utilização de valores teóricos de absorptância solar de um material (no presente caso de uma superfície considerada clara) pode não ser a abordagem mais rigorosa, tendo repercussões ao nível dos resultados. No conjunto das três campanhas verificou-se uma melhoria do Cv(RMSE) e do MBEn em cerca de 23% e 25%, respetivamente, para a absorptância medida no local face à padronizada pela literatura.
- o grau de discretização do modelo ao nível dos elementos de fachadas dos edifícios virados sensivelmente a Sul demonstrou ser essencial na obtenção de resultados mais próximos da realidade, nomeadamente no equinócio, quando a trajetória do Sol está numa altura intermédia. A definição de uma grelha mais refinada apresenta um papel fundamental na precisão e no rigor dos resultados obtidos. Não obstante, traduz-se num trabalho substancialmente acrescido com a definição da grelha e num aumento proporcional do tempo de computação da simulação (passando de 26 minutos para 60 minutos, ou seja, duplicando o tempo) que não deverá ser também descurado.
- a consideração de todas as variáveis mencionadas e analisadas neste estudo permitiram calibrar o modelo de simulação. Por exemplo, no caso do Edifício 2 às 12h00: no equinócio o modelo de simulação apresenta um erro Cv(RMSE) de 51.54% e MBEn de 16.34%; no solstício de verão Cv(RMSE) de 7.71% e MBEn de -0.16%; e no solstício de inverno um Cv(RMSE) de 61.58% e um MBEn de -35.66%. Desta forma, o modelo de simulação apresenta resultados significativamente melhores para a campanha de solstício de verão e piores para o solstício de inverno. Os valores baixos de Cv(RMSE) no solstício de verão indicam uma menor dispersão entre os valores simulados e os experimentais, e MBEn indica que o modelo de simulação se ajusta à realidade. Estes resultados podem ser justificados

pelo facto de no inverno, como a altura solar é menor, o efeito de sombreamento da envolvente é consideravelmente superior, sendo a pormenorização da envolvente do caso de estudo, nomeadamente os edifícios vizinhos, crucial para o bom desempenho da simulação e, como se verificou no solstício de inverno, a simplificação na caracterização da envolvente condiciona o bom desempenho do modelo.

- na análise do potencial solar nos diversos elementos construtivos exteriores dos edifícios da Vila, concluiu-se que as superfícies que apresentam maior potencial solar para a colocação de PV são as coberturas, com irradiância global anual de 1295.83 kWh/m<sup>2</sup>. Os envidraçados e as fachadas apresentam valores consideravelmente inferiores, de 341.55 kWh/m<sup>2</sup> e 385.31 kWh/m<sup>2</sup>, respetivamente, uma vez que o tempo de exposição à radiação solar direta é significativamente inferior. No entanto, a consideração das fachadas e envidraçados na análise do potencial solar na envolvente dos três edifícios induz um incremento de 56% na irradiância obtida (30% nas fachadas e 26% nos envidraçados), face a considerar só as coberturas, o que não é de todo desprezável.

De um modo geral, a análise realizada no presente estudo é importante não só para estudos de desempenho térmico e energético de edifícios, como também para a localização e a otimização de soluções de aproveitamento solar nomeadamente, coletores solares e painéis fotovoltaicos, e estudos de durabilidade dos revestimentos dos edifícios. Estes estudos são relevantes para o planeamento e ordenamento de cidades mais sustentáveis e a fomentação de medidas para a descarbonização das cidades, como seja a implementação de soluções tecnológicas de aproveitamento da energia solar que contribuam para o aumento da eficiência energética dos edifícios e das cidades.

## 8.2. Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros, sugerem-se os seguintes trabalhos:

- estudar o impacto da incerteza associada ao equipamento de medição: em estudos semelhantes, poderá aferir-se se os resultados simulados se encontram dentro do intervalo estabelecido para o grau de incerteza definido para os resultados experimentais;
- realizar uma análise custo-benefício da aplicação de sistemas de aproveitamento solar no modelo simulado;
- analisar o impacto de árvores de diferentes portes, devendo-se considerar as espécies florestais mais comuns, e aferir a irradiância nas fachadas dos edifícios;
- simular o potencial solar em ambiente urbano e sua calibração experimental comparando software de simulação diferentes;
- análise dos valores de iluminância para avaliação das condições de iluminação natural em ambientes urbanos;
- aplicação de um estudo semelhante ao nível de uma cidade, como Lisboa, uma vez que estes estudos do potencial solar têm um papel fundamental no ordenamento do território para a implementação de tecnologias de aproveitamento solar.

# Referências

Andrade, H. M. (2011). *Caracterização de edifícios antigos. Edifícios "Gaioleiros"*. PhD Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

BF5. (2020). *BF5 Sunshine Sensor Specification*. Retrieved fevereiro 2020, from Delta-T Devices: <https://www.delta-t.co.uk/product/bf5/#specification>

Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., . . . Rico, E. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. (Elsevier, Ed.) *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 833-858. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009>

Bot, K., Aelenei, L., Gomes, M., & Santos Silva, C. (2020). Performance Assessment of a Building Integrated Photovoltaic Thermal System in Mediterranean Climate—A Numerical Simulation Approach. (M. D. Institute, Ed.) *Energies*, 13, 2887. doi:<https://doi.org/10.3390/en13112887>

Brito, J., & Flores-Colen, I. (2003). *Paredes de Alvenaria de pedra natural*.

Brito, M., Redweik, P., Catita, C., Freitas, S., & Santos, M. (2019). 3D Solar Potential in the Urban Environment: A Case Study in Lisbon. (M. D. Institute, Ed.) *Energies*, 12, 3457.

Carneiro, C., Morello, E., Ratti, C., & Golay, F. (2008). Solar radiation over the urban texture: LIDAR data and image processing techniques for environmental analysis at city scale.

Catita, C., Redweik, P., Pereira, J., & Miguel Centeno, B. (2014). Extending solar potential analysis in building to vertical facades. *Computers & Geosciences*, 66, 1 - 12.

Chen, F., & Yin, H. (2016). Fabrication and laboratory-based performance testing of a building-integrated photovoltaic-thermal roofing panel. (Elsevier, Ed.) *Applied Energy*, 177, 271 - 284.

Chow, A., Fung, A., & Li, S. (2014). GIS Modeling of Solar Neighborhood Potential at a Fine Spatiotemporal Resolution. *Buildings*, 4, 195-206.

Comissão Europeia. (2019, Maio 16). *European Commission*. Retrieved Maio 15, 2020, from [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en#facts-and-figures](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en#facts-and-figures)

Comissão Europeia. (2020). *Climate Action*. Retrieved Fevereiro 20, 2020, from Comissão Europeia: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en)

Comissão Europeia. (2020). *Climate Action*. Retrieved maio 2020, 20, from Comissão Europeia: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en)

Comissão Europeia. (n.d.). *Pacto Ecológico Europeu*. Retrieved Maio 2020, 20, from Comissão Europeia: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_pt](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt)

Costa, F. (1955). *Enciclopédia prática da construção civil* (Vols. 18 - Pavimentos Diversos). Lisboa: Portugalia Editora.

Debbarma, M., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Thermal modeling, exergy analysis, performance of BIPV and BIPVT: a review. (Elsevier, Ed.) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1276 - 1288.

Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. (2013). Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. (3. S.-1.-0. Diário da República n.º 234/2013, Ed.) pp. 35088-(58) a 35088-(87).

Dixit, S. (2020). Solar technologies and their implementations: A review. *Materials Today: Proceedings*.

Faustino, C. (2012). *Influência de vãos envidraçados no desempenho energético de edifícios - Aplicação ao edifício do DECivil-IST*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.

Gonçalves, H., Aelenei, L., & Rodrigues, C. (2012). Solar XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building. *REHVA*, 34 - 40.

Google Maps. (2020). Retrieved Fevereiro 2020

Guias de Arquitetura. (S.D). Retrieved maio 2020, from [https://guiasdearquitetura.com/pt/produtos/packs/lisbon-district/\\_222](https://guiasdearquitetura.com/pt/produtos/packs/lisbon-district/_222)

Heidarinejad, M., Gracik, S., Roudsari, M., Nikkho, S., Liu, J., Liu, K., . . . Srebric, J. (2016). Influence of building surface solar irradiance on environmental temperatures in urban neighborhoods. (Elsevier, Ed.) *Sustainable Cities and Society*, 26, 186 - 202.

<https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>. (n.d.). *Elements*. Retrieved dezembro 2019, from Big Ladder Software.

<https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>. (n.d.). *Euclid*. Retrieved janeiro 2020, from Big Ladder Software.

[https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT//PRT\\_Lisboa.085360\\_INETI](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI). (n.d.). *Weather Data by Location*. Retrieved Janeiro 2020, from EnergyPlus.

<https://meteo.tecnico.ulisboa.pt/>. (2020). *Observações: Histórico*. Retrieved dezembro 2019, from meteo Técnico: <https://meteo.tecnico.ulisboa.pt/>

Ildfonso, S. (2008). *Vilas operárias em Lisboa: emergência novos modos de habitar. O caso da Vila Berta*. Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Ildfonso, S., Machete, R., Falcão, A., & Heitor, T. (2019). A proto-habitação social na cidade de Lisboa: uma leitura integrada da vila operária no contexto urbano atual. *Urbe, Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11, 1 - 15.

JEAM2014. (2014). *Jornadas de Engenharia so Ambiente do Instituto Superior Técnico*. Retrieved maio 2020, from <https://jeambtecnicolisboa.wordpress.com/jeamb-2014/programa-jeamb-2014/visita-tecnica/>

Kong, H. (2019). Building edge extraction based on DSM digital surface model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 384, 012184.

LI-COR. (2020). *LI-200R Pyranometer*. Retrieved Janeiro 2020, from LI-COR: <https://www.licor.com/env/products/light/pyranometer.html>

Machete, R. (2016). *Utilização de Modelos SIG-3D na Determinação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios*. Tese de Mestrado em Arquitetura, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Machete, R., Falcão, A., Gomes, M., & Rodrigues, A. (2018). The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. (Elsevier, Ed.) *Energy and Buildings*, 177, 290 - 302.

Matias, L., & Santos, P. (2006). *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de elementos da Envolvente dos Edifícios*. Lisboa: LNEC.

Moita, F. (1988). *Energia Solar Passiva - Volumes 1 e 2*. Direcção Geral de Energia.

NIST. (2010). Specific heat values are obtained primarily from the property routines prepared. In N. I. (NIST). Gaithersburg, MD. Retrieved from <https://web1.cs.wright.edu/people/faculty/sthomas/htappendix01.pdf>

Parlamento Europeu. (2002). *DIRECTIVA 2002/91/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios* (Vol. L 1/65). Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

Parlamento Europeu. (2010). *DIRECTIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)* (Vol. L 153/13). Jornal Oficial da União Europeia .

Parlamento Europeu. (2012). *DIRETIVA 2012/27/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética* (Vol. L 315). Jornal Oficial da União Europeia.

Parlamento Europeu. (2018). *DIRETIVA (UE) 2018/844 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética* (Vol. L 156/75). Jornal Oficial da União Europeia.

Pereira, N. (1994). Pátios e vilas de Lisboa, 1870-1930: a promoção privada do alojamento operário. (JSTOR, Ed.) *Análise social*, 509 - 524.

Peronato, G., Rey, E., & Andersen, M. (2018, 12). 3D model discretization in assessing urban solar potential: the effect of grid spacing on predicted solar irradiation. *Solar Energy*, 176, 334 - 349.

Peronato, G., Rey, E., & Andersen, M. (2018). 3D model discretization in assessing urban solar potential: the effect of grid spacing on predicted solar irradiation. (Elsevier, Ed.) *Solar Energy*, 176, 334 - 349.

Pinho, F. (2011). Aspetos construtivos e funcionais das paredes divisórias na construção tradicional. LOURENÇO, Paulo; et al. - *Paredes Divisórias: Passado, presente e futuro*. Porto: Ed. Universidade do Minho.

RCCTE. (2006, Abril 4). Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios. *Diário da República n.º 67/2006, Série I-A de 2006-04-04* (pp. 2468 - 2513). Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.

Rocha, F. (2016). *Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa*. Dissertação, Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências da Terra.

Rodrigues, L. (2016). *Vilas operárias um bairro artístico em Lisboa*. Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

Shiota, A., Koyamatsu, Y., Fuji, K., Mitani, Y., & Qudaih, Y. (2015). Development and Public Release of Solar Radiation Map for Effective Use of Solar Energy Based on GIS with Digital Surface Model. *International Journal of Electrical Energy*, 3.

Smelik, R., Tutenel, T., Bidarra, R., & Benes, B. (2014). A Survey on Procedural Modeling for Virtual Worlds. *Computer Graphics Forum*, 33, 31-50.

SolarGIS. (2019). *SolarGIS*. Retrieved maio 2020, from <https://solargis.com/maps-and-gis-data/tech-specs>

Teixeira, H. (2019). *Estudo de Simulação Numérica do Comportamento de Envidraçados com Películas de Controlo Solar*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.

Teixeira, M. (1992). As estratégias de habitação em Portugal, 1880-1940. (JSTOR, Ed.) *Análise Social*, 65 - 89.

Villalva, M. G. (1983). *Energia Solar Fotovoltaica*. Saraiva educação SA.

Zhang, X., Hong, Z., Yang, T., & Wu, Y. (2015). Building Integrated Solar Thermal (BIST) Technologies and Their Applications: A Review of Structural Design and Architectural Integration. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. doi:10.4172/2090-4541.100018

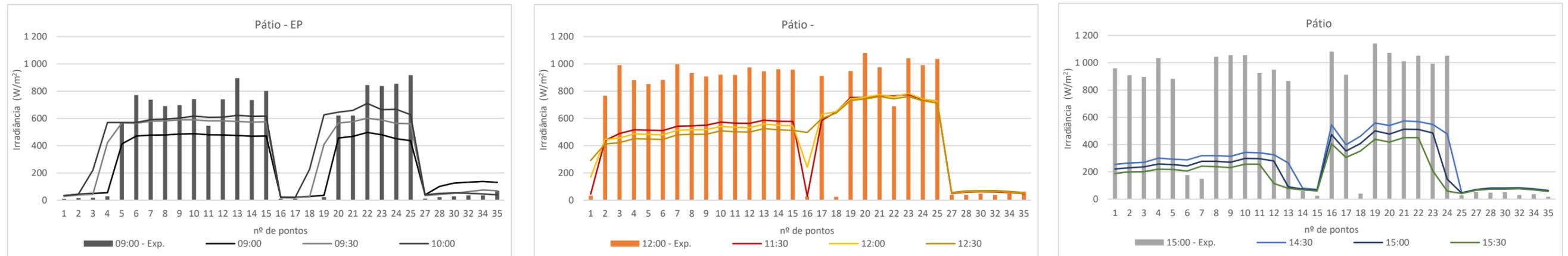
Zhu, R., Wong, M., You, L., Santi, P., Nichol, J., Ho, H., . . . Ratti, C. (2020). The effect of urban morphology on the solar capacity of three-dimensional cities. (Elsevier, Ed.) *Renewable Energy*, 153, 1111 - 1126.

