

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS VERDES

Diogo Miguel Matias Cabrita Serpa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Prof.^a Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Prof.^a Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Júri

Presidente: Prof. Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Orientador: Prof.^a Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Maio de 2016

Resumo

A fachada verde é uma solução construtiva recente em Portugal que proporciona um melhor comportamento térmico ao edifício e à sua envolvente. Contribui para a redução das necessidades de sistemas de climatização na edificação, aumenta os espaços verdes em meio urbano e atenua as condições climáticas adversas que têm vindo a agravar-se. O presente estudo visa analisar o comportamento térmico de fachadas verdes no clima mediterrânico em dois períodos com características climáticas diferentes. Para tal, utilizaram-se os resultados de campanhas de monitorização efetuado por Prazeres (2015) nos meses de Fevereiro, Março, Junho e Julho em duas fachadas e uma cobertura verde, localizadas na área metropolitana de Lisboa. Estes dados experimentais foram utilizados para calibrar dois modelos matemáticos desenvolvidos por Susorova et al. (2013) e por Malys et al. (2014), sendo que o primeiro se refere a uma fachada com vegetação do tipo trepadeira (DGF, direct green façade) e o segundo a uma fachada com vegetação independente do edifício (LW, living wall). Estes modelos foram implementados em Excel tendo-se recorrido também aos programas EnergyPlus (2013), OpenStudio (2013) e GoogleSketchup (2013) para o cálculo da radiação solar incidente nas fachadas. Os modelos simularam as temperaturas da superfície exterior da fachada e da cobertura verdes com coeficientes de correlação próximos de 0,9 e com erro *RMSE* menor que 4°C. Verificou-se também que o modelo de Malys et al. (2014) simula com maior precisão os valores experimentais, dado que as fachadas em estudo são também do tipo LW. Ambos os modelos necessitaram do conhecimento prévio do coeficiente de transmissão térmica, este coeficiente foi determinado pelas resistências térmicas das camadas constituintes da fachada e da cobertura, pelas médias progressivas das temperaturas ambientais e superficiais. Confirmou-se que os valores calculados são significativamente diferentes, porém não tiveram impacto direto nos valores estimados pelos modelos da temperatura da superfície exterior da fachada e da cobertura. Concluiu-se também que a vegetação proporcionou um melhor comportamento térmico da parede na redução das temperaturas superficiais exteriores e que esta redução é maior quando existe um aumento do índice de área da folha (LAI, leaf area index) e da dimensão da planta.

Palavras-chave: Fachadas verdes, temperatura da folha, coeficiente de transmissão térmica, temperatura superficial exterior

Abstract

The green façade is an innovative constructive solution in Portugal that provides an increase on building thermal performance and on its surroundings. It contributes to air-conditioning reduction, increases green spaces in urban environment and mitigates the adverse weather conditions. This study aims to analyze the thermal behavior of green facades in Mediterranean climate in two periods with different climatic characteristics. The monitoring campaign was carried out by Prazeres (2015) in February, March, June and July in two green façades and in one green roof, in Lisbon metropolitan area. These data were validated using two mathematical models made by Susorova et al. (2013) and Malys et al. (2014). The first relates to a facade with vine type vegetation (DGF, direct green façade) and the second to an independent facade with vegetation (LW, living wall). These models were implemented in Excel and it was also used EnergyPlus (2013), OpenStudio (2013) and GoogleSketchup (2013) to calculate the incident solar radiation on the facades. These models simulated the exterior facade and green roof surface temperature with correlation coefficients values close to 0.9 and error values, *RMSE*, less than 4°C. Malys et al. (2014) model obtained more accurate results than the one of Susorova et al. (2013), since the study cases were also LW green façades. In both models were required heat transfer coefficient data determined by three methods using facade and roof materials thermal resistances, a progressive average of environmental and surface temperatures. These values were significantly different, but had no direct impact on the simulated exterior facade and green roof surface temperature. In conclusion, the vegetation provided an increase on building thermal performance in reducing exterior surface temperature and this reduction is more evident when there is an increase in leaf area index (*LAI*) and plant size.

Keywords: Green facades, leaf temperature, heat transfer coefficient, exterior surface temperature

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças à contribuição de inúmeras pessoas, e não poderia deixar de expressar o meu agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Em particular, gostaria de agradecer às minhas orientadoras, Prof.^a Cristina Matos Silva e Prof.^a Maria da Glória Gomes, pela disponibilidade, acompanhamento e dedicação durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. António Moret Rodrigues pela disponibilidade e paciência na construção do procedimento de alteração do ficheiro climático do EnergyPlus.

Ao Prof. Joaquim Ramos Dias pela disponibilidade e dedicação na procura de uma solução para a construção do código em VBA.

À minha colega Rita Prazeres pelo apoio, empenho, dedicação e responsabilidade que demonstrou durante este período.

Ao Eng. João Salgueiro da ADN, à BWA, dono do edifício da Travessa do Patrocínio e ao Atlântico Blue Studio por nos terem permitido realizar a monitorização.

Agradeço também a todos os meus amigos e família pelo interesse, apoio e compreensão que demonstraram durante esta fase da minha vida. Em especial gostaria de agradecer à minha irmã, pela paciência e compreensão que tem comigo desde o princípio, aos meus pais pela pujança e incentivo, ao Miguel da Silva e ao Pedro Baptista pelo apoio, e à minha namorada Eva pela força que me deu nesta última fase do meu percurso académico.

Não queria deixar de agradecer ao meu avô por tudo aquilo que me transmitiu durante a sua vida e por me ter motivado na escolha deste tema.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento Geral	1
1.2.	Objetivos	4
1.3.	Organização da dissertação	4
2.	Fachadas verdes	5
2.1.	Evolução histórica	5
2.2.	Sistemas de fachadas verdes	9
2.3.	Vantagens e desvantagens das fachadas verdes	11
2.3.1.	Vantagens ambientais	11
2.3.2.	Vantagens económicas	13
2.3.3.	Vantagens sociais	14
2.3.4.	Desvantagens	15
2.4.	Fachada verde vs cobertura verde	16
2.5.	Incentivos fiscais para a utilização de fachadas verdes	18
2.6.	Simulação do comportamento térmico de fachadas verdes	19
2.7.	Considerações finais	24
3.	Modelo de fachadas verdes	25
3.1.	Modelo de Susorova et al. (2013)	25
3.2.	Modelo de Malys et al. (2014)	34
4.	Casos de estudo	41
4.1.	Caso de estudo: Travessa do Patrocínio, Lisboa	41
4.1.1.	Localização e caracterização	41
4.1.2.	Caraterísticas dos materiais	42
4.1.3.	Monitorização	44
4.2.	Caso de estudo: Atlântico Blue Studio	44
4.2.1.	Localização e caracterização	44
4.2.2.	Caraterísticas dos materiais	45
4.2.3.	Monitorização	46
5.	Coefficiente de transmissão térmica	49
5.1.	Cálculo do coeficiente transmissão térmica	49
5.1.1.	Cálculo de $U_{(i)}$ com base nas resistências térmicas das diferentes camadas	49
5.1.2.	Cálculo de $U_{(ii)}$ através da média progressiva com base nas temperaturas ambientais	50
5.1.3.	Cálculo de $U_{(iii)}$ através da média progressiva com base nas temperaturas superficiais	50
5.2.	Aplicação ao caso de estudo: Travessa do Patrocínio	51
5.3.	Aplicação ao caso de estudo: Atlântico Blue Studio	54
5.4.	Considerações finais	57
6.	Calibração dos modelos	59
6.1.	Caso de estudo: Travessa do Patrocínio	60

6.1.1.	Modelo de Susorova et al. (2013)	61
6.1.2.	Modelo de Malys et al. (2014).....	70
6.1.3.	Comparação entre modelos	76
6.2.	Caso de estudo: Atlântico Blue Studio	77
6.2.1.	Modelo de Susorova et al. (2013)	78
6.2.2.	Modelo de Malys et al. (2014).....	85
6.2.3.	Comparação entre modelos	90
6.3.	Considerações finais da validação para os dois casos de estudo	92
7.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	95
7.1.	Conclusões	95
7.2.	Desenvolvimentos futuros	98
Referências bibliográficas.....		99
A.1	Evapotranspiração de Penman-Monteith segundo Zotarelli et al. (2009)	I
A.2	Procedimento Sketchup – OpenStudio - EnergyPlus para o cálculo da radiação incidente na fachada verde	IV
A.3	Código desenvolvido no VBA para a função Solver	VI
A.4	Análise das condições climáticas.....	VIII
A.4.1.	Temperatura do ar exterior	VIII
A.4.2.	Humidade relativa do ar	IX
A.4.3.	Velocidade do Vento	X
A.4.4.	Radiação solar incidente.....	XI
A.4.5.	Precipitação	XII
A.5	Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental no Atlântico Blue Studio	XIII

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Efeito de estufa no planeta Terra, Britânica (2010)	1
Figura 1.2 - Variação da temperatura média da superfície do solo e dos oceanos relativamente ao período 1901-2012 IPMA (2013)	2
Figura 1.3 - Variação da Temperatura na Península Ibérica de 2011-2040 e 2041-2070 IPMA (2013).....	2
Figura 1.4 - Distribuição do consumo de energia final em eletricidade por setor em Portugal, adaptado de IEA (2013)	3
Figura 2.1 - Jardins verticais da Babilónia, Keys (2013).....	5
Figura 2.2 - Localização dos Jardins Verticais, Keys (2013)	5
Figura 2.3 - Tijolo botânico de Stanley White, Foundation (2012)	6
Figura 2.4 - Museu da Ciência e da Indústria em Paris de Patrick Blanc, Blanc (2012).....	7
Figura 2.5 - Funcionamento de um sistema hidropónico.....	7
Figura 2.6 - Tipologia de fachadas verdes exteriores, segundo Sousa (2012), Pérez et al. (2011), Ottelé et al. (2011), Perini et al. (2013), Mazzali et al. (2013), Wong et al. (2010), Eumorfopoulou et al. (2009)	9
Figura 2.7 - Temperaturas em zona rural e urbana devido à ilha de calor urbano, Reurb (2014)	13
Figura 2.8 - Fachada verde com problemas, Wolmarans (2013).....	15
Figura 2.9 - Fachada verde sem problemas, Wolmarans (2013).....	15
Figura 2.10 - Cobertura verde na Gulbenkian, Silva (2014)	16
Figura 2.11 - Fachada verde numa habitação unifamiliar, Travessa do Patrocínio, Lisboa, ADN Design (2012) ..	18
Figura 2.12 - Fachada verde em Condomínio Privado, Quinta das Nogueiras, Coimbra, Clorofila (2010).....	18
Figura 3.1 - Fachada verde (vegetated façade area) e fachada sem vegetação (bare façade area), Susorova et al. (2013)	25
Figura 3.2 - Fachada verde com diferentes LAI, Susorova et al. (2013)	26
Figura 3.3 - Balanço energético da parede com vegetação, adaptado de Susorova et al. (2013)	27
Figura 3.4 - Balanço energético da parede sem vegetação, adaptado de Susorova et al. (2013)	27
Figura 3.5 - Variação da τ e LAI, com K constante.....	28
Figura 3.6 - Vários ângulos de inclinação para diferentes situações.....	28
Figura 3.7 - Fluxograma das trocas de calor da fachada com vegetação	33
Figura 3.8 - Fluxograma das trocas de calor da fachada sem vegetação	33
Figura 3.9 - Amostras de Fachadas Verdes utilizadas no modelo de Malys et al. (2014)	34
Figura 3.10 - Balanço energético da fachada com vegetação.....	35
Figura 3.11 - Rede térmica de nós da fachada com vegetação, adaptado de Malys et al. (2014)	35
Figura 3.12 - Esquema dos processos envolvidos nos fluxos de calor no modelo de Malys et al. (2014)	35
Figura 3.13 - Fluxograma das trocas de calor na folhagem	38
Figura 3.14 - Fluxograma das trocas de calor no ar da folhagem	39
Figura 3.15 - Fluxograma das trocas de calor no substrato	39
Figura 4.1 - Localização dos casos de estudo e da estação meteorológica do Instituto Superior Técnico	41
Figura 4.2 - Orientação e localização da fachada verde na Travessa do Patrocínio, GoogleMaps (2015)	42
Figura 4.3 - Vista do exterior do edifício da fachada verde na Travessa do Patrocínio, ID3D (2012)	42
Figura 4.4 - Camadas constituintes da parede do Piso 2, Travessa do Patrocínio	43
Figura 4.5 Camadas constituintes da parede do Piso 0, Travessa do Patrocínio.....	43
Figura 4.6 - Esquema da fachada verde da Travessa do Patrocínio, Prazeres (2015)	44
Figura 4.7 - Fachada verde da Travessa do Patrocínio, ID3D (2012)	44
Figura 4.8 - Vista do exterior do edifício da fachada verde em Paço de Arcos, (Prazeres,2015).....	45
Figura 4.9 - Orientação e localização da fachada verde em Paço de Arcos, GoogleMaps (2015).....	45
Figura 4.10 - Camadas constituintes da fachada verde do Atlântico Blue Studio	46
Figura 4.11 - Camadas constituintes da cobertura verde do Atlântico Blue Studio	46
Figura 4.12 - Esquema da fachada verde do Atlântico Blue Studio, Prazeres (2015)	47
Figura 4.13 - Fachada verde do Atlântico Blue Studio, Prazeres (2015).....	47
Figura 5.1 - Coeficiente de transmissão térmica de acordo com o método $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$, Fevereiro, Travessa do Patrocínio	53
Figura 5.2 - Coeficiente de transmissão térmica de acordo com o método $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$, Março, Travessa do Patrocínio	53

Figura 5.3 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a zona 1 e zona 2, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio	56
Figura 5.4 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a cobertura, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio	56
Figura 5.5 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a zona 1 e zona 2, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio	56
Figura 5.6 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a cobertura, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio	56
Figura 6.1 - LAI menor, Fevereiro e Março, Travessa do Patrocínio, Prazeres (2015)	63
Figura 6.2 - LAI maior, Junho e Julho, Travessa do Patrocínio, Prazeres (2015)	63
Figura 6.3 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Piso 2, Travessa do Patrocínio.....	67
Figura 6.4 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Piso 2, Travessa do Patrocínio.....	67
Figura 6.5 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Piso 0, Travessa do Patrocínio.....	67
Figura 6.6 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Piso 0, Travessa do Patrocínio.....	67
Figura 6.7 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Piso 2, Travessa do Patrocínio	68
Figura 6.8– Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Piso 2, Travessa do Patrocínio	68
Figura 6.9 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Piso 0, Travessa do Patrocínio	68
Figura 6.10– Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Piso 0, Travessa do Patrocínio	68
Figura 6.11 - Fluxo de calor latente para os dias 14 a 21 de Maio de 2013, Malys et al. (2014).....	70
Figura 6.12 - Fluxo de calor latente calculado para os dias 5 a 10 de Julho de 2014	70
Figura 6.13 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Piso 2, Travessa do Patrocínio.....	74
Figura 6.14 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Piso 2, Travessa do Patrocínio.....	74
Figura 6.15 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Piso 2, Travessa do Patrocínio	74
Figura 6.16 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Piso 2, Travessa do Patrocínio	74
Figura 6.17 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, Piso 2, Fevereiro e Março, Travessa do Patrocínio.....	76
Figura 6.18 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, Piso 2, Junho e Julho, Travessa do Patrocínio.....	76
Figura 6.19 – Plantas na fachada verde, Inverno, Prazeres (2015)	79
Figura 6.20 – Plantas na fachada verde, Verão, Prazeres (2015).....	79
Figura 6.21 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, zona 1, Atlântico Blue Studio.....	81
Figura 6.22 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, zona 1, Atlântico Blue Studio.....	81
Figura 6.23 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, zona 2, Atlântico Blue Studio.....	81
Figura 6.24 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, zona 2, Atlântico Blue Studio.....	81
Figura 6.25 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, zona 1, Atlântico Blue Studio	82
Figura 6.26 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, zona 1, Atlântico Blue Studio	82
Figura 6.27 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, zona 2, Atlântico Blue Studio	82
Figura 6.28 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, zona 2, Atlântico Blue Studio	82

Figura 6.29 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	83
Figura 6.30 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	83
Figura 6.31 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	83
Figura 6.32 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	83
Figura 6.33 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, zona 1, Atlântico Blue Studio.....	87
Figura 6.34 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, zona 1, Atlântico Blue Studio.....	87
Figura 6.35 – Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Fevereiro, zona 2, Atlântico Blue Studio.....	87
Figura 6.36 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Março, zona 2, Atlântico Blue Studio.....	87
Figura 6.37 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, zona 1, Atlântico Blue Studio.....	88
Figura 6.38 – Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, zona 1, Atlântico Blue Studio.....	88
Figura 6.39 – Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Junho, zona 2, Atlântico Blue Studio.....	88
Figura 6.40 – Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Julho, zona 2, Atlântico Blue Studio.....	88
Figura 6.41 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Fevereiro, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	89
Figura 6.42 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Março, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	89
Figura 6.43 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Junho, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	89
Figura 6.44 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Julho, Cobertura, Atlântico Blue Studio.....	89
Figura 6.45 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, zona 1, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio.....	91
Figura 6.46 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, zona 1, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio.....	91

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens de um sistema hidropônico, Plubee (2013) e Resh (2003).....	7
Tabela 2.2 – Trabalhos internacionais de Patrick Blanc de fachadas verdes exteriores, Blanc (2012).....	8
Tabela 2.3 - Síntese dos tipos de Fachadas Verdes exteriores	10
Tabela 2.4 - Resumo das vantagens e desvantagens em fachadas verdes	11
Tabela 2.5 - Resumo dos parâmetros de fachadas e coberturas verdes, adaptado de Stav (2008).....	17
Tabela 2.6 – Características de fachadas e de coberturas verdes, adaptado de Sheweka et al. (2012)	17
Tabela 2.7 Análise de fachadas verdes – síntese bibliográfica	20
Tabela 2.8 - Análise de fachadas verdes – síntese bibliográfica (continuação)	21
Tabela 2.9 - Análise de fachadas verdes – síntese bibliográfica (continuação)	22
Tabela 2.10 - Resume dos fatores que influencia o comportamento térmico de uma fachada verde	24
Tabela 4.1 - Caraterísticas dos materiais presentes nas paredes do Piso 0 e Piso 2.....	43
Tabela 4.2 - Caraterísticas dos materiais presentes na parede, Paço de Arcos	46
Tabela 5.1 - Valores das resistências térmicas superficiais LNEC ITE50 (2006).....	49
Tabela 5.2 – Resistência térmica dos materiais constituintes da parede exterior do Piso 0 e Piso 2, Travessa do Patrocínio	51
Tabela 5.3 – Coeficientes de transmissão térmica (U) para os cálculos de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$, Fevereiro e Março, Travessa do Patrocínio	51
Tabela 5.4– Valores utilizados dos coeficientes de transmissão térmica (U) para o cálculo $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$ na calibração dos modelos, inverno e verão, Travessa do Patrocínio.....	51
Tabela 5.5- Resistência térmica do material tijolo, Atlântico Blue Studio	54
Tabela 5.6 - Coeficientes de transmissão térmica (U) para os vários métodos, Atlântico Blue Studio	54
Tabela 5.7 – Valores utilizados dos coeficientes de transmissão térmica (U) para o cálculo $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$ na calibração dos modelos, Atlântico Blue Studio	55
Tabela 6.1 – Comparação das temperaturas da folha com Susorova et al. (2013) e Gates (2003).....	61
Tabela 6.2 – Diferenças das temperaturas da folha do presente estudo com Susorova et al. (2013) e Gates (2003)	62
Tabela 6.3– Parâmetros da simulação do modelo de Susorova et al. (2013)	62
Tabela 6.4 – Parâmetros alterados das plantas do modelo de Susorova et al. (2013)	63
Tabela 6.5 – Calor específico e densidade dos componentes das paredes do Piso 0 e Piso 2, Travessa do Patrocínio	64
Tabela 6.6 - RMSE e r para o Piso 0 e Piso 2 a partir de $U_{(i)}$, Travessa do Patrocínio	65
Tabela 6.7 - RMSE e r para o Piso 2 a partir de $U_{(iii)}$, Travessa do Patrocínio	65
Tabela 6.8 - Parâmetros admitidos da resistência total aerodinâmica do Piso 2.....	71
Tabela 6.9 – Parâmetros da simulação do modelo de Malys et al. (2014)	71
Tabela 6.10 – RMSE e r para o Piso 2 a partir de $U_{(i)}$, Travessa do Patrocínio.....	72
Tabela 6.11 - RMSE e r para o Piso 2 a partir de $U_{(iii)}$, Travessa do Patrocínio	72
Tabela 6.12 – Parâmetros alterados das plantas do modelo de Susorova et al. (2013)	78
Tabela 6.13– Resistência térmica da parede (Zona 1 e Zona 2) e cobertura, Atlântico Blue Studio.....	79
Tabela 6.14 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura a partir de $U_{(i)}$, Atlântico Blue Studio.....	79
Tabela 6.15 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura, a partir de $U_{(iii)}$, Atlântico Blue Studio.....	80
Tabela 6.16 – Parâmetros admitidos da resistência total aerodinâmica, zona 1 e zona 2, Atlântico Blue Studio .	85
Tabela 6.17 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura, com o valor de $U_{(i)}$, Atlântico Blue Studio	85
Tabela 6.18 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura com o valor de $U_{(iii)}$, Atlântico Blue Studio ...	86
Tabela 6.19 – Comparação do coeficiente de correlação com diferentes autores para as temperaturas superficiais exteriores.....	93
Tabela 6.20 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica com diferentes autores para as temperaturas superficiais exteriores.....	93
Tabela 6.21 - Comparação da variação da temperatura superficial exterior da parede com e sem vegetação de diferentes autores para o clima Mediterrânico.....	93

Simbologia

A_f – Albedo da folha

C_{pcv} – Convecção na parede com vegetação, W/m^2

C_{psv} – Convecção na parede sem vegetação, W/m^2

$C_{f-ar,f}$ – Convecção na folha e o ar entre as folhas, W/m^2

$C_{ar,f-pcv}$ – Convecção no ar entre as folhas e a superfície exterior do substrato, W/m^2

$C_{ar,f-ar,ext}$ – Convecção no ar entre as folhas e o ar exterior, W/m^2

$C_{p,pcv}$ – Calor específico da parede, $J/(kg.^{\circ}C)$

$C_{p,ar}$ – Calor específico do ar, $J/(kg.^{\circ}C)$

$C_{p,ag}$ – Calor específico da água, $J/(kg.^{\circ}C)$

C_{of} – Capacidade térmica da folha, $J/^{\circ}C$

$C_{oar,f}$ – Capacidade térmica do ar entre as folhas, $J/^{\circ}C$

C_{opcv} – Capacidade térmica do substrato e parede, $J/^{\circ}C$

D_f – Dimensão característica da planta, m

ETP – Evapotranspiração de referência, $kg/(m^3.s)$

e_s – Parâmetro da pressão de vapor saturado, kPa

e_a – Pressão parcial do vapor saturado, kPa

$F_{ch\grave{a}o}, F_{c\acute{e}u}$ – Fator de vista do chão e do céu

g_c – Condutância de calor através do ar, $mol/(m^2.s)$

g_v – Condutância de vapor através do ar, $mol/(m^2.s)$

g_r – Condutância da radiação, $mol/(m^2.s)$

$g_{ea\ ss}$ – Condutância estomática atual da superfície superior da folha, $mol/(m^2.s)$

$g_{ea\ si}$ – Condutância estomática atual da superfície inferior da folha, $mol/(m^2.s)$

g_{icv} – Limite da condutância de vapor através do ar, $mol/(m^2.s)$

g_{icc} – Limite da condutância de calor através do ar, $mol/(m^2.s)$

h_{pcv}, h_{pcv} – Coeficientes de condutância térmica superficial por convecção da parede com e sem vegetação, $W/(m^2.^{\circ}C)$

h_{f-pcv} – Coeficiente de condutância térmica superficial por radiação entre a folha e a parede, $W/(m^2.^{\circ}C)$

$h_{f-ar,f}$ – Coeficiente de condutância térmica superficial por convecção entre a folha e o ar entre as folhas, $W/(m^2.^{\circ}C)$

$h_{ar,f-pcv}$ – Coeficiente de condutância térmica superficial por convecção entre o ar da folha e a parede, $W/(m^2.^{\circ}C)$

$h_{ar,f-ar,ext}$ – Coeficiente de condutância térmica superficial por convecção entre a folha e o ar entre as folhas, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

H_r – Humidade relativa do ar, %

I_t – Radiação olar incidente de onda curta na superfície da parede, W/m^2

I_{lr} – Radiação solar incidente de onda longa, W/m^2

I_{max} – Radiação solar máxima incidente na superfície da parede, W/m^2

K - Condutância térmica do material, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

L – Largura da parede, m

lat – Fluxo de calor latente, W/m^2

LAI – Índice de área da folha, leaf área index, m^2/m^2

LR_{f-pcv} – Trocas de radiação entre a vegetação e a parede, W/m^2

Q_{pcv} – Fluxo de calor por condução na parede com vegetação, W/m^2

Q_{psv} – Fluxo de calor por condução na parede sem vegetação, W/m^2

$R_{abs, f}$ – Radiação solar absorvida pela folha, W/m^2

R_{pcv}, R_{psv} - Resistência efetiva térmica da fachada com e sem vegetação, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$

R_{si} – Resistência térmica superficial interior, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$

r_α - Resistência total aerodinâmica, s/m

R_{aero} - Resistência aerodinâmica da folha, s/m

r_{as} – Resistência estomática atual da folha, $(m^2 \cdot s)/mol$

r_s – Resistência estomática típica da folha, $(m^2 \cdot s)/mol$

S_{pcv} – Calor armazenado na parede com vegetação, W/m^2

S_{psv} – Calor armazenado na parede sem vegetação, W/m^2

$T_{s ext}$ – Temperatura superficial exterior, $^\circ C$

$T_{s int}$ – Temperatura superficial interior, $^\circ C$

T_{orv} – Temperatura de orvalho, $^\circ C$

T_f – Temperatura da folha, $^\circ C$

U – Coeficiente de transmissão térmica, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

V_t – Quantidade de água armazenada no substrato, l

V_{max} – Quantidade de água máxima armazenada no substrato, l

$V_{ar,ext}$ – Velocidade do ar exterior, m/s

Caracteres gregos:

λ – Condutibilidade térmica do material W/(m.°C)

α_{Par} – Absortância da parede

α_{Folha} – Absortância da folha

α_{Lat} – Coeficiente de repartição do fluxo de calor latente

τ – Transmitância da radiação

ε_{pcv} – Emissividade da parede

$\varepsilon_{\text{Chão}}$ – Emissividade do chão

$\varepsilon_{\text{Céu}}$ – Emissividade do céu

$\varepsilon_{\text{Folha}}$ – Emissividade da folha

K – Coeficiente de atenuação da radiação

θ – Ângulo da inclinação da superfície da parede com o chão, °

Y – Constante psicométrica termodinâmica, 0,000666 1/°C

Y' – Constante psicométrica aparente, 1/°C

η_{Murchar} – Valor de humidade do solo que proporciona o “murchar” das plantas

$\eta_{\text{Raízes}}$ – Valor de humidade do solo mínimo na zona das raízes

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ W/(m².°C)

Δ – Gradiente da pressão-temperatura da saturação de vapor, kPa/°C

Δm – Variação horária da massa da amostra, kg

ρ_{ar} – Densidade do ar, kg/m³

ρ_{ag} – Densidade da água, kg/m³

ρ_{pcv} – Densidade do substrato e parede, kg/m³

Acrónimos:

LW – Living Wall

DGF – Direct Green Façade

ETTV- Valor das transferências térmicas para a envolvente

MRT- Temperatura média radiada

DS-GF – Double Skin Green Façade

pcv – Parede com vegetação

psv – Parede sem vegetação

f – Taxa de evapotranspiração

ICU – ilha de calor urbano

LAI – índice de área foliar (Leaf area index)

COV – compostos orgânicos voláteis

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

No início do séc. XXI, as sociedades dos países desenvolvidos deparam-se diariamente com problemas ambientais nas suas cidades sendo, a maior parte deles, resultado da irresponsabilidade do Homem.

A crescente preocupação com a saúde ambiental das cidades ocupa um lugar de destaque em todo o mundo e vem acompanhada de uma incessante procura de novas soluções para minimizar estes problemas. O crescimento urbano desordenado, a intensificação no uso e ocupação do solo, seguido de critérios estritamente económicos, provoca escassez do solo urbano e a carência de espaços verdes.

O aparecimento de fachadas verdes vem ajudar a reduzir estes problemas e a solucionar a falta de espaços verdes e vegetação nas ruas das cidades. Desta forma é possível melhorar a qualidade do ambiente urbano, bem como criar novas e inovadoras tipologias de verticalidade.

O recurso a este tipo de solução construtiva para fachada ainda é escasso em Portugal, onde não há legislação para a sua estruturação, insuficiente investigação acerca da qualidade/preço, reduzido número de empresas que o realizam e pouca informação disponível acerca do sistema construtivo e comportamento real desta solução.

Ao longo das últimas décadas tem crescido uma evidência científica que sugere que as maiores mudanças no clima da Terra foram provocadas pela atividade humana, os chamados efeitos antropogénicos. Estes, de certa forma têm contribuído para o aumento da concentração dos gases de efeito de estufa na nossa atmosfera provocando um aumento da temperatura no planeta. O efeito de estufa resulta da absorção da radiação emitida pela superfície terrestre, radiação infravermelha com onda longa, por determinados gases, como o dióxido de carbono, o metano e o protóxido de azoto presentes na atmosfera Figura (1.1).

Apesar do seu aumento trazer sérios inconvenientes para a humanidade, os gases resultantes do efeito de estufa são vitais para a vida na Terra, uma vez que, devido à sua habilidade de agir como uma camada que concentra e retém parte da radiação infravermelha, evitam que os gases escapem para o espaço. A ausência deste processo leva a que a temperatura na superfície terrestre fique muito mais fria.



Figura 1.1 - Efeito de estufa no planeta Terra, Britânica (2010)

As emissões dos gases de efeito de estufa (GEE) provocados foram originadas no início da revolução industrial (século XVIII-XIX), sendo maioritariamente resultado da queima de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, o petróleo e o gás natural, tratando-se, portanto, de energia não renovável. O volume destas emissões tem crescido rapidamente ao longo dos últimos anos, como resultado do aumento da população mundial. As mudanças nos níveis de emissão também se refletem no fenómeno da desflorestação, visto que as árvores e outras plantas ajudam a absorver o carbono presente na atmosfera, Eurostat (2010). Este aumento da emissão dos gases de efeito de estufa provoca um incremento da temperatura média em mais de 2°C por ano que pode desencadear danos irreversíveis nos ecossistemas terrestres, Nature (2012), Figura (1.2).

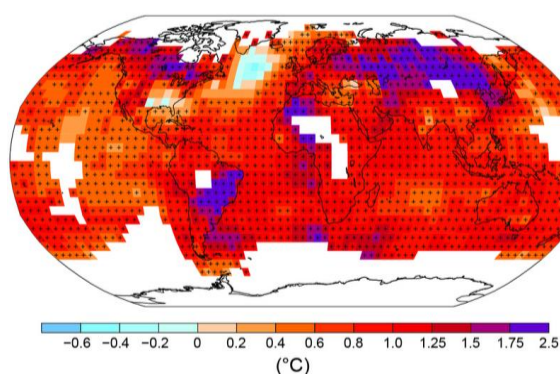


Figura 1.2 - Variação da temperatura média da superfície do solo e dos oceanos relativamente ao período 1901-2012 IPMA (2013)

Como referido, prevê-se que as temperaturas num futuro próximo, devido às alterações climáticas, aumentem consideravelmente. Na Península Ibérica, de 2011 a 2040 a temperatura variará até 2°C e de 2041 a 2070 variará até 4°C, IPMA (2013), Figura (1.3).

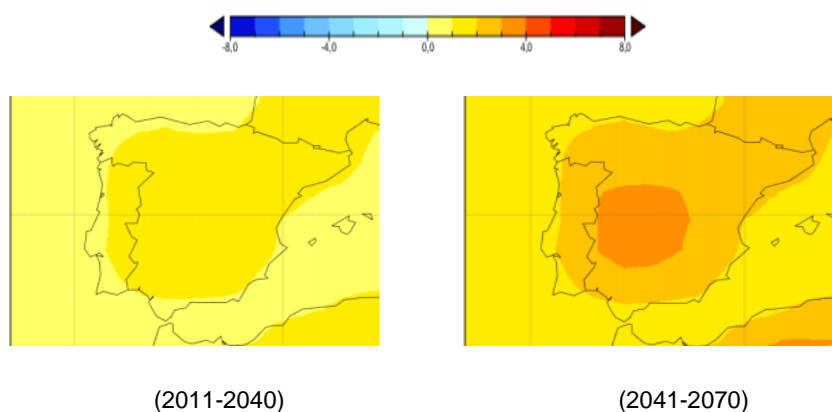


Figura 1.3 - Variação da Temperatura na Península Ibérica de 2011-2040 e 2041-2070 IPMA (2013)

As alterações climáticas são um dos maiores desafios para a humanidade e o número de países que procuram uma solução para lidar com este problema tem vindo a aumentar.

Em 1988 instaurou-se o Painel Intergovernamental de Cientistas para as Alterações Climáticas (IPCC, sigla em Inglês) que apresentou um relatório particularmente importante para a negociação do Protocolo de Quioto em 1997, com a informação sobre as emissões dos gases de efeito de estufa.

Todavia, só entrou em vigor em Fevereiro de 2005 quando a Rússia o retificou. Este protocolo propunha a redução os gases de efeito de estufa em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012, Eurostat (2010). Em Dezembro de 2008, em Copenhaga, os líderes dos países aprovaram um pacote de medidas na conferência das Nações Unidas acerca das alterações climáticas, destinado à redução das emissões dos gases do efeito de estufa por pelo menos 20% até 2020, em comparação com os níveis de 1990, o aumento de energia renovável por 20% para o mercado e a redução do consumo de energia final por 20%, Eurostat (2010). Até 2020, Portugal propôs a redução de 25% do consumo de energia primária, o aumento de 31% do consumo final bruto de energia proveniente de fontes renováveis e o aumento de 10% da energia renovável para utilização nos transportes, República (2013).

Com a proximidade da data final do protocolo de Quioto em 2012, 200 nações na Cimeira em Doha acordaram e prolongaram-no até 2020. Esta Cimeira definiu que em 2015 deverá ser estabelecido um acordo comum para países ricos e pobres, na qual deverá substituir o Protocolo de Quioto. O intuito da mesma procura encorajar os países ricos a mobilizarem 10 mil milhões de dólares para quando o novo acordo entrar em vigor, Naturlink (2012).

Para amenizar o problema das alterações climáticas é preciso agir tanto na adaptação como na mitigação. Enquanto a adaptação se insere no processo que procura minimizar os efeitos negativos dos impactes das alterações climáticas nos sistemas biofísicos e socioeconómicos, a mitigação refere-se ao processo que visa diminuir a emissão de GEE para a atmosfera. Neste contexto, considera-se que o problema passa por toda a comunidade internacional, Mam (2009). De acordo com a DGEG (2012), o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final na Europa e cerca de 30% em Portugal, Figura (1.4), embora, 50% deste consumo possa ser reduzido através de medidas de eficiência energética. A importância deste aspeto justificou a aprovação da Diretiva Europeia 2002/91/CE, sobre o Desempenho Energético dos Edifícios, entretanto transferida para a legislação dos países membros. Os setores residencial e de serviços representam cerca de 61% da energia final consumida em Portugal. Deste modo, existe a necessidade não só de reabilitar os edifícios mas também de realizar reabilitações energéticas de forma a reduzir esses consumos, Económico (2013). Na presente dissertação apenas será investigado o impacte da variação das características dos elementos da envolvente, mais precisamente da fachada, nas transferências de calor entre o exterior e o interior do edifício, em Portugal.