# **Anexos**

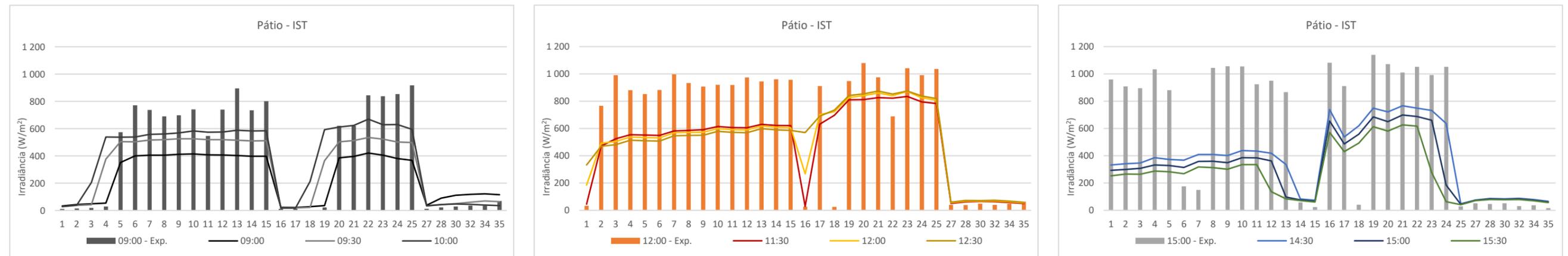


## Anexo A - Influência do ficheiro climático

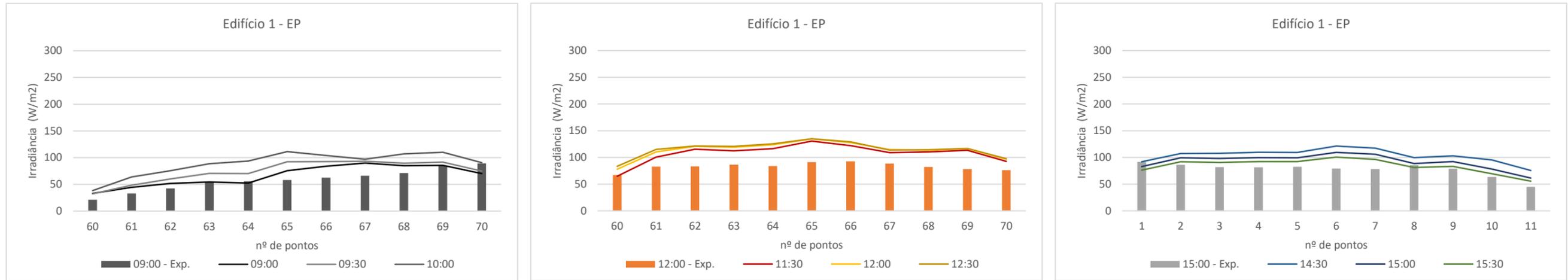
**Anexo A-1:** Representação da irradiância no pátio no equinócio utilizando o ficheiro climático EnergyPlus (EP), absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



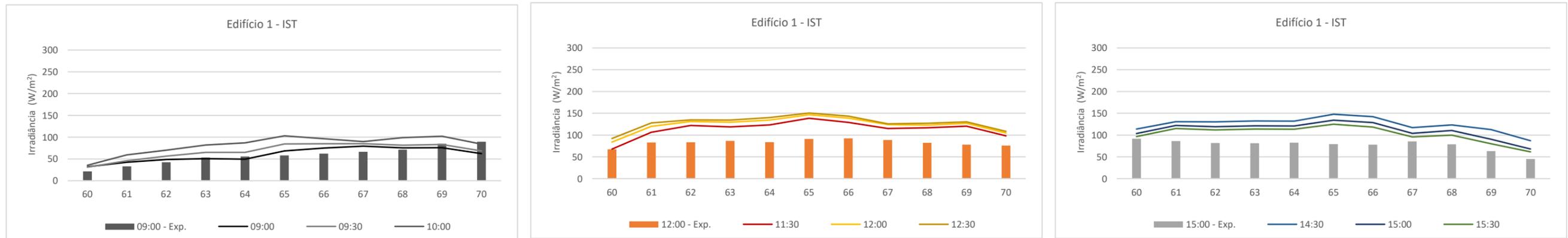
**Anexo A-2:** Representação da irradiância no pátio no equinócio utilizando o ficheiro climático do IST e e considerando a absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



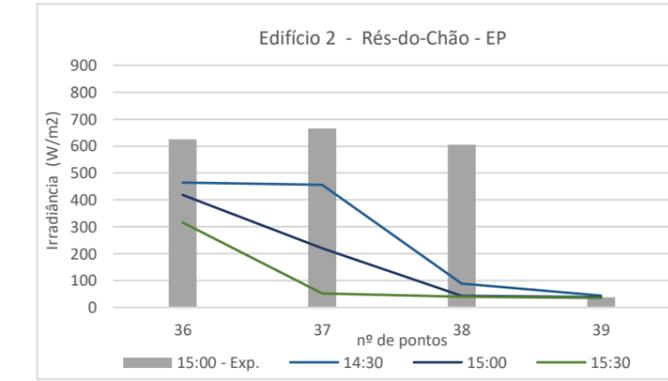
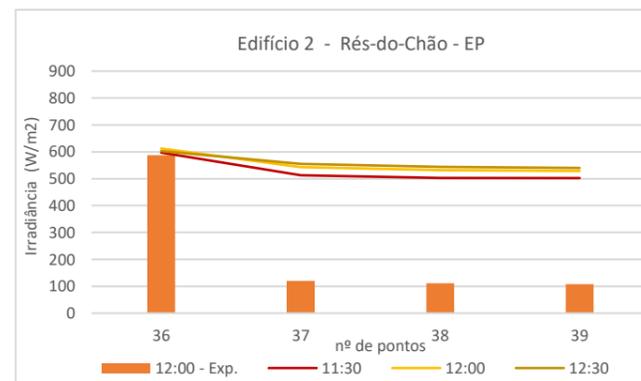
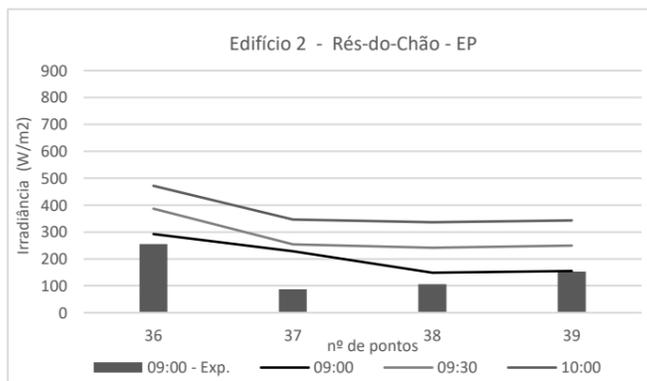
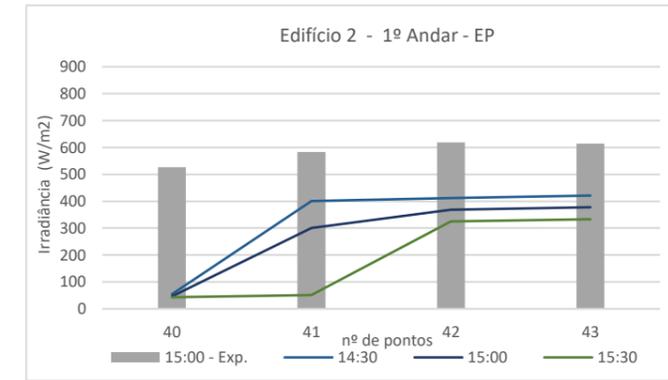
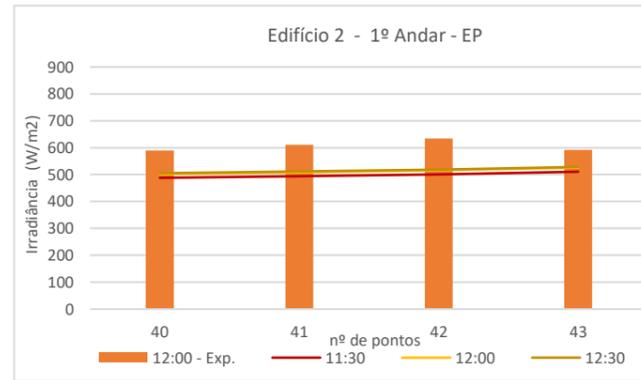
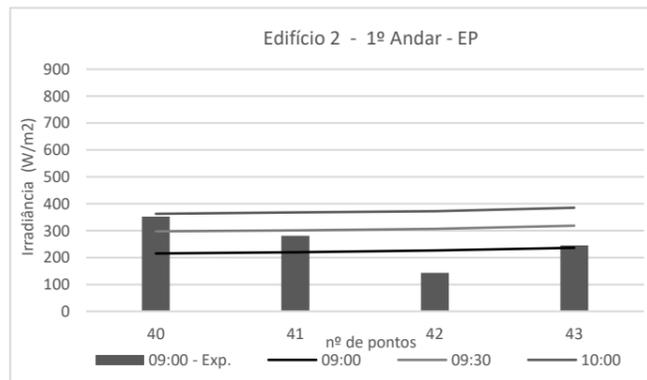
**Anexo A-3:** Representação da irradiância no Edifício 1 no equinócio utilizando o ficheiro climático EnergyPlus, absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



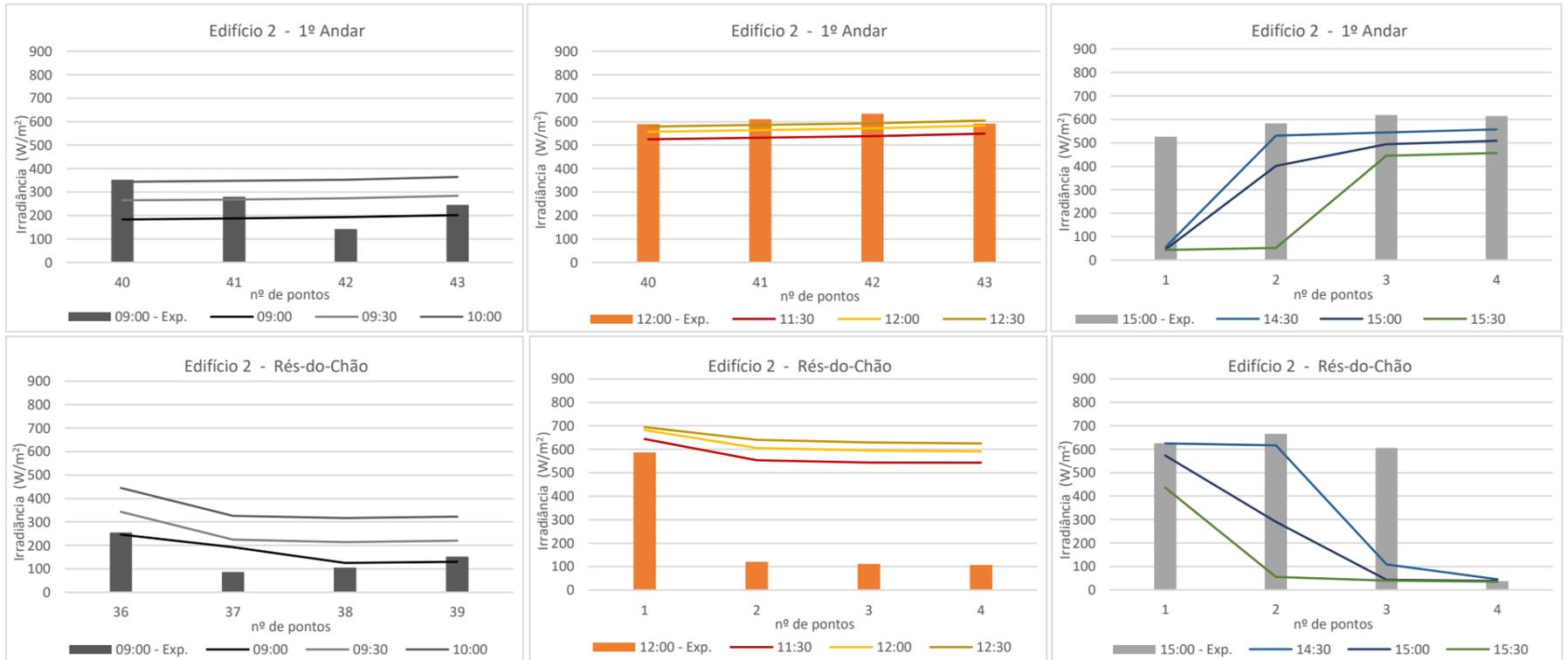
**Anexo A-4:** Representação da irradiância no Edifício 1 no equinócio utilizando o ficheiro climático IST e considerando a absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