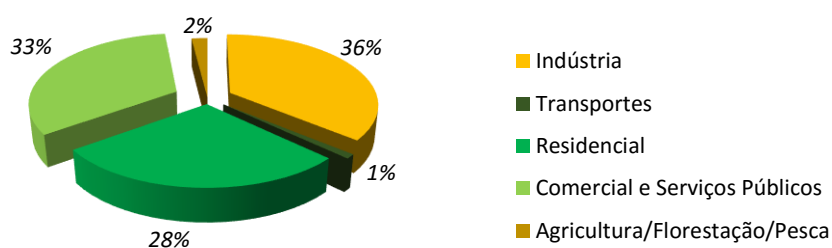


Figura 1.4 - Distribuição do consumo de energia final em eletricidade por setor em Portugal, adaptado de IEA (2013)

O consumo energético do edifício e o aumento da concentração de gases de efeito de estufa podem ser diminuídos na presença de fachada verde. Este tipo de fachada reduz a necessidade de uso de aparelhos de ar condicionado para arrefecimento e aquecimento do edifício, dado que as plantas atuam como uma camada protetora da parede exterior através do sombreamento das folhas. Na mitigação do problema dos gases de efeito de estufa, a fachada verde atua como coletor de partículas graças às características das plantas na absorção do dióxido de carbono, proporcionando também a redução da temperatura do ar exterior na cidade. Assim há a necessidade de avaliar o desempenho térmico desta solução no clima mediterrâneo.

1.2. Objetivos

A presente dissertação prevê o estudo de fachadas verdes em Portugal. Desta forma, o objetivo principal consiste na avaliação do comportamento térmico de fachadas verdes, no âmbito da temperatura superficial exterior. Assim, procedeu-se à análise de dois casos de estudo diferentes estudando:

- Dois modelos de tipologias diferentes de fachadas verdes - Susorova et al. (2013) e Malys et al. (2014), sendo o primeiro relativo à vegetação direta na fachada e o segundo à vegetação numa estrutura independente do edificado;
- As características individuais das plantas como a dimensão da folha, a absorvidade da folha, o *LAI*, coeficiente de atenuação da radiação e condutância estomática;
- Os fenómenos observados como convecção, condução, radiação e evapotranspiração;
- Coeficiente de transmissão térmica;
- Calibração dos dados experimentais.

1.3. Organização da dissertação

A seguinte dissertação encontra-se dividida em sete capítulos e cinco anexos:

O primeiro capítulo remete à introdução.

O segundo capítulo refere-se às fachadas verdes, apresentando a evolução do conceito, vantagens e desvantagens na aplicação desta solução, sistemas construtivos e tipologias, legislação e regulamentação aplicada a nível nacional e internacional, nomenclatura utilizada, comparações entre fachadas e coberturas verdes, e por último uma análise bibliográfica de estudos em fachadas verdes.

O terceiro capítulo analisa os modelos de fachadas verdes com respetiva descrição das fórmulas utilizadas, Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014).

O quarto capítulo apresenta os casos de estudo e materiais constituintes da fachada e cobertura verdes.

O quinto capítulo engloba os cálculos e a análise dos coeficientes de transmissão térmica nos casos de estudo.

O sexto capítulo aponta para a calibração dos modelos para os casos de estudo.

O sétimo capítulo diz respeito às conclusões e desenvolvimentos futuros.

2. Fachadas verdes

Neste capítulo descreve-se a evolução histórica das fachadas verdes, as suas principais vantagens e desvantagens, a nomenclatura, os diversos sistemas construtivos, a relação entre fachadas e coberturas verdes, os incentivos à sua utilização e uma revisão bibliográfica dos trabalhos de investigação de jardins verticais.

As plantas têm estado presentes na vida da humanidade desde o início dos tempos, tanto no fornecimento de alimento, roupa como em materiais de construção. Com o constante aumento da população das cidades modernas e a combinação do aquecimento global com o efeito de ilha de calor urbano, existe a preocupação no planeamento da introdução do verde nas mesmas. Com a colocação de vegetação nos edifícios, seria mais fácil alterar o microclima da envolvente dos mesmos e o clima local da cidade. As integrações de sistemas verdes, em coberturas e fachadas dos edifícios parte de uma promessa da arquitetura moderna, reconhecendo que as plantas são recursos pouco utilizados no conceito de edifício “verde”, Roofs (2008). Neste contexto pretende-se mitigar o fenómeno de calor urbano e o seu impacto no consumo de energia dos edifícios, e melhorar a saúde da sociedade que aí vive Malys et al. (2014).

2.1. Evolução histórica

A origem do conceito de fachada verde remete para os “*Jardins Verticais da Babilónia*”, Figura (2.1) (*Hanging Gardens of Babylon*, em Inglês), em 600 a.C., uma das sete maravilhas do mundo antigo cuja localização ainda permanece desconhecida (Woollaston, 2013). Segundo Keys (2013), a localização dos jardins não era na Babilónia, mas sim a 483 km desse local, em Nínive (Ninevah em Inglês), norte do Iraque, Figura (2.2). De acordo com os vestígios arquitetónicos conhecidos nos dias de hoje, presume-se que o jardim fosse semicircular, em forma de teatro com colina artificial e com várias camadas de 25 metros de altura, com plantas e árvores plantadas em campos artificiais e com uma dimensão de 120 metros. Considera-se ainda que seria irrigado com 35000 litros de água por dia, fornecidos por um aqueduto com 80,5km de comprimento e a água seria elevada mecanicamente através de uma bomba tipo “parafuso de Arquimedes”, Klein (2013).



Figura 2.1 - Jardins verticais da Babilónia, Keys (2013)



Figura 2.2 - Localização dos Jardins Verticais, Keys (2013)

Nas margens do mar Mediterrâneo, entre o século III a.C. e o século XVII d.C., verificou-se que a cultura romana construiu estruturas verticais em treliça para sustentar as vinhas, bem como, a utilização de vegetação de tipo trepadeira presente nas paredes dos castelos, de modo a reduzir as amplitudes térmicas no edifício. Alguns séculos depois, os britânicos promoveram a integração de jardins em casas nas cidades através de estruturas treliçadas, com prégulas e através de sistemas de vegetação trepadeira, Roofs (2008).

Em pleno século XIX, a utilização deste tipo de vegetação foi aclamado pelas cidades europeias e americanas não pelos benefícios que proporcionava ao edifício, mas pelo seu aspeto estético. Na Europa, na década de 80, devido a questões ambientais surgiu a necessidade de trazer a natureza para as cidades, como no caso da maior parte das cidades alemãs que se criaram programas de incentivo à plantação e manutenção de trepadeiras nos seus quintais e fachadas. A introdução de vegetação nas fachadas proporcionou diversas investigações sobre as vantagens das plantas como isolamento do edifício, a habilidade para mitigar o pó e o arrefecimento proporcionado pelas plantas, Köhler (2008).

Segundo o Tclf (2008), o professor de arquitetura paisagística Stanley Hart White (1891-1979), foi o primeiro a apresentar o conceito de uma estrutura que fornecia nutrientes e água às plantas num sistema fechado (sistema hidropónico). No final da década de 30 (1938), o professor Stanley Hart White patenteou o sistema de suporte de vegetação e o tijolo botânico, Figura (2.3). Esta invenção era composta por unidades com plantas capazes de serem colocadas em qualquer altura dando rápidos efeitos paisagísticos. Neste contexto, o seu jardim vertical contribuiu para a resposta ao problema da introdução de jardins modernos em cidades. Segundo Hindle (2012), refere que mesmo com a importância do verde na arquitetura moderna, a invenção de Stanley Hart White permanece irrealizada e inteiramente desconhecida nos últimos 80 anos.

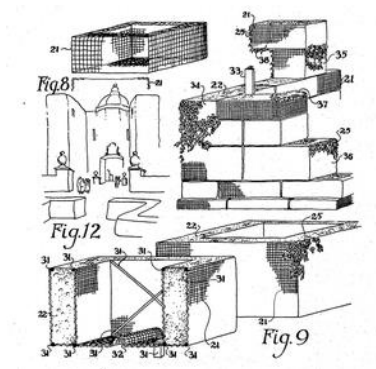


Figura 2.3 - Tijolo botânico de Stanley White, Foundation (2012)

No final da década de 80 (1988) construiu-se a primeira fachada verde pública no Museu da Ciência e da Indústria em Paris, Figura (2.4), pelo responsável da modernização deste tipo de jardim, Patrick Blanc. Apesar de não ser o inventor do conceito, tem sido reconhecido mundialmente pelo desenvolvimento na área. Desde o início da sua carreira como botânico, tem suportado a ideia de criar jardins verticais sem a utilização do solo (hidroponia). Esclarece que as plantas não precisam de solo, “*não, elas não...O solo é simplesmente nada mais que um suporte mecânico. Somente a água e os*

diversos minerais dissolvidos nela são essenciais para as plantas, em conjunto com luz e dióxido de carbono para realizar a fotossíntese”, Blanc (2012). Além dos projetos de sua autoria, trabalhou com vários arquitetos de renome, como o Jean Nouvel, os suíços Herzog&Demeuron e a japonesa Kazuyo Sejima.



Figura 2.4 - Museu da Ciência e da Indústria em Paris de Patrick Blanc, Blanc (2012)

Os nutrientes que as plantas normalmente necessitam são simplesmente dissolvidos numa solução aquosa e absorvidos pelas raízes suspensas nesse sistema. Esta solução nutritiva deve ser substituída periodicamente de forma a evitar a acumulação de sais. O sistema hidropónico deverá considerar a boa qualidade da água, tendo em conta a condutibilidade, pH e dureza. O funcionamento de um sistema hidropónico apresenta-se na Figura (2.5) englobando todo o processo, desde a oxigenação da água e a introdução dos nutrientes ao reaproveitamento da água. O processo é idêntico ao utilizado em fachadas verdes.

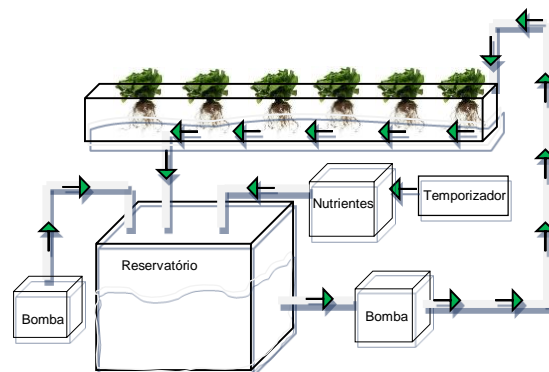


Figura 2.5 - Funcionamento de um sistema hidropónico

Na Tabela (2.1) são apresentadas as vantagens e desvantagens que um sistema hidropónico proporciona em fachadas verdes.

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens de um sistema hidropónico, Plubee (2013) e Resh (2003)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Não precisam de solo • Água pode ser reutilizada • Controlo do tipo/quantidade dos nutrientes • Facilidade no controlo de doenças/pragas nas plantas • Facilidade em retirar/colocar plantas 	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas no sistema hidropónico provoca a morte das plantas • Ataques patogénicos

Na Tabela (2.2) apresentam-se alguns trabalhos internacionais de Patrick Blanc.

Tabela 2.2 – Trabalhos internacionais de Patrick Blanc de fachadas verdes exteriores, Blanc (2012)

Obra	Tipo de edifício	Data	Arquiteto/s	Localização	Continente	Obra	Tipo de edifício	Data	Arquiteto/s	Localização	Continente
 Restaurante Juvia	Restaurante	2012	Alejandro Barrios Carrero; Bonnie Fisher	Miami, E.U.A.	América	 Empresa Privada de Gestão	Escritório	2014	-	Genebra, Suíça	Europa
 Escola Drew	Escola	2011	Alejandro Barrios Carrero; Bonnie Fisher	São Francisco, E.U.A.		 Centro comercial Victoire	Centro Comercial	2009	-	Sainte-Geneviève-des-Bois, França	
 Museu Kanazawa	Museu	2012	Hibino	Kanazawa, Japão	Ásia	 Botica Azzedine Alaïa	Escritório	2013	Pierre Granger	Paris, França	
 Shaikh Ebrahim bin Mohammed Al Khalifa	Escritório	2013	-	Al Muharraq, Barém		 Centro comercial no Alpha Park II	Centro Comercial	2012	-	Les-Clayes-sous-Bois, França	

2.2. Sistemas de fachadas verdes

A expressão fachada verde é frequentemente utilizada para abranger todo o tipo de jardins verticais mas, tecnicamente, está associada a dois grupos distintos de fachadas verdes. A primeira tipologia de fachadas verdes denomina-se por Direct Green Façade (DGF) e a segunda por Living Wall (LW). A fachada DGF consiste na colocação de plantas do tipo trepadeira (i.e. hera) na base dos edifícios (chão) ou em espaços intermédios (vasos) ou até nos telhados. Implica sempre substrato (terra) para a sobrevivência e fixação das plantas. Quanto ao seu posicionamento, as plantas podem ser fixadas a paredes já existentes ou colocadas em estruturas independentes ao edifício, como por exemplo em vedações. No entanto, o seu crescimento pode danificar a parede ou causar dificuldades na manutenção ou substituição da planta. De forma a evitar estes problemas desenvolveram-se novos sistemas como, a treliça, os painéis rígidos e os sistemas de cabos para suportar as plantas.

A segunda tipologia de fachadas verdes denomina-se por Living Wall (LW) e é mais complexa que a primeira, mas mais eficaz, visto que as plantas possuem determinadas características que asseguram a sua sobrevivência na ausência de substrato. São compostas por painéis pré-fabricados, módulos verticais ou por camadas e encontram-se fixadas verticalmente na parede exterior do edifício. Estes painéis podem ser constituídos por diversos tipos de materiais e suportam uma grande variedade de espécies de plantas, às quais são fornecidos nutrientes e água através de um sistema artificial de fertirrigação/irrigação de conta-gotas (hidroponia), Cameron et al. (2014) e Eumorfopoulou et al. (2010). Ainda no estudo de Cameron et al. (2014) é referido outro tipo de fachada verde, a Biowall (BW). Apresenta características semelhantes à LW, mas situa-se no interior do edifício. A Biowall reduz a necessidade de sistemas mecânicos de filtragem do ar por existir na sua constituição micro-organismos ou populações de plantas primitivas, por exemplo musgo, que melhoram a qualidade do ar e reduzem a humidade. Nesta dissertação serão apresentadas apenas fachadas verticais exteriores que se encontram na Figura (2.6) e na Tabela (2.3).

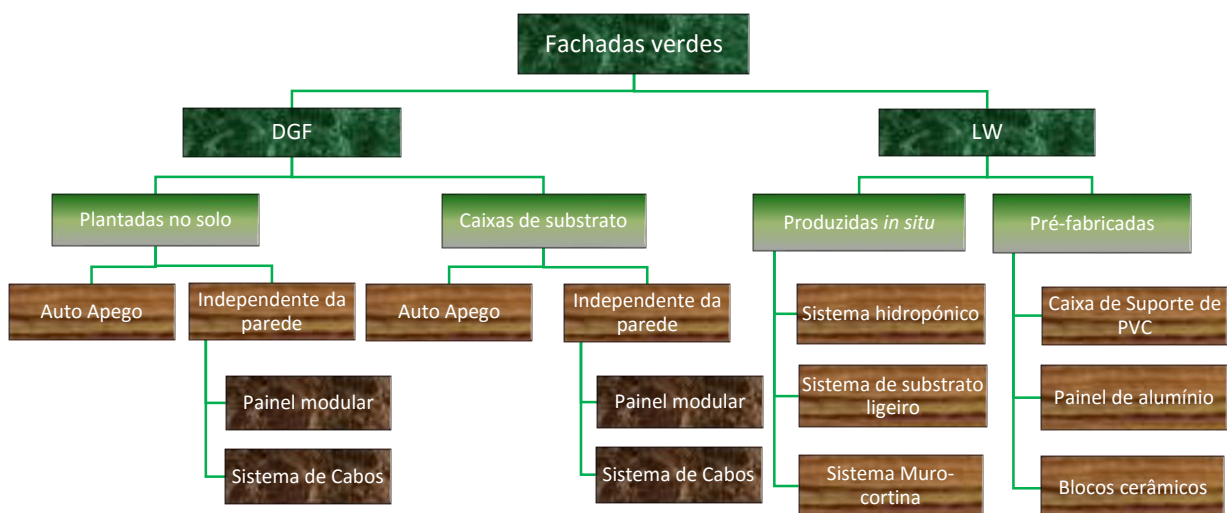
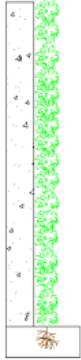
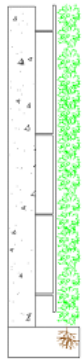
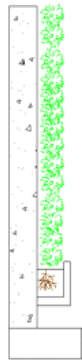
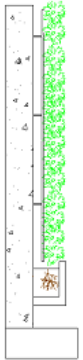
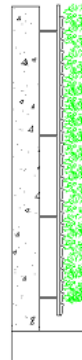
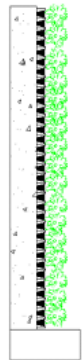
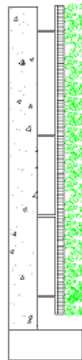
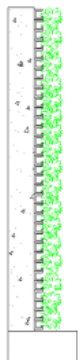


Figura 2.6 - Tipologia de fachadas verdes exteriores, segundo Sousa (2012), Pérez et al. (2011), Ottelé et al. (2011), Perini et al. (2013), Mazzali et al. (2013), Wong et al. (2010), Eumorfopoulou et al. (2009)

Tabela 2.3 - Síntese dos tipos de Fachadas Verdes exteriores

	Direct Green Façades (DGF)				Living Walls (LW)			
	Plantadas no solo		Caixas de substrato		Sistemas: hidropónico, substrato ligeiro e Muro-cortina	Caixa de Suporte de PVC	Painel de alumínio	Blocos cerâmicos
	Auto apego	Independente da parede	Auto Apego	Independente da parede				
Esquema								
Tipo	Direto	Indireto	Direto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto
Substrato	Terra	Terra	Terra	Terra	Feltro	Terra	Terra	Terra
Raízes	Solo	Solo	Caixa	Caixa	Bolsas	Caixas	Caixas	Caixas
Sistema de suporte	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Caixa-de-ar	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
Tipo de plantas	Tipo trepadeira	Tipo trepadeira	Tipo trepadeira	Tipo trepadeira	Qualquer	Qualquer	Qualquer	Qualquer
Sistema de rega	Natural	Natural	Gota a gota	Gota a gota	Gota a gota	Gota a gota	Gota a gota	Gota a gota

2.3. Vantagens e desvantagens das fachadas verdes

Os jardins verticais podem ser mais do que um acabamento estético das fachadas dos edifícios visto que trazem importantes benefícios para os mesmos, para o meio urbano e para as pessoas. Apresentam vantagens ambientais, económicas e sociais, bem como algumas desvantagens. Os benefícios da fachada verde podem ser facilmente quantificados através de estimativas técnicas baseadas no custo do sistema, performance, eficiência e durabilidade. No entanto, a viabilidade das opções técnicas está dependente das exigências das interações da fachada com o edifício.

As principais vantagens e desvantagens do uso de fachadas verdes em edifícios são apresentados na Tabela (2.4).

Tabela 2.4 - Resumo das vantagens e desvantagens em fachadas verdes

	Vantagens	Desvantagens
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos gases de efeito de estufa; • Adaptação às mudanças climáticas; • Melhoramento da qualidade do ar (redução da poluição do ar); • Habitat para animais; • Mitigar o efeito de ICU; • Redução das temperaturas do “Canyon” Urbano; • Coleção de partículas, como Dióxido de Carbono; • Aumento da retenção de água. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mão-de-obra especializada; • Manutenção; • Investimento inicial; • Pouco conhecido; • Falta de regulamentação; • Dependente das condições climáticas do local; • Problemas com Irrigação/Fertirrigação; • Facilidade de acesso às janelas por Cobras/aranhas venenosas; • Humidade no interior do edifício.
Económico	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição dos custos da infraestrutura de drenagem; • Aperfeiçoamento estético pode ajudar a vender o projeto (Marketing); • Redução das necessidades energéticas através de melhor isolamento e sombreamento. 	
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Alívio visual do ambiente urbano; • Aumento de espaços para relaxamento e melhorar relações sociais; • Impedimento da realização de grafitis nas fachadas; • Controlo de pó, humidade e geração de ar fresco; • Plantas reduzem o stress devido à sua estética; • Redução da síndrome dos Edifícios Doentes, SBS (Sick Building Syndrome, em Inglês); • Melhoramento na atenuação do som através da absorção, reflexão e refração. 	

2.3.1. Vantagens ambientais

A valorização das fachadas verdes é um assunto relativamente recente, visto que ainda não existem muitos dados empíricos que demonstrem os seus benefícios. As fachadas verdes podem ajudar a mitigar a perda de biodiversidade provocada pelos efeitos de urbanização. Ajudam a sustentar uma variedade de plantas, aumentam a produção de oxigénio e alimento, fornecem habitat e locais de

nidificação para diversas espécies de aves, Ottelé et al. (2011). Segundo diversos estudos, os jardins verticais ajudam a melhorar a qualidade do ar, através da redução do pó, partículas e compostos orgânicos voláteis (COV). Estes gases e partículas poluentes são retirados do ar e são lentamente decompostos e mineralizados, tornando-se adubo para as plantas. Além de diminuírem as concentrações de dióxido de carbono libertadas para a atmosfera, reduzem a necessidade do uso de aparelhos de ar condicionado para arrefecimento e aquecimento e equilibram a temperatura ambiente no interior dos edifícios, Ismail (2013).

As plantas proporcionam ao edifício vários mecanismos de arrefecimento como, o sombreamento, a evapotranspiração, a alteração do fluxo do ar, a absorção da radiação solar e a alteração do albedo da superfície, Cameron et al. (2014) e Sheweka et al. (2012). A vegetação permite assim reduzir tanto as temperaturas superficiais como as velocidades do vento e o efeito de ruído do trânsito, Stec et al. (2005). A contribuição da vegetação para o desempenho térmico do edifício em condições climáticas diversas tem sido alvo de várias investigações, como no estudo de Meier (1991), a proximidade de vegetação ao edifício beneficia e melhora o conforto térmico no ambiente interior, e assim, reduz as necessidades energéticas de arrefecimento. Tal acontece porque as plantas absorvem uma quantidade considerável de radiação solar para o seu crescimento e funções biológicas, como a fotossíntese, respiração, transpiração e evaporação nas folhas, Kontoleon et al. (2010). Assim, a vegetação tem um papel fundamental na mitigação do efeito de ilha de calor urbano (ICU), conseguindo diminuir a radiação absorvida pelo edifício, traduzindo-se num aumento de humidade local devido à evapotranspiração das plantas e consequente diminuição da temperatura, Figura (2.7), Sheweka et al. (2012). A ilha de calor em meio urbano traduz-se pelo aumento de temperatura da área metropolitana face às áreas rurais na vizinhança. Este efeito ocorre nas cidades pelo aumento de superfícies artificiais criadas pelo Homem e pela energia que as pessoas, carros, autocarros, comboios, entre outros, produzem. Entre 1979 e 2003, morreram mais pessoas pelo efeito ilha de calor do que devido a furacões, raios, tornados, inundações e terremotos, todos juntos, EPA (2012). Segundo Mazzali et al. (2013) afirma que num microclima, a introdução de fachadas verdes pode contribuir na mitigação do fenómeno através do sombreamento das plantas no edifício. Tanto o impacto do sombreamento como da evapotranspiração, reduzirá o calor que seria novamente radiado pelas fachadas. Também Perini et al. (2013) esclarece que o efeito positivo da vegetação reduz o efeito de ilha de calor, mas apenas se torna evidente se existirem grandes superfícies de espaços verdes, como parques, jardins, fachadas e coberturas verdes. Em geral, os melhores resultados para a redução de temperaturas no centro urbano são obtidos quando combinadas as duas soluções nos edifícios, fachadas e coberturas verdes.

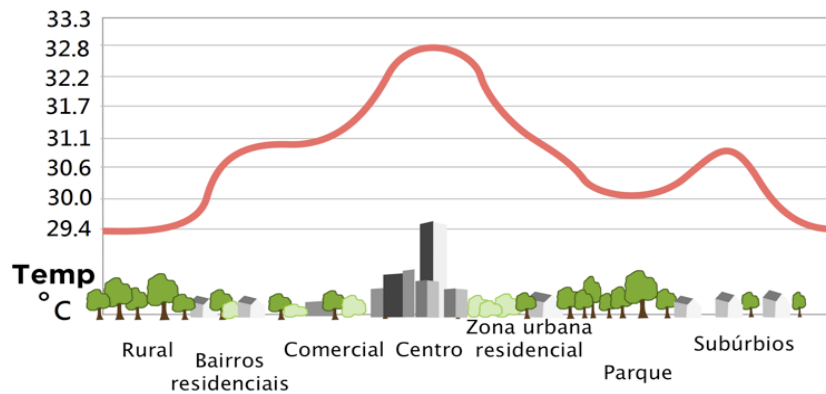


Figura 2.7 - Temperaturas em zona rural e urbana devido à ilha de calor urbano, Reurb (2014)

2.3.2. Vantagens económicas

O interesse no jardim vertical em fachadas pode ser justificado não só pelo enriquecimento do imóvel, por ser uma tecnologia relativamente nova, mas também por necessitar de pouco espaço. Esta é uma grande vantagem, visto que com o aumento do crescimento urbano, os espaços para a construção de jardins, diminuí. Também a utilização de diferentes cores e disposições das plantas dão imediato carácter e vivacidade ao edifício, e, por consequência, criam uma perceção positiva aos possíveis compradores. Assim, consegue-se aumentar o valor da propriedade comercial e residencial entre 7% a 15%, Green (2010).

A presença de vegetação na fachada protege o edifício através de uma barreira, isolando a edificação e deixando-o menos suscetível às solicitações exteriores. O isolamento térmico providenciado pelas plantas ajuda a reduzir a quantidade de calor perdido pelas casas para o exterior e a reduzir a acumulação do mesmo para o interior. Assim, melhora o comportamento térmico dos edifícios e proporciona uma redução de custos de aquecimento e arrefecimento, Ismail (2013).

Os efeitos económicos gerados pela presença de vegetação nos valores da propriedade têm sido investigados ao longo dos anos, principalmente em coberturas verdes, mas subentende-se que tenha o mesmo impacte em fachadas verdes. Segundo Akbari et al. (2001), a presença de espaços verdes em jardins, fachadas e coberturas reduz 20% da energia total dos E.U.A. necessária para o arrefecimento do edifício. Esta percentagem representa uma poupança de 40 Twh/ano e de \$4 milhares de milhão por ano. Já no estudo de Peck et al. (1999) verificou-se que o valor do edifício aumenta cerca de 6% a 15% na presença de uma fachada verde, enquanto na investigação de Rosiers et al. (2002) estimou-se que o valor do edificado aumenta de 3,6% a 3,9%. Segundo o estudo de Gao et al. (2007) refere que o preço do terreno aumenta cerca de 1,4% em Tóquio e 2,7% em Kitakyushu por existir vegetação na fachada e nas estradas. Outro impacto económico está relacionado com o aproveitamento da água proveniente das chuvas para a rega das plantas na fachada, dado que a captação da água e posterior armazenamento num reservatório possibilita a redução até 90% das despesas com a água, Design (2010).

2.3.3. Vantagens sociais

Os jardins verticais são uma forma de adicionar elementos naturais à vida quotidiana das pessoas em meios urbanos. O verde tem um excelente potencial na redução do stress, causado pelo ruído e pelos aglomerados de pessoas, como também um importante impacto no fornecimento de ar limpo. Além de proporcionar o encobrimento da tonalidade cinzenta do betão, os jardins verticais ficam sujeitos a várias alterações ao longo das estações do ano, tais como, a cor, o tamanho, as flores e o perfume que proporcionam, beneficiando as comunidades ao usufruir melhor o espaço em que vivem. A aplicação de plantas tanto no exterior como no interior do edifício traz um efeito psicológico positivo na redução do risco da Síndrome dos Edifícios Doentes (Sick Building Syndrome, em Inglês). Esta síndrome é um fenómeno pouco compreendido, onde as pessoas apresentam uma variedade de sintomas relacionados com o dia-a-dia num certo edifício, na maior parte das vezes no local de trabalho, e não há causa específica identificada. No entanto, investigadores pressupõem que deriva da combinação de diversos fatores, tais como, pouca ventilação, baixa humidade, partículas no ar, fatores psicológicos, pouca luminosidade. De acordo com Gerwig (2014), a saúde não se encontra no tratamento da doença com medicação, mas sim através do contacto com a natureza, uma vez que reduz a quantidade de tempo que os doentes passam nas unidades de saúde. A presença de vegetação nas fachadas fornece um alívio visual que muitas das vezes não existe nos ambientes monótonos dos hospitais. Estes problemas também existem em edifícios modernos, provavelmente devido aos novos materiais de construção e à falta de verde, Fjeld et al. (1998) através de Skov et al. (1990). A utilização de plantas na fachada pode reduzir a criminalidade ao transmitir maior segurança às pessoas e por proporcionar menores comportamentos violentos na presença de vegetação. Funciona também como um importante entrave para o vandalismo dos edifícios, especialmente para grafitis, pela incompatibilidade da aplicação dos mesmos, Plantscapes (2012).

A planta tem um papel muito importante na remoção da poluição do ar no espaço interior, ou diretamente pelas folhas ou indiretamente pelas raízes e solo. Neste contexto, recomenda-se para a remoção de altas concentrações de químicos e fumo, dentro do edifício, um sistema integrado utilizando plantas em vasos e um ou mais sistemas de filtração. Subentende-se que as plantas em espaços exteriores, neste caso, em fachadas verdes exteriores, terão o mesmo efeito, Wolverton (1989). Uma outra característica que a planta proporciona trata-se da redução do som. Segundo o estudo de Kockbeker et al. (2012), a vegetação tem sido proposta como um material natural capaz de reduzir a poluição sonora do exterior em meio urbano. Tanto as árvores, como os arbustos situados entre a fonte e o recetor do ruído podem reduzir o nível do mesmo. Através de medições do som realizadas por Kockbeker et al. (2012), a vegetação consegue reduzir entre 2,7dB e 6dB de nível de pressão sonora, dependendo da espécie utilizada.

2.3.4. Desvantagens

Alguns dos problemas presentes em fachadas verdes podem partir de inconvenientes na construção e na sua manutenção, muitos deles provocados por deficiente dimensionamento ou pela falta de qualidade da obra, não sendo estes objecto de estudo na presente dissertação. Uma das principais desvantagens das fachadas verdes prende-se com a falta de acesso durante a sua manutenção. Na investigação de Green (2013), a solução mais eficiente para o acesso às pequenas fachadas verdes requer uma plataforma móvel ao nível do chão, enquanto para fachadas verdes com mais de 10 metros, é necessária uma plataforma de trabalho colocada no telhado. Ambas as soluções requerem mão-de-obra especializada e gestão do risco, com o objetivo de reduzir danos na estrutura, nas plantas e diminuir os acidentes com os trabalhadores. Segundo os estudos de Francis et al. (2011) e de Castleton et al. (2010), tanto a cobertura como a fachada verde têm uma potencial barreira socioeconómica na sua utilização, sendo os seus maiores obstáculos, a manutenção e o investimento financeiro inicial. Sendo que, o preço da cobertura varia entre 75€/m² e 130€/m², enquanto para a fachada o preço encontra-se próximo de 300€/m². Por sua vez, no estudo de Perini et al. (2013), apresentam-se preços para os vários tipos de fachadas verdes, a constituída por plantas do tipo trepadeira com um custo de 30 a 45 €/m², a de vasos com valores entre 40 e 75€/m² e a de painéis pré-fabricados com quantias entre 400 a 1200€/m². A outra importante desvantagem das fachadas verdes prende-se com, a possibilidade de secagem das plantas na ausência de um sistema de irrigação e de fertirrigação eficaz. Quando surge algum problema no sistema de irrigação ou de fertirrigação e a vegetação falece, torna-se necessário um novo investimento para a restituição das plantas na fachada. Toma-se como exemplo, a situação em Holloway, na qual uma fachada verde de £100.000 secou, devido a problemas de rega e foi preciso um novo investimento de £130.000 para a substituição das plantas, Blunden (2010). Apresenta-se na Figura (2.8) a situação da fachada verde com problemas e na Figura (2.9) a situação da fachada verde com a vegetação saudável.



Figura 2.8 - Fachada verde com problemas, Wolmarans (2013)



Figura 2.9 - Fachada verde sem problemas, Wolmarans (2013)

A diversidade de vegetação utilizada numa fachada verde proporciona a deslocação de animais de diversas espécies para a mesma por existir alimento e a possibilidade de nidificação. Alguns destes até podem ser inconvenientes por possuírem má reputação na interação com o Homem, como por

exemplo, cobras, aranhas e abelhas. O problema aparece, quando existe a facilidade dos animais terem acesso a janelas abertas. Não obstante do afirmado, este problema é cuidadosamente investigado durante a escolha das espécies de plantas colocadas próximas dos locais abertos.

Uma das preocupações no dimensionamento da fachada prende-se com a escolha das plantas. A falta de estudos preliminares pode provocar a não adaptação da planta às condições climáticas do local. Em Portugal, ainda não existe regulamentação específica para este tipo de construção, nem existem muitas empresas portuguesas a construí-las. Além da possibilidade de aparecerem falhas de diversos tipos durante a sua construção e manutenção, necessita de mão-de-obra especializada por não ser um tipo de obra comum.

2.4. Fachada verde vs cobertura verde

As coberturas verdes, de uma forma simplificada, caracterizam-se por serem instaladas sobre a laje estrutural e por constituírem camadas intermédias de membranas protetoras e de isolamento, bem como uma camada de substrato (terra) com vegetação, Figura (2.10).



Figura 2.10 - Cobertura verde na Gulbenkian, Silva (2014)

Na Tabela (2.5) encontram-se benefícios e limitações que se fazem sentir na presença de uma fachada ou de uma cobertura verde. Nesta Tabela (2.5) constam os benefícios térmicos e hidrológicos, a envolvente do edifício, a qualidade do ar, a produção de alimento, a vida selvagem e o bem-estar das pessoas, enquanto as desvantagens centram-se nos custos materiais e de operação. Em particular, verificam-se diferenças ao nível da redução da temperatura pelo espaço de ar existente entre o edifício e a fachada. A fachada verde por ser um elemento estrutural vertical, independente do edifício, pode-se projetá-la a vários centímetros do edifício.

Tabela 2.5 - Resumo dos parâmetros de fachadas e coberturas verdes, adaptado de Stav (2008)

	Fachadas verdes	Coberturas verdes
Benefícios térmicos	<ul style="list-style-type: none"> Grande área de superfície para edifícios altos 	<ul style="list-style-type: none"> Mais benéfico para edifícios baixos
Benefício para a Hidrologia	<ul style="list-style-type: none"> Potencial para filtração do escoamento 	<ul style="list-style-type: none"> Significante retenção e filtração
Envolvente do edifício	<ul style="list-style-type: none"> Proteção contra temperaturas extremas e radiação ultravioleta 	<ul style="list-style-type: none"> Proteção contra temperaturas extremas e radiação ultravioleta
Qualidade do ar	<ul style="list-style-type: none"> Grande área de superfície para edifícios altos 	<ul style="list-style-type: none"> Área pequena, longe do nível do chão
Produção de alimento	<ul style="list-style-type: none"> Grande área com problemas de acessibilidade 	<ul style="list-style-type: none"> Acessível mas com uma área relativamente pequena
Vida selvagem	<ul style="list-style-type: none"> Habitat vertical 	<ul style="list-style-type: none"> Alto potencial para criação de habitat natural
Bem-estar das pessoas	<ul style="list-style-type: none"> Grande área exposta ao nível das ruas 	<ul style="list-style-type: none"> Parcialmente visto ou acessível
Custos materiais	<ul style="list-style-type: none"> Suporte estrutural e sistemas especializados podem ser necessários 	<ul style="list-style-type: none"> Material adicional para impermeabilização, drenagem e substrato
Custos de operação	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção vertical pode ser desafiante 	<ul style="list-style-type: none"> Custos altos para as diferentes tipologias de coberturas

As características de uma fachada e cobertura verde proporcionam a redução da temperatura, o isolamento térmico por sombreamento, o arrefecimento por evaporação e a variação do vento no edifício, Tabela (2.6).

Tabela 2.6 – Características de fachadas e de coberturas verdes, adaptado de Sheweka et al. (2012)

	Fachadas verdes	Coberturas verdes
Redução da temperatura	<ul style="list-style-type: none"> LAI; Barreira contra o vento; Espaço de ar entre o edifício e fachada; Substrato: espessura, baridade, teor de humidade e cor. 	<ul style="list-style-type: none"> LAI; Substrato: espessura, baridade, teor de humidade e cor.
Isolamento (Sombreamento)	<ul style="list-style-type: none"> LAI; Número de camadas. 	<ul style="list-style-type: none"> LAI; Número de camadas.
Arrefecimento (Evaporação)	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de planta; Exposição; Clima (seco/húmido); Velocidade do vento; Humidade do substrato. 	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de planta; Exposição; Clima (seco/húmido); Velocidade do vento; Humidade do substrato.
Variação do vento no edifício	<ul style="list-style-type: none"> Densidade da folhagem e penetrabilidade; Velocidade e direção do vento; Orientação da fachada. 	<ul style="list-style-type: none"> Densidade da folhagem e penetrabilidade; Velocidade e direção do vento.

2.5. Incentivos fiscais para a utilização de fachadas verdes

Nos últimos vinte anos, algumas cidades internacionais adotaram incentivos económicos de forma a apoiarem uma maior implementação de vegetação em cidades, embora, na maior parte dos casos sejam apenas para coberturas verdes, Perini et al. (2013). No estudo de Scherer et al. (2013) as cidades, Londres em Inglaterra e Toronto no Canadá, criaram impulsos para a construção de fachadas verdes com o intuito de aumentar as superfícies verdes em áreas urbanas e minimizar os impactes ambientais nas mesmas. Da mesma forma, no Japão e em Singapura, incitam as investigações e aplicações de fachadas verdes como solução na redução do consumo energético da climatização. Na investigação de Pérez et al. (2011) verifica-se que existem benefícios fiscais em Espanha para a implementação de fachadas verdes. Já em Nova Iorque, nos Estados Unidos da América, surgiu uma redução no imposto de inserção de fachadas verdes de 1,5 a 3 \$/m², Open (2014). Segundo Costa (2011), várias cidades na Alemanha já apresentam programas de incentivo às construções mais ecológicas, incluindo as fachadas verdes. Quanto à Austrália, os projetos têm surgido apenas para as coberturas verdes mas prevêem-se planos para as fachadas verdes no futuro, como para a cidade de Sydney, em que se consideraram várias opções estratégicas para uma política flexível de implementação de fachadas verdes, Strategy (2012).

Apesar do potencial destas fachadas verdes ser alto, ainda não existe regulamentação e programas de incentivo em Portugal, no entanto, já se construíram alguns exemplos, como as fachadas em Lisboa e em Coimbra, Figuras (2.11) e (2.12), realizadas por empresas portuguesas, a ADN Design e a Clorofila.



Figura 2.11- Fachada verde numa habitação unifamiliar, na Travessa do Patrocínio, Lisboa, ADN Design (2012)



Figura 2.12 - Fachada verde em Condomínio Privado, Quinta das Nogueiras, Coimbra, Clorofila (2010)

2.6. Simulação do comportamento térmico de fachadas verdes

O crescente interesse nas fachadas verdes tanto a nível estético como a nível dos benefícios para o edifício e envolvente refletiu-se no desenvolvimento de trabalhos de investigação na área de modelação ao longo dos últimos anos. Até ao presente, apesar das múltiplas pesquisas acerca dos efeitos térmicos proporcionados pela vegetação, existem poucos modelos de fachadas verdes capazes de simular o efeito das plantas no comportamento térmico do edifício. Os modelos existentes já incluem a evapotranspiração, as trocas de calor por convecção e por radiação entre a vegetação, o ambiente envolvente e o chão, bem como algumas características das plantas. No entanto, carecem em algum parâmetro, isto é, não estão completos. No estudo de Holm (1989), desenvolveu-se um modelo que prevê o comportamento térmico na fachada verde para diferentes orientações, climas e tipos de construção, mas não inclui a evapotranspiração e baseia-se num conjunto específico de características das plantas medidas em laboratório. Já na investigação de Eumorfopoulou et al. (2009) elaborou-se um modelo matemático simplificado de uma fachada verde utilizando a resistência térmica, com a intenção de avaliar o efeito da orientação da fachada, da densidade da folhagem, da camada de isolamento e das reduções energéticas no arrefecimento. Quanto ao modelo matemático de Di et al. (1999) regeu-se pelo fluxo de calor por convecção monitorizado em campanhas experimentais de fachadas verdes. A elaboração dos três modelos mencionados anteriormente teve em consideração apenas as características das espécies de plantas recolhidas experimentalmente e não de outras espécies. As dimensões das folhas, o LAI, a resistência estomática, entre outras características, são intrínsecas a cada planta. Daí não ser viável utilizá-los para a simulação de fachadas verdes com espécies de plantas diferentes das dos modelos em questão.

Os modelos de coberturas verdes não podem ser diretamente usados para estimar propriedades térmicas e fluxos de calor através de fachadas verdes, dado que as fachadas caracterizam-se pela ausência de solo, pelos processos de troca de calor acontecerem na horizontal, pela radiação solar incidente ser no plano vertical, entre outros.

Os programas computacionais utilizados nas simulações do comportamento térmico em fachadas verdes são praticamente inexistentes, e os que existem pertencem a empresas privadas ou servem para estimar as reduções de temperatura do ar exterior na envolvente da fachada.

Nas Tabelas (2.7), (2.8) e (2.9) encontram-se sínteses bibliográficas de alguns artigos analisados tendo em conta a utilização ou não de modelo e respetiva validação, alguns parâmetros fulcrais como a temperatura, o coeficiente de transmissão térmica, a evapotranspiração e o albedo das plantas em diversos tipos de clima.

Tabela 2.7 Análise de fachadas verdes – síntese bibliográfica

Clima	Tipo de fachada	Referência	Simulação			Experimental	Edifício				Conclusões / Observações				
			Programa	Modelo	Validação		Local	Tipo de edifício	Est. Do Ano	Orientação	ΔT Superfície da fachada (diminuição)	Coefficiente de transmissão térmica (U)	Temperatura	Evapotranspiração	Albedo das Plantas
Húmido Continental	DGF	Di et al. (1999)	Aproximações de diferenças finitas de equações diferenciais	Fluxo de calor da fachada verde e convencional	-	X	Pequim (China)	Universidade	Verão	Oeste Sul	8,2°C	-	A hera da DGF => ↓ Radiação solar absorvida e ↓ Temperatura superficial interior	-	0.15
Subártico para árido	DGF	Alexandri et al. (2008)	C++ e aproximações de diferenças finitas de equações diferenciais	Transferência de calor e de massa com base em dados experimentais	-	-	9 Cidades: Atenas Pequim Brasília Hong Kong Londres Montreal Moscou Bombaim Riade	-	Verão	Norte Sul Este Oeste	-	-	Quanto ↑ o espaço envolvente, ↓ será o efeito na diminuição da temperatura	-	0.3
Equatorial	DGF	Wong et al. (2010)	TAS (Thermal Simulation Software)	ETTV [i] através da relação entre o coef. de sombra e o LAI	-	-	Ayer Rajah (Singapura)	-	Inverno, Primavera, Verão e Outono	-	1,1°C-11,58°C	Coefficiente (U) diminui com a presença de folhagem	DGF => ↓ MRT [ii] do edifício. A presença de vegetação => ↓ temperatura da zona envolvente.	-	-
Temperado Continental	DGF	Susorova et al. (2013)	-	Modelo implementado por Susorova et al. (2013)	Comparação com resultados experimentais, coeficientes de correlação de 0,96 (sem nuvens) e 0,86 (com nuvens)	X	Illinois, Chicago (E.U.A.)	Universidade	Verão	Sul	4,7°C	-	As plantas com folhagem densa e com folhas paralelas à parede => ↓ temperatura superficial exterior e ↓ fluxo de calor	Bristow-Campbell	-

[i] ETTV- Valor das transferências térmicas para a envolvente

[ii] MRT- Temperatura média radiada

Tabela 2.8 - Análise de fachadas verdes – síntese bibliográfica (continuação)

Clima	Tipo de fachada	Referência	Simulação			Experimental	Edifício				Conclusões / Observações				
			Programa	Modelo	Validação		Local	Tipo de edifício	Est. Do Ano	Orientação	ΔT Superfície da fachada (diminuição)	Coefficiente de transmissão térmica (U)	Temperatura	Evapotranspiração	Albedo das Plantas
Mediterrânico	LW	Malys et al. (2014)	SOLENE Microclimate	Modelo implementado por Malys et al. (2014)	Comparação com resultados experimentais da temperatura, sendo $\Delta T_{\text{substrato}}$ e $\Delta T_{\text{folha}} < 2^\circ\text{C}$	X	Genebra (Suíça)	Amostra num terraço	Primavera	Sul	-	-	O fluxo de calor latente limita o \uparrow da temperatura do substrato da amostra composta por telhas ocas	Método de Penman-Monteith	0.25 - 0.3
	LW	Olivieri et al. (2013)	-	Estimada a ΔT entre LW e convencional com modelo autorregressivo de variáveis exógenas	Estimado um erro padrão residual através de resultados experimentais, $0,61-3,54 \text{ }^\circ\text{C}^2$	X	Colmenar Viejo (Espanha)	Protótipo de escritório	Inverno, Primavera, Verão e Outono	Sul	$15^\circ\text{C}-30^\circ\text{C}$ da parede sem vegetação (metal) durante o dia	-	As LW => \downarrow temperatura exterior em zonas de clima mediterrânico.	-	-
	DGF	Eumorfopoulou et al. (2009)	-	Estimada a resistência térmica e a exigência energética através de dados experimentais	-	X	Saloniki (Grécia)	Amostra num terraço	Verão	Norte Sul Este Oeste	$1,9^\circ\text{C}-8,3^\circ\text{C}$	-	A colocação de isolamento sobre a sup. ext. da alvenaria => \downarrow a ΔT	-	0.16

Tabela 2.9 - Análise de fachadas verdes – síntese bibliográfica (continuação)

Clima	Tipo de fachada	Referência	Simulação			Experimental	Edifício				Conclusões / Observações				
			Programa	Modelo	Validação		Local	Tipo de edifício	Est. Do Ano	Orientação	ΔT Superfície da fachada (diminuição)	Coefficiente de transmissão térmica (U)	Temperatura	Evapotranspiração	Albedo das Plantas
Subtropical Húmido	DGF	Holm (1989)	DEROB	Representado por características individuais das plantas	Comparação com resultados experimentais, coeficientes de correlação de 0,93 (verão) e 0,97 (inverno)	X	África do Sul (Pretória)	1 -Amostra 2 -Habitacional	Verão, Inverno	Oeste	2,6°C	-	Δ temperatura superficial exterior e Δ temperatura superficial interior da DGF é ↓ no Verão e no Inverno	-	0.16
	LW	Chen et al. (2013)	-	Estimados os fluxos de calor por convecção e radiação	-	X	Wuhan (China)	Laboratório térmico numa cobertura	Verão	Oeste	-	-	A LW proporciona ↓ Δ temperatura superficial exterior e Δ temperatura superficial interior	-	-
-	DS-GF	Stec et al. (2005)	SimulinkTM	Calor latente através da evapotranspiração a constante da relação do calor latente com o calor total absorvido	Comparação com resultados experimentais, coeficientes de correlação > 0,98	X	(Holanda)	Amostra num Laboratório	-	Sul	-	-	A Temperatura é ↓ em todas as camadas utilizando vegetação em vez de persianas	Método de Penman-Monteith.	-

DS-GF – Double Skin Green Façade. Representa uma fachada dupla com a constituição do exterior para o interior: vidro, ar, vegetação, ar e parede.

As Tabelas (2.9), (2.10) e (2.11) encontram-se organizadas pelo clima onde se localiza cada estudo, o que permite verificar a existência de alguma correlação entre as conclusões dos diversos autores na utilização de fachadas verdes. Concluiu-se que existe maior variação entre as temperaturas superficiais exteriores da parede com e sem vegetação no clima equatorial, mediterrânico e húmido continental na estação de Verão. Verifica-se que esta diferença ocorre maioritariamente em fachadas verdes do tipo DGF. A razão para tal, centra-se no facto das fachadas verdes do tipo LW serem mais recentes que as do tipo DGF. O facto de a temperatura do ar exterior ser alta, proporciona o aumento da temperatura superficial exterior da fachada, bem como a temperatura do ar interior do edifício, daí a vegetação ter um importante papel na redução deste efeito. Também a orientação da fachada melhora o seu comportamento térmico, se estiver posicionada de forma a atenuar com mais eficácia o efeito do vento e a receber mais radiação solar.

O coeficiente de transmissão térmica (U) é caracterizado pela quantidade de calor transferido através de uma dada superfície como uma dada espessura, em regime estacionário, quando a diferença entre ambas é diferente. No estudo de Wong et al. (2010) registou-se que, edifícios com cobertura verdes apresentam valores do coeficiente de transmissão diferentes de edifícios convencionais. Sendo o valor de $U = 0,365 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para o caso de estudo com vegetação e o valor de $U = 3,344 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para o caso de estudo sem vegetação. A diferença de valores prende-se com a utilização de substrato e de vegetação. Embora na constituição da fachada verde não exista terra, o valor do coeficiente de transmissão térmica pode ser semelhante ao apresentado por Wong et al. (2010), dado que na sua estrutura existe vegetação, camadas de substrato e ar.

A evapotranspiração é um fenómeno que inclui a perda de água do solo por evaporação e a perda de água da planta por transpiração em simultâneo. Este processo tem importante relevância no efeito de arrefecimento, contudo é bastante dependente das condições climáticas locais. O cálculo da evapotranspiração traduz-se numa função complexa de múltiplos fatores como a radiação solar, a humidade do ar, a velocidade do vento, a concentração interna de dióxido de carbono na folha, entre outros. Este cálculo pode ser realizado pela equação de Bristow-Campbell (2009), que depende da radiação global e das temperaturas máxima, mínima e média, e pela equação de Penman-Monteith segundo Zotarelli et al. (2009), a qual calcula a evaporação da superfície das folhas em função das radiações de onda curta e longa, temperatura e pressão do vapor no ar envolvente. De notar também que no balanço da água e no cálculo da evapotranspiração existe muita incerteza devido à falta de dados experimentais, são necessários melhores procedimentos para melhorar a exatidão dos resultados.

O albedo ou coeficiente de reflexão é o rácio entre a radiação refletida e a radiação incidente na superfície. Trata-se de um valor adimensional e pode ser expresso em percentagem (0-100%) ou numa escala (0-1). Sendo o valor mínimo a reflexão de uma superfície preta e o valor máximo uma superfície branca. Os valores do albedo de plantas varia entre 0,15 e 0,30.

2.7. Considerações finais

Da literatura científica, verificou-se que os fenômenos envolvidos nas fachadas verdes são muito mais complexos que nas fachadas convencionais. A evapotranspiração proporcionada pela presença de vegetação depende de imensos parâmetros e que muitas vezes não é fácil ser quantificada, são necessárias medições mais precisas para tornarem os resultados mais verosímeis. A variabilidade entre estudos é significativa, nomeadamente devido ao tipo de fachada verde, espécies de plantas, clima e localização. Também os programas computacionais utilizados nos modelos avaliam situações diferentes e até hoje não está disponível um programa que permita estudar o fluxo horizontal em fachadas verdes considerando todos os parâmetros envolvidos no processo. Em suma, a utilização de vegetação proporciona uma redução significativa da temperatura superficial exterior da fachada em dias de maior calor (verão), enquanto nos dias frios (inverno) essa influência não se nota muito. Na Tabela (2.10), apresenta-se um resumo dos fatores que afetam de algum modo o comportamento térmico de uma fachada verde.

Tabela 2.10 - Resume dos fatores que influencia o comportamento térmico de uma fachada verde

	Parâmetros que aumentam/diminuem os fatores presentes
Evapotranspiração (Penman-Monteith)	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura do ar na folhagem ↑• Radiação solar ↑• Pressão de saturação do vapor ↑• Resistência aerodinâmica ↓• Velocidade do vento ↑• Altura das plantas ↑• Resistência estomática ↓• LAI ↑
Sombreamento	<ul style="list-style-type: none">• LAI ↑• Altura das plantas ↑
Absorção de radiação solar da vegetação	<ul style="list-style-type: none">• Radiação solar ↑• Absortância da folha ↑• LAI ↑• Altura das plantas ↑

3. Modelos de fachadas verdes

Neste capítulo descrevem-se os dois modelos de fachadas verdes utilizados na validação dos dados recolhidos da monitorização realizada por Prazeres (2015). O primeiro baseia-se num estudo realizado por Susorova et al. (2013) numa fachada verde do tipo Direct Green Façade (DGF) de auto apego situada em Chicago. O segundo consiste num estudo desenvolvido por Malys et al. (2014) em protótipos de fachadas verdes do tipo Living Wall (LW) situadas em Genebra. Com estes modelos pretende-se perceber se a vegetação proporciona uma redução nas temperaturas superficiais exteriores, bem como se existe alguma correlação entre eles.

3.1. Modelo de Susorova et al. (2013)

O modelo de Susorova et al. (2013) foi desenvolvido para uma fachada verde do tipo DGF de auto apego que apresenta as raízes das plantas fixas ao chão, sendo que, o crescimento das plantas ocorre diretamente na superfície da mesma sem a utilização de solo ou substrato, Figura (3.1).



Figura 3.1 - Fachada verde (vegetated facade area) e fachada sem vegetação (bare facade area), Susorova et al. (2013)

Este modelo simula o comportamento térmico da fachada utilizando parâmetros como as características variáveis das plantas, as propriedades da fachada, as orientações do edifício e as condições atmosféricas. Para isso, considera os fenómenos da evapotranspiração, trocas de calor por convecção e radiação entre as plantas, a fachada, o ambiente envolvente e o chão. Em relação às características individuais das plantas incluem-se a absorvância da folha, a dimensão da folha, índice de área da folha (LAI), coeficiente de atenuação da radiação, condutância e respetiva resistência estomática da folha. Algumas das considerações de base utilizados neste modelo baseiam-se em estudos anteriores de outros autores, como Sailor (2008), Campbell (1998) e Gates (2003):

- As folhas estão uniformemente distribuídas e orientadas na fachada vertical;
- Os ângulos individuais das folhas não são considerados no modelo, apenas o ângulo respetivo à inclinação da fachada;

- As características individuais das plantas como a dimensão da folha, a absorvância da folha, o LAI, coeficiente de atenuação da radiação e condutância estomática são constantes e não variam ao longo do ano;
- O fluxo de calor na fachada verde dá-se apenas na horizontal e não é considerado o fluxo de calor na vertical;
- A velocidade do vento é considerada constante, não variando com a altura;
- A precipitação não é considerada;
- O ar que se encontra por baixo dos poros estomáticos das plantas está saturado.

O valor de LAI é adimensional (m^2/m^2) e representa a área projetada da folha por unidade de área de superfície. Os seus valores variam de 0.01-7 para plantas pequenas com folhas pequenas e para florestas com dosséis densos. Na Figura (3.2) estão presentes três exemplos do parâmetro LAI na fachada verde do modelo de Susorova et al. (2013).



Figura 3.2 - Fachada verde com diferentes LAI, Susorova et al. (2013)

O balanço energético da parede sem vegetação (psv), medido em W/m^2 , depende da radiação de onda curta para a parede (SR_{psv}), da radiação de onda longa de e para a parede (LR_{psv}), do fluxo de calor por convecção de e para a parede (C_{psv}), do fluxo de calor por condução através da parede (Q_{psv}) e do calor armazenado no material da parede (S_{psv}), Equação (3.1).

$$SR_{psv} + LR_{psv} + C_{psv} = Q_{psv} + S_{psv} \quad (3.1)$$

O balanço energético da parede com vegetação (pcv), medido em W/m^2 , inclui os parâmetros da equação (3.1) bem como as trocas de radiação entre a parede e a vegetação (LR_{f-pcv}), Equação (3.2).

$$SR_{pcv} + LR_{pcv} + C_{pcv} + LR_{f-pcv} = Q_{pcv} + S_{pcv} \quad (3.2)$$

Nas Figuras (3.3) e (3.4) representam-se esquematicamente os processos de transferência de calor de pcv e de psv .

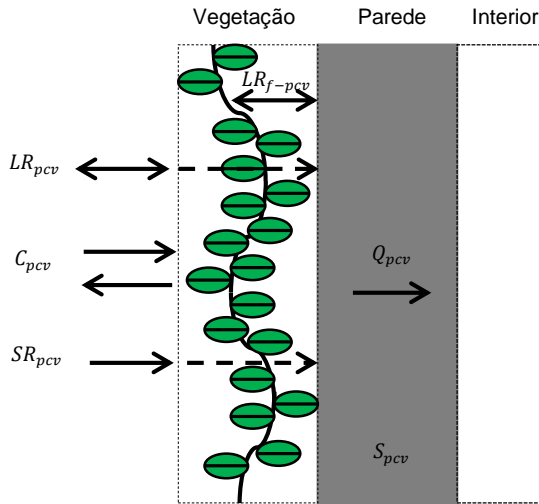


Figura 3.3 - Balanço energético da parede com vegetação, adaptado de Susorova et al. (2013)

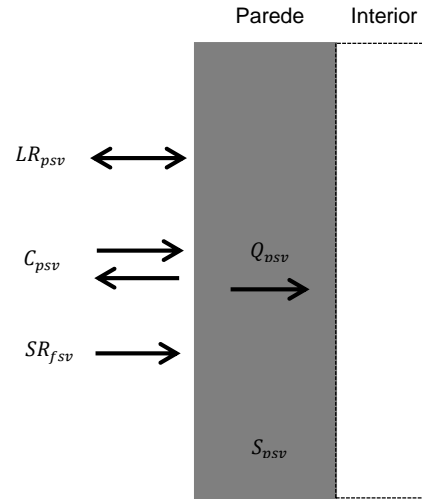


Figura 3.4 - Balanço energético da parede sem vegetação, adaptado de Susorova et al. (2013)

A radiação de onda curta na psv é composta pela radiação solar de onda curta incidente na superfície (I_t) e pela absorptância (α_p) da parede, Equação (3.3). Na pcv é ainda acrescentado a transmitância solar na vegetação (τ), Equação (3.4).

$$SR_{psv} = I_t \alpha_p \quad (3.3)$$

$$SR_{pcv} = I_t \alpha_p \tau \quad (3.4)$$

A α_p é adimensional e representa a fração de radiação solar incidente absorvida pela parede da fachada, sendo o seu valor dependente do tipo de acabamento da mesma. Segundo Susorova et al. (2013) uma parede de tijolo vermelho assume o valor de $\alpha_p \approx 0.7$, enquanto Neves (2009) admite o valor de $\alpha_p \approx 0.9$ para uma parede de betão normal. A τ também é adimensional e varia de 0-1. Depende do coeficiente de atenuação da radiação solar e do LAI , Equação (3.5).

$$\tau = e^{(-K LAI)} \quad (3.5)$$

O valor do coeficiente de atenuação da radiação solar (K) é adimensional (0-1). Esta variabilidade deve-se ao ângulo da folha, sendo o valor $K = 0$ quando a folha é perpendicular à fachada e $K = 1$ quando é paralela. Quanto maior o LAI e o coeficiente de atenuação da radiação, menor a transmitância solar na vegetação, a isto se deve à pouca radiação que a atravessa, sendo este processo favorável na redução da quantidade de calor absorvida pela fachada. A Figura (3.5) demonstra a variação do τ e do LAI , com valores de K constantes.

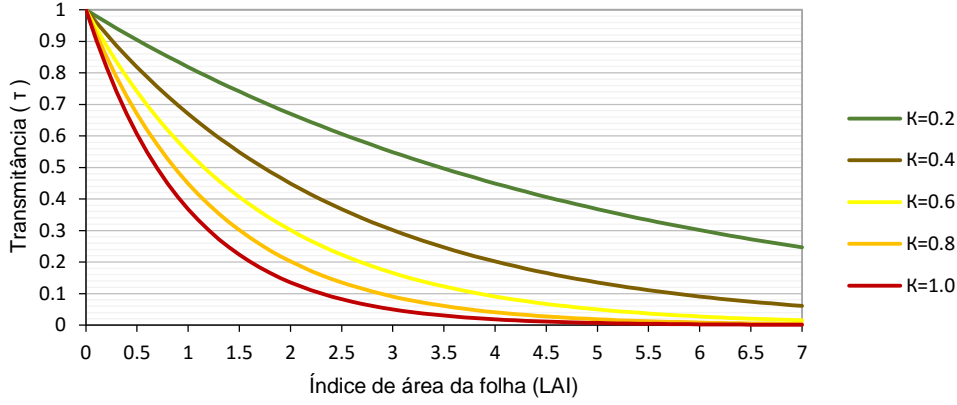


Figura 3.5 – Variação da τ e LAI, com K constante

A radiação de onda longa na psv e na pcv é constituída pela radiação proveniente do céu e do chão, inclui as emissividades da parede (ε_p), do céu ($\varepsilon_{céu}$), do chão ($\varepsilon_{chão}$) e também as temperaturas medidas em °C do céu ($T_{céu}$), do chão ($T_{chão}$), da superfície exterior da parede com vegetação ($T_{s\ ext,pcv}$) e sem vegetação ($T_{s\ ext,psv}$), Equações (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9).

$$LR_{psv} = LR_{céu} + LR_{chão} \quad (3.6)$$

$$LR_{pcv} = \tau LR_{céu} + \tau LR_{chão} \quad (3.7)$$

$$LR_{céu} = \varepsilon_p \varepsilon_{céu} \sigma F_{céu} (T_{ar,ext}^4 - T_{s\ ext,psv}^4) \quad (3.8)$$

$$LR_{chão} = \varepsilon_p \varepsilon_{chão} \sigma F_{chão} (T_{chão}^4 - T_{s\ ext,psv}^4) \quad (3.9)$$

A Equação (3.6) diferencia-se da Equação (3.7) apenas pela τ , uma vez que a presença de vegetação reduz a quantidade de radiação de onda longa acessível à fachada. O valor da emissividade da parede bem como a do chão é adimensional (0-1) e representa a fração de radiação de onda longa incidente emitida pela superfície. Quanto à emissividade do céu, considerou-se próximo de um corpo negro, isto é, com valor igual a 1. Os fatores de vista do céu ($F_{céu}$) e do chão ($F_{chão}$) dependem do ângulo de inclinação da superfície da parede com o chão (θ), medido em graus, Equações (3.10) e (3.11) e Figura (3.6).

$$F_{chão} = 0.5 (1 - \cos \theta) \quad (3.10)$$

$$F_{céu} = 0.5 (1 + \cos \theta) \quad (3.11)$$

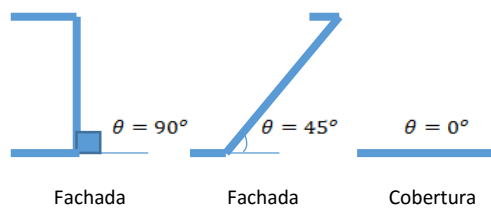


Figura 3.6 - Vários ângulos de inclinação para diferentes situações

A temperatura do céu ($T_{c\acute{e}u}$) pode-se determinar a partir de da temperatura exterior do ar ($T_{ar,ext}$) e da temperatura de ponto de orvalho (T_{orv}), Equação (3.12). A T_{orv} é a temperatura para a qual o vapor de água, numa amostra de ar a pressão barométrica constante, condensa à mesma proporção que evapora.

$$T_{c\acute{e}u} = T_{ar,ext} [0.8 + (T_{orv} - 273)/250]^{0.25} \quad (3.12)$$

Para a estimativa de T_{orv} , recorreu-se às correlações empíricas de Bulk (1981), Equação (3.13). Relaciona-se com a temperatura exterior do ar ($T_{ar,ext}$) e a humidade relativa do ar (HR), medida em %. As parcelas b , c e d denominam-se por constantes empíricas.

$$T_{orv} = \frac{c \ln \left(\frac{HR}{100} e^{\left(\left(b - \frac{T_{ar,ext}}{d} \right) \left(\frac{T_{ar,ext}}{c + T_{ar,ext}} \right) \right)} \right)}{b - \ln \left(\frac{HR}{100} e^{\left(\left(b - \frac{T_{ar,ext}}{d} \right) \left(\frac{T_{ar,ext}}{c + T_{ar,ext}} \right) \right)} \right)} \quad (3.13)$$

em que $b = 18,678$; $c = 257,14$ °C; $d = 234,5$ °C.

A convecção do modelo de Susorova et al. (2013) encontra-se bastante simplificado visto que os coeficientes de condutância térmica superficial por convecção da parede com e sem vegetação (h_{pcv} e h_{psv}) são iguais, Equação (3.14). Resultam da estimativa de uma equação quadrática que inclui a velocidade do vento junto à fachada ($V_{ar,ext}$), Equação (3.15).

$$h_{psv} = h_{pcv} = 10.79 + 4.192 V_{ar,ext} \quad (3.14)$$

$$h = a + b V_{ar,ext} + c V_{ar,ext}^2 \quad (3.15)$$

em que, $a = 10.79$; $b = 4.192$; $c = 0$.

Os parâmetros h_{pcv} e h_{psv} são medidos em W/(m².°C) e a velocidade do vento em m/s. As trocas de calor por convecção na fachada com (C_{fcv}) e sem (C_{fsv}) vegetação são calculadas respetivamente pelas Equações (3.16) e (3.17), como produtos dos coeficientes de condutância térmica superficial por convecção pela diferença da temperatura do ar exterior e a temperatura superficial exterior com ($T_{s ext,pcv}$) e sem ($T_{s ext,psv}$) vegetação.

$$C_{pcv} = h_{pcv} (T_{ar,ext} - T_{s ext,pcv}) \quad (3.16)$$

$$C_{psv} = h_{psv} (T_{ar,ext} - T_{s ext,psv}) \quad (3.17)$$

O calor armazenado no material da parede da fachada com (S_{pcv}) e sem (S_{psv}) vegetação, ajuda a reduzir os fluxos de calor tanto do exterior para o interior como do interior para o exterior. A presença de vegetação do tipo trepadeira proporciona uma menor redução do calor absorvido na fachada, dado

que a planta cobre a superfície da parede exterior. Por outro lado, a inclusão da vegetação no cálculo proporciona o aumento da massa volúmica e da largura da parede. O mesmo se sucede se for incluído o substrato. Os parâmetros S_{pcv} e S_{psv} são dinâmicos e dependentes do tempo, visto que a temperatura exterior superficial das fachadas varia de instante para instante, Equações (3.18) e (3.19). Caracterizam-se pela largura da parede (L) é medida em m, a variação do tempo (dt) em s, o calor específico ($c_{p,p}$) em J/(kg.°C) e a massa volúmica (ρ_p) dos materiais da parede em kg/m³. O calor específico do material representa a energia calorífica necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau.

$$S_{pcv} = L_{pcv} c_{p,pcv} \rho_{pcv} \left(\frac{dT_{s\ ext,pcv}}{dt} \right) \quad (3.18)$$

$$S_{psv} = L_{psv} c_{p,psv} \rho_{psv} \left(\frac{dT_{s\ ext,psv}}{dt} \right) \quad (3.19)$$

O fluxo de calor por condução da parede com (Q_{pcv}) e sem (Q_{psv}) vegetação é definido pela variação da temperatura superficial exterior e interior da parede, bem como pela resistência efetiva térmica da parede com (R_{pcv}) e sem (R_{psv}), Equações (3.20) e (3.21). A resistência efetiva térmica, medida em (m².°C)/W, foi calculada com base no método das resistências térmicas dos diferentes materiais da parede e no método das médias progressivas presentes no capítulo (5).

$$Q_{pcv} = \frac{T_{s\ ext,pcv} - T_{s\ int,pcv}}{R_{pcv}} \quad (3.20)$$

$$Q_{psv} = \frac{T_{s\ ext,psv} - T_{s\ int,psv}}{R_{psv}} \quad (3.21)$$

As trocas de radiação entre a parede e a vegetação (LR_{f-pcv}) são tanto maiores quanto mais vegetação existir, visto que o coeficiente τ diminui. Estas trocas são caracterizadas pelas emissividades da parede e da folha, bem como pela diferença entre a temperatura exterior superficial parede e a temperatura da folha, Equação (3.22).

$$LR_{f-pcv} = (1 - \tau) \frac{\varepsilon_{pcv} \varepsilon_{folha}}{\varepsilon_{pcv} + \varepsilon_{pcv} - \varepsilon_{pcv} \varepsilon_{folha}} (T_{s\ ext,pcv}^4 - T_f^4) \quad (3.22)$$

O valor da emissividade da folha (ε_{folha}) é adimensional (0-1) e representa a fração de radiação de onda longa incidente emitida pela folha. Esta emissividade apresenta valores compreendidos no intervalo de 0.94-0.98, segundo um estudo de ICESS (1999).

A temperatura da folha é relativamente complexa por envolver diversos fenómenos como a evapotranspiração. No modelo de Susorova et al. (2013) a evapotranspiração é indiretamente referida na Equação (3.23) que remete aos cálculos de Campbell (1998).

$$T_f = T_{ar,ext} + \frac{\gamma''}{\frac{\Delta}{P_{ar}} + \gamma''} \left[\frac{Q_f}{g_c c_{p,ar}} - \frac{e_s(T) - e_a}{P_{ar} \gamma''} \right] \quad (3.23)$$

A constante psicométrica aparente (γ''), medida em $^{\circ}\text{C}^{-1}$ depende da constante psicométrica termodinâmica ($\gamma = 0,0006666$), bem como da razão entre a condutância de calor através do ar (g_c) e a condutância de vapor através do ar (g_v) na planta, em $\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$, Equação (3.24).

$$\gamma'' = \frac{\gamma g_c}{g_v} \quad (3.24)$$

A condutância de calor através do ar (g_c) engloba a condutância por radiação (g_r) e o limite da condutância de calor através do ar (g_{lcc}) na folha, Equação (3.25).

$$g_c = g_{lcc} + g_r \quad (3.25)$$

Quanto ao parâmetro g_{lcc} , relaciona-se com a velocidade do ar ($V_{ar,ext}$) e com a dimensão característica da planta (D_f) medida em m, Equação (3.26).

$$g_{lcc} = 1.4 \left(0.135 \sqrt{\frac{V_{ar,ext}}{D_f}} \right) \quad (3.26)$$

A condutância por radiação resulta das tabelas de Campbell (1998) e inclui a emissividade da parede (ε_p), a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2.\text{^{\circ}\text{C}}$), a temperatura exterior do ar ($T_{ar,ext}$) bem como o calor específico do ar a pressão constante ($C_{p,ar} = 29,3 \text{ J}/\text{mol}.\text{^{\circ}\text{C}}$), Equação (3.27).

$$g_r = \frac{4 \varepsilon_p \sigma T_{ar,ext}^3}{C_{p,ar}} \quad (3.27)$$

O parâmetro g_v deriva das condutâncias estomáticas atuais da folha, tanto da superfície superior ($g_{ea ss}$) como da inferior ($g_{ea si}$) e também do limite da condutância por vapor através do ar (g_{lcv}), Equação (3.28).

$$g_v = \frac{0.5 g_{ea ss} g_{lcv}}{g_{ea ss} + g_{lcv}} + \frac{0.5 g_{ea si} g_{lcv}}{g_{ea si} + g_{lcv}} \quad (3.28)$$

No modelo de Susorova et al. (2013), os valores de $g_{ea ss}$ e $g_{ea si}$ tiveram como base os valores obtidos experimentalmente por Gates (2003). Tecnicamente, a condutância estomática da superfície superior e inferior da folha são diferentes, sendo o valor da superfície inferior muito menor devido à evapotranspiração ocorrer majoritariamente através da superfície superior. O parâmetro g_{lcv} apresenta a mesma configuração que g_{lcc} , apenas diferenciando-se na constante, como mostra a Equação (3.29)

$$g_{lcv} = 1.4 \left(0.147 \sqrt{\frac{V_{ar,ext}}{D_f}} \right) \quad (3.29)$$

O valor da resistência estomática típica da folha (r_s) é medida em (m².s)/mol, sendo o seu inverso representado pela condutância estomática típica da folha (g_s). A resistência estomática mede a taxa de transição de dióxido de carbono (CO₂) na folha ou a saída de vapor de água através dos poros da mesma. A resistência estomática atual (r_{as}) resulta do produto da resistência estomática típica da folha (r_s), pela razão entre a radiação incidente máxima (I_{max}) e a de um dado instante na fachada (I_t) medidas em W/m² e também pela razão entre o nível de humidade do solo que proporciona o murchar da planta ($\eta_{murchar}$) e o valor mínimo de humidade do solo na zona das raízes ($\eta_{raízes}$), Equação (3.30).

$$r_{as} = r_s \left[\frac{I_{max}}{0.03 I_{max} + I_t} + \left(\frac{\eta_{murchar}}{\eta_{raízes}} \right)^2 \right] \quad (3.30)$$

Segundo Campbell (1998), a radiação total absorvida na folha (Q_f) resulta da subtração da radiação emitida pela absorvida ($R_{abs,f}$), Equação (3.31). Nesta equação assumiu-se que no instante zero, a temperatura da folha é igual à do ar exterior.

$$Q_f = R_{abs,f} - \varepsilon_f \sigma (T_f)^4 \quad (3.31)$$

A radiação absorvida pela folha inclui não só a radiação incidente na folha mas também a radiação emitida, proveniente do céu e do chão, Equação (3.32).

$$R_{abs,f} = I_t \alpha_f + \varepsilon_f \sigma F (T_{céu}^4 + T_{chão}^4) \quad (3.32)$$

A absorvância da folha (α_f) é adimensional (0-1) e representa a fração de radiação incidente absorvida pela superfície da folha.