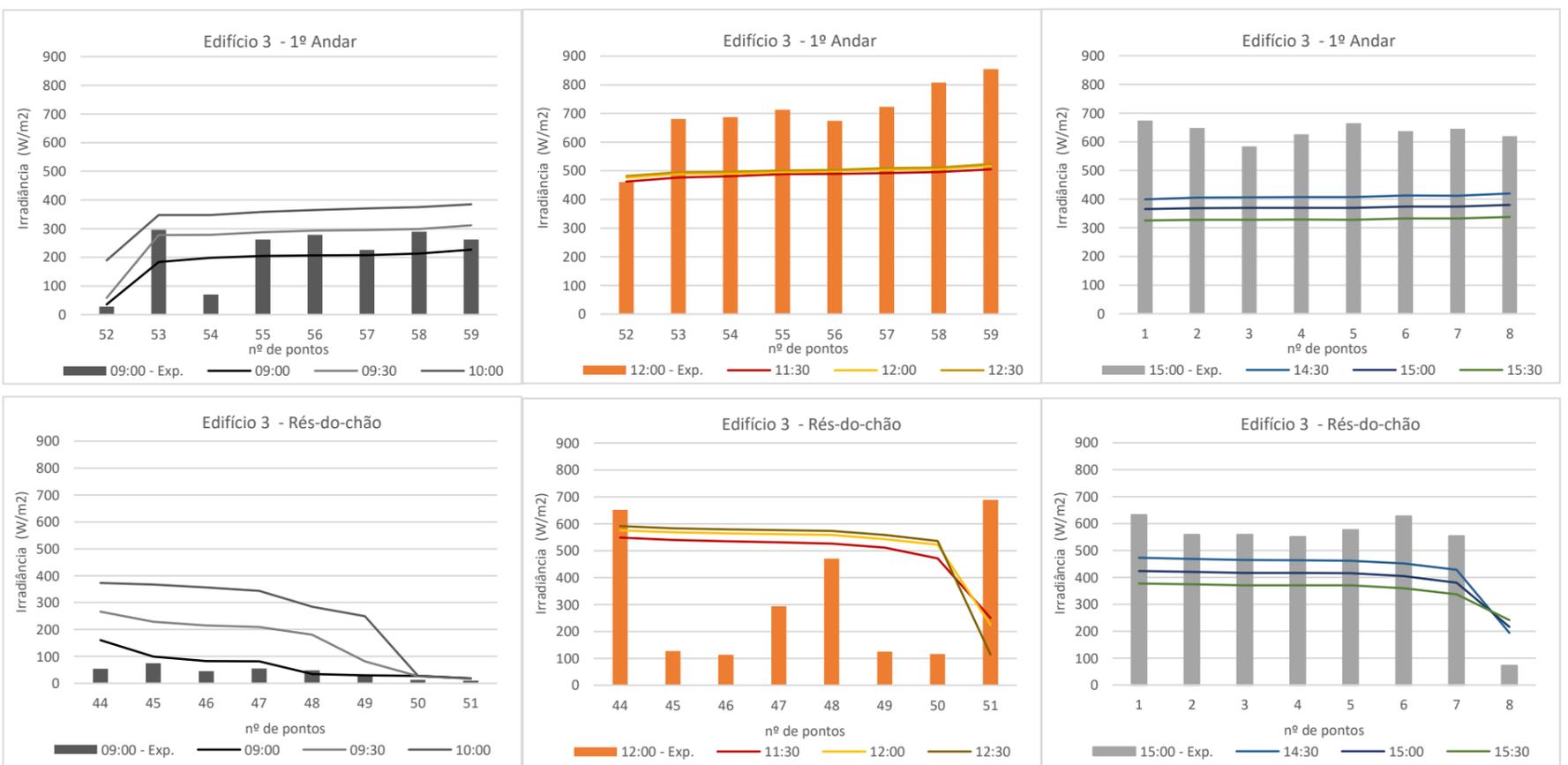
**Anexo A-5:** Representação da irradiância no Edifício 2 no equinócio utilizando o ficheiro climático EP, absortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



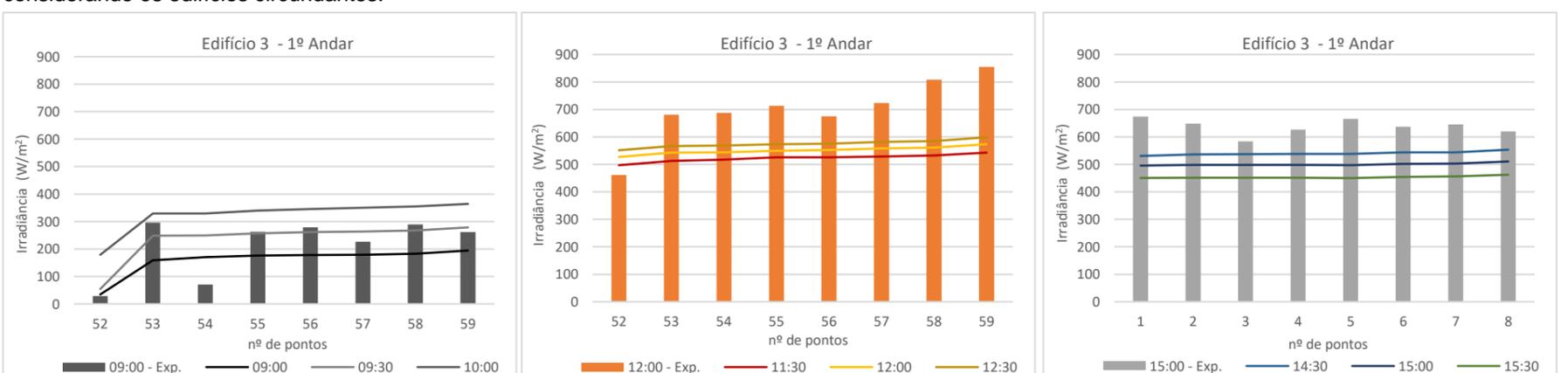
**Anexo A-6:** Representação da irradiância no Edifício 2 no equinócio utilizando o ficheiro climático IST e considerando a absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.

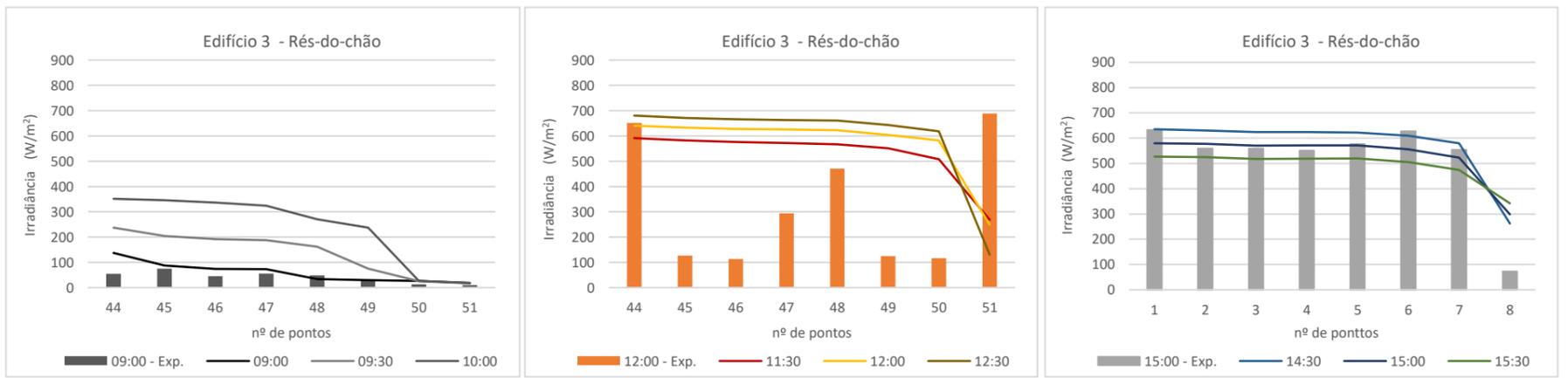


**Anexo A-7:** Representação da irradiância no Edifício 3 no equinócio utilizando o ficheiro climático EP, absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes

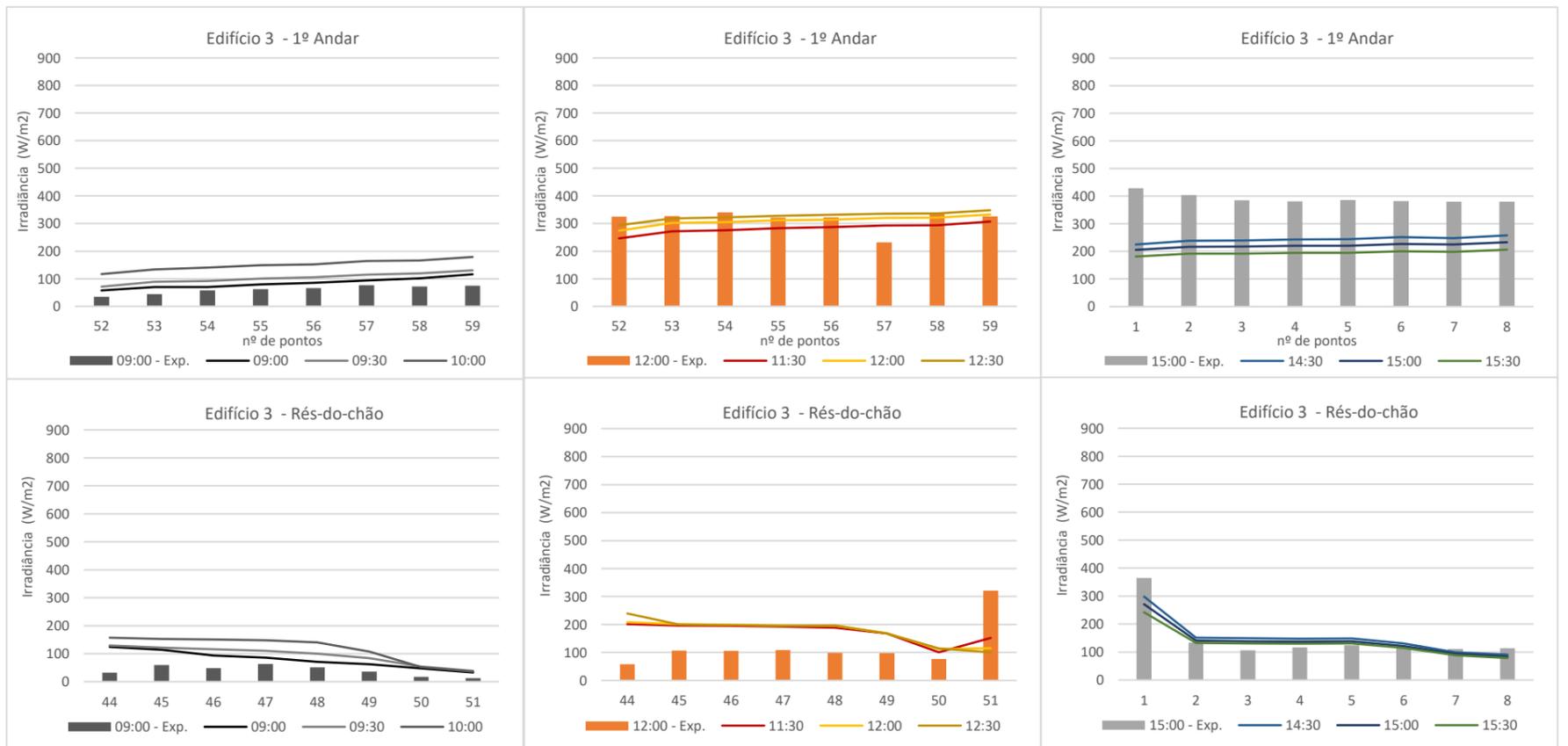


**Anexo A-8:** Representação da irradiância no Edifício 3 no equinócio utilizando o ficheiro climático IST e considerando a absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.

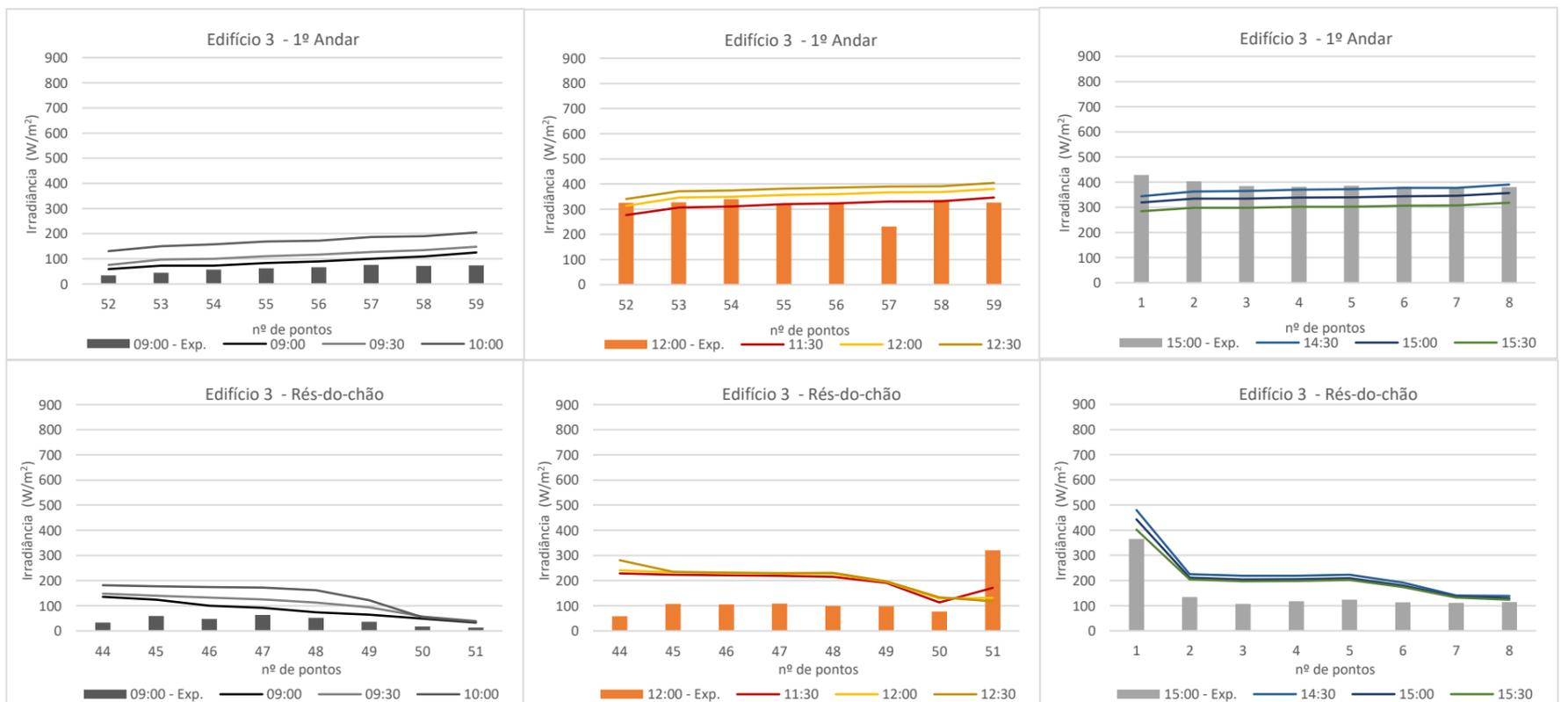




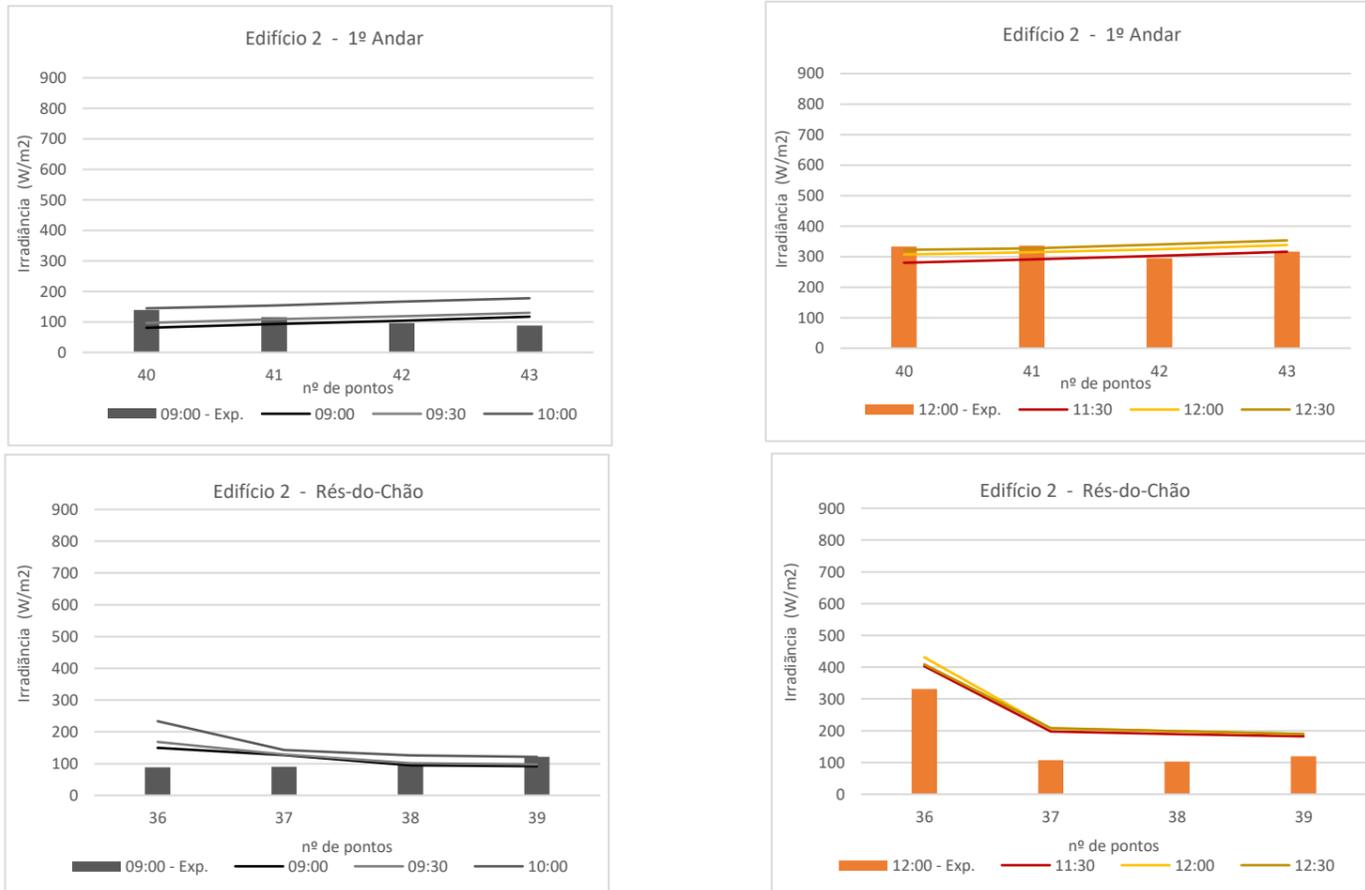
**Anexo A-9:** Representação da irradiância no Edifício 3 no solstício de verão com o ficheiro climático EP, absorância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes



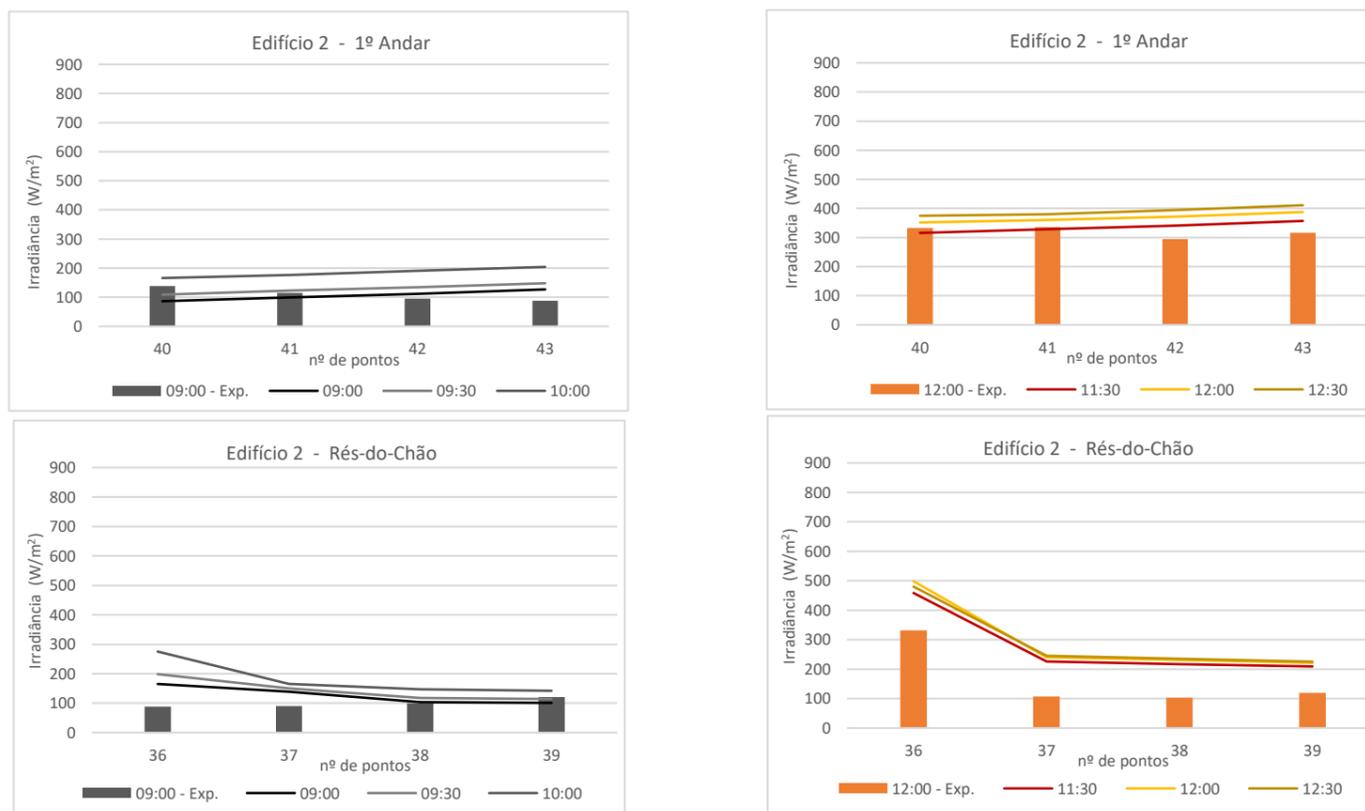
**Anexo A-10:** Representação da irradiância no Edifício 3 no solstício de verão com o ficheiro climático IST e absorância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



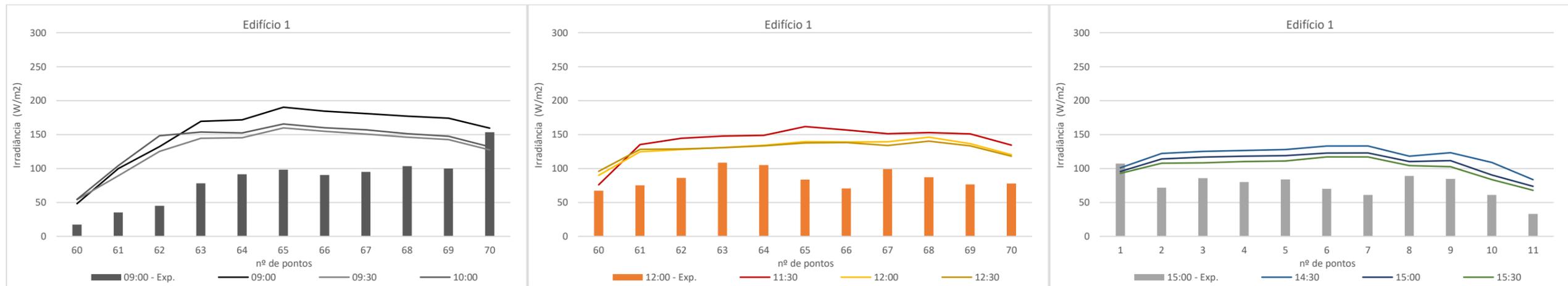
**Anexo A-11:** Representação da irradiância no Edifício 2 no solstício de verão com ficheiro climático EP, absortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes



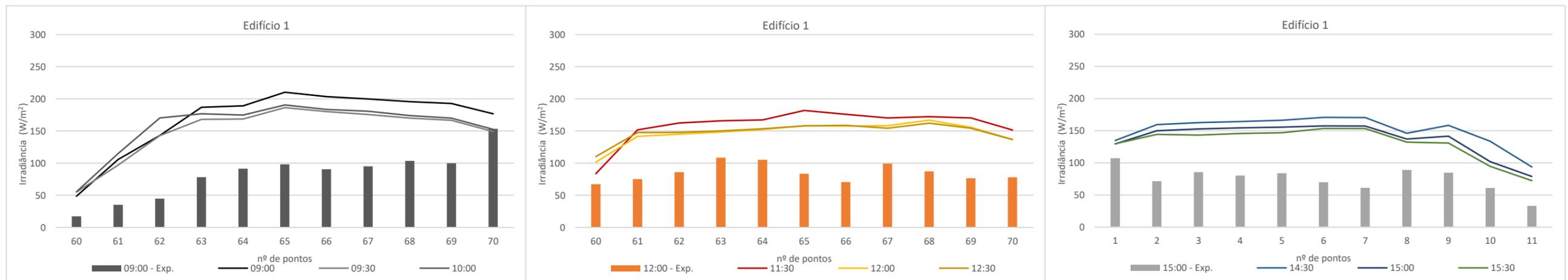
**Anexo A-12:** Representação da irradiância no edifício 2 no solstício de verão com ficheiro climático IST e absortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



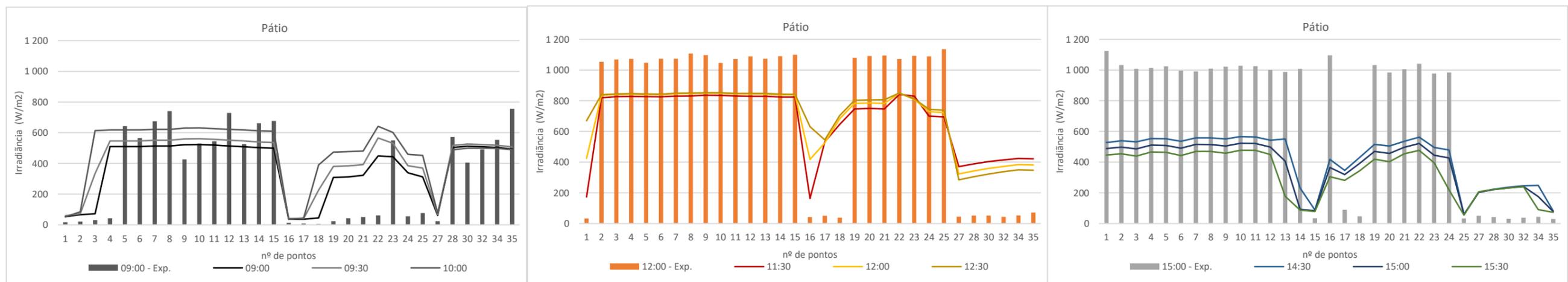
**Anexo A – 13:** Representação da irradiância no Edifício 1 no solstício de verão com ficheiro climático EP, absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



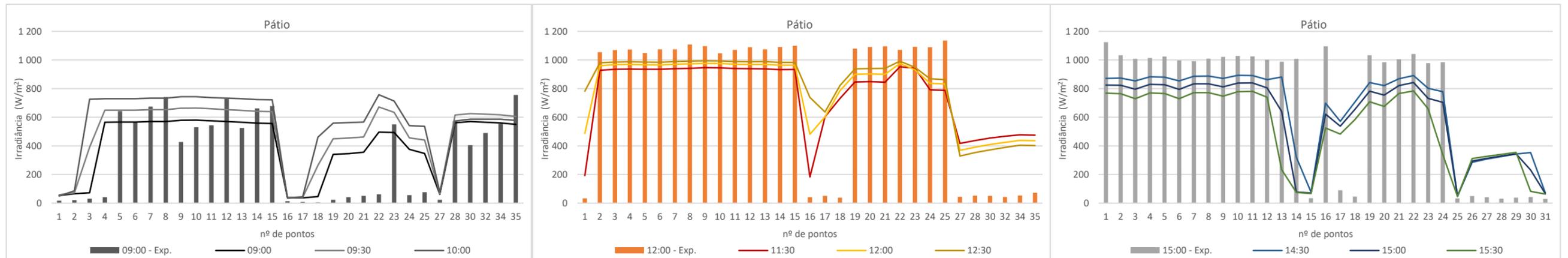
**Anexo A – 14:** Representação da irradiância no Edifício 1 no solstício de verão com ficheiro climático IST, absorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