A pressão do vapor saturado $e_s(T_{ar,ext})$ medida em kPa deriva da temperatura do ar, Equação (3.33).

$$e_s(T_{ar,ext}) = 0,611 e^{\left(\frac{17.502 T_{ar,ext}}{T_{ar,ext} + 240.97} \right)} \quad (3.33)$$

O gradiente da pressão-temperatura da saturação de vapor (Δ) medido em kPa/°C relaciona-se com a pressão do vapor de água do ar saturado $e_s(T_{ar,ext})$ e através da temperatura do ar exterior, Equação (3.34).

$$\Delta = \frac{4217 e_s(T_{ar,ext})}{(240.97 + T_{ar,ext})^2} \quad (3.34)$$

A pressão parcial do vapor saturado (e_a) encontra-se dependente de $e_s(T_{ar,ext})$ e da humidade relativa do ar (%), Equação (3.35). Verificando-se o valor máximo de e_a quando $Hr = 100\%$.

$$e_a = e_s(T_{ar,ext})Hr \quad (3.35)$$

Para finalizar a descrição do modelo de Susorova et al. (2014) apresentam-se dois fluxogramas, o primeiro da fachada com vegetação, Figura (3.7), e o segundo sem vegetação, Figura (3.8). O fluxograma da Figura (3.7) demonstra que a presença de vegetação proporciona a diminuição do fluxo de calor por condução na fachada, enquanto o da Figura (3.8) indica que em dias quentes e com radiação solar elevada, origina o aumento do fluxo de calor por condução, sendo esta situação indesejável.

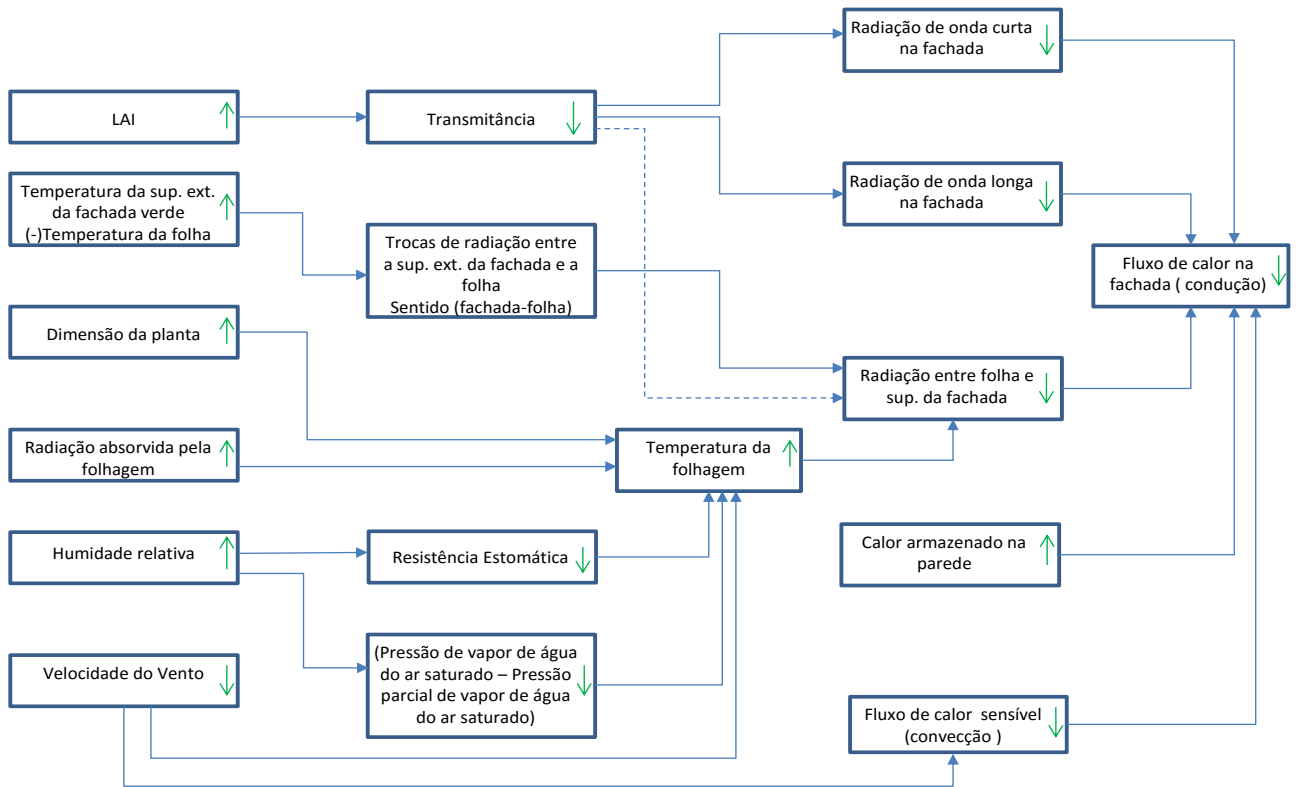


Figura 3.7 - Fluxograma das trocas de calor da fachada com vegetação

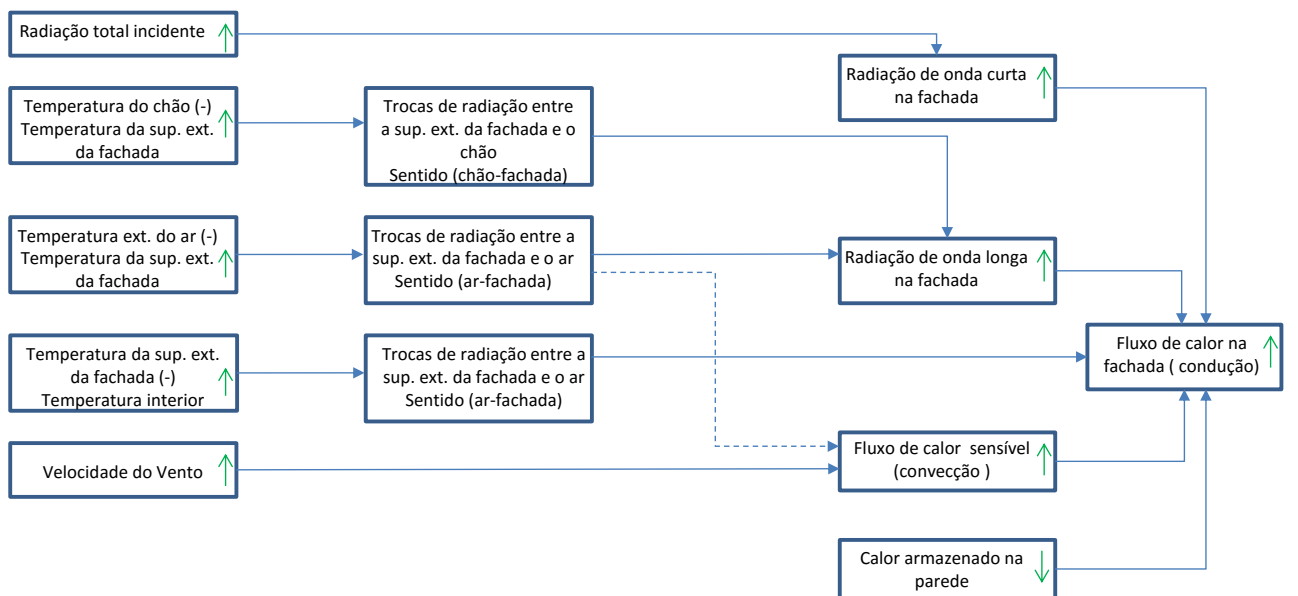


Figura 3.8 - Fluxograma das trocas de calor da fachada sem vegetação

No modelo de Susorova et al. (2013), considerou-se a temperatura superficial exterior como *output*. Já os *inputs* abrangem as condições climáticas, como a velocidade do vento, a humidade relativa do ar exterior, a radiação solar incidente na fachada e a temperatura exterior do ar; das condições da fachada, como a temperatura da superfície interior da fachada, o coeficiente de transmissão térmica, a emissividade da parede, a absorptância, a massa volúmica, o calor específico e a largura da parede; das características das plantas, como o *LAI*, a dimensão da folha, a condutância estomática, o coeficiente de atenuação da radiação e a emissividade da folha.

3.2. Modelo de Malys et al. (2014)

O modelo desenvolvido por Malys et al. (2014) representa um estudo de protótipos de fachadas verdes do tipo Living Wall, compostas por blocos cerâmicos e telhas ocas localizadas na cobertura de um edifício, Figura (3.9). O crescimento das plantas acontece nos espaços ociosos com terra e é proporcionado pela irrigação. A introdução de terra neste modelo proporcionará um armazenamento significativo de energia na fachada do qual resultará um melhor desempenho térmico do edifício.



Figura 3.9 - Amostras de Fachadas Verdes utilizadas no modelo de Malys et al. (2014)

Os balanços térmicos apresentados no estudo de Malys et al. (2014) englobam a planta, o ar entre as plantas e o substrato (inclui a parede), definidos respetivamente nas Equações (3.36), (3.37) e (3.38).

$$C_{of} \frac{dT_f}{dt} = SR_f + LR_{ar,ext} + LR_{f-pcv} + C_{f-ar,f} + lat_f \quad (3.36)$$

$$C_{o_{ar,f}} \frac{dT_{ar,f}}{dt} = -C_{f-ar,f} + C_{ar,f-pcv} + C_{ar,f-ar,ext} \quad (3.37)$$

$$C_{o_{pcv}} \frac{dT_p}{dt} = SR_{pcv} - LR_{f-pcv} - C_{ar,f-pcv} + Q_{pcv} - lat_{pcv} \quad (3.38)$$

Nas Figuras (3.10), (3.11) e (3.12) mostram-se alguns esquemas com os principais processos de transferência de calor e uma rede de nós térmica da fachada com vegetação.

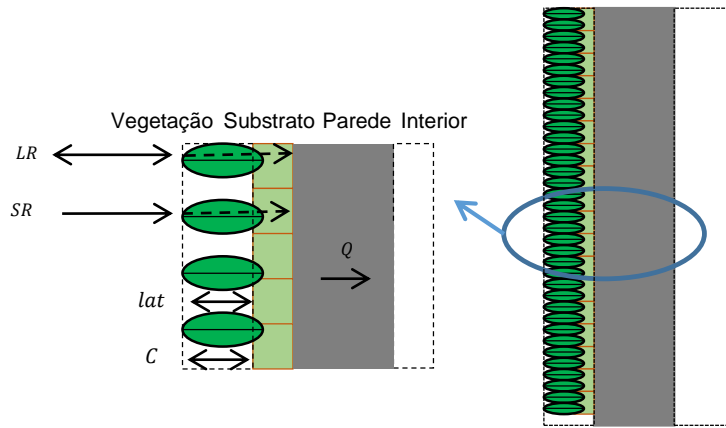


Figura 3.10 - Balanço energético da fachada com vegetação

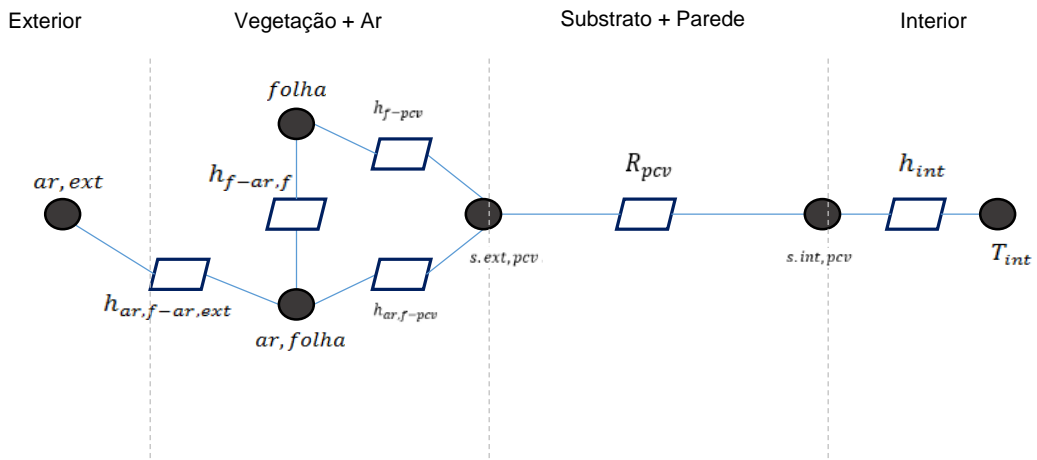


Figura 3.11 - Rede térmica de nós da fachada com vegetação, adaptado de Malys et al. (2014)

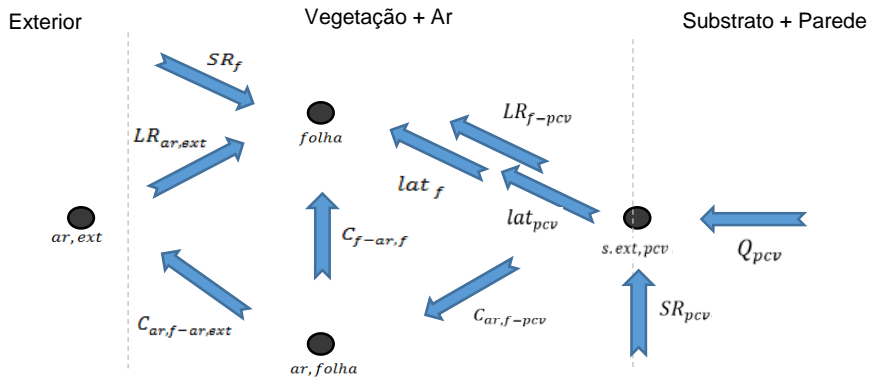


Figura 3.12 - Esquema dos processos envolvidos nos fluxos de calor no modelo de Malys et al. (2014)

A capacidade térmica na folha (C_{of}) define-se pela sua espessura (d_f), LAI, massa volúmica (ρ_{ag}) e calor específico ($c_{p,ag}$) da água, Equação (3.39). Quanto à capacidade térmica do ar entre a folhagem ($C_{oar,f}$) representa-se pela espessura da camada de vegetação mais os espaços de ar (D_f), massa volúmica (ρ_{ar}) e calor específico ($c_{p,ar}$) do ar, Equação (3.40). A capacidade térmica do substrato (C_{op}) caracteriza-se pela sua espessura (D_{pcv}), massa volúmica (ρ_{pcv}) e calor específico ($c_{p,pcv}$) da parede, Equação (3.41). Na capacidade térmica do substrato não é contabilizada a vegetação.

$$Co_f = d_f \rho_{ag} c_{p,ag} LAI \quad (3.39)$$

$$Co_{ar,f} = D_f \rho_{ar} c_{p,ar} \quad (3.40)$$

$$Co_{pcv} = D_{pcv} \rho_{pcv} c_{p,pcv} \quad (3.41)$$

A radiação de onda curta na folha (SR_f) é constituída pela radiação solar incidente de onda curta na superfície da parede (I_t) medida em W/m^2 , pela transmitância da radiação solar (τ) adimensional (0-1) e pelo albedo da folha (A_f) adimensional (0-1), Equação (3.42). O albedo da folha define-se pela quantidade de luz refletida, isto é, representa uma medida da refletividade da superfície da folha.

$$SR_f = (1 - \tau - A_f)I_t \quad (3.42)$$

A radiação de onda longa na folha ($LR_{ar,ext}$) estabelece-se pelas trocas de radiação entre a atmosfera, o chão e as folhas, Equação (3.43). Este parâmetro depende dos fatores de vista do céu ($F_{céu}$) e do chão ($F_{chão}$) adimensionais (0-1), da radiação solar de onda longa proveniente da atmosfera (I_{ir}) medida em W/m^2 , da emissividade do chão ($\varepsilon_{chão}$) adimensional (0-1), da constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2/^\circ C$), bem como das temperaturas da folha (T_f) e do chão ($T_{chão}$) medidas em graus.

$$LR_{ar,ext} = F_{céu}(I_{ir} - \sigma T_f^4) + \sigma F_{chão}(\varepsilon_{chão} T_{chão}^4 - \varepsilon_f T_f^4) \quad (3.43)$$

As trocas de radiação de onda longa entre a folha e o substrato (LR_{f-pcv}) representam-se pelo produto entre o coeficiente de transmitância superficial por radiação entre a folha e a superfície exterior do substrato (h_{f-pcv}) medido em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, pela diferença entre a temperatura da folha (T_f) e a temperatura superficial exterior do substrato (T_{pcv}), Equação (3.44). O parâmetro h_{f-pcv} encontra-se dependente da temperatura da folha, Equação (3.45).

$$LR_{f-pcv} = h_{f-pcv} (T_f - T_{pcv}) \quad (3.44)$$

$$h_{f-pcv} = 4 \sigma T_f^3 \quad (3.45)$$

A convecção entre as folhas e o ar ($C_{f-ar,f}$) caracteriza-se pelo produto entre o coeficiente de transmitância superficial por convecção nas folhas e no ar ($h_{f-ar,f}$), pela diferença entre a temperatura da folha (T_f) e a temperatura do ar entre as folhas ($T_{ar,f}$), Equação (3.46). O parâmetro $h_{f-ar,f}$ determina-se pelo produto entre o LAI, a massa volúmica do ar (ρ_{ar}) e o calor específico do ar ($C_{p,ar}$) pela divisão da resistência aerodinâmica da folha (R_{aero}) medida em s/m, Equação (3.47). O valor da resistência aerodinâmica da folha varia com a velocidade do vento dentro da vegetação. Para efeitos de cálculo foi admitida conforme a resistência aerodinâmica do dossel da vegetação (r_a), presente no Anexo (A.1).

$$C_{f-ar,f} = h_{f-ar,f} (T_f - T_{ar,f}) \quad (3.46)$$

$$h_{f-ar,f} = 2 LAI \left(\frac{\rho_{ar} C_{p ar}}{R_{aero}} \right) \quad (3.47)$$

O fluxo de calor latente (lat_f) caracteriza-se pelo produto entre o coeficiente de repartição do fluxo de calor latente (α_{lat}) adimensional (0-1), a evapotranspiração de referência (ETP) medida em kg/(m³.s) e a taxa de evapotranspiração (f) adimensional (0-1), Equação (3.48). O parâmetro α_{lat} representa a distribuição do fluxo latente entre a transpiração das plantas e a evaporação da água, enquanto f reproduz a disponibilidade da água no substrato. A evapotranspiração Penman-Monteith (ETP) segundo Zotarelli et al. (2009) encontra-se no Anexo (A.1).

$$lat_f = \alpha_{lat} f ETP \quad (3.48)$$

No balanço térmico do ar entre as plantas existem três tipos de trocas por convecção utilizadas na formulação da Equação (3.37). A convecção entre as folhas e o ar ($C_{f-ar,f}$) encontra-se na Equação (3.46), enquanto a convecção no ar entre as folhas e a superfície exterior do substrato ($C_{ar,f-pcv}$), bem como a convecção no ar entre as folhas e o ar exterior às folhas ($C_{ar,f-ar,ext}$) apresentam-se respetivamente nas Equações (3.49) e (3.50). A $C_{f-ar,f}$ resulta do produto entre o coeficiente da transmitância superficial por convecção no ar entre as folhas e a superfície exterior da fachada ($h_{ar,f-pcv}$) pela diferença da temperatura superficial exterior da parede (T_{pcv}) com a temperatura do ar entre as folhas ($T_{ar,f}$). A $C_{ar,f-ar,ext}$ advém do produto entre o coeficiente da transmitância superficial por convecção no ar entre as folhas e o ar exterior ($h_{ar,f-ar,ext}$) pela diferença da temperatura do ar entre as folhas ($T_{ar,f}$) com a temperatura do ar exterior ($T_{ar,ext}$).

$$C_{ar,f-pcv} = h_{ar,f-pcv} (T_{pcv} - T_{ar,f}) \quad (3.49)$$

$$C_{ar,f-ar,ext} = -h_{ar,f-ar,ext} (T_{ar,f} - T_{ar,ext}) \quad (3.50)$$

O parâmetro $h_{ar,f-pcv}$ foi assumido com valor igual ao coeficiente de transmitância superficial por radiação entre a folha e a superfície exterior da parede (h_{f-pcv}) por falta de informação em Malys et al. (2014), Equação (3.51).

$$h_{ar,f-pcv} = h_{f-pcv} = 4 \sigma T_f^3 \quad (3.51)$$

O elemento $h_{ar,f-ar,ext}$ depende do produto das trocas de calor e de massa entre a vegetação e o ar exterior (R) medido em s, pela capacidade térmica do ar entre as folhas ($C_{o_{ar,f}}$), Equação (3.52). O parâmetro R é estimado a partir da velocidade do vento próxima da parede, Equação (3.53).

$$h_{ar,f-ar,ext} = R(v) C_{o_{ar,f}} \quad (3.52)$$

$$R = R_{m\acute{a}x} + \alpha_R \frac{V}{V_{m\acute{a}x}} (R_{m\acute{a}x} - R_{m\acute{i}n}) \quad (3.53)$$

em que, $R_{mín} \approx 0,035$ s, $R_{máx} \approx 0,278$ s, $V_{máx} = 10$ m/s e α_R representa o coeficiente de ponderação da velocidade do vento adimensional (0-1).

Por último, no balanço térmico do substrato existem cinco parâmetros utilizados na formulação da Equação (3.42). O primeiro tem em conta a radiação de onda curta que entra em contacto com o substrato (SR_{pcv}), que se encontra dependente da transmitância da radiação solar (τ) e da radiação solar incidente de onda curta na superfície da parede (I_t), Equação (3.54). O segundo considera a radiação de onda longa entre a folha e o substrato (LR_{f-pcv}) presente na Equação (3.44). O terceiro caracteriza-se pela convecção no ar entre as folhas e a superfície exterior do substrato ($C_{ar,f-pcv}$) apresentada na Equação (3.49). O quarto indica a condução entre a superfície exterior do substrato à superfície interior da parede (Q_{pcv}), o qual depende da diferença dessas temperaturas e da resistência térmica da parede, Equação (3.55). O quinto representa-se pelo fluxo de calor latente no substrato (lat_{pcv}) que se encontra dependente do coeficiente de repartição (α_{lat}), da taxa de evapotranspiração (f) e da evapotranspiração Penman-Monteith (ETP), Equação (3.56).

$$SR_{pcv} = \tau I_t \quad (3.54)$$

$$Q_{pcv} = \frac{(T_{s\ ext,pcv} - T_{s\ int,pcv})}{R_{pcv}} \quad (3.55)$$

$$lat_{pcv} = (1 - \alpha_{lat}) f ETP \quad (3.56)$$

Os fluxogramas das trocas de calor das folhas, do ar situado entre as folhas e do substrato encontram-se presentes nas Figuras (3.13), (3.14) e (3.15).

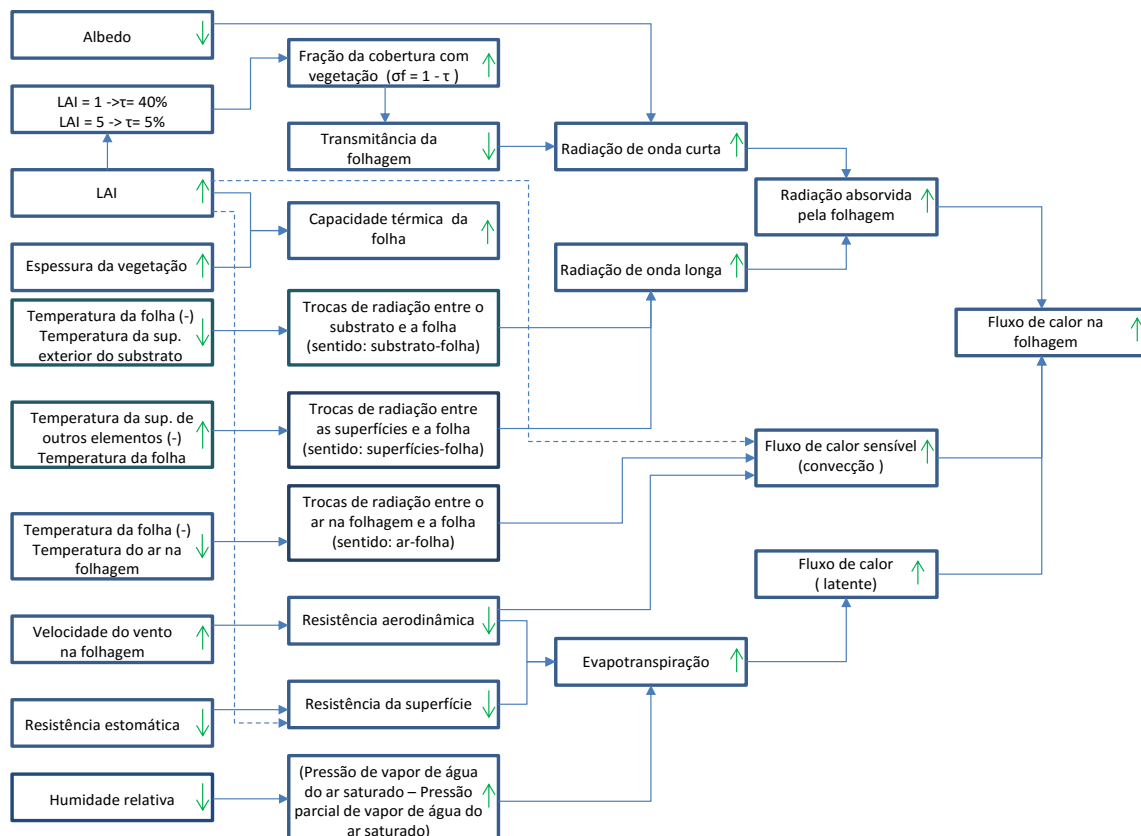


Figura 3.13 - Fluxograma das trocas de calor na folhagem

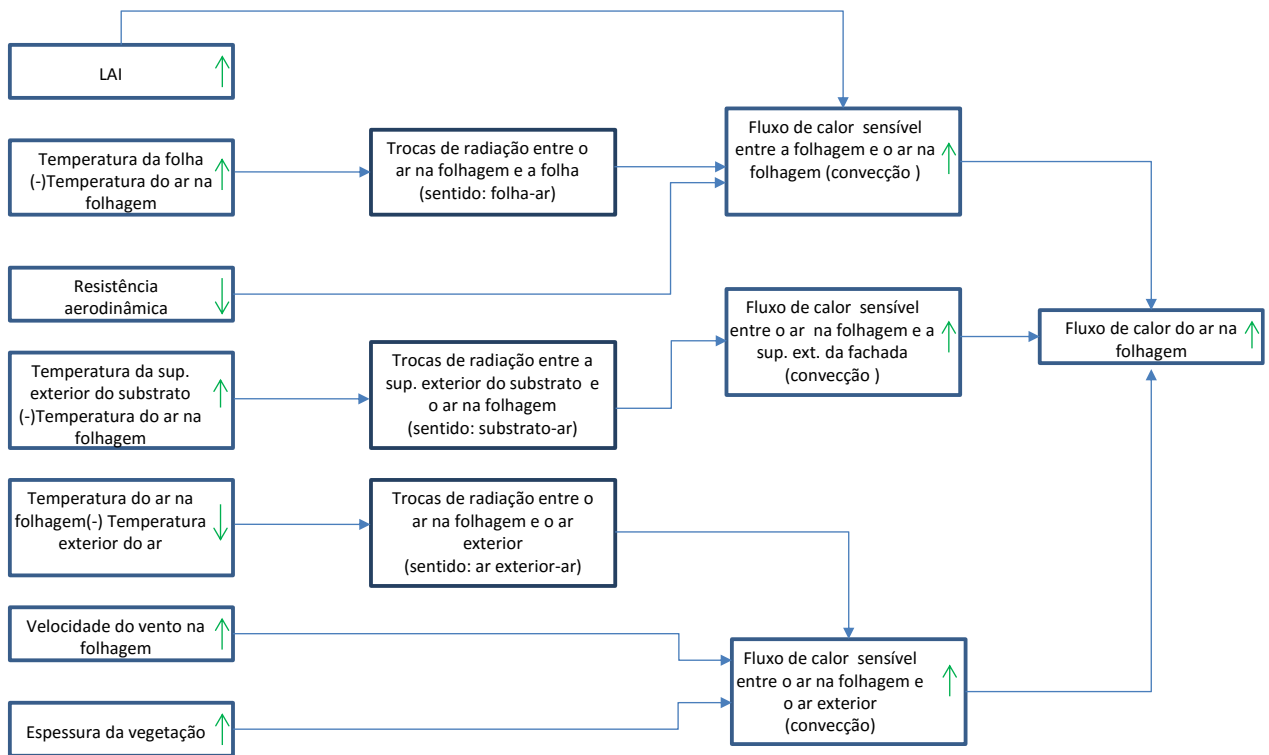


Figura 3.14 - Fluxograma das trocas de calor no ar da folhagem

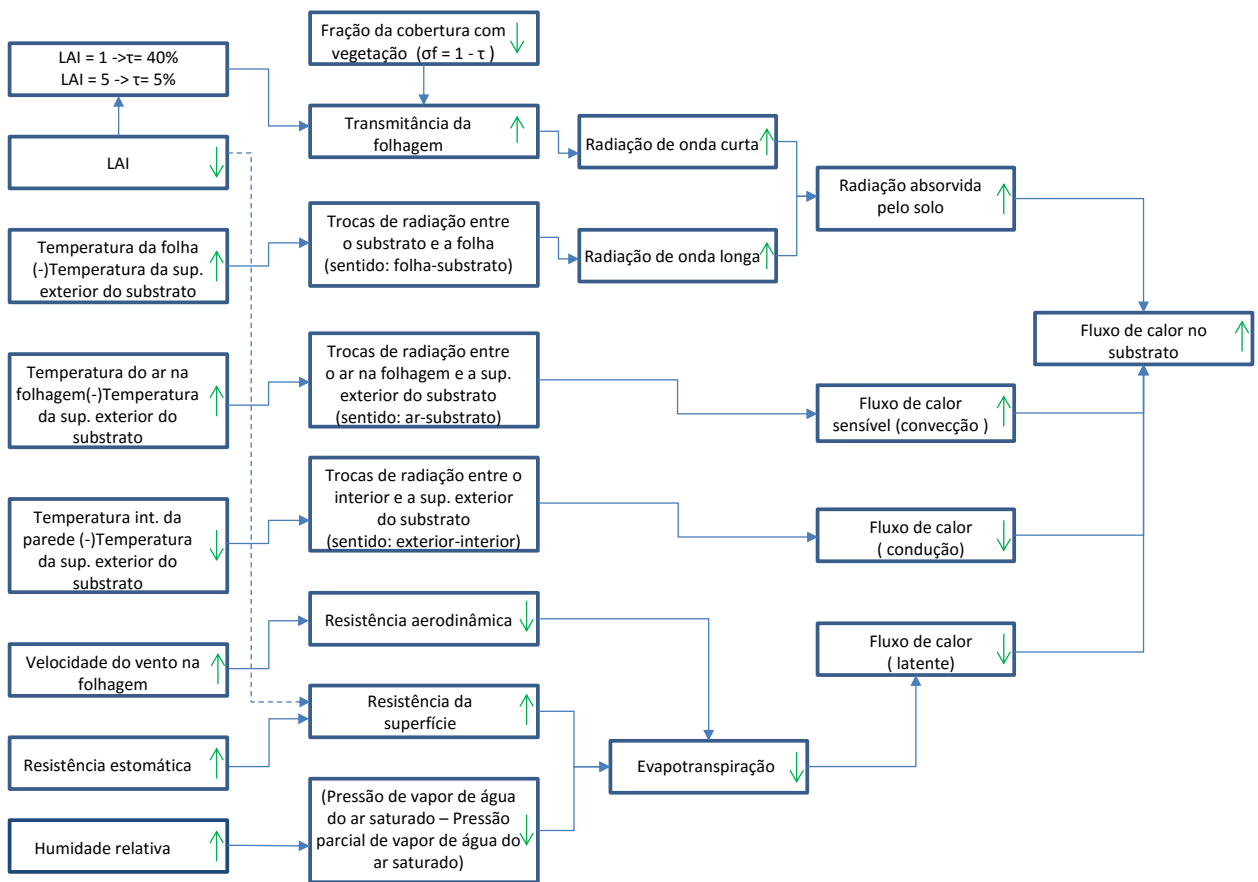


Figura 3.15 - Fluxograma das trocas de calor no substrato

No modelo de Malys et al. (2014), considerou-se a temperatura superficial exterior, a temperatura da folha e a temperatura do ar entre as folhas como *outputs*. Para tal, foi necessário estabelecer corretamente os *inputs* das condições climáticas, como a velocidade do vento, a humidade relativa do ar exterior, a radiação solar incidente na fachada e a temperatura exterior do ar; das condições da fachada, como a temperatura da superfície interior da fachada, o coeficiente de transmissão térmica, a emissividade da parede, a massa volúmica, o calor específico e a largura; das características das plantas, como o *LAI*, a dimensão da folha, o albedo da folha, a resistência estomática da folha, a espessura da folha, a resistência aerodinâmica, o coeficiente de atenuação da radiação e a emissividade da folha.

4. Casos de estudo

Pretende-se no presente capítulo apresentar e descrever os dois casos de estudo: a fachada verde de uma habitação unifamiliar de três andares, situada na Travessa do Patrocínio em Lisboa, e a fachada verde de um estúdio de música, denominado Atlântico Blue Studio em Paços de Arcos, Figura (4.1). Nesta mesma figura, encontra-se indicada a estação meteorológica do Instituto Superior Técnico (METEO-IST) que, pela sua localização permitiu a recolha e utilização dos seus dados experimentais e posterior aplicação nos dois casos de estudo, permitindo enquadrar as características climáticas de Lisboa.