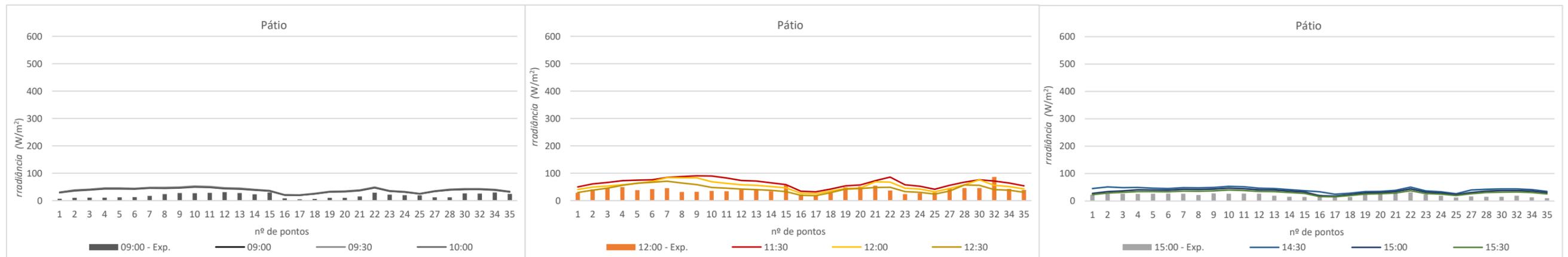
**Anexo A – 15:** Representação da irradiância no Pátio no solstício de verão com ficheiro climático EP, a bsorptância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



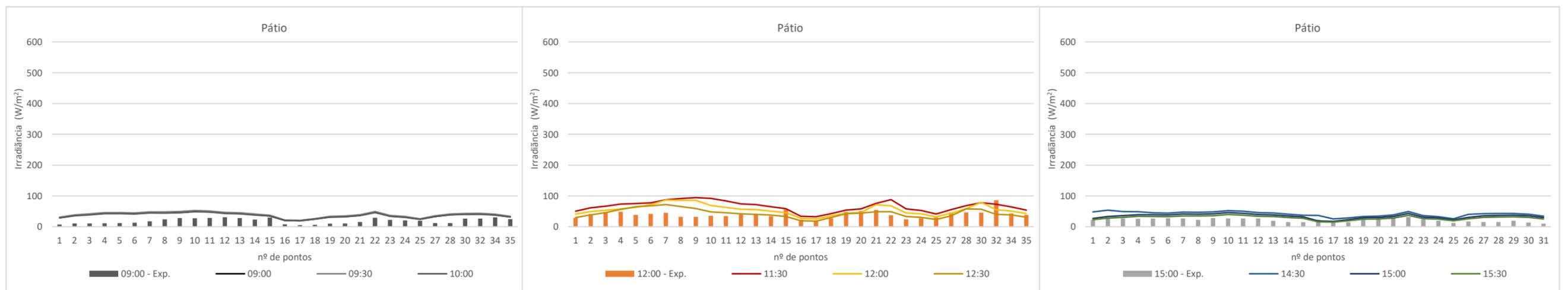
**Anexo A – 16:** Representação da irradiância no Pátio no solstício de verão com ficheiro climático IST, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



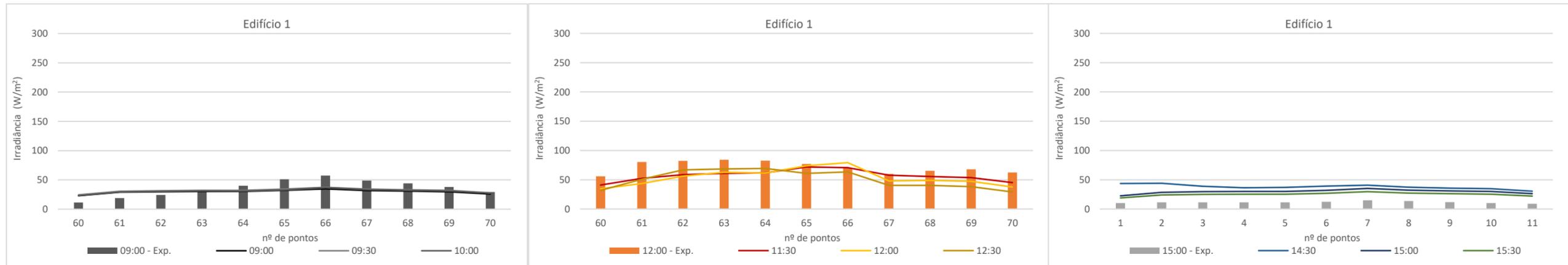
**Anexo A – 17:** Representação da irradiância no Pátio no solstício de verão com ficheiro climático EP, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



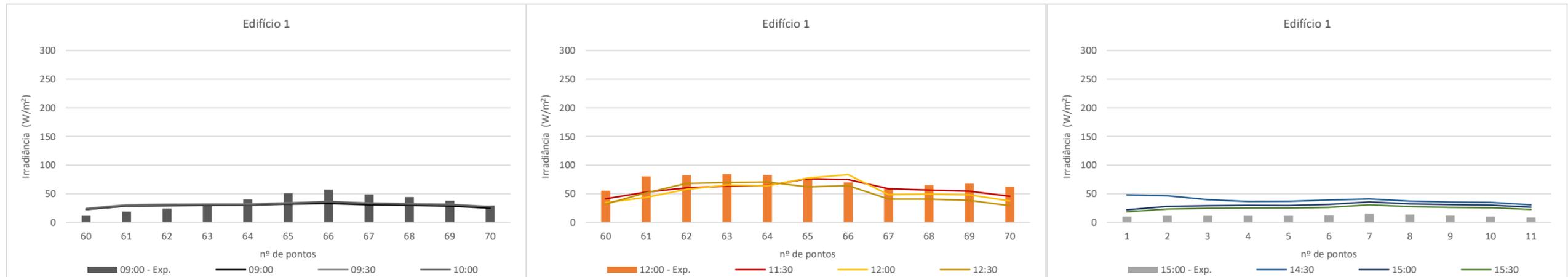
**Anexo A – 18:** Representação da irradiância no Pátio no solstício de inverno com ficheiro climático IST, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.



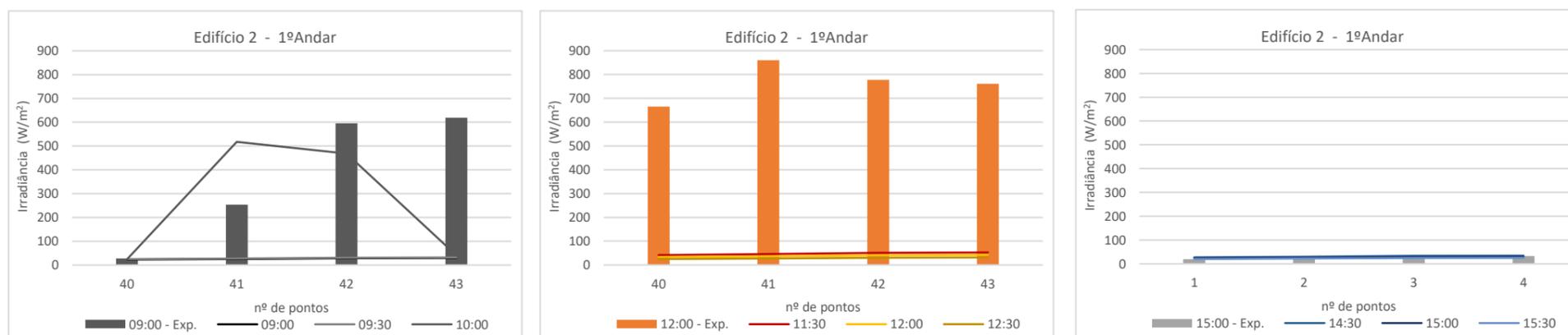
**Anexo A – 19:** Representação da irradiância no Edifício 1 no solstício de inverno com ficheiro climático EP, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes.

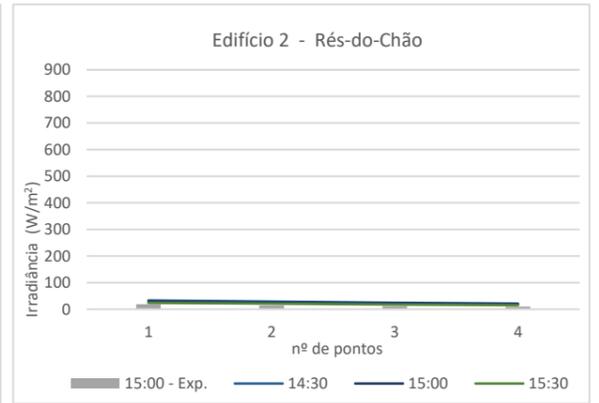
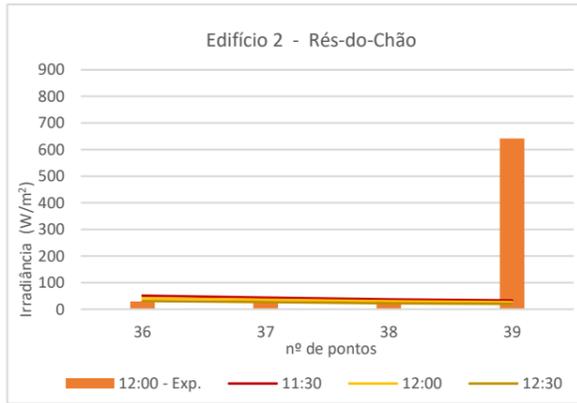
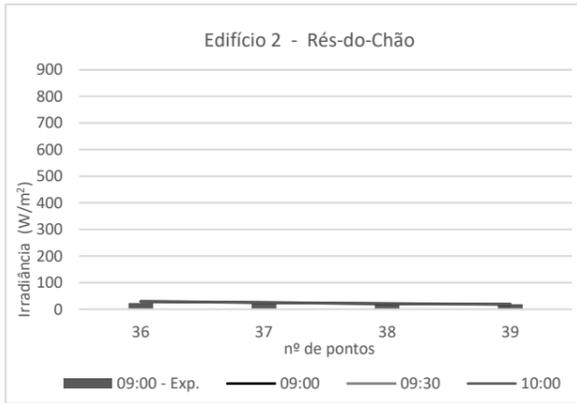


**Anexo A – 20:** Representação da irradiância no Edifício 1 no solstício de inverno com ficheiro climático IST, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes

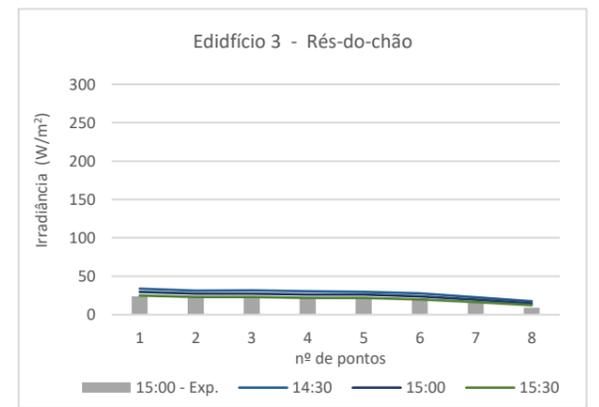
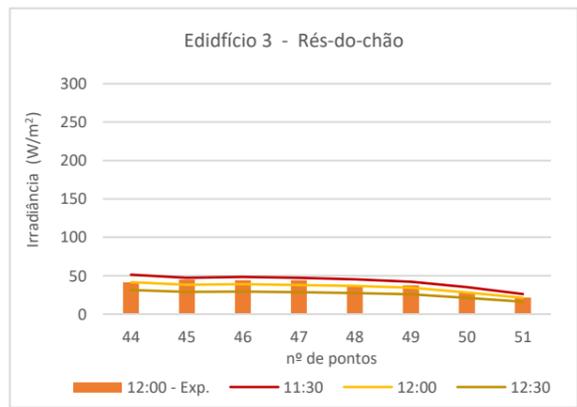
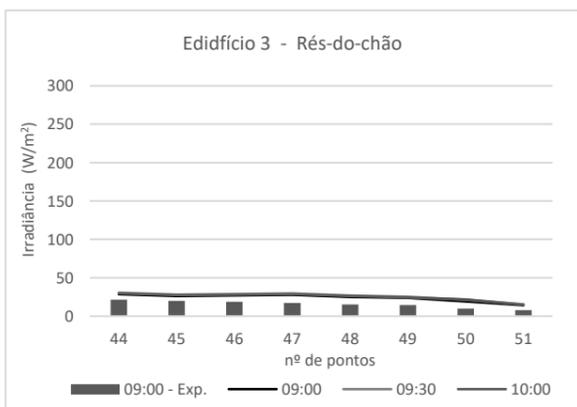
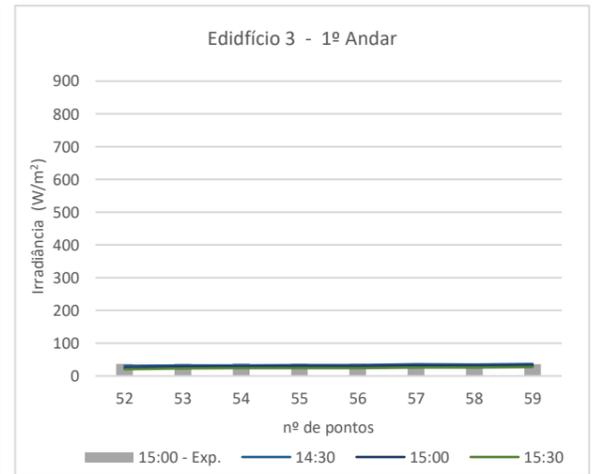
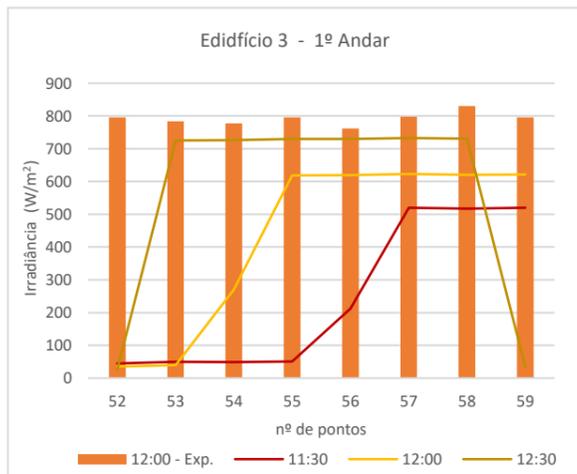
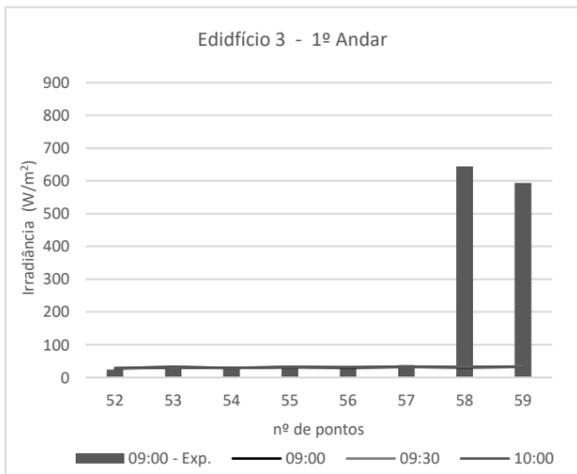