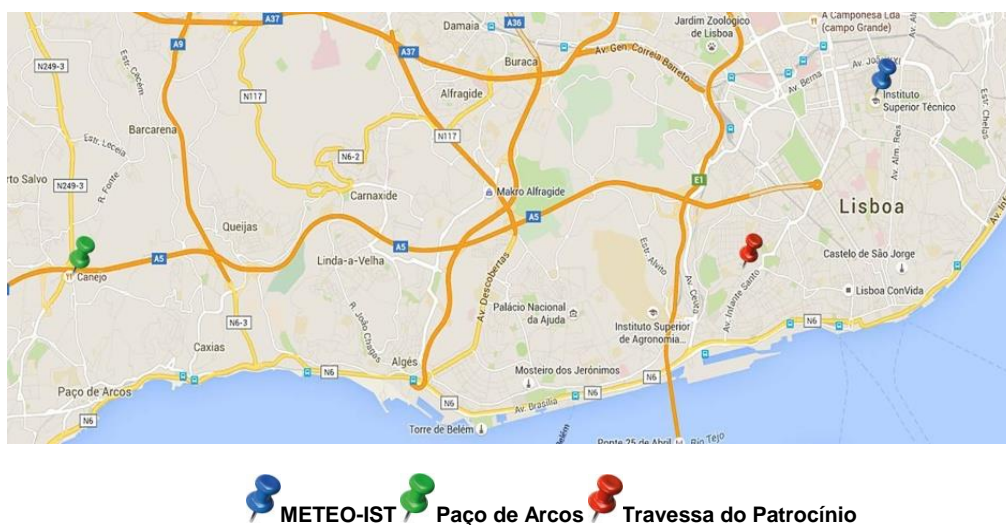


Figura 4.1- Localização dos casos de estudo e da estação meteorológica do Instituto Superior Técnico

A cidade de Lisboa situa-se praticamente no centro de Portugal, oeste da Península Ibérica, com as coordenadas geográficas, 38°42'49.72"N (latitude) e 9°8'21.79"W (longitude). Encontra-se próxima do Oceano Atlântico, recebendo uma forte influência da corrente marítima do golfo que lhe permite ter temperaturas mais quentes. De acordo com a classificação climática apresentada por Köppen-Geiger (sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia), apresenta um clima mediterrânico, caracterizado por quatro estações bem definidas, com verões secos e quentes e invernos instáveis, húmidos e chuvosos, IPMA (2014).

4.1. Caso de estudo: Travessa do Patrocínio, Lisboa

4.1.1. Localização e caracterização

O primeiro caso de estudo baseou-se numa habitação unifamiliar construída em 2012 com o objetivo de recuperar um edifício devoluto localizado na Travessa do Patrocínio, em Lisboa. A fachada verde vertical ocupa 100 metros quadrados, preenchidos por cerca de 4500 plantas, de 25 espécies diferentes. Por sua vez a construção, é totalmente tradicional com betão. Por fora apresenta uma

estrutura independente ao edifício e uma fachada verde ventilada de forma a evitar problemas de humidade. Na Figura (4.2), retirada do GoogleMaps (2015), não consta o edifício por ter sido captada em momento anterior à construção. Todavia indicou-se a respetiva localização do edifício e sua orientação. Já na Figura (4.3) é visível a fotografia do edifício com a fachada verde em estudo.



Figura 4.2 - Orientação e localização da fachada verde na Travessa do Patrocínio, GoogleMaps (2015)



Figura 4.3 - Vista do exterior do edifício da fachada verde na Travessa do Patrocínio, ID3D (2012)

Aquando da deslocação ao local, durante as campanhas experimentais de Inverno e Verão, o edifício não se encontrava habitado nem possuía sistema de climatização. A monitorização deste edifício realizou-se em dois pisos distintos, no Piso 0 (escritório) e no Piso 2 (sala de jantar). A razão para tal decisão prendeu-se com o facto de se pretender analisar os resultados provenientes de uma parede sem vegetação (escritório) comparando-os com os recolhidos de uma parede com vegetação (sala de jantar), ambas viradas para Sudeste em que existe maior aproveitamento da radiação solar. De forma a obter uma melhor comparação entre paredes, estas necessitariam de estar adjacentes, à mesma altura, mas tal não foi possível, visto haver vegetação nos pisos superiores e não no rés-do-chão. A solução construtiva da fachada verde é singular, visto não ser paralela ao edifício. Isto é, apresenta uma forma piramidal, no qual o seu ponto mais distante do edifício se situa entre o Piso 1 e o Piso 2. Esta forma piramidal é caracterizada pelo aumento da caixa-de-ar entre o edifício e a fachada verde, a qual varia entre 20-72 centímetros, enquanto os restantes elementos constituintes da fachada verde permanecem com espessuras constantes.

4.1.2. Caraterísticas dos materiais

Foi possível conhecer as espessuras das respetivas camadas constituintes das paredes do Piso 0 (sem vegetação) e do Piso 2 (com vegetação) através do certificado energético realizado ao edifício. No entanto, muitas das outras características dos materiais foram admitidas por falta de informação. Relativamente à parede do Piso 2 é composta, do exterior para o interior por, vegetação, duas camadas de manta geotêxtil com tubagem no seu interior, manta geotêxtil, PVC, ar, poliuretano projetado, betão, ar e duas camadas de gesso cartonado, Figura (4.4). Já a parede do Piso 0, é constituída do exterior para o interior por, reboco, betão, lâ de rocha e duas camadas de gesso cartonado como mostra a Figura (4.5). É importante realçar que as espessuras da camada verde e substrato foram admitidas, visto que, não foram utilizadas no cálculo do coeficiente de transmissão térmica presente no certificado

energético do edifício. As restantes características dos materiais encontram-se presentes na Tabela (4.1).

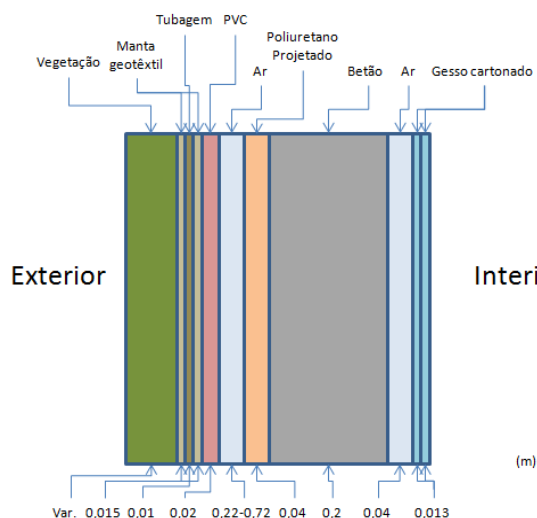


Figura 4.4 - Camadas constituintes da parede do Piso 2, Travessa do Patrocínio

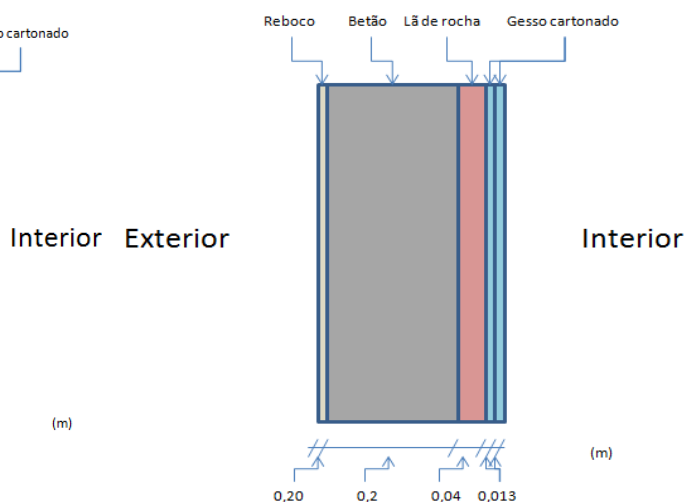


Figura 4.5 Camadas constituintes da parede do Piso 0, Travessa do Patrocínio

Tabela 4.1 - Características dos materiais presentes nas paredes do Piso 0 e Piso 2

	Reboco	Betão	Lã de Rocha	Gesso cartonado	Poliuretano Projetado	PVC	Manta geotêxtil	Ar	Ar (tubagem)
Espessura (m)	0,02	0,2	0,04	0,013	0,04	0,02	0,015	0,04	0,01
Condutibilidade térmica W/(m.°C)	1,3	2,0	0,04	0,25	0,042	0,2	0,05	0,222	0,067
Condutância térmica W/(m².°C)	65	10	1	19,23	1,05	10	3,33	5,556	6,667
Massa volúmica (kg/m³)	1950	2350	67,5	875	35	1300	1180	1,23	1,23
Calor específico J/(kg.°C)	1046	880	735	800	1045	1040	1470	1010	1010
Absortância da radiação solar	0,8	0,8	0,4	0,5	0,4	0,4	0,8	-	-
Emissividade	0,87	0,94	0,9	0,9	0,94	0,92	0,9	-	-

Como muitas das características dos materiais foram admitidas, decidiu-se dar a conhecer ao leitor a origem dos valores apresentados na Tabela (4.1). Quanto à condutibilidade térmica, consultou-se o documento do LNEC ITE50 (2006), e referente ao calor específico do reboco, betão e lã de rocha, e a massa volúmica, o estudo realizado por Mendonça (2005). Relativamente ao calor específico do gesso cartonado recolheu-se a informação junto da empresa Isover (2010) em Portugal, e a absortância da radiação solar no REH (2013) tendo em conta a cor dos materiais. Por sua vez, os dados da emissividade da lã de rocha foram obtidos na empresa Unifrax (2011), enquanto a emissividade do reboco, betão e gesso cartonado foi analisada a partir de resultados do estudo realizado por Mendonça (2005). Por último, os dados relativos à manta têxtil foram fornecidos pela empresa Isover (2010).

4.1.3. Monitorização

A monitorização da fachada verde na Travessa do Patrocínio realizou-se em duas campanhas experimentais no ano 2014, uma no Inverno, de 21 a 27 de Fevereiro e de 3 a 10 de Março, e outra realizada no Verão, de 17 a 24 de Junho e de 3 a 7 de Julho.

Apurou-se que a rega das plantas ocorria em três momentos diários, às 13:00, 19:00 e 00:00 através do processo de fertirrigação. Em dias de maior calor, os ditos períodos eram intensificados manualmente por um técnico especializado. Determinou-se a escolha das zonas para a simulação em função da localização dos fluxímetros utilizados na monitorização, que foram colocados considerando a variação da caixa-de-ar existente entre a vegetação e o edifício. Assim, apresenta-se na Figura (4.6) o esquema desenhado por Prazeres (2015) da fachada verde em estudo. As zonas simuladas são identificadas com o nº 7 (sem vegetação) e nº 3 (com vegetação), sendo a primeira relativa à parede sem vegetação no Piso 0 e a segunda respetiva a uma zona da fachada verde no Piso 2. Para melhor visualização da fachada, acrescenta-se a Figura (4.7).

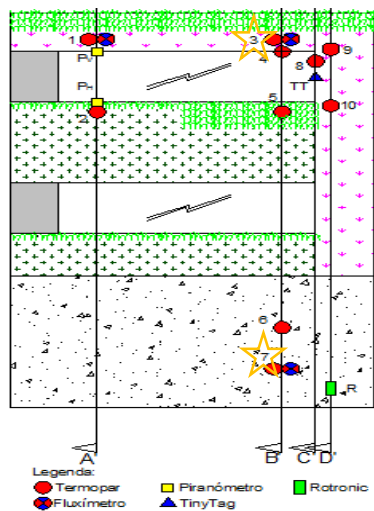


Figura 4.6 - Esquema da fachada verde da Travessa do Patrocínio, adaptado de Prazeres (2015)



Figura 4.7 - Fachada verde da Travessa do Patrocínio, ID3D (2012)

4.2. Caso de estudo: Atlântico Blue Studio

4.2.1. Localização e caracterização

O segundo caso de estudo incidiu sobre o Atlântico Blue Studio situado em Paço de Arcos, Oeiras. A fachada verde vertical ocupa 20 metros quadrados e a cobertura verde 28,5 metros quadrados. Em relação à construção, não existiu informação disponível acerca dos elementos constituintes da parede em estudo. Pelo que, se considerou a existência de uma parede dupla de tijolo com uma fachada verde independente do mesmo, separada por uma caixa-de-ar de 5 cm. Na Figura (4.8) encontra-se uma imagem retirada do GoogleMaps (2015) que por estar desatualizada não apresenta a

fachada/cobertura verde, mas permite a localização do edifício e respetiva orientação. Na Figura (4.9) apresenta-se uma fotografia do edifício com a fachada verde em estudo.



Figura 4.8 - Vista do exterior do edifício da fachada verde em Paço de Arcos, (Prazeres,2015)



Figura 4.9 – Orientação e localização da fachada verde em Paço de Arcos, GoogleMaps (2015)

É importante reter que o edifício se encontrava em utilização, e que o *hall* de entrada do Atlântico Blue Studio possuía sistema de climatização em funcionamento durante o dia e não à noite, ao longo da campanha experimental de Inverno e de Verão. A monitorização deste edifício realizou-se em vários pontos da fachada e na cobertura acima desta (com vegetação). A razão para tal decisão prendeu-se com o facto de se poder analisar os resultados provenientes de uma cobertura inclinada e de uma parede vertical com vegetação, sendo a última virada para Oeste. A solução construtiva da camada verde e substrato é idêntica à utilizada na Travessa do Patrocínio, pese embora a do Atlântico Blue Studio não apresentar uma forma piramidal ao edifício, nem uma caixa-de-ar variável ao longo da altura do mesmo.

4.2.2. Características dos materiais

No caso de estudo do edifício de Paço de Arcos não foi possível conhecer as espessuras das camadas constituintes da parede e da cobertura. Assim, muitas das características destes materiais, que serão apresentadas no decorrer deste subcapítulo, foram admitidas por falta de informação. Relativamente à parede da fachada verde, sabe-se que é constituída do exterior para o interior por, vegetação, duas camadas de manta geotêxtil com tubagem no seu interior, manta geotêxtil, PVC, ar, e no restante admitiu-se que seria constituído por reboco, tijolo furado, caixa-de-ar ventilada, tijolo furado e reboco, Figura (4.10). Quanto à cobertura, não é assunto desta dissertação, no entanto monitorizaram-se e simularam-se os seus efeitos. Além disso, devido à falta de informação acerca dos materiais que a constituem, admitiu-se do exterior para o interior que é composto por vegetação, duas camadas de manta geotêxtil com tubagem no seu interior, PVC, poliuretano projetado, betão, caixa-de-ar com espessura variável (teto falso) e gesso cartonado, apresentando uma inclinação de aproximadamente 30°, Figura (4.11).

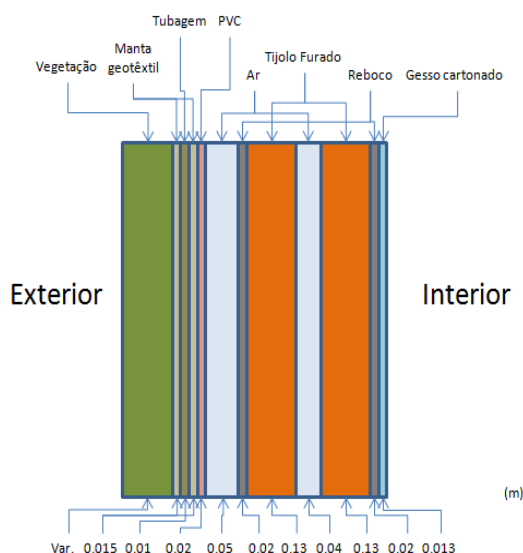


Figura 4.10 - Camadas constituintes da fachada verde do Atlântico Blue Studio

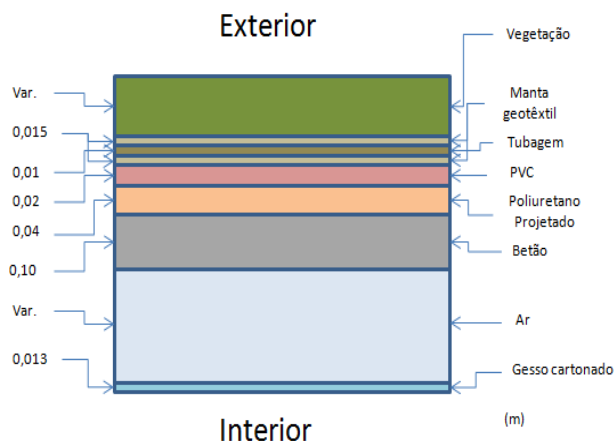


Figura 4.11 - Camadas constituintes da cobertura verde do Atlântico Blue Studio

Como atrás se mencionou, a solução construtiva da fachada verde é idêntica à utilizada na Travessa do Patrocínio, pelo que as características do material que não estão presente na Tabela (4.1) da Travessa do Patrocínio, o tijolo furado, constam na Tabela (4.2).

Tabela 4.2 - Características dos materiais presentes na parede, Paço de Arcos

Material	Espessura (m)	Condutibilidade de térmica W/(m.°C)	Condutância térmica W/(m².°C)	Massa volúmica (kg/m³)	Calor específico J/(kg.°C)	Absortância da radiação solar	Emissividade
Tijolo Furado	0,13	0,5	3,85	1200	1000	0,5	0,91

Os dados presentes na Tabela (4.2) relativos à condutibilidade térmica, condutância térmica e massa volúmica foram retirados do LNEC ITE50 (2006), enquanto os dados do calor específico foram obtidos na dissertação de Silva (2007). A informação relativa à absortância da radiação solar provém do REH (2013) e a emissividade foi assumida nos termos do documento de Surovova et al. (2013).

4.2.3. Monitorização

A monitorização da fachada verde em Paço de Arcos realizou-se em duas campanhas experimentais realizadas no ano 2014, uma no Inverno, de 13 a 19 de Fevereiro e de 27 de Fevereiro a 13 de Março, e outra realizada no Verão, de 18 de Junho a 2 de Julho e de 5 a 10 de Julho. Quanto à rega, apresenta os mesmos horários que a Travessa do Patrocínio mas com durações menores, realizados em três momentos diários, com uma duração de uma hora cada, através do processo de fertirrigação. Ao contrário da situação da Travessa do Patrocínio, o Atlântico Blue Studio encontra-se em funcionamento, tendo sido observados vários aparelhos de ar-condicionado que não foram considerados na validação dos modelos de Surovova et al. (2013) e de Malys et al. (2014). Neste caso de estudo foi considerado

apenas o fluxo pela parede exterior, sem contar com a contribuição dos outros elementos dentro do edifício, por exemplo, trocas de calor pelo teto e por outras paredes do compartimento em estudo.

Decidiu-se simular três zonas diferentes, duas na fachada e outra na cobertura. As localizações na fachada foram escolhidas tendo em conta as diferentes espécies de plantas que no local se encontravam, enquanto a localização na cobertura foi decidida tendo em conta o alinhamento com os aparelhos de medição situados na fachada. As zonas simuladas são identificadas com o nº 1 (cobertura), nº 2 (zona 1) e nº 4 (zona 2), presentes na Figura (4.12). Na Figura (4.13) apresenta-se uma fotografia do edifício com a fachada verde em estudo.

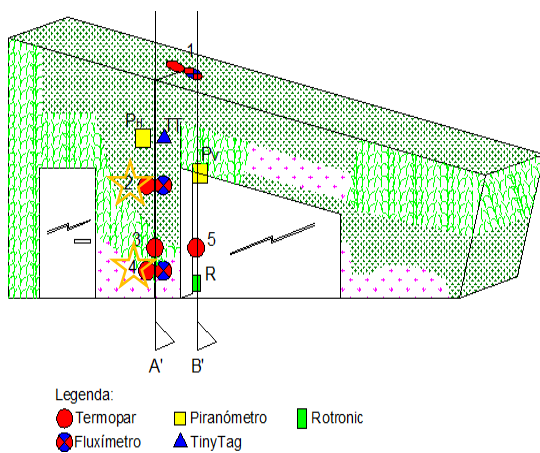


Figura 4.12 - Esquema da fachada verde do Atlântico Blue Studio, adaptado de Prazeres (2015)



Figura 4.13 – Fachada verde do Atlântico Blue Studio, Prazeres (2015)

5. Coeficiente de transmissão térmica

5.1. Cálculo do coeficiente transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica refere-se a um input inerente ao desenvolvimento dos modelos de Susosorva et al. (2013) e de Malys et al. (2014). Assim, no presente capítulo encontram-se três métodos utilizados para estimar o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) com unidades $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, para cada caso de estudo.

5.1.1. Cálculo de $U_{(i)}$ com base nas resistências térmicas das diferentes camadas

O primeiro consiste no cálculo do coeficiente de transmissão térmica através das resistências térmicas dos materiais da parede em estudo ($\sum R_j$) e das resistências térmicas superficiais, exterior (R_{se}) e interior (R_{si}), como mostra a Equação (5.1). Sendo estas resistências térmicas da parede dependentes da espessura e da condutibilidade térmica dos materiais da mesma.

$$U_{(i)} = \frac{1}{(R_{si} + R_{se} + \sum R_j)} \quad (5.1)$$

Como o fluxo de uma parede acontece na horizontal, as resistências térmicas superficiais segundo o LNEC ITE50 (2006) tomam os valores apresentados na Tabela (5.1). Nesta dissertação também está presente o fluxo vertical numa cobertura, que se encontra presente também na mesma tabela com os respetivos valores das resistências superficiais.

Tabela 5.1 - Valores das resistências térmicas superficiais LNEC ITE50 (2006)

Sentido do fluxo		R_{se} ($m^2 \cdot ^\circ C$)/W	R_{si} ($m^2 \cdot ^\circ C$)/W
Horizontal		0,04	0,13
Vertical	Ascendente	0,04	0,10
	Descendente	0,04	0,17

Através do documento apresentado pelo LNEC ITE50 (2006), retiraram-se os valores respetivos às condutibilidades térmicas, λ $W/(m \cdot ^\circ C)$ dos materiais e através das respetivas espessuras utilizou-se a Equação (5.2) para o cálculo da resistência térmica, R_j ($m^2 \cdot ^\circ C$)/W.

$$\sum R_j = \sum \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} \right) \quad (5.2)$$

5.1.2. Cálculo de $U_{(ii)}$ através da média progressiva com base nas temperaturas ambientais recolhidas experimentalmente

O segundo consiste no cálculo do coeficiente de transmissão térmica, segundo a norma EN ISO 9869:1994, para cada instante, tendo em conta as médias dos valores dos instantes anteriores das temperaturas exteriores e interiores e dos fluxos de calor, e não dos seus valores instantâneos, como mostra a Equação (5.3).

$$U_{(ii)} = \frac{\sum_0^{i-t} Q_i}{\sum_0^{i-t} T_{i_i} - \sum_0^{i-t} T_{e_i}} \quad (5.3)$$

Em que:

t – Instante do tempo (min);

Q_i – Fluxo de calor (W/m^2);

T_{i_i} – Temperatura interior no instante i ($^{\circ}C$);

T_{e_i} – Temperatura exterior no instante i ($^{\circ}C$).

Os valores dos parâmetros apresentados na Equação (5.3) estimam-se através de uma monitorização experimental, recorrendo a um fluxímetro colocado no lado interior da parede do edifício, de dois termopares localizados no interior e exterior da parede (de preferência no mesmo eixo) e de um Data Logger localizado no interior do edifício (recolha dos dados). O coeficiente de transmissão térmica estimado contém alguma incerteza, devido aos erros que os sensores e o Data Logger podem apresentar. No entanto, este erro não é contemplado nesta dissertação. O U estimado deverá convergir para um valor não superior/inferior a 5% do valor final. Se isto acontecer, o valor do coeficiente encontra-se próximo do real.

5.1.3. Cálculo de $U_{(iii)}$ através da média progressiva com base nas temperaturas superficiais recolhidas experimentalmente

O terceiro consiste no cálculo do coeficiente de transmissão térmica para cada instante, segundo a norma EN ISO 9869:1994. Por sua vez, tem em conta as médias dos valores dos instantes anteriores das temperaturas superficiais exteriores, das superficiais interiores e dos fluxos de calor, Equação (5.4). Esta equação também acrescenta o valor das resistências superficiais, exterior e interior, apresentadas na Tabela (5.1).

$$U_{(iii)} = \frac{1}{\frac{\sum_0^{i-t} T_{si_i} - \sum_0^{i-t} T_{se_i}}{\sum_0^{i-t} Q_i} + R_{se} + R_{si}} \quad (5.4)$$

Em que:

t – Instante do tempo (min);

Q_i – Fluxo de calor (W/m^2);

T_{si_i} – Temperatura superficial interior no instante i ($^{\circ}C$);

T_{se_i} – Temperatura superficial exterior no instante i ($^{\circ}C$);

R_{si} – Resistência superficial interior ($m^2 \cdot ^{\circ}C/W$);

R_{se} – Resistência superficial exterior ($m^2 \cdot ^{\circ}C/W$).

5.2. Aplicação ao caso de estudo: Travessa do Patrocínio

No caso de estudo da Travessa do Patrocínio a estimativa do coeficiente de transmissão térmica para campanha experimental do verão é realizada apenas pelo cálculo de (i), em que foram consideradas as resistências térmicas de todos os materiais pertencentes às paredes exteriores do Piso 0 e do Piso 2.

Na campanha experimental de Inverno, a estimativa do coeficiente de transmissão térmica foi calculada segundo (i), (ii) e (iii) para o Piso 0 e Piso 2. Na Tabela (5.2) indicam-se os materiais e suas resistências térmicas.

Tabela 5.2 – Resistência térmica dos materiais constituintes da parede exterior do Piso 0 e Piso 2, Travessa do Patrocínio

	Manta geotêxtil	PVC	Espaço de ar não ventilado (1cm)	Poliuretano projetado	Betão	Espaço de ar não ventilado (4-30cm)	Lã de Rocha	Gesso cartonado	Reboco
R_i ($m^2 \cdot ^\circ C$)/W	0,300	0,100	0,15	0,952	0,100	0,18	1,000	0,052	0,015

Por sua vez, na campanha experimental de inverno, apresentam-se na Tabela (5.3) os valores dos coeficientes de transmissão térmica calculados através de $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ para o Piso 0 e Piso 2. Realça-se que não existem valores do cálculo de U a partir de $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ para a campanha de verão, por isso utilizou-se o mesmo valor que no inverno, no entanto é importante referir que os valores de U seriam diferentes. Na Tabela (5.4) constam os valores de U do cálculo $U_{(i)}$ juntamente com $U_{(iii)}$ utilizados na calibração dos modelos de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014).

Tabela 5.3 – Coeficientes de transmissão térmica (U) para os cálculos de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$, Fevereiro e Março, Travessa do Patrocínio

Período experimental	Coeficiente de transmissão térmica (U), $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$			
	PISO 2		PISO 0	
	$U_{(ii)}$	$U_{(iii)}$	$U_{(ii)}$	$U_{(iii)}$
21/02-27/02	2,180	2,268	-6,880	0,732
03/03-10/03	6,214	1,438	0,840	3,071
21/02-27/02 + 03/03-10/03	3,460	1,706	0,222	-0,442

Tabela 5.4– Valores utilizados dos coeficientes de transmissão térmica (U) para o cálculo $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$ na calibração dos modelos, inverno e verão, Travessa do Patrocínio

Período experimental	Coeficiente de transmissão térmica (U), $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$			
	PISO 2		PISO 0	
	$U_{(i)}$	$U_{(iii)}$	$U_{(i)}$	$U_{(iii)}$
Inverno	0,362	2,268	0,720	-
Verão				

Analisando a Tabela (5.3) relativamente ao Piso 0, verifica-se que no período experimental 21 de Fevereiro a 27 de Fevereiro, o coeficiente de transmissão térmica de $U_{(iii)}$ converge para o $U_{(i)}$, enquanto o valor de $U_{(ii)}$ é negativo. O valor negativo do coeficiente de transmissão térmica justifica-se pela média progressiva do fluxo de calor por condução ser negativa no final do período experimental. O mesmo não acontece para o período experimental de 3 de Março a 10 de Março, em que o valor de $U_{(ii)}$ converge para o de $U_{(i)}$. A razão para tal não ter acontecido pode partir dos resultados experimentais das temperaturas superficiais da parede em estudo, visto que o fluxo utilizado foi o mesmo. Em relação ao agrupamento dos dois períodos da campanha experimental de Inverno, é de notar que o cálculo do $U_{(ii)}$ converge melhor para o $U_{(i)}$ que para o $U_{(iii)}$, sendo esta situação indesejável. O U segundo $U_{(iii)}$ aproxima-se da situação real em estudo, dado que neste consta as temperaturas superficiais e as resistências superficiais exteriores e interiores na sua formulação. Retenha-se que tanto no cálculo de $U_{(ii)}$ como no $U_{(iii)}$, os valores relativos às temperaturas e fluxos foram obtidos experimentalmente. O cálculo do coeficiente de transmissão térmica através do $U_{(i)}$ foi comparado com os resultados da certificação energética da parede em estudo, sendo o seu valor igual para o Piso 0. Será assim preferível utilizar o U de $U_{(i)}$ para caracterizar o coeficiente de transmissão térmica em ambas as campanhas experimentais neste piso.

No Piso 2, verifica-se que para o período experimental de 21 a 27 de Fevereiro os valores dos coeficientes de transmissão térmica através de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ estão muito próximos, e que o de $U_{(i)}$ difere destes. Toma-se necessário perceber o significado da resistência térmica da fachada verde. Se o coeficiente de transmissão térmica for baixo, pressupõe-se uma resistência térmica elevada. Neste caso, na presença de vegetação na fachada verificou-se o contrário. A resistência térmica dada por $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ proporciona uma resistência térmica inferior à da própria parede. No período de 3 a 10 de Março, o valor de $U_{(iii)}$ não diverge significativamente do período experimental anterior, enquanto o resultado de $U_{(ii)}$ aumenta praticamente o triplo do valor do coeficiente de transmissão térmica. A causa desta situação pode residir no aumento do fluxo na parede em estudo e pela menor diferença entre as temperaturas do ar interior e exterior. Utilizaram-se os coeficientes de transmissão térmica de $U_{(i)}$ e de $U_{(iii)}$ para o Piso 2, de forma a compreender a sua influência na temperatura superficial exterior da fachada verde.

A resistência térmica da planta, segundo o estudo de Susorova et al. (2013) varia de caso para caso e tem em consideração as suas características intrínsecas. Por exemplo, para valores de LAI entre 0-4 (assumindo o coeficiente de atenuação da radiação igual a 0,5), a resistência da planta varia entre 0,07-0,50 ($m^2 \cdot ^\circ C/W$). Para valores de atenuação da radiação entre 0-0,8 (assumindo o LAI igual a 2), a resistência da planta varia de 0,06-0,38 ($m^2 \cdot ^\circ C/W$). Assim sendo, uma vez que houve um défice de informação em relação ao parâmetro da resistência térmica da planta, admitiu-se que para a campanha de Verão seria $R_{planta} = 0,225$ ($m^2 \cdot ^\circ C/W$) e para a campanha de Inverno seria $R_{planta} = 0,115$ ($m^2 \cdot ^\circ C/W$). Estes valores basearam-se respetivamente no $LAI = 1,8$ e $LAI = 1$.

Como o espaço de ar não ventilado é maioritariamente superior a este valor, consultou-se a ISO 13789 para espaços de ar não ventilados superiores a 300 mm, que de certa forma iria aumentar a resistência térmica da do conjunto. O cálculo desta resistência mostrou ser demasiado elevado para a situação do caso de estudo, por isso decidiu-se utilizar o valor de $0,20 \text{ (m}^2\cdot\text{°C)/W}$, incrementado ao da norma do LNEC ITE50 (2006), $0,18 \text{ (m}^2\cdot\text{°C)/W}$ para espaços de ar não ventilados inferiores a 300 mm. O valor do coeficiente de transmissão térmica pode vir a ser minorado dado o valor de R_{se} , visto não se tratar de uma parede convencional. Portanto, prevê-se que seja maior que $0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{°C)/W}$ na presença de vegetação. O valor admitido da resistência da planta foi o mesmo utilizado no modelo desenvolvido por Malys et al. (2014).

As Figuras (5.1) e (5.2) são relativas aos cálculos dos coeficientes de transmissão térmica do Piso 2 através de $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ para Fevereiro e Março. Não estão presentes as figuras dos gráficos relativos ao Piso 0, dado que o seu valor já era facultado no certificado energético. Para o Piso 2, o coeficiente de transmissão térmica calculado em $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ estabiliza no período experimental de Fevereiro, enquanto no mês de Março tal não se verifica.

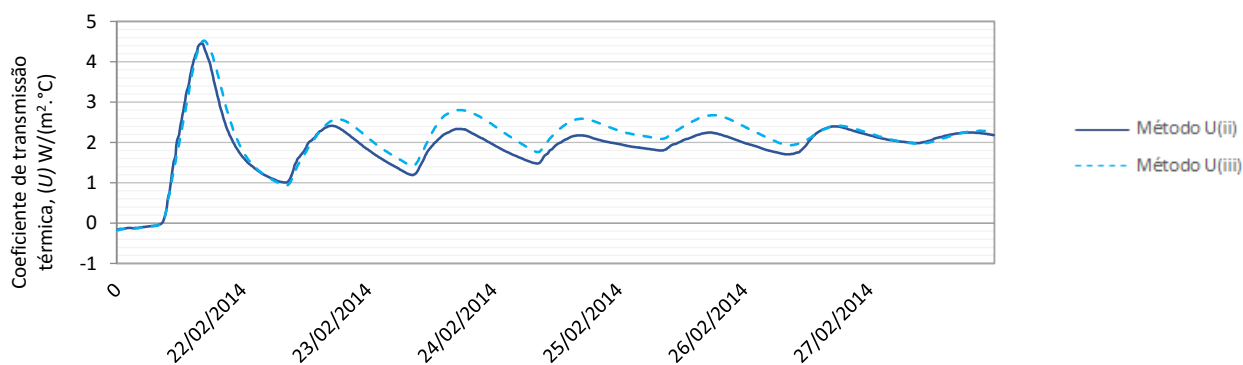


Figura 5.1 - Coeficiente de transmissão térmica de acordo com o método $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$, Fevereiro, Travessa do Patrocínio

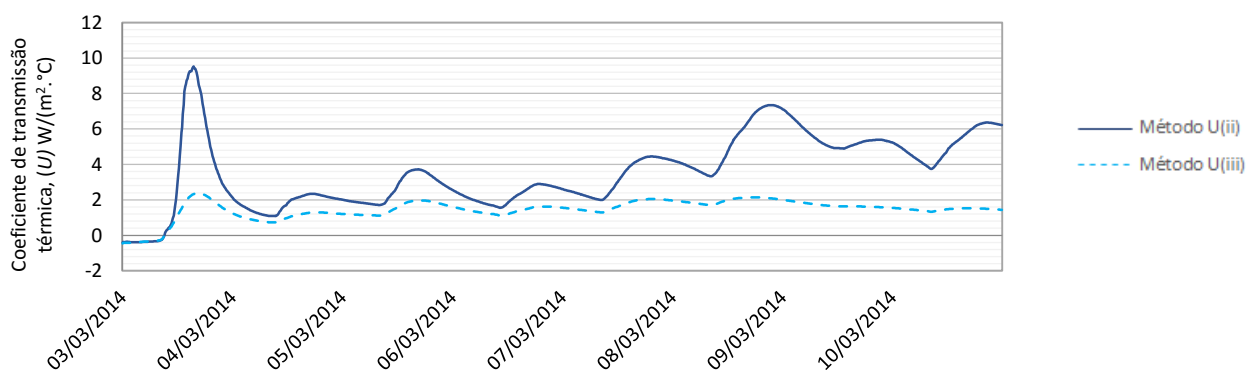


Figura 5.2 - Coeficiente de transmissão térmica de acordo com o método $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$, Março, Travessa do Patrocínio

5.3. Aplicação ao caso de estudo: Atlântico Blue Studio

No Atlântico Blue Studio em Paço de Arcos estimou-se o valor do coeficiente de transmissão térmica através de $U_{(i)}$, $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ durante a campanha de inverno e de verão, para as duas diferentes zonas da parede do jardim vertical e para a cobertura. Os resultados obtidos de $U_{(i)}$ podem não corresponder ao valor real, dado que os componentes que caracterizam a parede foram admitidos por falta de informação. Na Tabela (5.5) indica-se o material que não se encontra na Tabela (5.2) e respetiva resistência térmica, obtida através do LNEC ITE50 (2006).