**Anexo A – 21:** Representação da irradiância no Edifício 2 no solstício de inverno com ficheiro climático EP, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circunda

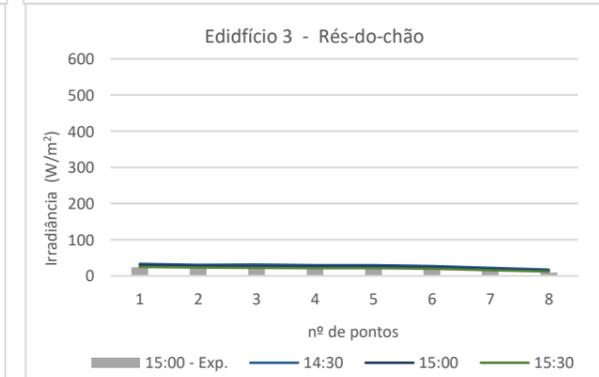
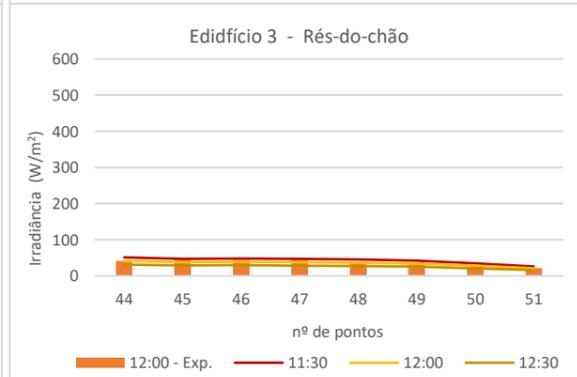
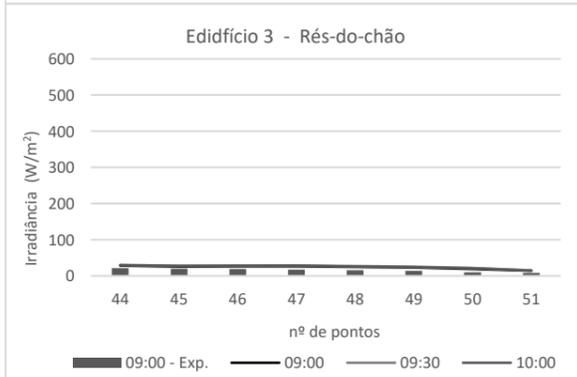
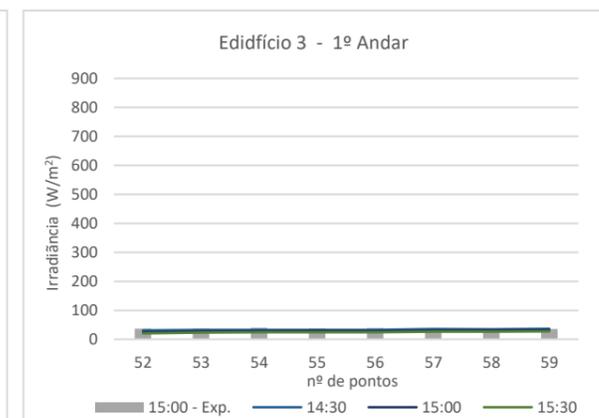
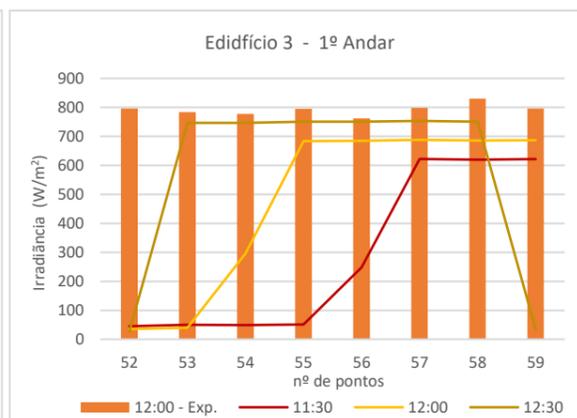
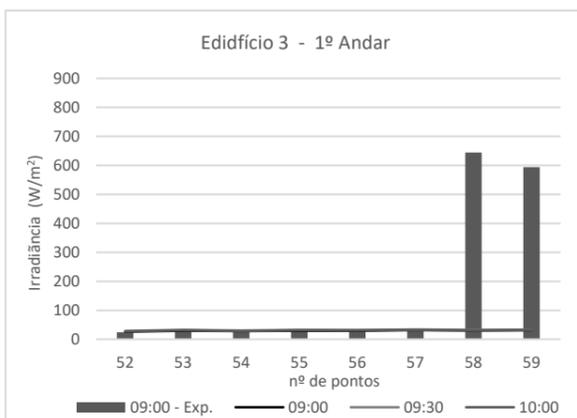




**Anexo A – 22:** Representação da irradiância no Edifício 3 no solstício de inverno com ficheiro climático IST, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios

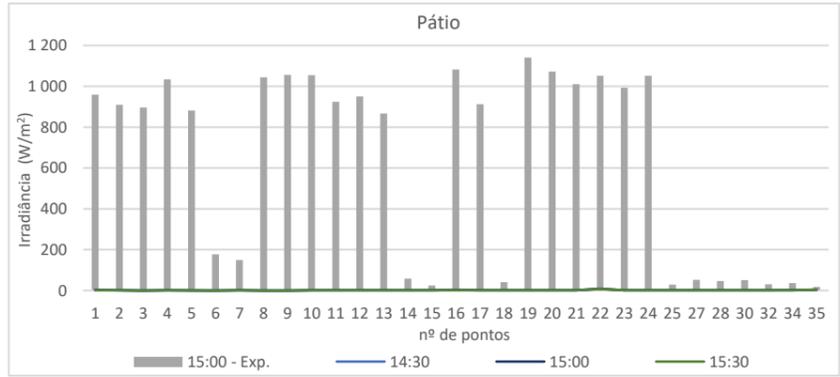
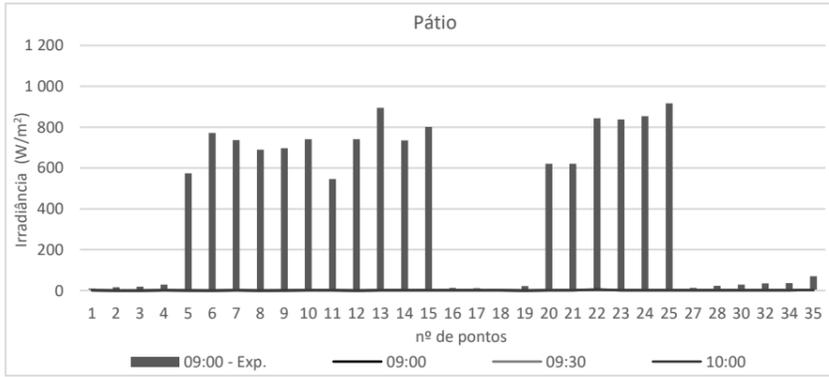


**Anexo A – 22:** Representação da irradiância no Edifício 3 no solstício de inverno com ficheiro climático IST, a bsortância solar da literatura e considerando os edifícios circundantes

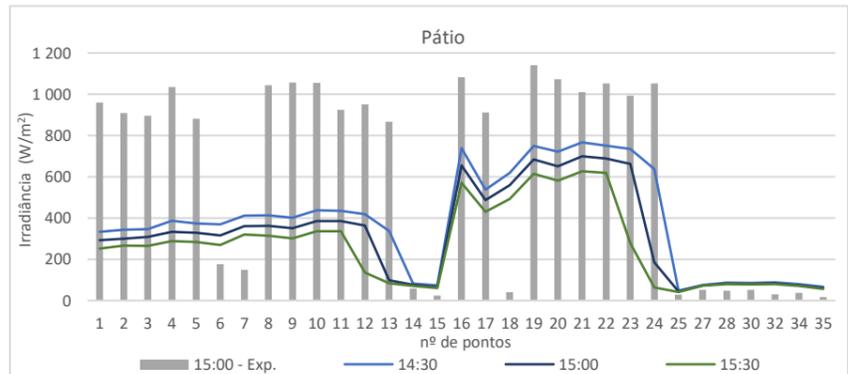
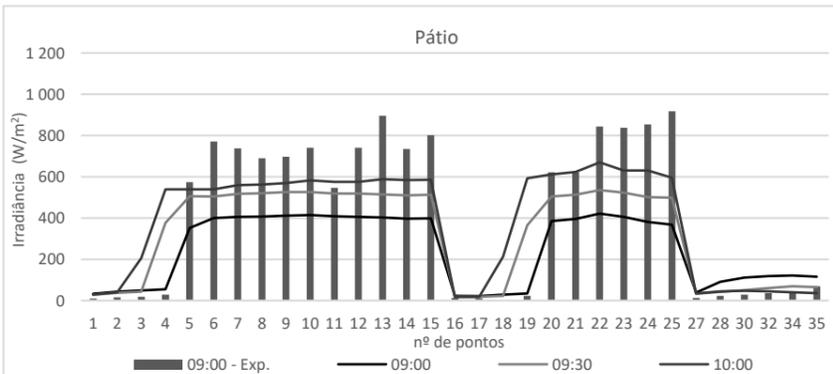


## Anexo B- Influência da semântica do objeto

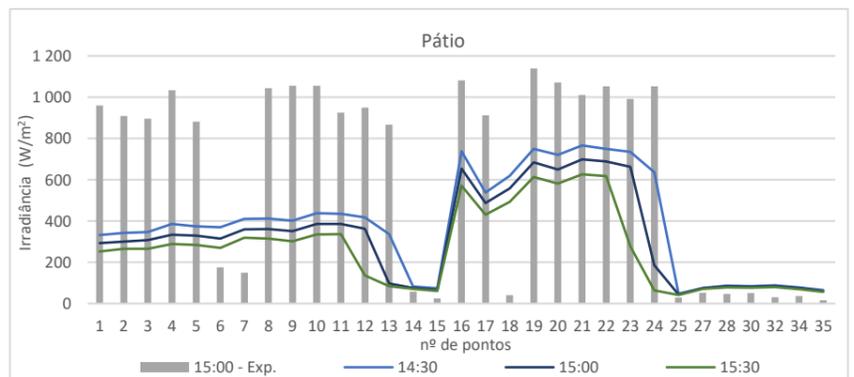
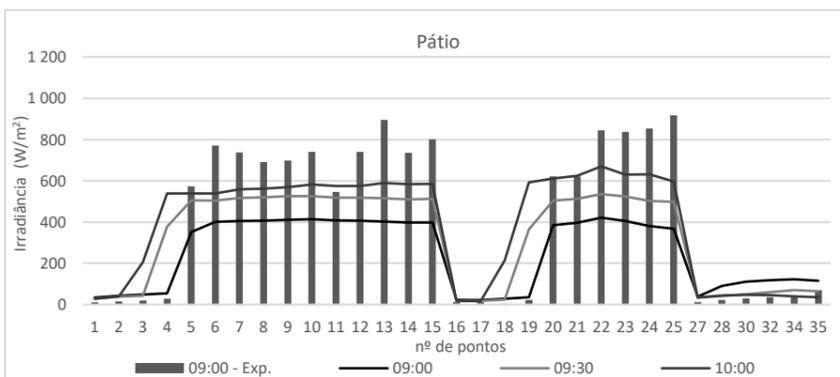
### Anexo B-1: Simulação no equinócio, pátio com superfície do tipo Floor



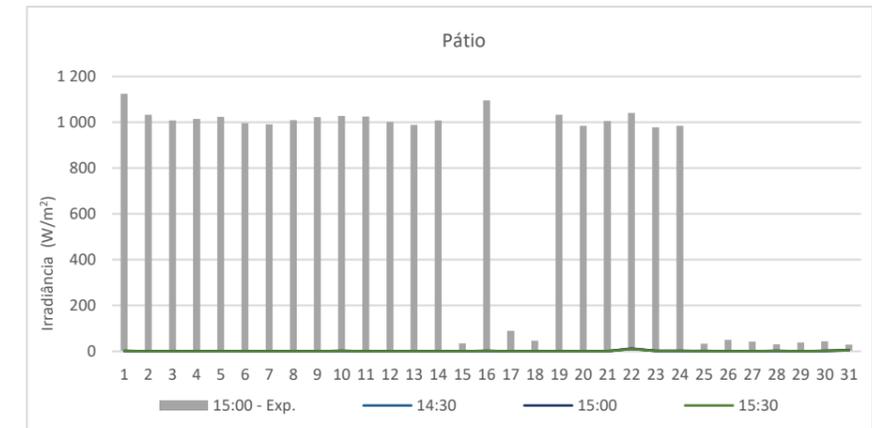
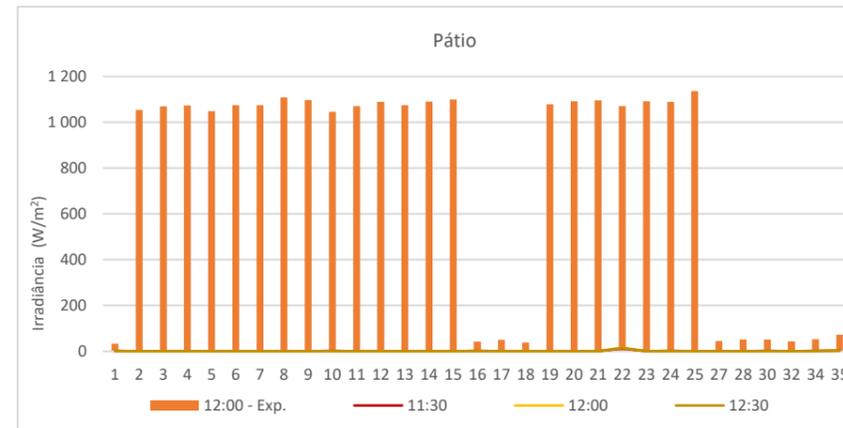
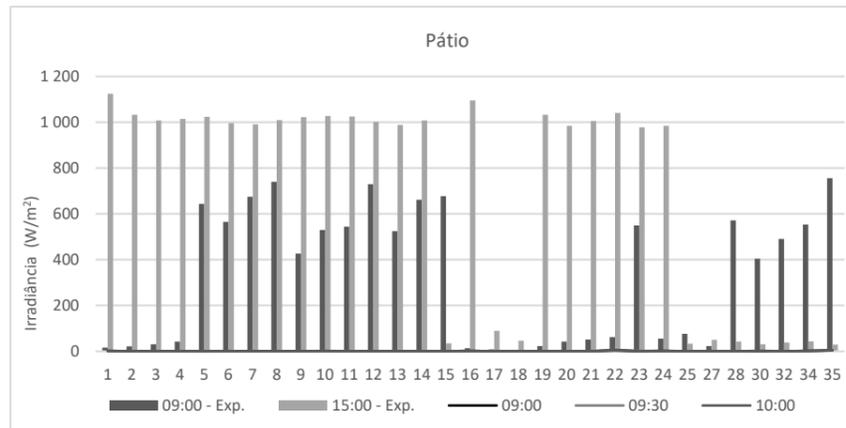
### Anexo B-2: Simulação no equinócio, pátio com superfície do tipo Wall.