Tabela 5.5- Resistência térmica do material tijolo, Atlântico Blue Studio

	Tijolo furado
R_i (m ² .°C)/W	0,260

Os valores dos coeficientes de transmissão térmica calculados através de $U_{(i)}$, $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$, da parede exterior (zona 1 e zona 2) e da cobertura, encontram-se registados na Tabela (5.6).

Tabela 5.6 - Coeficientes de transmissão térmica (U) para os vários métodos, Atlântico Blue Studio

Período experimental	Coeficiente de transmissão térmica (U), W/(m ² .°C)								
	Cobertura verde			Fachada verde					
	$U_{(i)}$	$U_{(ii)}$	$U_{(iii)}$	Zona 1			Zona 2		
	$U_{(i)}$	$U_{(ii)}$	$U_{(iii)}$	$U_{(i)}$	$U_{(ii)}$	$U_{(iii)}$	$U_{(i)}$	$U_{(ii)}$	$U_{(iii)}$
13/02-19/02	0,426	1,745	1,055	0,519	2,970	1,774	0,493	1,994	1,347
27/02-13/03		2,298	1,420		3,347	1,882		2,278	1,489
13/02-19/02 + 27/02-13/03		2,087	1,279		3,203	1,842		2,169	1,436
18/06-02/07	0,413	2,091	1,644		3,229	1,703		2,268	1,356
05/07-10/07		1,967	1,635		3,445	2,022		1,999	1,140
18/06-02/07 + 05/07-10/07		2,058	1,641		3,284	1,782		2,120	1,292

Analisando a Tabela (5.6), verifica-se que os valores de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ têm o mesmo tipo de andamento ao longo das duas campanhas experimentais. Deste modo, o coeficiente de transmissão térmica está de acordo com o expectável, visto não variar significativamente durante os períodos de monitorização. Os resultados de $U_{(ii)}$ apresentam um valor médio de 2,041 W/(m².°C), 3,246 W/(m².°C) e 2,138 W/(m².°C), enquanto em $U_{(iii)}$ regista um valor médio de 1,446 W/(m².°C), 1,834 W/(m².°C) e 1,343 W/(m².°C), para a cobertura verde, zona 1 e zona 2 respetivamente. Anote-se que os valores de cálculo do coeficiente de transmissão térmica são relativamente menores em $U_{(iii)}$ quando comparados com $U_{(ii)}$ nas duas campanhas experimentais, em que a diferença máxima entre ambos é, 0,878 W/(m².°C), 1,526 W/(m².°C) e 0,912 W/(m².°C), para a cobertura verde, zona 1 e zona 2 respetivamente. Através da

comparação dos coeficientes de transmissão térmica de $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ da zona 1, constata-se que a diferença é significativamente alta ($>1 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$), não se verificando o mesmo para a zona 2 e cobertura. Este aspeto pode ter sido originado na medição de fluxos de calor (fluxímetro) na zona 1, dado que em $U_{(ii)}$ as temperaturas do ar exterior e interior são as mesmas da zona 2 e cobertura.

Em relação aos valores de $U_{(i)}$, verifica-se que são de uma ordem de grandeza diferentes dos apurados nos restantes métodos. A razão para tal prende-se com o facto de os fluxímetros não conseguirem recolher o fluxo real da parede e da cobertura verde, possivelmente por ter sido dispersado pelas caixas-de-ar e não chegar aos restantes materiais constituintes. O valor do coeficiente de transmissão térmica da cobertura em $U_{(i)}$ varia da campanha de inverno para a de verão, visto que o sentido do fluxo de calor (ascendente no inverno ou descendente no verão) altera a resistência térmica da superfície interior do elemento.

Na Tabela (5.7) encontram-se os coeficientes de transmissão térmica utilizados na validação dos modelos de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014). Sendo que, os valores de (i) permanecem iguais aos apresentados na Tabela (5.6), enquanto os valores de $U_{(iii)}$ resultam da média dos dados do mês em questão. Quanto a $U_{(ii)}$, decidiu-se não incluir na validação dos modelos visto que em $U_{(iii)}$ englobam-se as temperaturas superficiais interiores e exteriores, esperando-se ter o coeficiente de transmissão térmica mais próximo do real.

Tabela 5.7 – Valores utilizados dos coeficientes de transmissão térmica (U) para o cálculo $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$ na calibração dos modelos, Atlântico Blue Studio

Coeficiente de transmissão térmica (U), $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})$						
Período experimental	Cobertura verde		Fachada verde			
	$U_{(i)}$	$U_{(iii)}$	Zona 1		Zona 2	
			$U_{(i)}$	$U_{(iii)}$	$U_{(i)}$	$U_{(iii)}$
Inverno	0,426	1,251	0,519	1,833	0,493	1,424
Verão	0,413	1,640		1,836		1,263

Apresentam-se nas Figuras (5.3) a (5.6), o andamento do coeficiente de transmissão térmica da fachada e da cobertura verde. Houve a necessidade de agrupar o mês de Fevereiro com o mês de Março e o mês de Junho com o mês de Julho de forma a não sobrecarregar a dissertação com figuras dos gráficos.

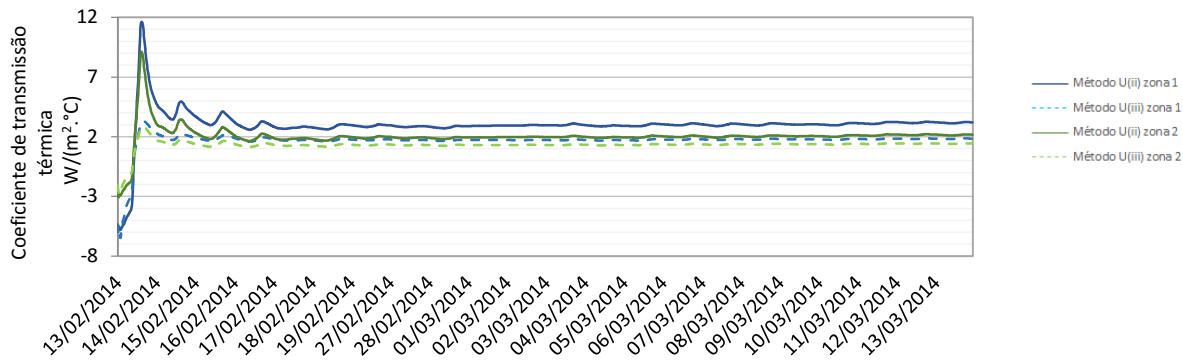


Figura 5.3 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a zona 1 e zona 2, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio

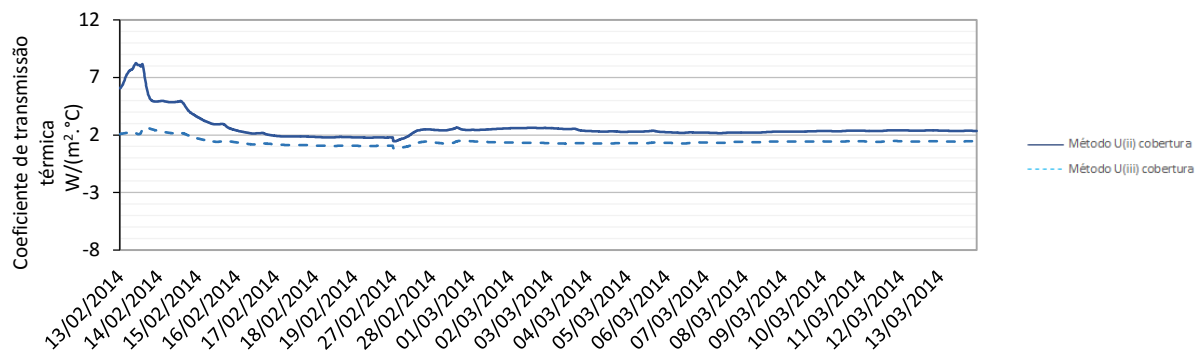


Figura 5.4 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a cobertura, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio

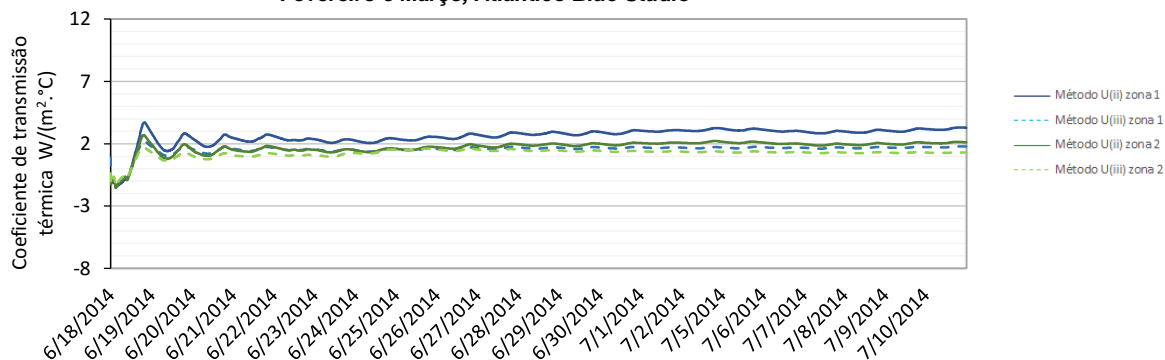


Figura 5.5 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a zona 1 e zona 2, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio

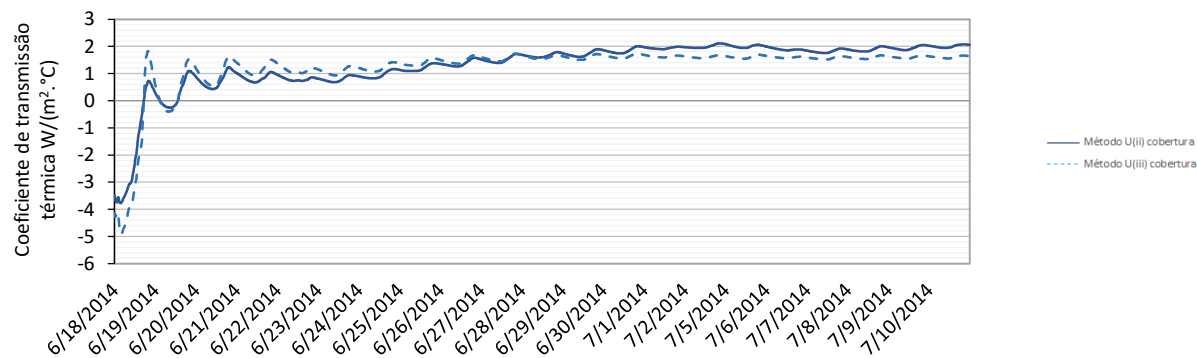


Figura 5.6 - Coeficiente de transmissão térmica a partir de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para a cobertura, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio

Quanto maior o período da estimativa de U , segundo o método da média progressiva, maior a fiabilidade dos resultados. Pelo que, o período entre os dias 10 e 20 é o que melhor estima o coeficiente de transmissão térmica. A partir da análise da Figura (5.3) relativa às zonas 1 e 2, verifica-se que o intervalo de +/- 5% do valor estimado acontece depois do dia 17 de Fevereiro, estabilizando nos dias seguintes, sendo esses valores próximos dos reais. É na zona 2 onde acontece a maior aproximação de $U_{(ii)}$ com $U_{(iii)}$. Nos meses de Junho e Julho para a fachada verde, Figura (5.5), o coeficiente de transmissão térmica apresenta o mesmo tipo de andamento apresentado na Figura (5.3).

Da análise da Figura (5.4), relativa à cobertura, verifica-se que o coeficiente de transmissão térmica estabiliza dias mais tarde quando comparado com as zonas 1 e 2 (1 de Março), acontecendo o mesmo para os meses de Junho e Julho, Figura (5.6).

5.4. Considerações finais

Foi tido em consideração três cálculos para a estimativa do coeficiente de transmissão térmica das paredes de duas fachadas verdes distintas. O primeiro relaciona as resistências superficiais da parede e das camadas constituintes da parede, enquanto os últimos dois dependem de parâmetros provenientes de campanhas experimentais. Os valores de $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$, traduzem uma melhor aproximação do valor de real de U que os de $U_{(i)}$, pois consistem na utilização de temperaturas ambientais e superficiais, bem como de fluxos de calor.

Na Travessa do Patrocínio para o Piso 2 foram detetadas diferenças significativas nos coeficientes de transmissão térmica entre $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ com o $U_{(i)}$. O período experimental em que houve uma melhor aproximação de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ para o Piso 2 ocorreu entre os dias 21 a 27 de Fevereiro. Já no Piso 0, essa aproximação não se verificou. Também no mês de Fevereiro, o cálculo de U através de $U_{(iii)}$ convergiu para $U_{(i)}$ na parede do Piso 0.

No caso de estudo do Atlântico Blue Studio, os valores de $U_{(i)}$ divergem significativamente dos restantes cálculos, pois têm em consideração as resistências térmicas de todos os materiais envolvidos no processo, enquanto os valores de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ têm em conta os dados experimentais recolhidos por Prazeres (2015). Como foram admitidos os materiais constituintes da parede e da cobertura presentes neste caso de estudo, pode ter levado a alguns desvios no cálculo do coeficiente de transmissão térmica.

Em suma, o coeficiente de transmissão térmica calculado através de $U_{(i)}$ exige maior rigor na especificação do parâmetro da condutibilidade térmica dos materiais constituintes da parede, na consulta e aplicação dos dados do LNEC ITE50 (2006) e de outras proveniências. Ora, havendo uma pequena diferença nos valores utilizados, aparece um resultado do coeficiente de transmissão térmica divergente. Outro fator de natureza incerta prende-se com a resistência da planta que pode ser mais elevada, ou não, do valor apresentado. Os valores de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$ aproximam-se mais da situação real que os de $U_{(i)}$ por serem considerados os dados experimentais nos seus cálculos. Todavia, tem de haver um especial cuidado na recolha dos valores da atividade de monitorização.

6. Calibração dos modelos

O presente capítulo pretende validar a temperatura superficial exterior calculada através dos dois modelos com a que foi recolhida experimentalmente por Prazeres (2015). Inicia-se com um procedimento de cálculo da radiação solar, que se encontrou omissa na campanha experimental de Fevereiro e Março por falha do piranómetro (aparelho de medição de radiação solar). De seguida, são definidos dois parâmetros para avaliação do erro dos modelos, *RMSE* e *r*, que serão depois utilizados em cada caso de estudo.

Apresenta-se uma comparação da temperatura da folha com um estudo de Gates (2003) e com o modelo de Susorova et al. (2013), bem como os parâmetros assumidos e admitidos na validação. Transmite-se a utilização da evapotranspiração no modelo de Malys et al. (2014) bem como a validação do fluxo de calor latente e também os parâmetros assumidos e admitidos. Para concluir, em cada caso de estudo, foi feita uma comparação da temperatura superficial exterior dos diferentes modelos com a recolhida experimentalmente.

A radiação solar normal à fachada necessária para ambos os modelos foi determinada a partir da interação de três programas, o Sketchup (2013), o EnergyPlus (2013) e o OpenStudio (2013). Com a utilização do programa Sketchup (2013) visou-se desenhar um objeto genérico, que se assemelhasse a um edifício, enquanto o OpenStudio (2013) transferia esses dados para o EnergyPlus (2013), que por sua vez simulava valores da radiação incidente da fachada. Os dados a fornecer ao EnergyPlus (2013) provêm da Equação (6.1) que relaciona a radiação direta normal com a radiação global horizontal, a radiação difusa horizontal e o $\sin(a)$. O parâmetro a representa o ângulo que a altura do solo faz com o horizonte.

$$Rad. \ dir. \ normal \ (nova) = \frac{Rad. \ glob. \ horiz. \ (METEO) - Rad. \ dif. \ horiz}{\sin(a)} \quad (6.1)$$

De forma a introduzir os parâmetros na Equação (6.1) consultou-se a radiação difusa horizontal e a radiação global horizontal para a cidade de Lisboa através do documento do EnergyPlus (2013) de forma a calcular a radiação direta horizontal, Equação (6.2). Após este cálculo, utilizou-se a Equação (6.3) para determinar o $\sin(a)$, que se manteve constante ao longo da campanha, visto ser igual para qualquer situação. A razão para tal, prendeu-se com a omissão dos dados experimentais da radiação solar da campanha de Fevereiro e Março.

$$Rad. \ glob. \ horiz. \ (Eplus) = Rad. \ dir. \ horiz. + Rad. \ dif. \ horiz. \ (Eplus) \quad (6.2)$$

$$Rad. \ dir. \ normal \ (Eplus) = \frac{Rad. \ dir. \ horiz.}{\sin(a)} \quad (6.3)$$

Nestes modelos utilizou-se o parâmetro o Root Mean Square Root (RMSE) para avaliar o erro do modelo e o coeficiente de correlação de Pearson (r) para estabelecer uma correspondência entre os dados experimentais e simulados. O primeiro traduz a variação dos valores experimentais com os simulados, tendo em conta o número total de medições. O segundo traduz a precisão quantitativa dos valores do modelo com os dados analisados experimentalmente, variando de -1 a 1. Assim, quando os valores experimentais apresentam uma correlação perfeita positiva entre os simulados, temos o resultado $r = 1$ mas sempre que exibirem uma correlação negativa perfeita, isto é, se um aumenta, a outra diminui e assume-se $r = -1$. No caso de não dependerem linearmente um do outro, considera-se $r = 0$. As equações associadas aos cálculos destes dois parâmetros estão presentes na Equação (6.4) e Equação (6.5), sendo a primeira referente ao RMSE e a segunda ao coeficiente de correlação de Pearson.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{modelo,i})^2}{n}} \quad (6.4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.5)$$

6.1. Caso de estudo: Travessa do Patrocínio

No caso de estudo da Travessa do Patrocínio, na campanha experimental dos meses de Fevereiro, Março, Junho e Julho, foi possível quantificar os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar exterior, °C;
- Temperatura do ar interior do Piso 0 e Piso 2, °C;
- Temperatura da superfície exterior do Piso 0 e Piso 2, °C;
- Temperatura da superfície interior do Piso 0 e Piso 2, °C;
- Fluxos de calor nas paredes de estudo do Piso 0 e Piso 2, W/m²;
- Radiação horizontal e vertical, W/m²;
- Humidade relativa do ar, %;

No decorrer da monitorização das campanhas experimentais utilizaram-se valores apurados no decurso das mesmas, bem como dados do METEO-IST. Os parâmetros do METEO-IST foram usados de forma a corrigir alguns dados da monitorização como a radiação solar e a humidade relativa, e outros que não foram medidos durante a campanha experimental como a velocidade do vento. Alguns dos aparelhos como foi o caso do fluxímetro na posição nº1 da Figura (4.6) não registou nenhum valor, o piranómetro não registou dados da radiação vertical incidente, os termopares (aparelho de medição da temperatura) falharam e não registaram as temperaturas, e o humidímetro (aparelho de medição da humidade) em algumas horas seguidas registou

valores máximos (100%) e mínimos (0%), não havendo valores médios entre eles em certos dias da monitorização.

Na campanha dos meses de Fevereiro e de Março, não foi possível quantificar os fluxos de calor tanto no Piso 0 como no Piso 2 e também existiram falhas nas medições das temperaturas em alguns dias da monitorização. A distância desta estação meteorológica ao local do estudo é considerável (3,3Km), o que pode ter provocado um desvio significativo na validação do modelo. Também as condições do local eram diferentes, visto que a zona do edifício da Travessa do Patrocínio era mais resguardada. Neste caso de estudo foi considerado apenas o fluxo pela parede exterior, sem contar com a contribuição dos outros elementos dentro do edifício, por exemplo, as trocas pelo teto e por outras paredes do compartimento em estudo.

6.1.1. Modelo de Susorova et al. (2013)

O primeiro aspeto a ser validado centrou-se na temperatura da folha da Equação (3.27) com o objetivo de verificar, através da comparação com o estudo de Gates (2003) e com o de Susorova et al. (2013), os desvios entre os valores. Desta comparação visou-se clarificar que, o cálculo da temperatura da folha para a calibração do modelo nos casos de estudo não variou $>1^{\circ}\text{C}$ dos cálculos efetuados por Susorova et al. (2013). Uma vez que existiram alguns parâmetros omissos no modelo de Susorova et al. (2013), foram assumidos parâmetros, tais como, a emissividade da superfície e da folha como um corpo negro ($\epsilon_{\text{folha}} = \epsilon_s = 1$) Gates (2003); o $g_{\text{ea ss}}$ e o $g_{\text{ea ss}}$ provenientes do inverso da resistência estomática ($1/r_s$) com igual valor.

Foram comparadas as temperaturas das folhas com base no aumento da radiação absorvida e aumento da velocidade do vento. Para esse efeito, alguns parâmetros foram inicialmente assumidos como constantes por Gates (2003) e Susorova et al. (2013), sendo estes:

- Temperatura do ar exterior, $T_{ar,ext} = 30^{\circ}\text{C}$;
- Humidade relativa, $HR = 50\%$;
- Dimensão característica da folha, $D_f = 0,05\text{m}$;
- Resistência estomática, $r_s = 5 \text{ m}^2.\text{s}/\text{mol}$;

Os valores da temperatura da folha segundo o modelo de Susorova et al. (2013), o estudo de Gates (2003) e o presente estudo encontram-se presentes na Tabela (6.1).

Tabela 6.1 – Comparação das temperaturas da folha com Susorova et al. (2013) e Gates (2003)

Radiação absorvida (W/m ²)	Susorova et al. (2013)			Gates (2003)			Presente estudo		
	T _f (°C)			T _f (°C)			T _f (°C)		
	0,1 (m/s)	1 (m/s)	5 (m/s)	0,1 (m/s)	1 (m/s)	5 (m/s)	0,1 (m/s)	1 (m/s)	5 (m/s)
419	24,56	26,32	27,69	23,7	26	27,8	24,36	26,01	27,4
698	34,07	31,48	30,71	34,1	31,3	30,7	34,74	31,74	30,84
977	43,58	36,64	33,76	44,5	36,8	34,4	45,13	37,47	34,27

Verifica-se que através da Tabela (6.1) para menores radiações, 419 W/m², e com o contínuo aumento da velocidade do vento, a temperatura da folha aumenta. Para radiações mais elevadas, 698 e 977 W/m², com o contínuo aumento da velocidade do vento, a temperatura da folha diminui. A razão da temperatura da folha aumentar deve-se ao facto do ar exterior, T_{ar,ext}=30°C, aquecer a folha por convecção, sendo esta situação frequente em noites de verão Gates (2003). Enquanto no segundo caso, a convecção ajuda a arrefecer a temperatura da folha com o aumento da velocidade do vento e da radiação absorvida. No sentido de explicar os desvios dos valores de cálculo do autor em relação ao modelo de Susorova et al. (2013) e Gates (2003) apresenta-se a Tabela (6.2).

Tabela 6.2 – Diferenças das temperaturas da folha do presente estudo com Susorova et al. (2013) e Gates (2003)

Radiação absorvida (W/m ²)	Susorova et al. (2013)			Gates (2003)		
	T. folha (°C)			T. folha (°C)		
	0,1 (m/s)	1 (m/s)	5 (m/s)	0,1 (m/s)	1 (m/s)	5 (m/s)
419	-0,92	-0,7	-0,52	-0,06	-0,38	-0,63
698	-0,04	-0,13	-0,11	-0,07	-0,05	-0,1
977	0,84	0,44	0,27	-0,08	-0,28	-0,37

As diferenças dos dados do presente estudo com os do modelo de Susorova et al. (2013) e com o estudo de Gates (2003) não excederam mais do que 1°C. Era de esperar que as diferenças fossem menores na comparação com o modelo de Susorova et al. (2013), visto ser este o modelo aplicado. Só que se verifica a existência de menores diferenças com os valores de Gates (2003) dado que alguns dos parâmetros admitidos partem deste estudo. Pode concluir-se que os cálculos do presente estudo relativamente aos de Susorova et al. (2013) apresentam uma boa aproximação para a validação do modelo que será apresentado no decorrer deste capítulo.

No início da modelação admitiu-se que no instante zero a temperatura da superfície exterior seria igual à da temperatura superficial exterior experimental e a temperatura da folha seria igual à temperatura do ar exterior. Na validação deste modelo existiram parâmetros que permaneceram constantes durante a simulação e outros que se alteraram.

Na Tabela (6.3) estão presentes os parâmetros inalterados durante a simulação em relação às plantas e a outros dados gerais.

Tabela 6.3– Parâmetros da simulação do modelo de Susorova et al. (2013)

Parâmetros da Fachada Verde								
Dados gerais	γ (1/°C)	0,000666	$\epsilon_{céu}$	1	P_{ar} (kPa)	100	$\epsilon_{chão}$	0,9
	$F_{céu}=F_{chão}$	0,5	ϵ_{reboco}	0,87	$C_{p,ar}$ J/(mol ² .°C)	29,3	σ	5,67E-08
Plantas	ϵ_{folha}	0,96	η_{root}	0,7	r_s (m ² .s)/mol	5		
	α_{folha}	0,5	η_{wilt}	0,39	K	0,4		

A emissividade do material da parede (ϵ_{reboco}) acolheu o valor apresentado na Tabela (4.1), enquanto a emissividade do chão ($\epsilon_{ch\tilde{a}o}$) adotou o valor de 0,90 (praticamente um corpo negro). Em relação à resistência estomática assumiu-se 5 m²s/mol, correspondendo a um valor comum utilizado no intervalo, 2,5-13 m²s/mol, fornecido por (Gates,2003). Os valores de $g_{ea\ ss}$ e $g_{ea\ si}$ consideraram-se iguais para uma dada resistência estomática e os $F_{c\acute{e}u} = F_{ch\tilde{a}o} = 0,5$ de acordo com as equações (3.14) e (3.15). Quanto aos parâmetros, α_{folha} , K e $\epsilon_{c\acute{e}u}$ admitiram-se valores iguais aos presentes no modelo de Susorova et al. (2013) juntamente com os parâmetros da humidade do solo, η_{wilt} e η_{root} , que não foram monitorizados nas campanhas experimentais. As densidades e calor específicos do ar foram retirados no sítio da internet, Engineering Toolbox (N.A.). Da campanha de Inverno para a de Verão na Travessa do Patrocínio constatou-se o aumento do LAI e a dimensão constante da planta, seguramente pela intervenção apropriada de um técnico especializado, Figuras (6.1) e (6.2).



Figura 6.1 - LAI menor, Fevereiro e Março, Travessa do Patrocínio, Prazeres (2015)



Figura 6.2 - LAI maior, Junho e Julho, Travessa do Patrocínio, Prazeres (2015)

Procurou-se averiguar se a vegetação tem influência na diminuição das temperaturas superficiais exteriores da fachada com a variação do LAI. Apresenta-se na Tabela (6.4) as características das plantas utilizadas em ambas as campanhas experimentais.

Tabela 6.4 – Parâmetros alterados das plantas do modelo de Susorova et al. (2013)

		Parâmetros		
		LAI (m ² /m ²)	D _f (m)	τ
Piso 2	Inverno	1	0,1	0,67
	Verão	1,8	0,1	0,49

O tratamento de dados teve em conta os diferentes intervalos de tempo, pois o espaço temporal utilizado variava nos locais onde se recolheu as informações. Concretamente, a campanha experimental apresentava dados de 1 em 1 minuto e de 10 em 10 minutos (temperatura, humidade e fluxo de calor por condução), o METEO-IST de 1 em 1 minuto (radiação global horizontal, humidade e velocidade do vento) e o EnergyPlus (2013) de 60 em 60 minutos

(radiação solar vertical). Decidiu-se organizar os dados em intervalos de 60 minutos para os meses de Fevereiro e Março, e de 10 minutos para os meses de Junho e Julho. Esta escolha deveu-se ao facto de nos meses de Fevereiro e de Março, a radiação solar vertical se encontrar simulada (60 em 60 minutos), enquanto nos meses de Junho e Julho, a mesma ser experimental (10 em 10 minutos).

Nas Tabelas (5.3) e (5.4) encontram-se presentes os valores do coeficiente de transmissão térmica utilizados na validação através do modelo de Susorova et al. (2013).

No caso experimental do modelo de Susorova et al. (2013), apenas era tratado um único material (tijolo) como característica da parede. Como no caso em estudo se consideraram vários materiais, procedeu-se à devida adequação do modelo acima referido. Desta maneira, normalizaram-se os parâmetros presentes nas equações (3.22) e (3.23), do calor específico da parede ($c_{P,parede}$) e da massa volúmica (ρ_{parede}), utilizando expressões simples como as apresentadas nas Equações (6.6) e (6.7).

$$c_{P,parede} = \frac{c_{P,mat\ 1} \times e_{mat,1} + \dots + c_{P,mat\ n} \times e_{mat,n}}{e_{total}} \quad (6.6)$$

$$\rho_{parede} = \frac{\rho_{mat,1} \times e_{mat,1} + \dots + \rho_{mat,n} \times e_{mat,n}}{e_{total}} \quad (6.7)$$

Os valores destas equações encontram-se presentes na Tabela (6.5) para o Piso 0 e Piso 2 (sem e com fachada verde).

Tabela 6.5 – Calor específico e densidade dos componentes das paredes do Piso 0 e Piso 2, Travessa do Patrocínio

		$c_{P,parede}$ J/(kg.°C)	ρ_{parede} kg/m ³
Piso 0		864,06	1763,81
Piso 2	<i>s/ fachada verde</i>	911,76	1546,42
	<i>c/ fachada verde</i>	991,92	618,05

Da análise da Tabela (6.5), verifica-se que a introdução de fachada verde no edifício provoca uma diminuição significativa da massa volúmica, enquanto o calor específico permanece praticamente inalterado. A razão para tal aumento, prende-se com a presença de uma caixa-de-ar com espessura variável (20-72cm), que para efeitos de cálculo considerou-se 50cm, devido à posição que se encontrava o fluxímetro. Regista-se que a diferença entre ter ou não fachada verde, ronda os 80 J/(kg.°C).

O valor da massa volúmica das plantas por ser muito baixo quando comparado com os valores das massas volúmicas dos diferentes materiais, assumiu-se como desprezável. Quanto ao calor específico da planta, decidiu-se utilizar o valor 1500 J/(kg.°C), retirado da investigação de Casado et al. (2001). No caso de estudo, ao adicionar o valor correspondente do calor específico da

planta com 10cm na fachada verde ao valor apresentado na Tabela (6.5), 911,76 J/(kg.°C), implicou um acréscimo de 50 J/(kg.°C). Assim, concluiu-se que a planta tem um papel importante no calor específico da fachada verde.

Nas Tabelas (6.6) e (6.7) encontram-se presentes os parâmetros *RMSE* e *r* da temperatura superficial exterior para a zona de estudo do Piso 0 e do Piso 2 da Travessa do Patrocínio segundo os cálculos do coeficiente de transmissão térmica de $U_{(i)}$ e de $U_{(iii)}$ do Capítulo (5).

Tabela 6.6 - RMSE e r para o Piso 0 e Piso 2 a partir de $U_{(i)}$, Travessa do Patrocínio

	21 a 27 de Fevereiro		3 a 10 de Março		17 a 24 de Junho		3 a 7 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext} \text{ Piso 0 (}^{\circ}\text{C)}$	3,988	0,858	4,098	0,637	1,897	0,807	2,652	0,813
$T_{s.ext} \text{ Piso2 (}^{\circ}\text{C)}$	2,945	0,693	3,737	0,738	2,959	0,526	3,559	0,487

Tabela 6.7 - RMSE e r para o Piso 2 a partir de $U_{(iii)}$, Travessa do Patrocínio

	21 a 27 de Fevereiro		3 a 10 de Março		17 a 24 de Junho		3 a 7 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext} \text{ Piso 2 (}^{\circ}\text{C)}$	2,746	0,751	3,651	0,789	2,878	0,565	3,557	0,552

A ausência de valores da temperatura superficial exterior do Piso 0 na Tabela (6.7) justifica-se pelo coeficiente de transmissão térmica de $U_{(iii)}$ ser praticamente igual ao de $U_{(i)}$.

Da análise dos resultados registados na Tabela (6.6) para o Piso 0, obtiveram-se as seguintes conclusões:

1. *RMSE* (Piso 0): apresenta valores próximos de 4 °C para os meses de Fevereiro e de Março, enquanto nos meses de Junho e Julho, o erro assume valores ligeiramente inferiores. Concluiu-se que nos meses de calor este erro é praticamente metade dos meses de frio, logo simula melhor.
2. *r* (Piso 0): exhibe valores superiores a 0,8 para os meses de Fevereiro, Junho e Julho, enquanto em Março a correlação é ligeiramente inferior. Em suma, a correlação entre valores experimentais e simulados é próxima da perfeita ($r = 1$).

A partir dos resultados inscritos nas tabelas (6.6) e (6.7) para o Piso 2, concluiu-se o seguinte:

1. *RMSE* (Piso 2): demonstra ter erros menores nos meses de Fevereiro e de Março, mas maiores erros nos meses de Junho e de Julho, quando comparados com os valores do Piso 0; A utilização de diferentes coeficientes de transmissão térmica segundo os valores de $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$, não influencia a diminuição do erro para as temperaturas superficiais

exteriores. Confirma-se que, o aumento ou diminuição do coeficiente de transmissão apenas afeta o fluxo de calor por condução presente nas Equações (3.24) e (3.25);

2. r (Piso 2): regista correlações menores entre dados experimentais e simulados nos meses de calor e de frio, embora no mês de Março a correlação do Piso 2 seja superior ao do Piso 0. Como a correlação é sempre superior a 0,5 durante as campanhas experimentais, o andamento da temperatura superficial exterior simulada segue o da temperatura experimental.

A campanha experimental dos meses de Fevereiro e de Março, bem como a validação estão presentes nas Figuras (6.3) à (6.6), que incluem a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (simulada). A campanha experimental dos meses de Junho e de Julho, bem como a validação estão presentes nas Figuras (6.7) à (6.10), que incluem a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (experimental). Como as diferenças dos valores da temperatura superficial exterior entre as Tabelas (6.6) e (6.7) não são consideráveis, decidiu-se apenas registar os valores simulados para o coeficiente de transmissão calculado por $U_{(iii)}$.

21 a 27 de Fevereiro de 2014

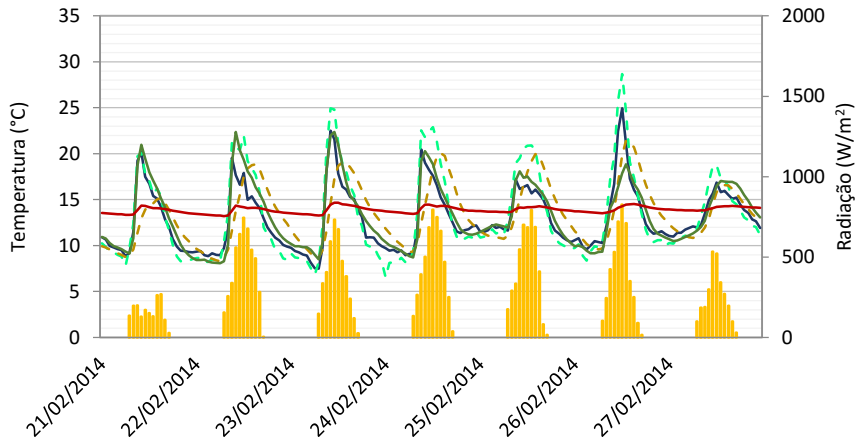


Figura 6.3 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Piso 2, Travessa do Patrocínio

3 a 10 de Março de 2014

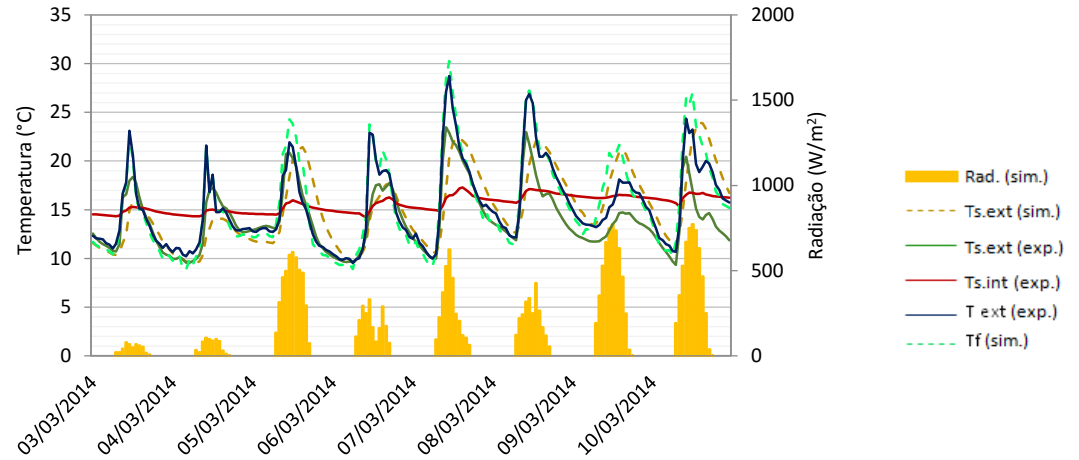


Figura 6.4 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Piso 2, Travessa do Patrocínio

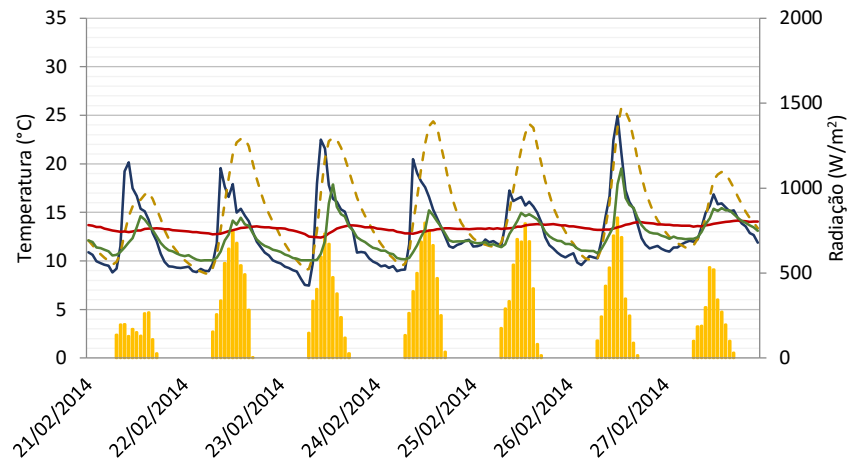


Figura 6.5 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Piso 0, Travessa do Patrocínio

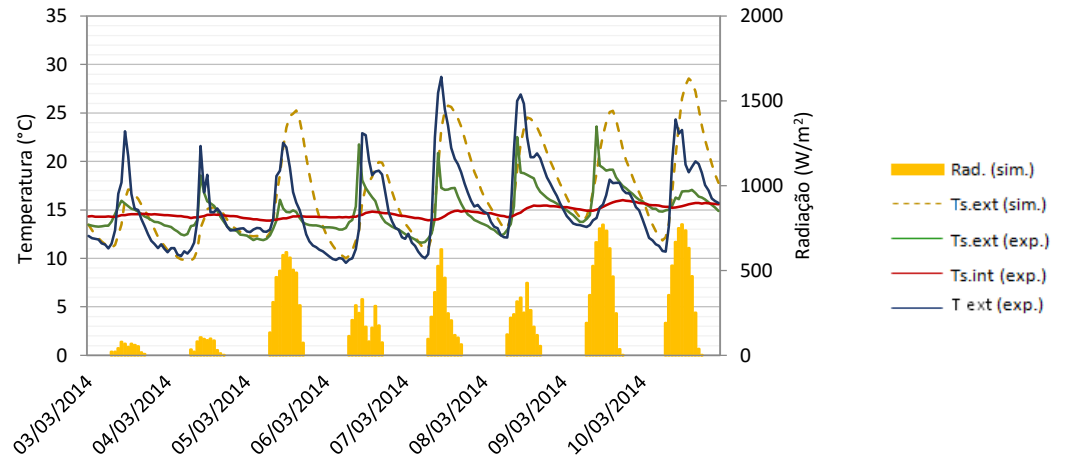


Figura 6.6 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Piso 0, Travessa do Patrocínio

17 a 24 de Junho de 2014

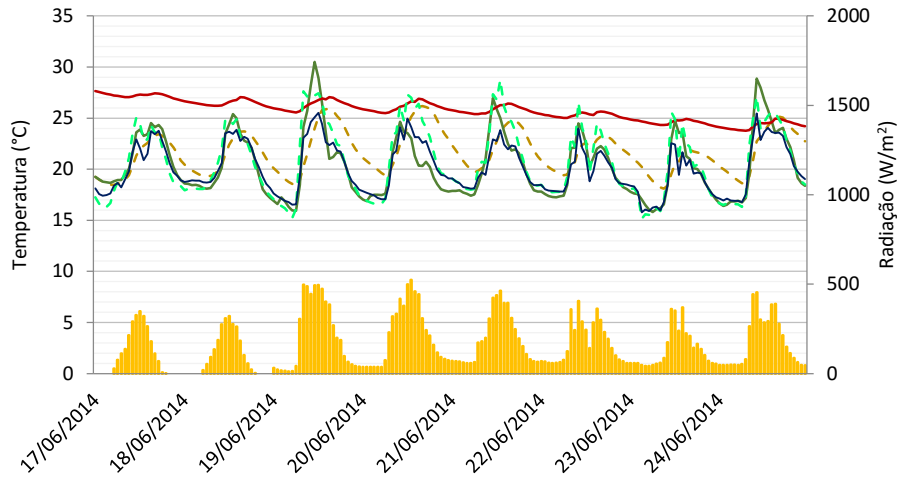


Figura 6.7 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Piso 2, Travessa do Patrocínio

3 a 7 de Julho de 2014

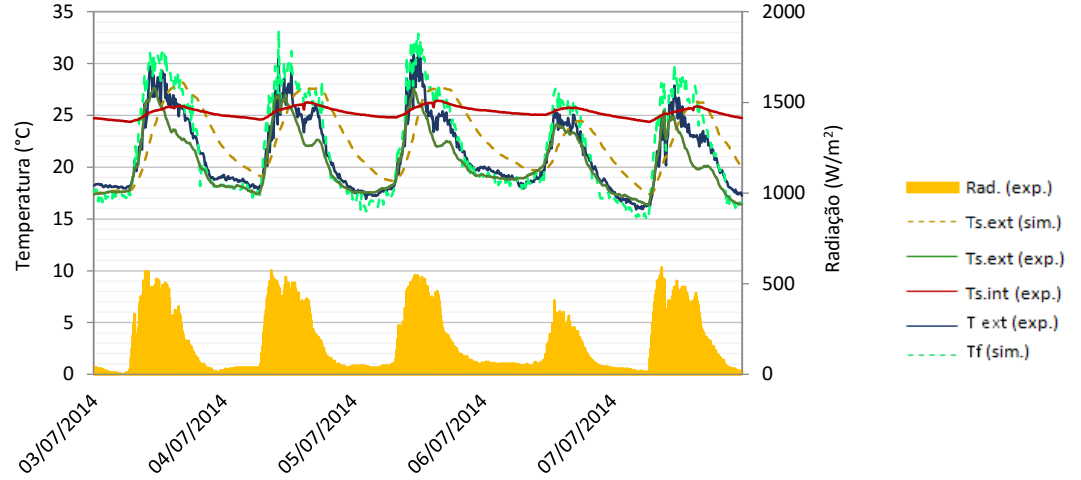


Figura 6.8- Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Piso 2, Travessa do Patrocínio

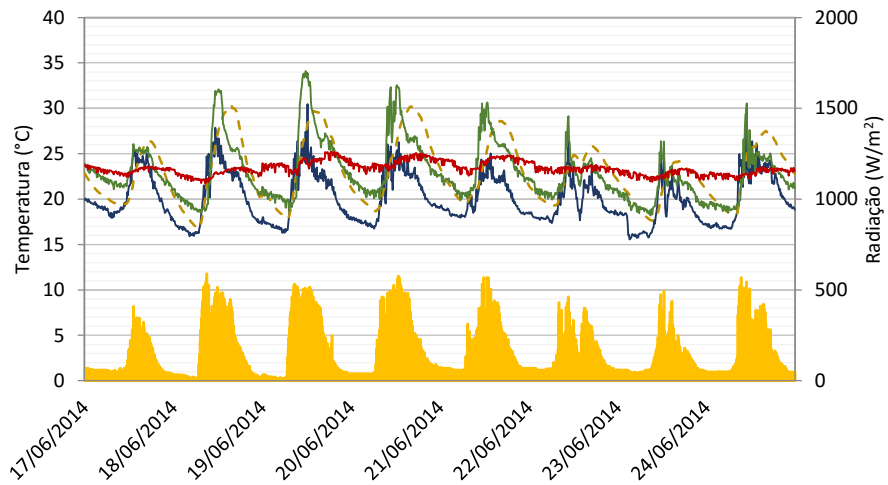


Figura 6.9 Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Piso 0, Travessa do Patrocínio

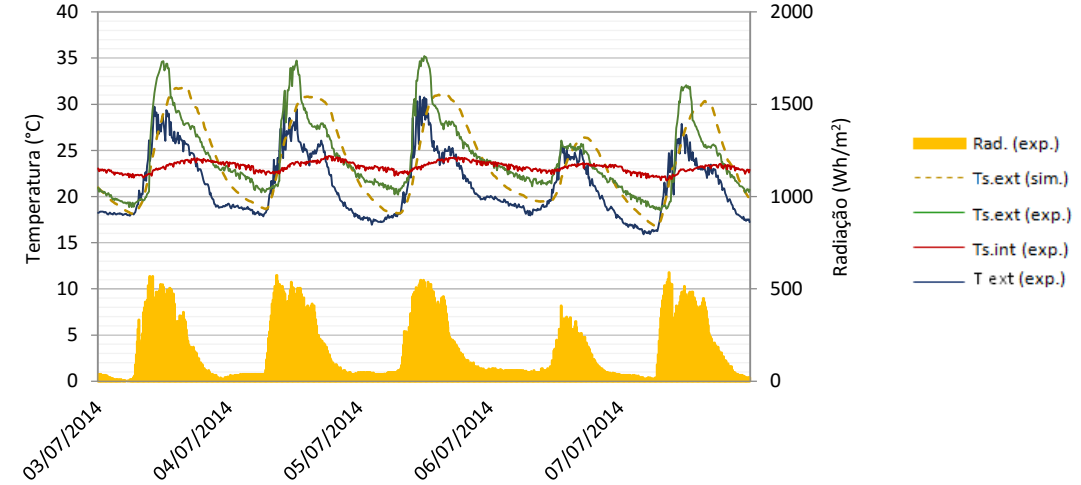


Figura 6.10- Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Piso 0, Travessa do Patrocínio

Nos meses de Fevereiro e de Março, verificou-se que as temperaturas superficiais exteriores simuladas foram superiores no Piso 0, enquanto as experimentais apresentaram maiores valores no Piso 2. A razão para tal, prende-se com a incerteza dos valores da simulação da radiação solar, visto não ter em conta o sombreamento da fachada. No Piso 0, o aumento da radiação proporcionou o aumento das temperaturas superficiais exteriores simuladas, o que não aconteceu para o Piso 2, dado que a maior parte da radiação solar é absorvida pela vegetação.

Nos meses de Junho e de Julho, constatou-se que tanto a temperatura superficial exterior simulada como a experimental foi superior no Piso 0, uma vez que, a ausência de vegetação na parede, proporciona um aumento da temperatura superficial exterior.

A diferença entre valores experimentais e simulados da temperatura da superfície exterior da fachada na campanha experimental de inverno registou o valor máximo de 6,24°C no dia 9 de Março para o Piso 2 e 11,31°C no dia 10 de Março para o Piso 0. Na campanha experimental de Verão apurou-se como valor máximo 4,56°C para o Piso 2 no dia 19 de Junho e 4,60°C para o Piso 0 no dia 19 de Junho.

Na Travessa do Patrocínio concluiu-se que nos meses de Fevereiro e de Março, as temperaturas superficiais exteriores da parede do escritório no Piso 0 (sem vegetação) foram menores que as da parede da sala de jantar no Piso 2 (com vegetação). Já nos meses de Junho e de Julho verificou-se o contrário. A variação de valores das temperaturas superficiais exteriores entre o Piso 0 e o Piso 2 situou-se no intervalo de 0,5°C a 8,1°C na campanha de inverno e no verão de 1,5°C a 8,4°C.

A temperatura superficial interior no mês de Fevereiro encontra-se praticamente idêntica nos dois pisos. No entanto, nos últimos dias do mês de Março, a temperatura regista valores superiores no Piso 2 pela sua maior exposição solar.

A temperatura superficial interior nos meses de Junho e Julho foi maior para o Piso 2, o que também se verificou no mês de Março. Assim, conclui-se que o aumento da temperatura do ar exterior e da radiação proporciona uma maior temperatura superficial interior. Também é preciso ter em conta que a temperatura superficial interior do Piso 2 encontra-se próxima da temperatura interior de conforto de edifícios (24°C).

Quanto à temperatura da folha, conclui-se que apresentou valores superiores à temperatura superficial exterior experimental, à temperatura superficial exterior simulada e à temperatura exterior do ar nas horas de calor (dia) e valores menores em relação a estas durante as horas de frio (noite) em ambas as campanhas experimentais. Apresenta como máxima diferença do ar exterior no dia 9 de Março com o valor de 3,64°C e no dia 21 de Junho com o valor de 4,36°C. Um dos fatores em análise foi a característica da planta, *LAI*, que aumentou para os meses de calor (1 para 1,8). Confirma-se assim, que quanto maior o seu valor, mais radiação a planta absorve, proporcionando uma diminuição da temperatura superficial exterior.

6.1.2. Modelo de Malys et al. (2014)

O primeiro aspeto a ser analisado centrou-se no fluxo de calor latente por se tratar de um parâmetro complexo ao depender da evapotranspiração (ETP) de Penman-Monteith. Comparou-se o fluxo de calor latente apresentado no modelo de Malys et al. (2014), Figura (6.11), com o do caso de estudo, Figura (6.12). Para tal, decidiu-se escolher um período experimental aleatório de forma a comprovar a correlação entres os fluxos de calor latente, pertencentes a meses e anos diferentes. Assim, o período experimental seleccionado ocorre entre 3 e 7 de Julho de 2015 enquanto o de Malys et al. (2014) acontece entre 14 a 21 de Maio de 2014.

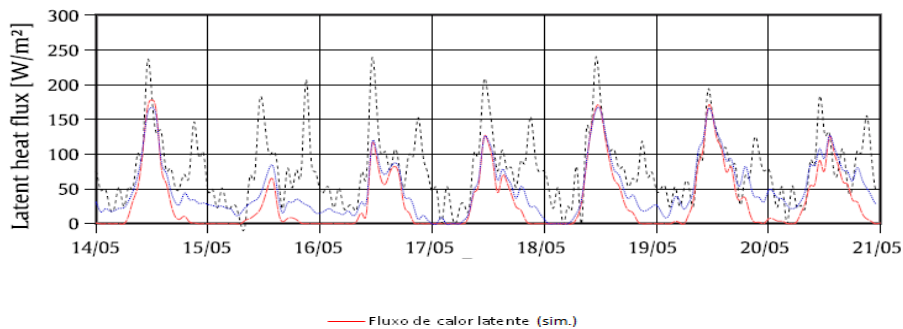


Figura 6.11 - Fluxo de calor latente para os dias 14 a 21 de Maio de 2013, Malys et al. (2014)

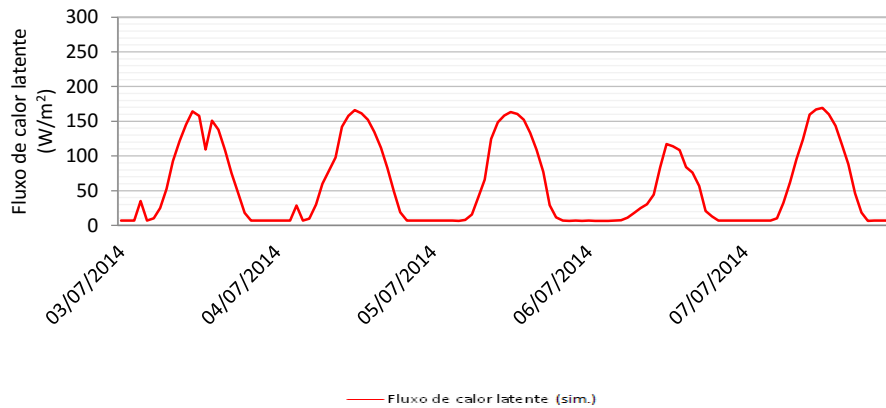


Figura 6.12 - Fluxo de calor latente calculado para os dias 5 a 10 de Julho de 2014

Da análise das Figuras (6.11) e (6.12) verifica-se que existe correlação entre os fluxos de calor latente do modelo de Malys et al. (2014) com o do presente estudo. Conclui-se então, que os valores da evapotranspiração se encontram bem estimados no cálculo do fluxo de calor latente. Regista-se que, o fluxo de calor latente não é apenas composto pela ETP (evapotranspiração) mas também pelo coeficiente de repartição do fluxo de calor latente (α_{lat}) e pela taxa de evapotranspiração (f), como mencionado no Capítulo (3). Nas campanhas experimentais não houve a monitorização da água envolvida, logo assumiu-se a repartição do fluxo de calor latente, entre a transpiração das plantas e a evaporação da água, com o valor de 0,5. A taxa de evapotranspiração foi assumida com o valor de 1, visto haver disponibilidade de água no substrato devido à rega.

No cálculo da ETP do Anexo (A.1) foi necessário converter o valor para W/m^2 através da Equação (4.11).

$$MJ/(m^2 \cdot dia) = 0,0864 W/m^2 \quad (4.11)$$

Os parâmetros da altura da medição da velocidade do vento (zm) e da altura da medição da humidade (zh) no cálculo da ETP foram admitidos por falta de dados experimentais e assumiram o valor da altura da planta, 0,1m, presentes na Tabela (6.8).

Tabela 6.8 - Parâmetros admitidos da resistência total aerodinâmica do Piso 2

Piso 2	
Zh (m)	0,1
Zm (m)	0,1

Na validação de Malys et al. (2014) também se admitiu parâmetros das características das plantas e dados gerais, que permanecem constantes durante as campanhas experimentais. Estes valores encontram-se presentes na Tabela (6.9).

Tabela 6.9 – Parâmetros da simulação do modelo de Malys et al. (2014)

Parâmetros da Fachada Verde						
Dados gerais	γ (1/°C)	0,000666	$\epsilon_{céu}$	1	α_r	0,5
	$F_{céu} = F_{chão}$	0,5	$\epsilon_{chão}$	0,7	σ	5,67E-08
	ρ_{ar} (kg/m ³)	1,29	$\rho_{água}$ (kg/m ³)	1000	α_{lat}	0,5
	$C_{p ar}$ J/(kg.°C)	1005	$C_{p água}$ J/(kg.°C)	4187		
Plantas	ϵ_{folha}	0,96	K	0,4	k	0,41
	α_{folha}	0,5	A_f	0,25		
	df (m)	0,00015	R_{aero} (s/m)	50		

Os parâmetros da Tabela (6.9) relativos à emissividade da folha (ϵ_{folha}), do chão ($\epsilon_{chão}$) e do céu ($\epsilon_{céu}$), bem como o fator $F_{céu} = F_{chão}$ e o coeficiente de atenuação da radiação (K), são idênticos aos utilizados no modelo de Susorova et al. (2013) devido à omissão dos valores no documento de Malys et al. (2014). Também os valores dos parâmetros LAI e o D_f no modelo de Malys et al. (2014) foram os mesmos do modelo de Susorova et al. (2013). Em relação à espessura da folha (df), considerou-se a dimensão de 0,00015m segundo o estudo de Mendes et al. (2010). Quanto ao coeficiente α_{lat} , registou o valor de 0,5. A resistência aerodinâmica da folha (R_{aero}) foi admitida consoante a resistência aerodinâmica do dossel da vegetação (r_a), presente no (A.1), visto que para valores maiores/menores das velocidades de vento existem resistências aerodinâmicas

menores/maiores. Para finalizar, as densidades e calor específicos do ar e da água foram retirados no sítio da internet Engineering Toolbox (N.A.).

Ao contrário do modelo de Susorova et al. (2013), decidiu-se apenas efetuar cálculos para o Piso 2 (com vegetação) e não para o Piso 0 (sem vegetação), uma vez que o modelo de Malys et al. (2014) requer parâmetros do substrato e da vegetação. No início da modelação (instante zero), admitiu-se que a temperatura da folha e a do ar entre as folhas seria a mesma da temperatura do ar exterior, enquanto a temperatura do substrato seria a mesma da temperatura superficial exterior da fachada.

No presente caso de estudo não foi considerada a presença do solo, dado que, se encontra apenas em pequenas bolsas utilizadas para suporte mecânico das plantas. Assim, utilizaram-se os mesmos valores do calor específico e da densidade dos componentes das paredes da validação do modelo de Susorova et al. (2013) presentes na Tabela (6.5). Em relação aos coeficientes de transmissão térmica do Piso 2, encontram-se presentes nas Tabelas (5.3) e (5.4), já os valores de LAI e da dimensão da planta encontram-se na tabela (6.4).

Nas Tabelas (6.10) e (6.11) encontram-se presentes os parâmetros $RMSE$ e r da temperatura superficial exterior para o Piso 2 da Travessa do Patrocínio segundo os coeficientes de transmissão térmica de $U_{(i)}$ e de $U_{(iii)}$ do Capítulo (5).

Tabela 6.10 – $RMSE$ e r para o Piso 2 a partir de $U_{(i)}$, Travessa do Patrocínio

	21 a 27 de Fevereiro		3 a 10 de Março		17 a 24 de Junho		3 a 7 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext\ Piso2} (°C)$	3,208	0,578	2,497	0,715	1,901	0,793	1,996	0,763

Tabela 6.11 - $RMSE$ e r para o Piso 2 a partir de $U_{(iii)}$, Travessa do Patrocínio

	21 a 27 de Fevereiro		3 a 10 de Março		17 a 24 de Junho		3 a 7 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext\ Piso2} (°C)$	2,897	0,640	2,414	0,731	1,751	0,830	1,904	0,794

Com base nos resultados referidos nas Tabelas (6.10) e (6.11) do Piso 2, permitiu-se chegar às seguintes conclusões:

1. $RMSE$ (Piso 2): apresenta valores próximos de 3°C para os meses de Fevereiro e Março, enquanto nos meses de Junho e Julho, o erro assume valores próximos de 2°C. Conclui-se que o modelo simula melhor para a campanha experimental dos meses mais quentes. Também se verifica que a diferença entre tabelas é praticamente inexistente.

2. r (Piso 2): regista valores superiores a 0,5 para todos os meses das campanhas experimentais. Confirma-se uma maior correlação entre valores experimentais e simulados nos meses mais quentes, com valores próximos de 0,8. Também se verifica que os valores de correlação de ambas as tabelas permanecem pouco inalterados.

A campanha experimental dos meses de Fevereiro e de Março, e respetiva validação encontra-se nas Figuras (6.13) e (6.14), que incluem a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (simulada). No que diz respeito à campanha experimental dos meses de Junho e Julho bem como a validação, encontram-se presentes nas Figuras (6.15) e (6.16) e incluem a temperatura da superfície exterior (experimental e simulada), a da superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da temperatura da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (experimental).

A temperatura do ar entre as folhas não foi colocada no conjunto de Figuras (6.13) à (6.16), uma vez que se verificaram valores praticamente idênticos à temperatura do ar exterior. Assim, de forma a não gerar confusão, decidiu-se omitir nas figuras. Também neste conjunto de figuras registaram-se apenas os valores simulados com o valor do coeficiente de transmissão térmica calculado por $U_{(iii)}$.

21 a 27 de Fevereiro de 2014

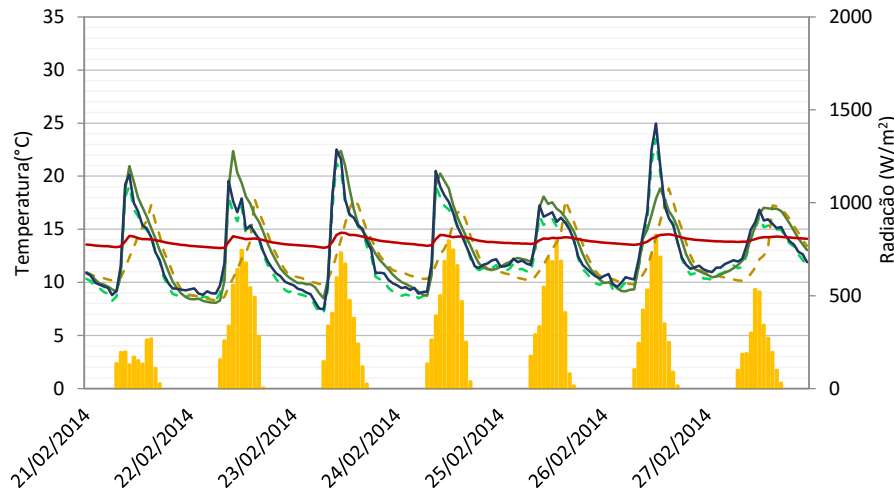


Figura 6.13 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Piso 2, Travessa do Patrocínio

3 a 10 de Março de 2014

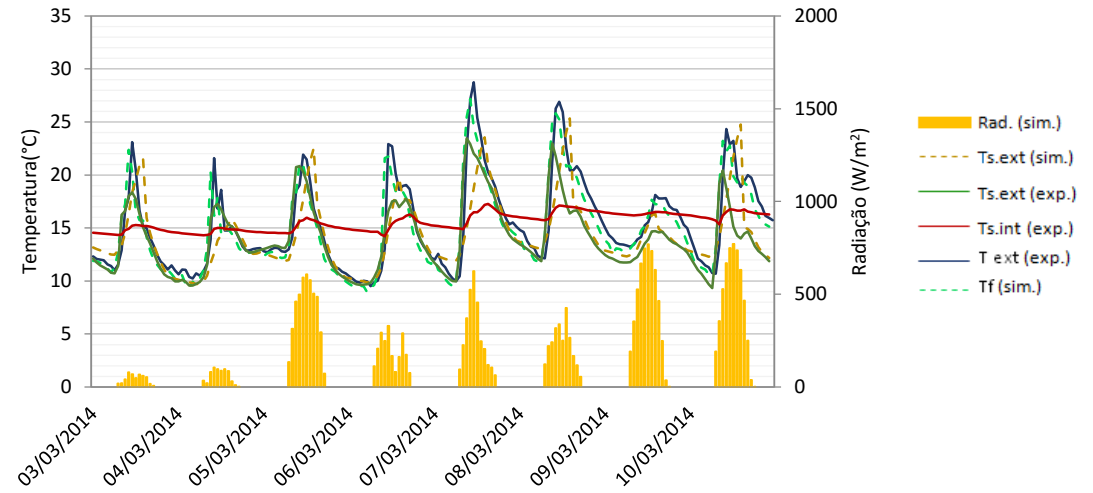


Figura 6.14 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Piso 2, Travessa do Patrocínio

17 a 24 de Junho de 2014

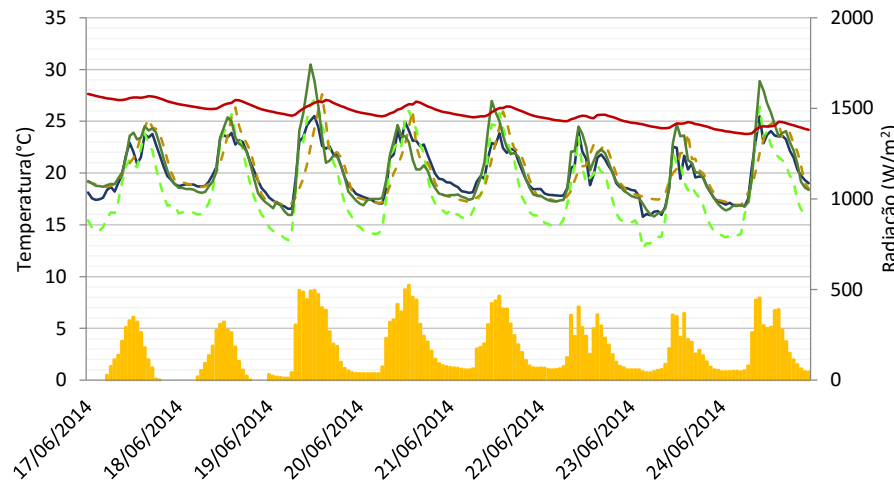


Figura 6.15 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Piso 2, Travessa do Patrocínio

3 a 7 de Julho de 2014

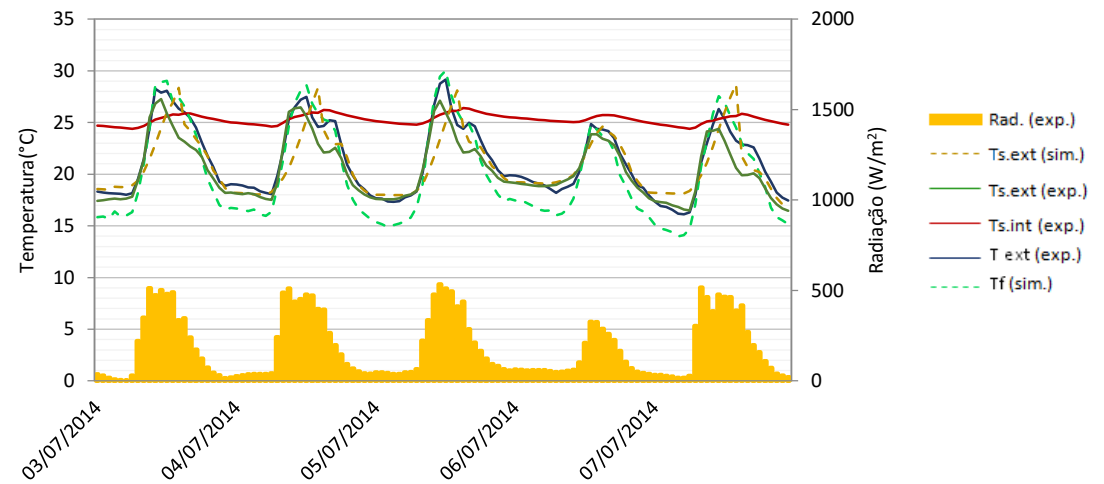


Figura 6.16 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Piso 2, Travessa do Patrocínio

Na análise das Figuras (6.13) à (6.16) verifica-se que o modelo apresenta um desfasamento entre os valores simulados e experimentais da temperatura superficial exterior. A razão para tal, prende-se com a fraca sensibilidade do modelo quanto ao aumento significativo da temperatura do ar exterior e da radiação solar incidente. Durante o período noturno, verifica-se que este desfasamento é praticamente inexistente, sendo idêntico em muitos dos dias das campanhas experimentais.

No mês de Fevereiro, verificou-se uma diminuição das temperaturas superficiais exteriores simuladas face às experimentais, contrariamente ao dia 27 em que as mesmas subiram. Quanto ao mês de Março, registou-se um aumento das temperaturas superficiais exteriores simuladas comparativamente às experimentais, exceto no dia 4 que apresentou resultados inferiores. A temperatura superficial interior encontra-se constante durante os meses de Fevereiro e de Março, próxima de 15°C.

No mês de Junho, os valores das temperaturas superficiais exteriores simuladas variam em relação às temperaturas superficiais exteriores experimentais. Nuns dias são superiores, noutros inferiores. Em relação ao mês de Julho, confirmou-se que as temperaturas superficiais exteriores simuladas são sempre superiores às experimentais. Na campanha experimental de Junho, as temperaturas superficiais interiores registaram no início do mês valores próximos de 27°C e no final do mês 25°C. Quanto ao mês de Julho, a temperatura superficial interior manteve-se constante e próxima dos 25°C.

A diferença entre valores experimentais e simulados da temperatura da superfície exterior da fachada na campanha experimental de inverno registou o valor máximo de 4,51°C ocorrido no dia 23 de Fevereiro para o Piso 2, enquanto na campanha experimental de verão apresentou como valor máximo 4,31°C detetado no dia 7 de Julho para o Piso 2.

Em relação à temperatura da folha concluiu-se que, no mês de Fevereiro apresentou valores inferiores à temperatura superficial exterior experimental durante o período noturno e diurno, enquanto no mês de Março a temperatura da folha foi superior nos períodos diurnos e inferior nos noturnos. Quanto à comparação entre a temperatura da folha e a temperatura superficial exterior simulada, constata-se que a da folha apresenta valores inferiores ou idênticos durante a noite e inferiores/superiores durante o dia. A variação de valores da temperatura da folha está intrinsecamente ligada à temperatura do ar exterior, dado que a sua correlação encontra-se evidente nas Figuras (6.13) e (6.14). Apresenta dados inferiores aos do ar exterior, tanto na noite como durante o dia.

Nos meses de Junho e de Julho durante o período noturno registaram-se menores valores da temperatura da folha face à temperatura do ar exterior, com a máxima diferença de 3,92°C verificada no dia 17 de Junho, enquanto no período diurno, a temperatura da folha foi a mesma do ar ou superior. Em relação às temperaturas superficiais exteriores experimentais e simuladas regista-se que durante a noite, são superiores à da folha. Na hora de maior calor dos dias de Junho, à exceção do dia 20, a folha regista menores temperaturas face à superficial exterior experimental. Já em comparação com a temperatura superficial exterior simulada, constata-se que é inferior, embora nos dias 22 e 24 aconteça o contrário. No mês de Julho, a temperatura da folha é superior à temperatura da superfície exterior experimental e simulada, embora no dia 7 se verifique apenas um aumento face à experimental. O

incremento do LAI, dos meses de Fevereiro e de Março para os meses de Junho e de Julho leva a que, o gradiente térmico da temperatura superficial exterior seja menor.

6.1.3. Comparação entre modelos

Apresenta-se nas Figuras (6.17) e (6.18) a comparação da temperatura superficial exterior da fachada para o Piso 2 entre os modelos de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014) com a temperatura medida experimentalmente por Prazeres (2015) segundo o coeficiente de transmissão térmica calculado em $U_{(iii)}$.