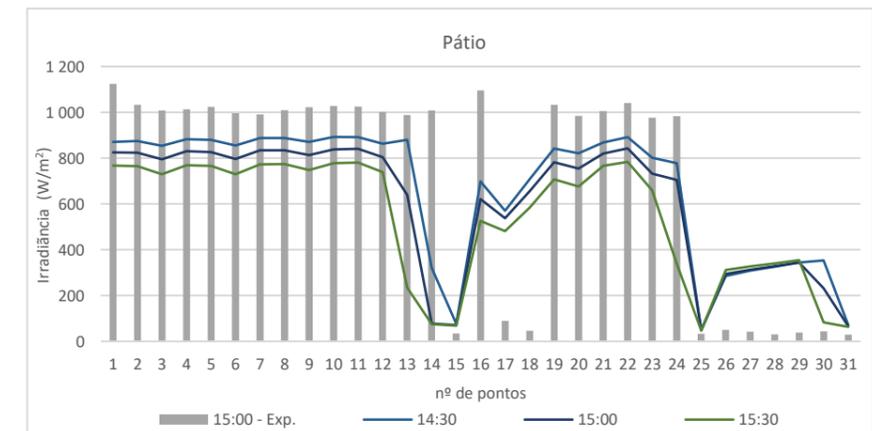
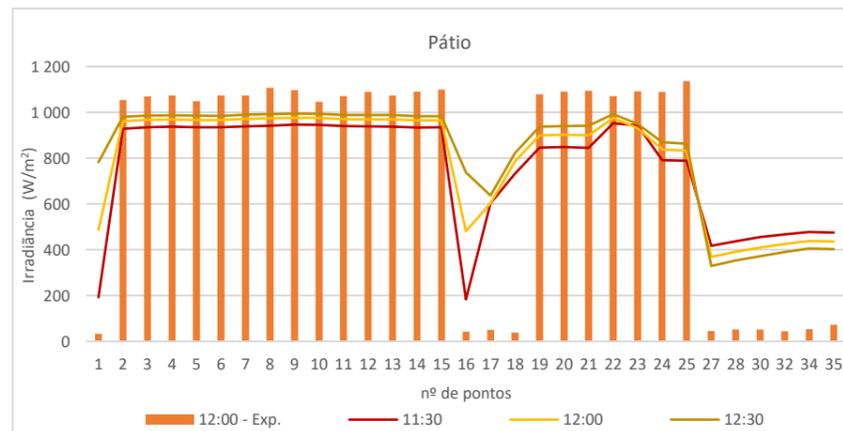
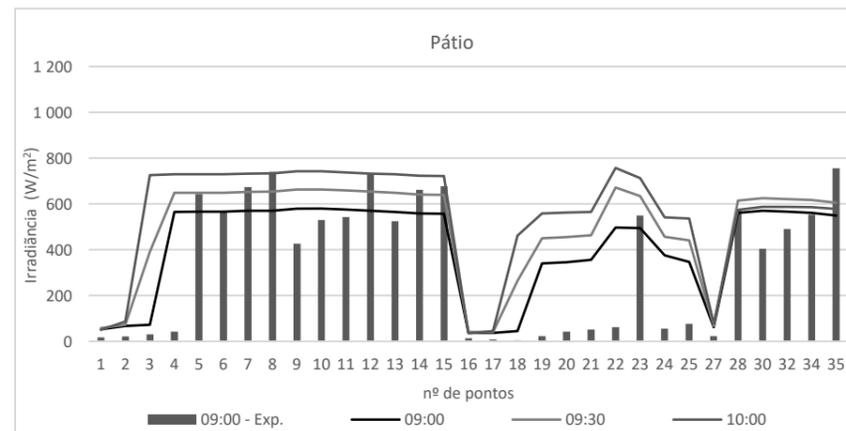
### Anexo B-3: Simulação no equinócio, pátio com superfície do tipo Roof.



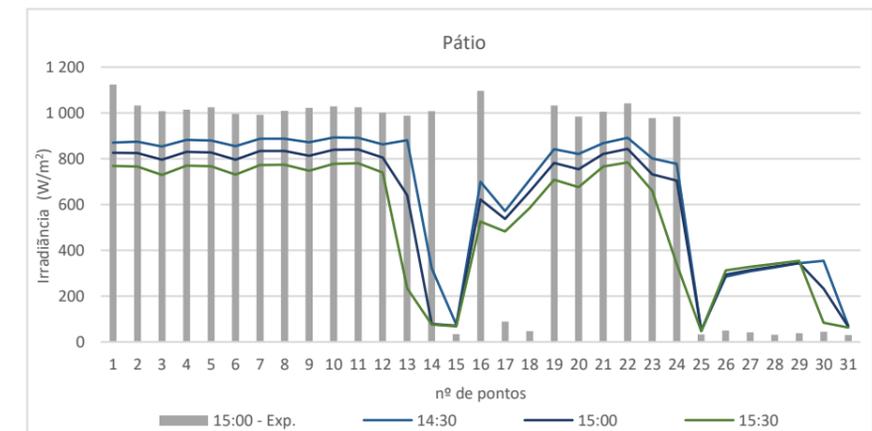
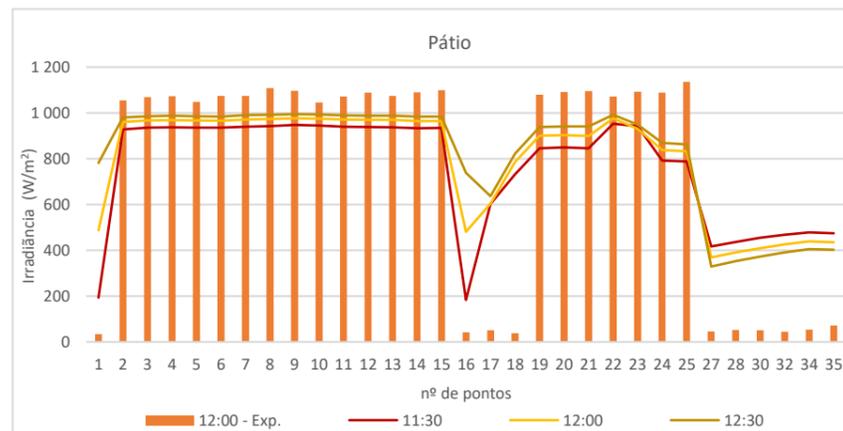
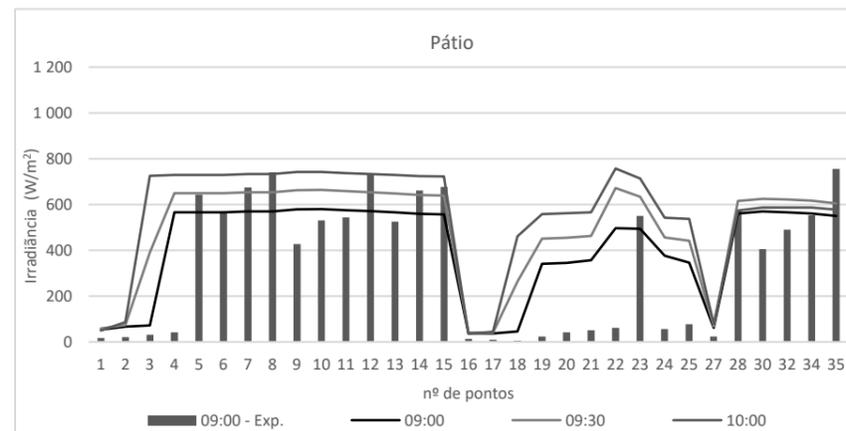
**Anexo B-4:** Simulação no solstício de verão, Pátio com superfície tipo *Floor*



**Anexo B-5:** Simulação no solstício de verão, Pátio com superfície tipo *Wall*

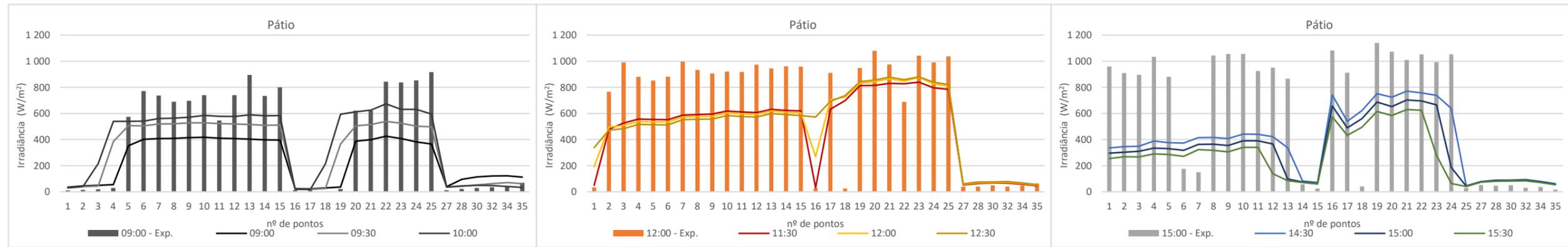


**Anexo B-6:** Simulação no solstício de verão, Pátio com superfície tipo *Roof*

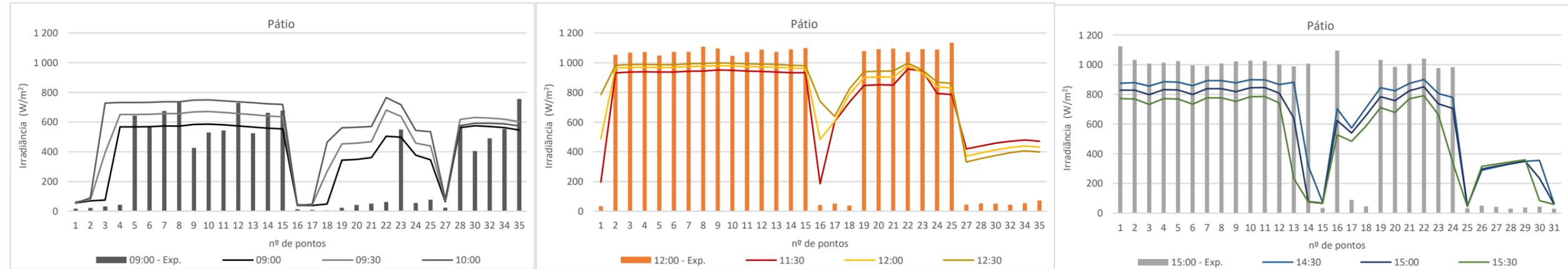


## Anexo C- Influência do contexto urbano

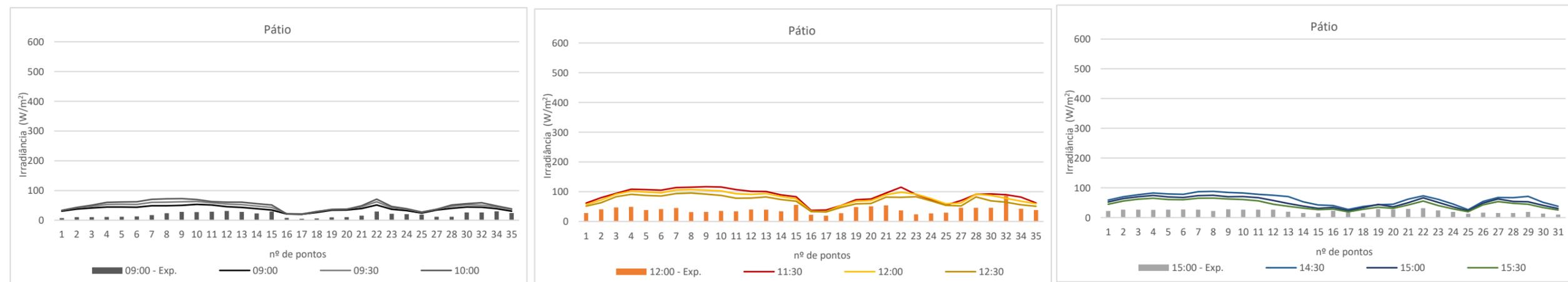
Anexo C – 1: Representação da irradiância no Pátio no equinócio apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes.



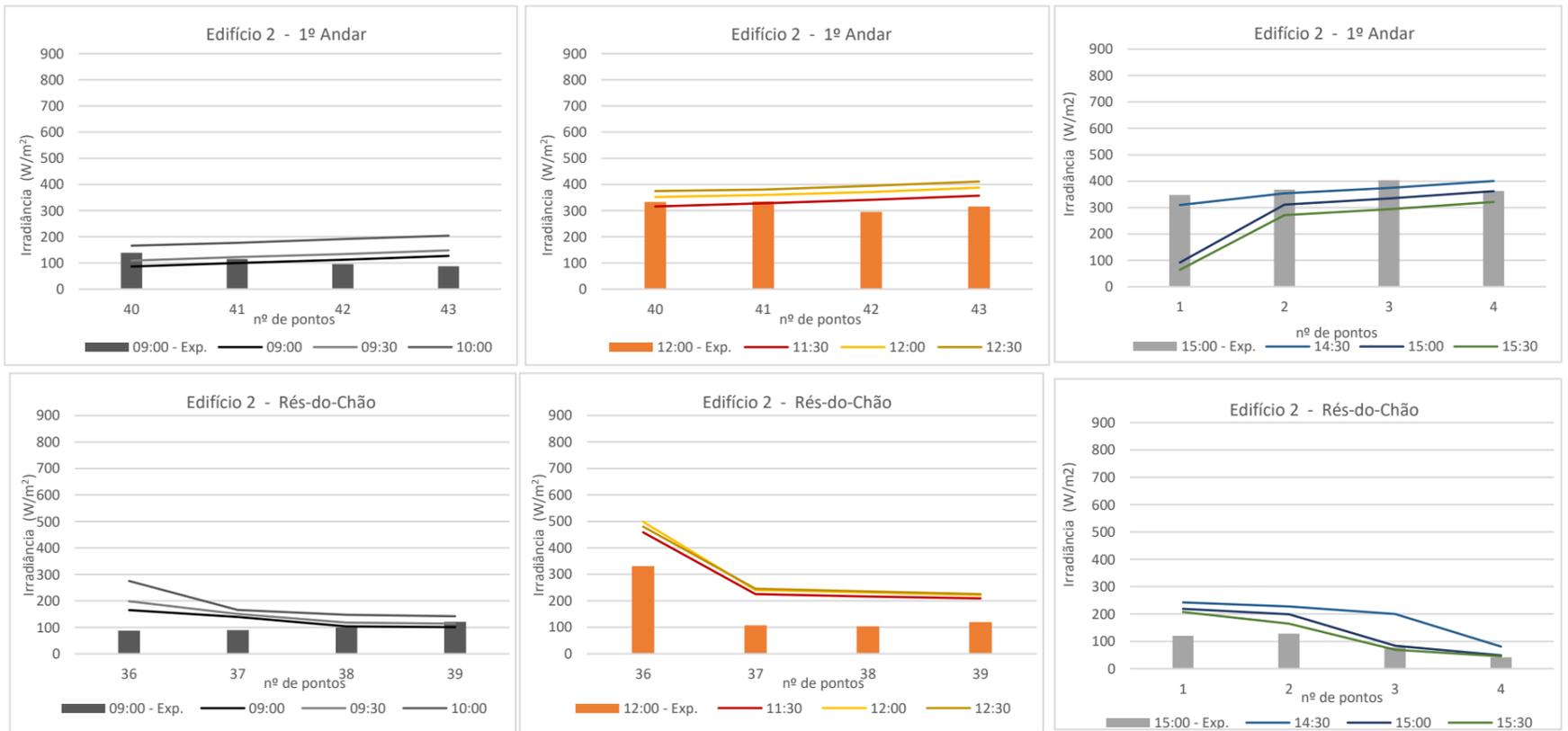
Anexo C – 2: Representação da irradiância no Pátio no solstício de verão apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes.



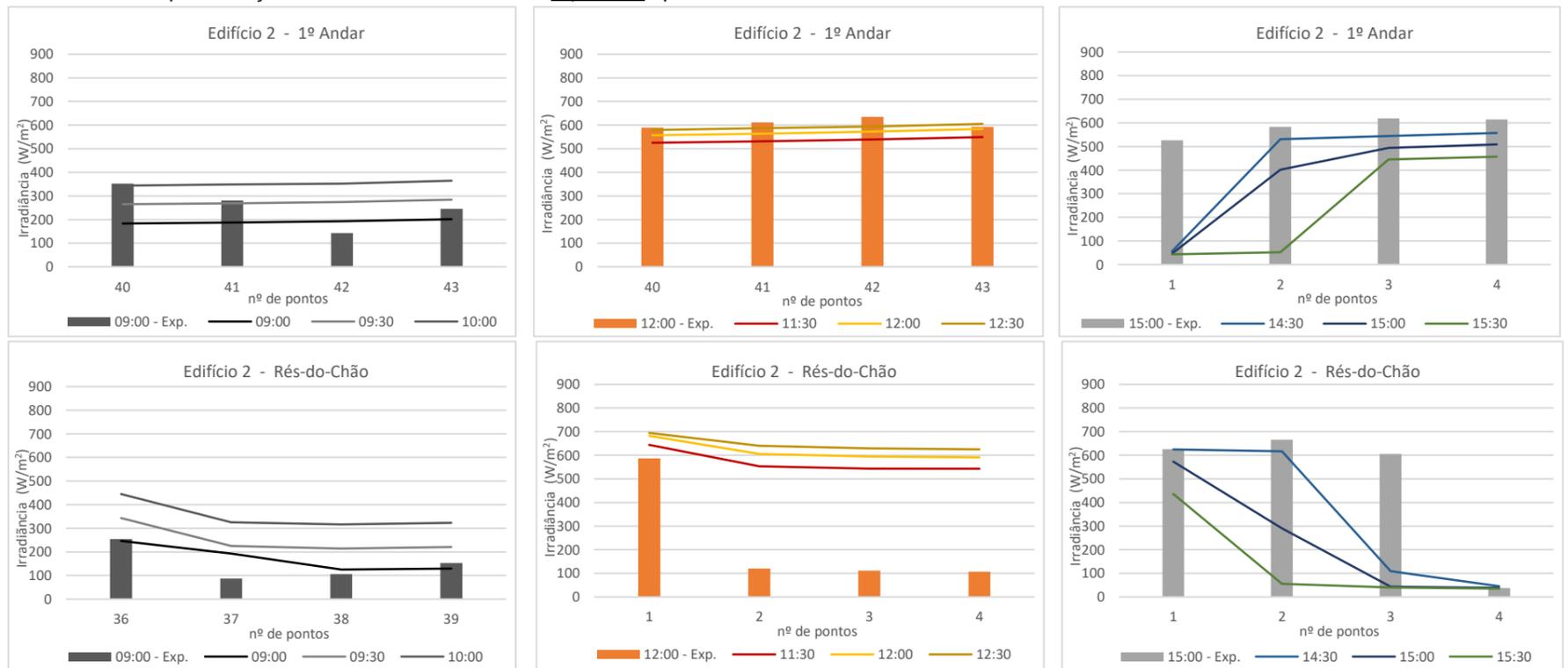
Anexo C – 3: Representação da irradiância no Pátio no solstício de inverno apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes



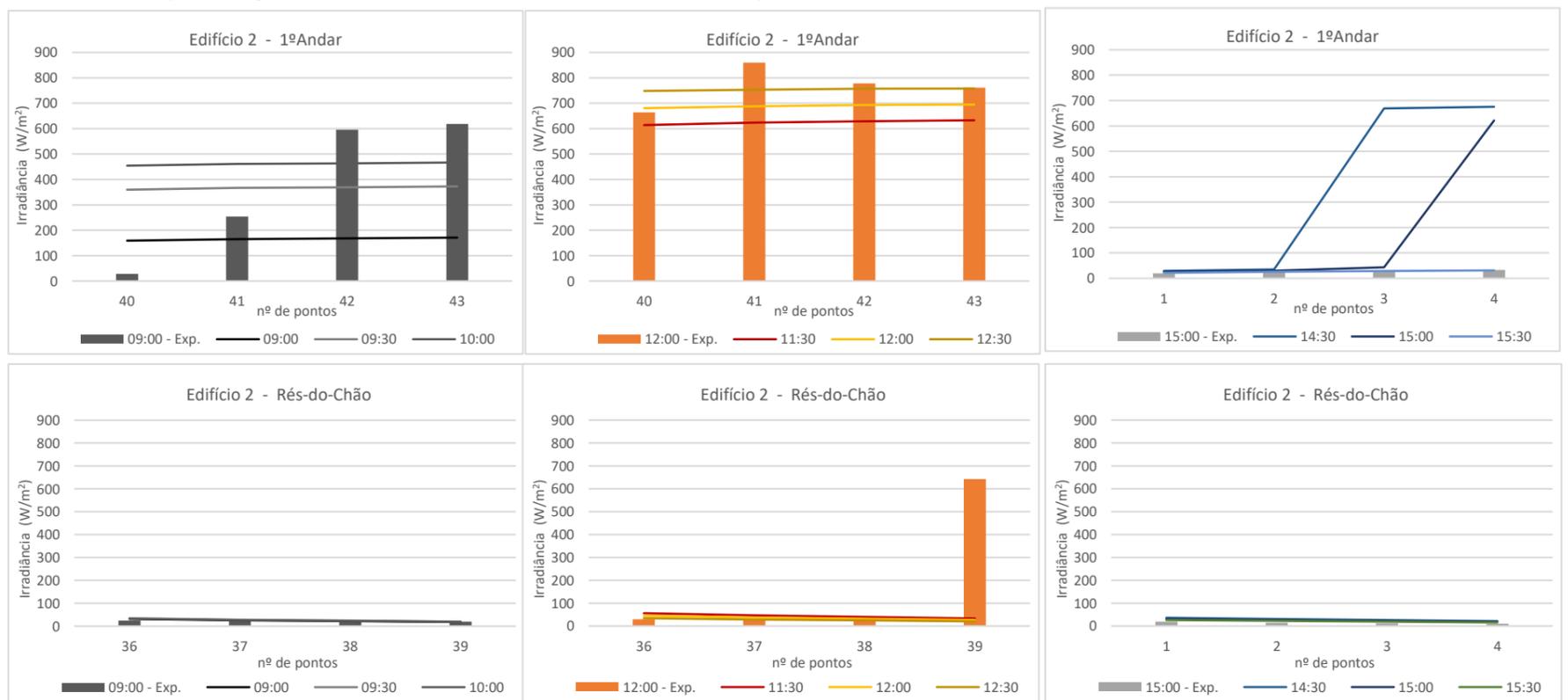
Anexo C – 4: Representação da irradiância no Pátio no solstício de verão apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes



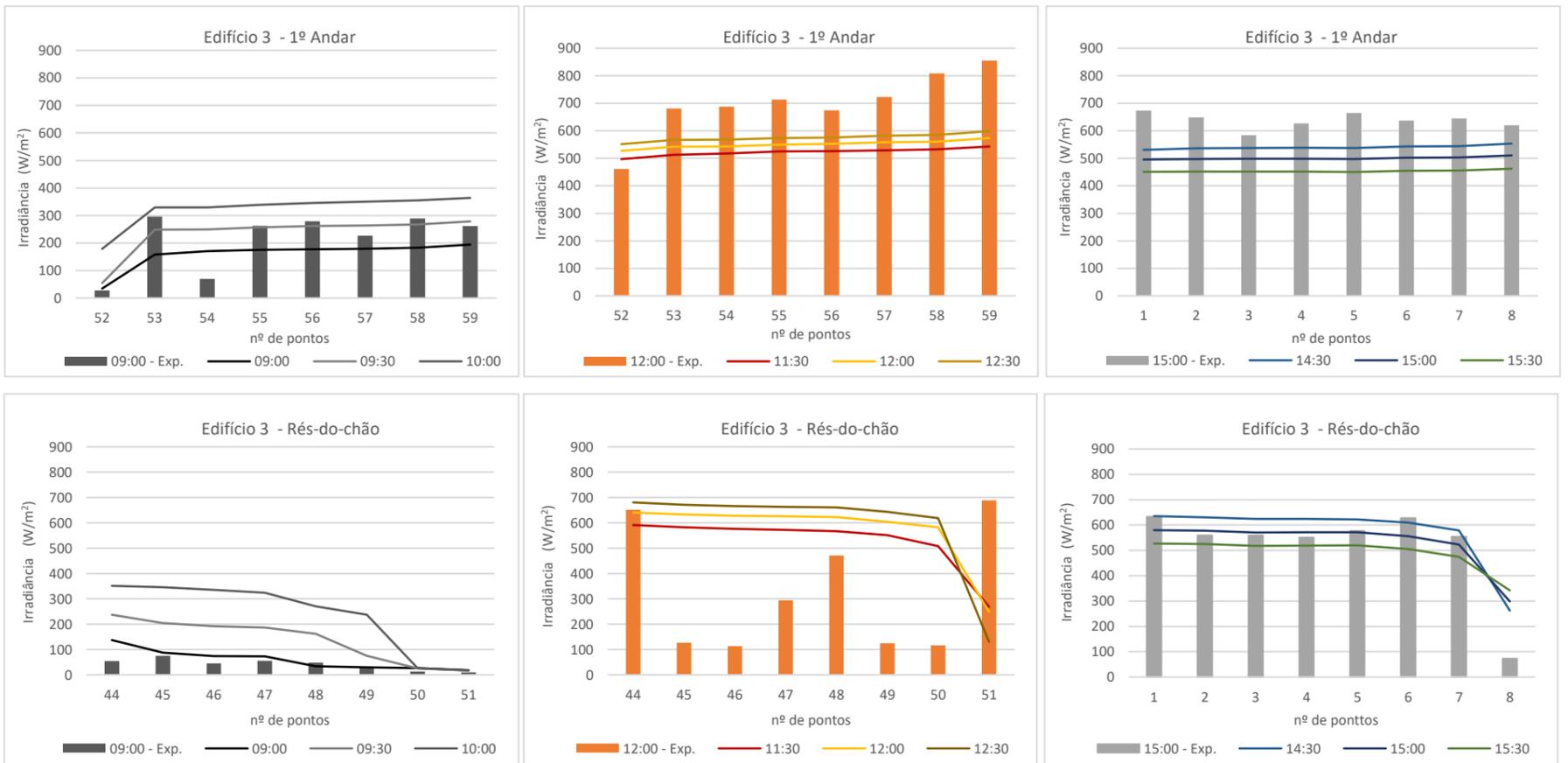
Anexo C – 5: Representação da irradiância no Pátio no equinócio apenas considerando a Vila Luz sem os edifício



Anexo C – 6: Representação da irradiância no Pátio no solstício de inverno apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes



**Anexo C-7:** Representação da irradiância no Edifício 3 no equinócio apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes.



**Anexo A-9:** Representação da irradiância no Edifício 3 no solstício de verão apenas considerando a Vila Luz sem os edifícios circundantes.