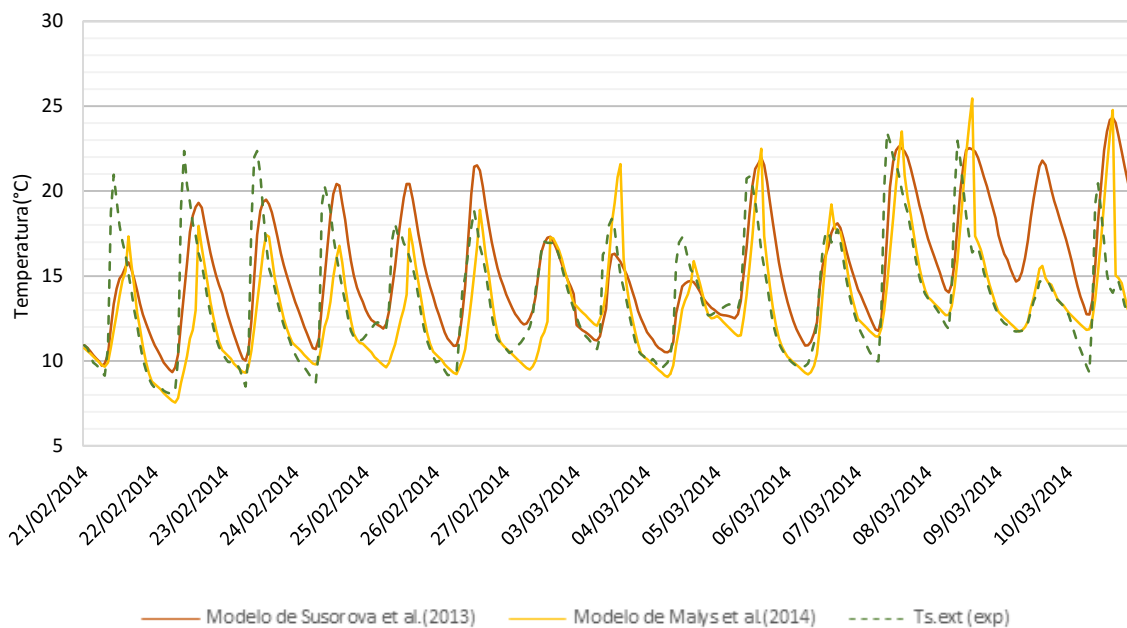


Figura 6.17 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, Piso 2, Fevereiro e Março, Travessa do Patrocínio

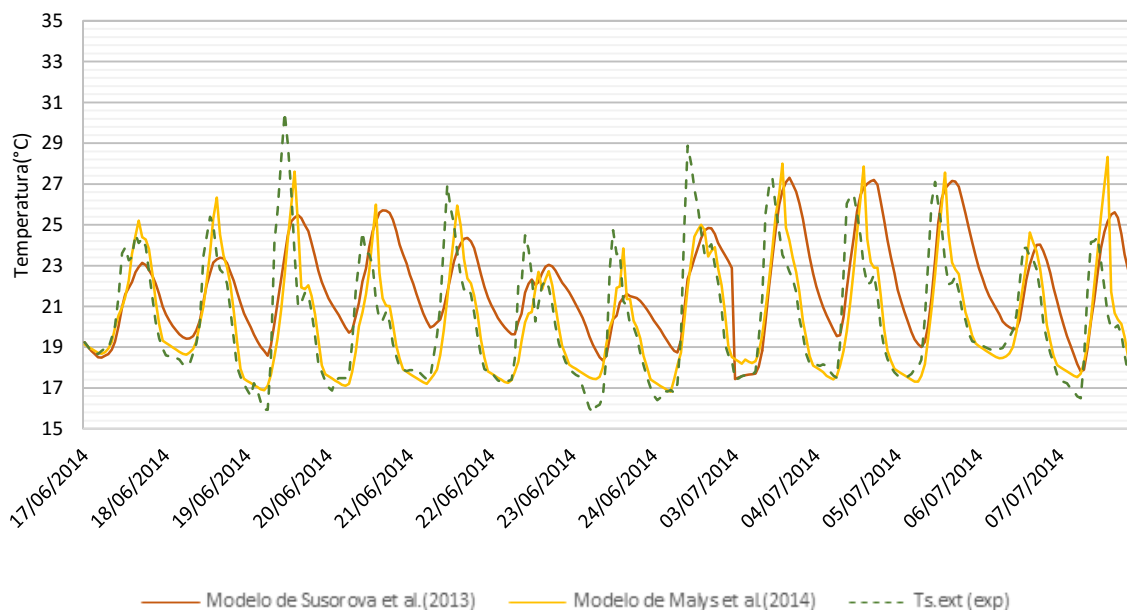


Figura 6.18 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, Piso 2, Junho e Julho, Travessa do Patrocínio

Da análise das Figuras (6.17) e (6.18) concluiu-se que a temperatura superficial exterior calculada através do modelo de Malys et al. (2014) aproximou-se melhor da experimental. A correlação dos dois modelos ficou quase perfeita no período horário entre a meia-noite (00:00) e o meio-dia (12:00), mas distanciou-se antes do pico máximo da temperatura. Repare-se que, após o pico máximo diário, a temperatura da superfície exterior através do modelo de Susorova et al. (2013) demora a arrefecer, não conseguindo chegar aos valores mínimos experimentais. A maior diferença entre os dois modelos apareceu no dia 9 de Março com o valor de 5,86 °C. Relembre-se que o modelo de Susorova et al. (2013) foi originalmente projetado para fachadas verdes do tipo DGF e não LW. A adaptação do modelo para o caso de estudo da Travessa do Patrocínio implicou a alteração da resistência térmica da parede, uma vez que, no documento de Susorova et al. (2013), a resistência térmica da parede com vegetação é idêntica à sem vegetação. Também apresenta apenas a temperatura superficial exterior como incógnita e assume os coeficientes de condutância térmica superficial por convecção da parede com e sem vegetação iguais.

6.2. Caso de estudo: Atlântico Blue Studio

Na campanha experimental dos meses de Fevereiro, de Março, de Junho e de Julho, foi possível quantificar os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar exterior, °C;
- Temperatura do ar interior do Hall de entrada do estúdio, °C;
- Temperatura da superfície exterior da parede da fachada e da cobertura verde, °C;
- Temperatura da superfície interior da parede da fachada e da cobertura verde, °C;
- Fluxos de calor na parede da fachada e da cobertura verde, W/m²;
- Radiação horizontal e vertical na cobertura e na fachada, W/m²;
- Humidade relativa, %.

À semelhança do caso de estudo da Travessa do Patrocínio, também no presente se recorreu a dados apurados na monitorização das campanhas experimentais e no METEO-IST. Os parâmetros do METEO-IST foram usados de forma a corrigir alguns dados da monitorização como a radiação incidente na fachada (vertical), a humidade relativa do ar exterior e a velocidade do vento. Alguns dos aparelhos como foi o caso do piranómetro (PH) próximo da posição nº2 da Figura (4.12), não tinha comprimento suficiente para a monitorização da radiação solar vertical e horizontal nos meses de Fevereiro e de Março. No entanto, nos meses de Junho e de Julho foi possível registar os dados experimentais da radiação solar, através de cabos com comprimentos maiores fornecidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Relativamente à humidade do ar exterior, o humidímetro em algumas horas seguidas registou valores máximos (100%) e mínimos (0%), sem valores intermédios. Para a velocidade do vento, não foi utilizado qualquer aparelho de medição no decorrer dos meses das campanhas experimentais. Assim, usaram-se os valores da simulação do EnergyPlus (2013) para a radiação solar vertical e os dados do METEO-IST para a radiação solar horizontal nos meses de

Fevereiro e de Março, bem como os dados do METEO-IST para a velocidade do vento e humidade relativa do ar exterior nos meses de Fevereiro, de Março, de Junho e de Julho. A distância do METEO-IST ao local do estudo é considerável (13,3Km), o que pode ter provocado um desvio significativo na validação do modelo. Também as condições do local eram diferentes, visto que a zona do edifício do Atlântico Blue Studio era mais resguardada.

6.2.1. Modelo de Susorova et al. (2013)

No Atlântico Blue Studio admitiu-se que no instante zero, a temperatura da superfície exterior seria igual à temperatura superficial exterior experimental e a temperatura da folha seria igual à do ar exterior. Também os *inputs* e *outputs* são os mesmos por se tratar do modelo de Susorova et al. (2013).

Os parâmetros da simulação do modelo presentes na Tabela (6.3) foram utilizados no caso de estudo do Atlântico Blue Studio, embora a emissividade do chão ($\epsilon_{\text{chão}}$) seja diferente. A razão para tal deve-se ao material do chão ser de madeira com o valor de 0,87. Relativamente à espessura da caixa-de-ar na cobertura, admitiu-se 0,3 m para efeitos de cálculo e para o coeficiente de transmissão térmica, simulou-se com os dados presentes na Tabela (5.7).

Nas campanhas experimentais de Inverno e de Verão verificou-se que o *LAI* e a dimensão da planta mantiveram-se constantes. No entanto, os seus valores variam consoante a zona de monitorização, Tabela (6.12). As duas zonas da fachada verde abrangem espécies de plantas diferentes, sendo que a posição nº4 apresenta maior *LAI* e maior dimensão da planta em relação à posição nº2 da Figura (4.12). As diferenças entre as plantas da fachada verde encontram-se nas Figuras (6.19) para o Inverno e (6.20) para o Verão. Já quanto à cobertura, verificou-se que o *LAI* e dimensão das plantas são os mesmos valores da zona 1 da fachada verde, Tabela (6.12).

Tabela 6.12 – Parâmetros alterados das plantas do modelo de Susorova et al. (2013)

		Parâmetros		
		LAI (m ² /m ²)	D _f (m)	τ
Zona 1	Inverno	1	0,1	0,67
	Verão	1	0,1	0,67
Zona 2	Inverno	1,8	0,2	0,49
	Verão	1,8	0,2	0,49
Cobertura	Inverno	1	0,1	0,67
	Verão	1	0,1	0,67



Figura 6.19 – Plantas na fachada verde, Inverno, Prazeres (2015)



Figura 6.20 – Plantas na fachada verde, Verão, Prazeres (2015)

Da análise das Figuras (6.19) e (6.20) verifica-se que o LAI é maior para a zona 2. Em relação ao Inverno e ao Verão, não se verifica o aumento da dimensão da planta nem do LAI nas zonas da fachada verde.

O calor específico e a densidade dos materiais do parâmetro do calor armazenado na parede e cobertura, presentes nas Equações (3.22) e (3.23), encontram-se na Tabela (6.13).

Tabela 6.13– Resistência térmica da parede (Zona 1 e Zona 2) e cobertura, Atlântico Blue Studio

	$C_{p,parede}$ J/(kg.°C)	ρ_{parede} kg/m ³
Zona 1	1032,7	1000,0
Zona 2	1032,7	1000,0
Cobertura	1010,1	603,4

No Atlântico Blue Studio assumiu-se também que a densidade das plantas presentes na cobertura e em ambas as zonas da fachada é desprezável. O calor específico das plantas, retirado da investigação de Casado et al. (2001), é o mesmo da Travessa do Patrocínio.

Nas Tabelas (6.14) e (6.15) estão presentes os parâmetros RMSE e r do modelo de Susorova et al. (2013) no Atlântico Blue Studio, introduzindo valores de U calculados por $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$ apresentados no Capítulo (5).

Tabela 6.14 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura a partir de $U_{(i)}$, Atlântico Blue Studio

	13 a 19 de Fevereiro		27 de Fevereiro a 13 de Março		18 de Junho a 2 de Julho		5 a 10 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext\ zona1}$ (°C)	2,282	0,795	3,531	0,762	1,993	0,857	2,160	0,864
$T_{s.ext\ Zona2}$ (°C)	2,367	0,805	3,271	0,759	2,475	0,579	2,834	0,828
$T_{s.ext\ Cobertura}$ (°C)	3,152	0,810	4,564	0,753	3,412	0,928	4,132	0,900

Tabela 6.15 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura, a partir de $U_{(iii)}$, Atlântico Blue Studio

	13 a 19 de Fevereiro		27 de Fevereiro a 13 de Março		18 de Junho a 2 de Julho		5 a 10 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext}$ Zona1 (°C)	2,310	0,834	3,569	0,823	2,424	0,930	1,803	0,918
$T_{s.ext}$ Zona2 (°C)	2,372	0,829	3,301	0,821	2,408	0,701	2,937	0,878
$T_{s.ext}$ Cobertura (°C)	2,813	0,863	4,178	0,820	2,931	0,906	4,217	0,932

Com base nos resultados constantes nas Tabelas (6.14) e (6.15) para a zona 1 e zona 2 da fachada verde, permitiram concluir:

1. *RMSE* (zona 1 e 2): apresenta valores $<3^{\circ}\text{C}$ para os meses de Fevereiro, de Junho e de Julho, embora para o mês de Março sejam próximos de 4°C . Em geral a temperatura da superfície exterior simulada da zona 1 regista menor erro que na zona 2 da fachada verde. Conclui-se que a utilização de coeficientes de transmissão térmica diferentes não afeta significativamente a proximidade da temperatura da superfície exterior simulada do valor experimental.
2. *r* (zona 1 e 2): regista valores $> 0,8$ na maior parte dos meses das campanhas experimentais, embora no mês de Junho as correlações sejam próximas de 0,6. Concluiu-se que existe menor correlação entre valores experimentais e simulados quando utilizado o coeficiente de transmissão térmica estimado por $U_{(i)}$.

Da leitura dos resultados constantes nas Tabelas (6.14) e (6.15) para a cobertura chegou-se às seguintes conclusões:

1. *RMSE* (cobertura): exhibe valores superiores aos da fachada verde. Nos meses de Fevereiro e de Junho são próximos de 3°C , e nos meses de Março e de Julho encontram-se $> 4^{\circ}\text{C}$. Constata-se que a máxima diferença entre as tabelas situa-se nos dias de 18 de Junho a 2 de Julho, com o valor circunjacente a 0,5.
2. *r* (cobertura): verifica-se que existe maior correlação nos meses de Junho e de Julho, por apresentarem $r > 0,9$. Nos restantes meses, Fevereiro e Março, situa-se perto de 0,8.

A campanha experimental dos meses de Fevereiro e de Março, bem como a validação das zonas 1 e 2 da fachada verde apresentam-se nas Figuras (6.21) à (6.24), a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (simulada). Os meses de Junho e de Julho, e respetiva validação das zonas 1 e 2 da fachada verde encontram-se presentes nas Figuras (6.25) à (6.28), as quais incluem a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (experimental). Quanto à cobertura, as campanhas experimentais e validação exibem-se nas Figuras (6.29) à (6.32), as quais incluem a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (experimental). Como no caso de estudo da Travessa do Patrocínio, decidiu-se apenas registar os valores simulados com recurso ao coeficiente de transmissão térmica de $U_{(iii)}$.

. 13 a 19 de Fevereiro de 2014

27 de Fevereiro a 13 de Março de 2014

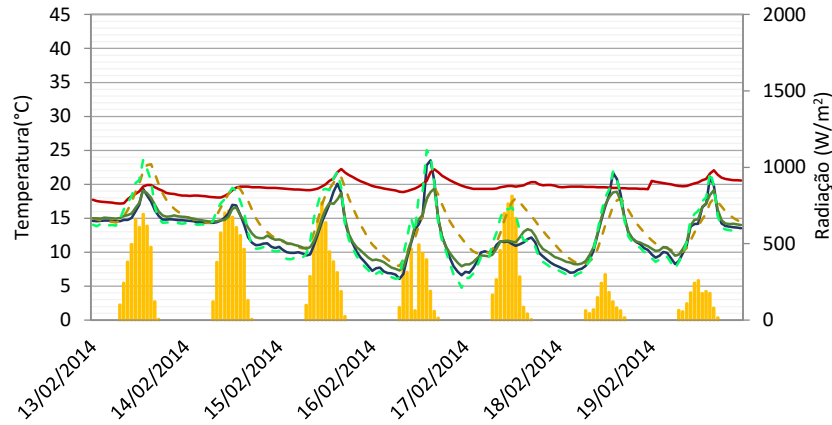


Figura 6.21 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, zona 1, Atlântico Blue Studio

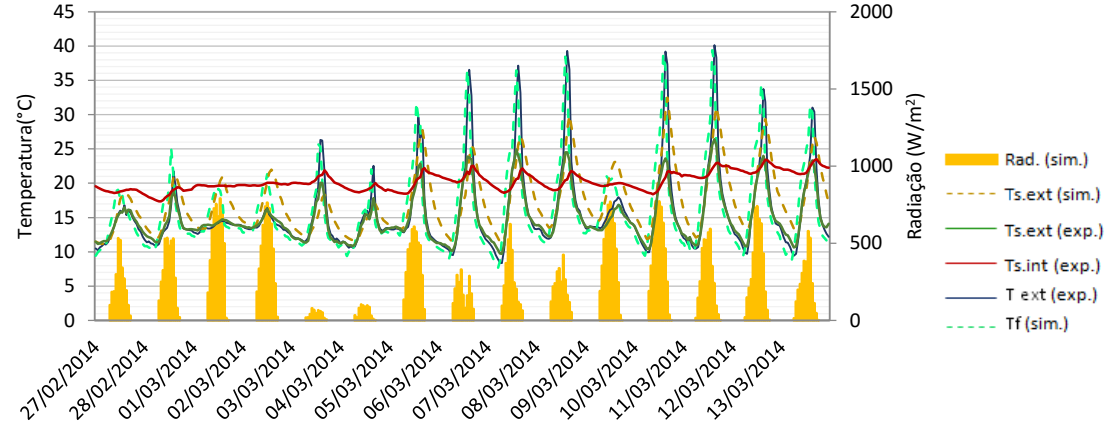


Figura 6.22 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, zona 1, Atlântico Blue Studio

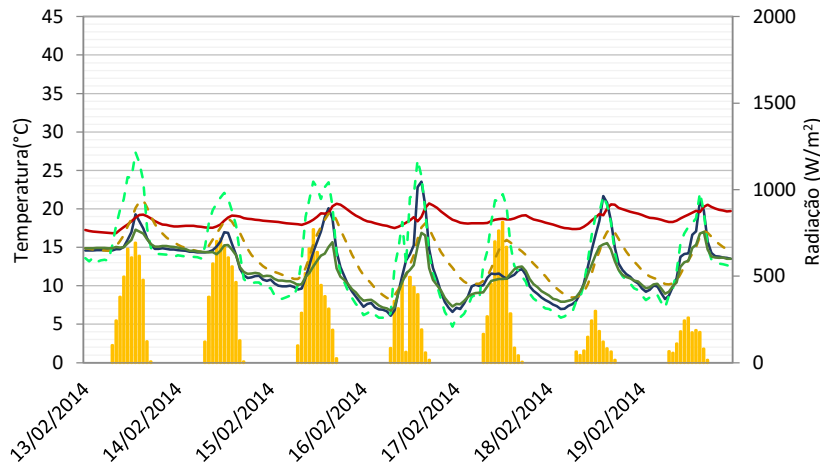


Figura 6.23 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, zona 2, Atlântico Blue Studio

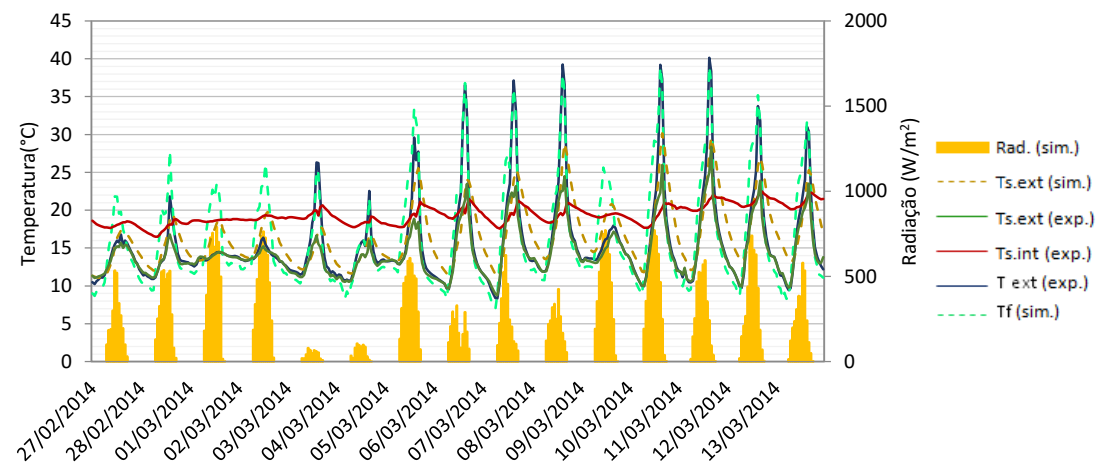


Figura 6.24 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, zona 2, Atlântico Blue Studio

18 de Junho a 2 de Julho de 2014

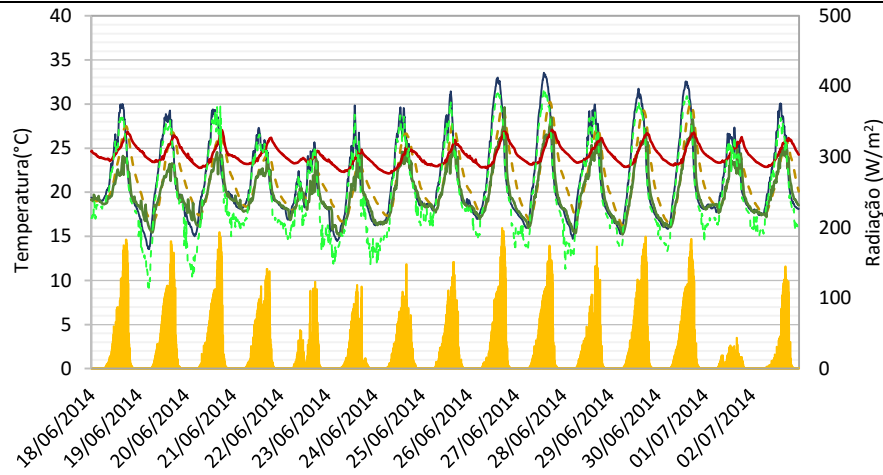


Figura 6.25 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, zona 1, Atlântico Blue Studio

5 a 10 de Julho de 2014

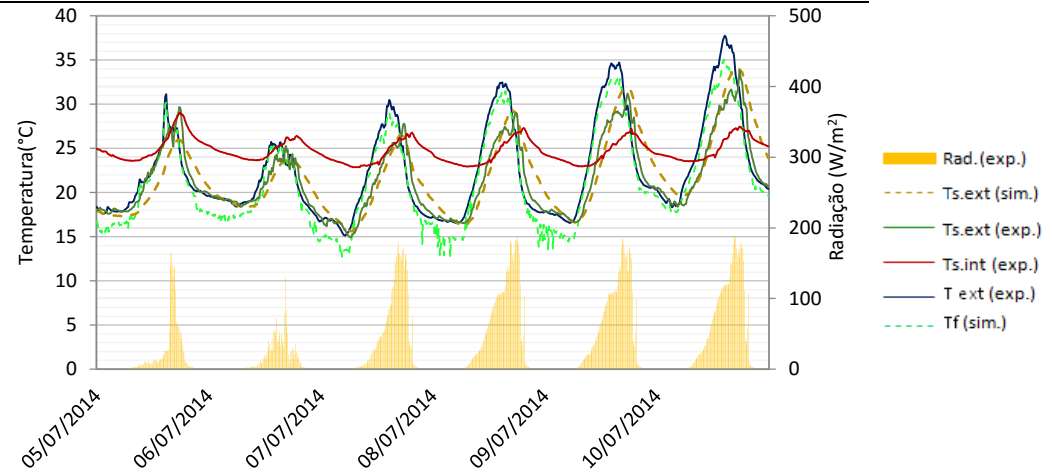


Figura 6.26 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, zona 1, Atlântico Blue Studio

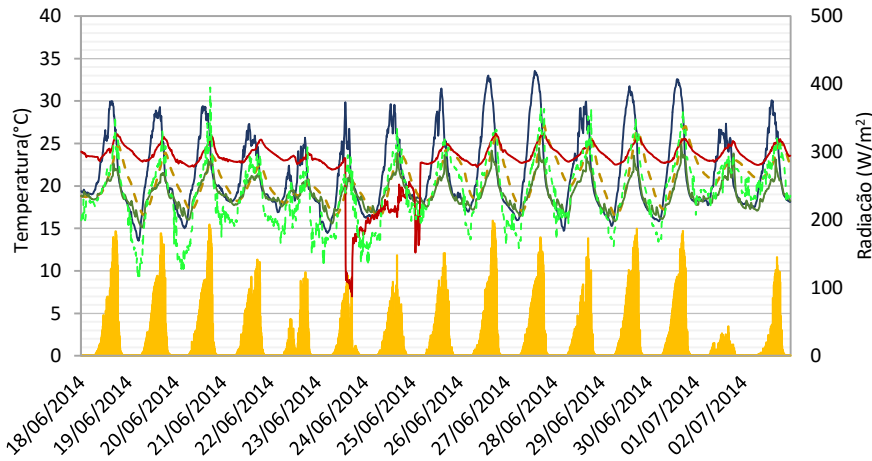


Figura 6.27 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, zona 2, Atlântico Blue Studio

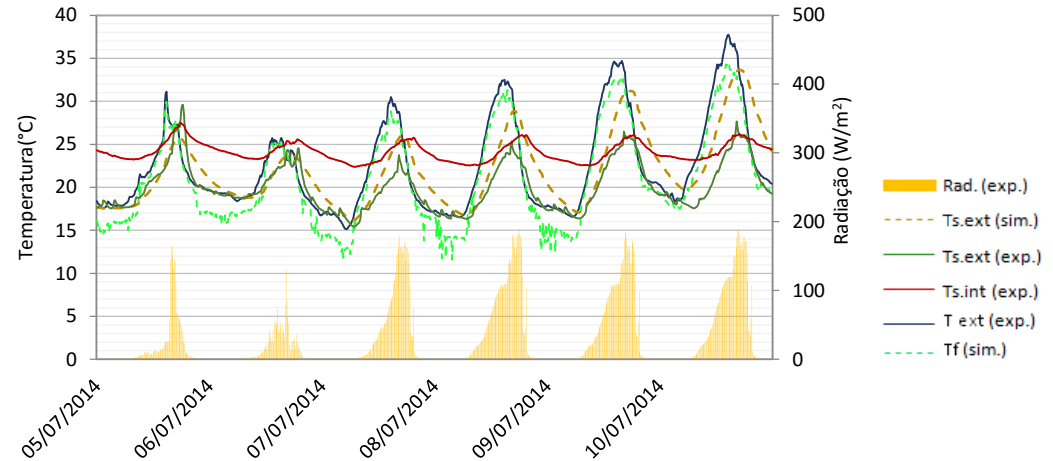


Figura 6.28 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, zona 2, Atlântico Blue Studio

13 a 19 de Fevereiro de 2014

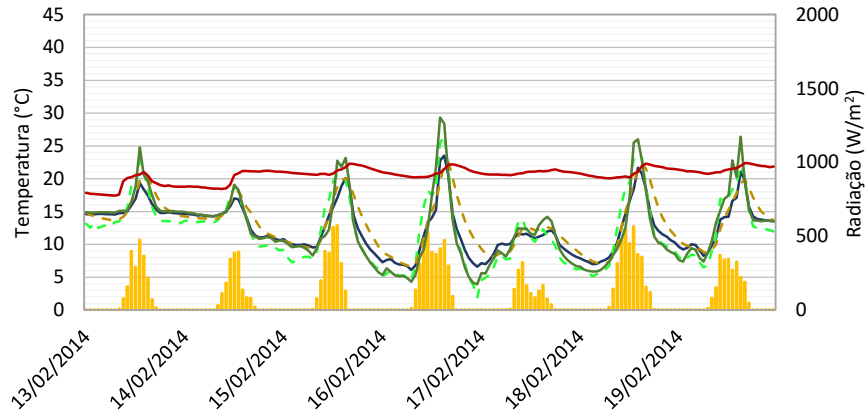


Figura 6.29 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, Cobertura, Atlântico Blue Studio

27 de Fevereiro a 13 de Março de 2014

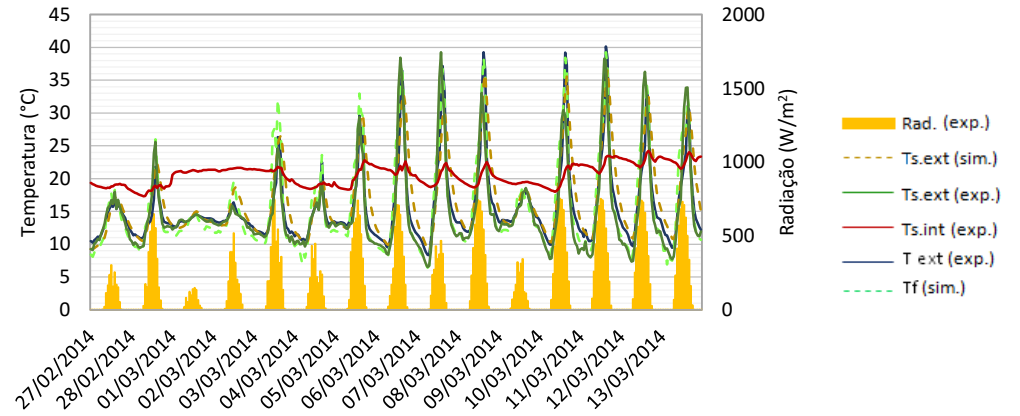


Figura 6.30 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, Cobertura, Atlântico Blue Studio

18 de Junho a 2 de Julho de 2014

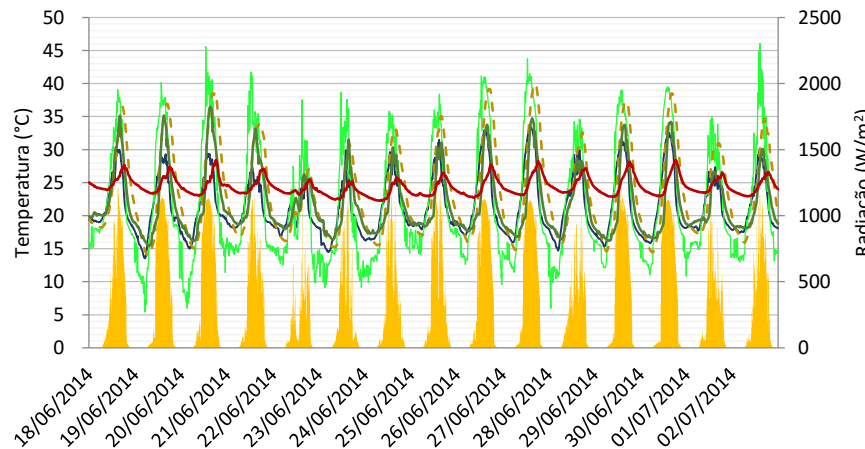


Figura 6.31 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, Cobertura, Atlântico Blue Studio

5 a 10 de Julho de 2014

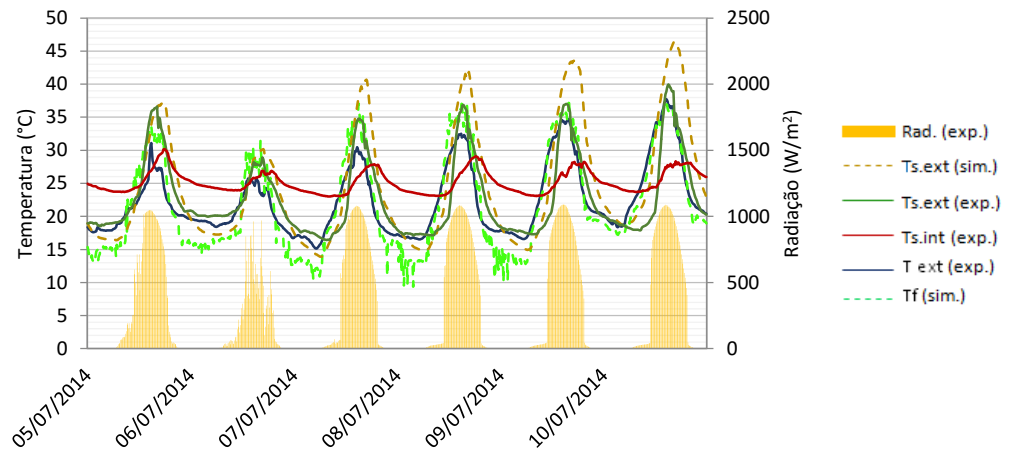


Figura 6.32 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, Cobertura, Atlântico Blue Studio

Para a fachada verde, nos meses de Fevereiro e de Março, verificou-se que as temperaturas superficiais exteriores simuladas e experimentais foram superiores na zona 1, embora nos dias 9 a 13 de Março as simuladas registaram valores superiores na zona 2. Nos meses de Junho e Julho, também a zona 1 registou maiores temperaturas superficiais exteriores simuladas e experimentais que a zona 2. A causa para tal prende-se com o facto da planta na zona 1 ter menor *LA* e menor dimensão, não proporcionando um decréscimo da temperatura superficial exterior como na zona 2.

Para a cobertura verde, nos meses de Fevereiro e de Março, constatou-se que as temperaturas superficiais exteriores experimentais são superiores às da fachada, no entanto as superficiais exteriores simuladas são superiores quando a temperatura do ar exterior é $> 30^{\circ}\text{C}$ ou próxima deste. No tocante aos meses de Junho e de Julho, como seria expectável, apresentam maior temperatura superficial exterior simulada e experimental do que a fachada verde, pois sobre a cobertura mais exposta à radiação solar.

A diferença entre valores experimentais e simulados da temperatura da superfície exterior da fachada na campanha experimental de inverno registou o valor máximo de $6,23^{\circ}\text{C}$ no dia 1 de Março para a zona 1, $4,52^{\circ}\text{C}$ no dia 2 de Março para a zona 2 e $7,54^{\circ}\text{C}$ para a cobertura no dia 16 de Fevereiro. Na campanha experimental de verão apurou-se o valor máximo de $3,48^{\circ}\text{C}$ no dia 19 de Junho para a zona 1, $6,02^{\circ}\text{C}$ no dia 27 de Junho para a zona 2 e $5,19^{\circ}\text{C}$ para a cobertura no dia 9 de Julho.

A temperatura superficial interior nos meses de Fevereiro e de Março situou-se entre os 17°C e os 22°C , enquanto nos meses de Junho e de Julho, a temperatura oscilou entre os 22°C e os 27°C . Apurou-se que quanto maior a temperatura do ar exterior durante o período das 12:00 às 14:00, mais a temperatura superficial interior aumenta. Na Figura (6.27), durante o dia 23 de Junho ocorreu uma descida acentuada da temperatura superficial interior da fachada (experimental), originada por uma falha do equipamento de medição.

Na campanha de inverno, durante o período diurno a temperatura da folha na zona 2 é superior à da zona 1. Já no período noturno, as diferenças entre ambas não são significativas. Também se constatou que a temperatura do ar exterior é menor ou igual à temperatura da folha na maior parte dos dias. Na cobertura, a temperatura da folha registou valores próximos da temperatura do ar exterior, que são inferiores aos apresentados na fachada verde.

Na campanha de verão, durante o período diurno, a temperatura da folha na zona 1 para o mês de Junho é maior que a da zona 2, enquanto no período noturno são semelhantes. No mês de Julho, permaneceram idênticas tanto para o dia como para a noite. Quanto à temperatura do ar exterior verificou-se que é superior à temperatura da folha, apresentando como máxima diferença o valor de $3,82^{\circ}\text{C}$ para a zona 1 e $4,96^{\circ}\text{C}$ para a zona 2 no dia 19 de Junho. Na cobertura durante o mês de Junho, a temperatura da folha exibiu valores superiores à do ar exterior, da superfície

exterior simulada e da experimental. Este resultado era esperado mas não com a dimensão exposta na figura (6.31). No mês de Julho, os dados da temperatura da folha aproximaram-se da temperatura da superfície exterior experimental, mas abaixo da simulada, ver figura (6.32). Em suma, os valores da temperatura da folha são, na maioria das vezes, superiores aos da temperatura da superfície exterior da fachada, porque as plantas absorvem a maior parte da radiação solar.

6.2.2. Modelo de Malys et al. (2014)

No caso de estudo do Atlântico Blue Studio assumiu-se que no instante zero, a temperatura da superfície exterior seria igual à temperatura superficial exterior experimental, e que a temperatura da folha e do ar entre eles seria igual à temperatura do ar exterior. Também foram considerados os mesmos *inputs* e *outputs* descritos no capítulo (3).

Na validação do modelo de Malys et al. (2014) aplicaram-se os parâmetros apresentados na Tabela (6.9) do caso de estudo da Travessa do Patrocínio. No cálculo da ETP, admitiu-se que os parâmetros da medição da velocidade do vento (z_m), bem como da altura da medição da humidade (z_h) correspondem ao valor da altura da vegetação *in situ*, presentes na Tabela (6.16).

Tabela 6.16 – Parâmetros admitidos da resistência total aerodinâmica, zona 1 e zona 2, Atlântico Blue Studio

	Zona 1	Zona 2
Zh (m)	0,1	0,2
Zm (m)	0,1	0,2

As características do *LAI* e da dimensão da planta, utilizados no modelo de Malys et al. (2014) encontram-se na Tabela (6.12) do modelo de Susorova et al. (2013). Quanto aos parâmetros do calor específico e da massa volúmica dos materiais da parede, bem como da cobertura estão indicados na Tabela (6.13).

Nas Tabelas (6.17) e (6.18) encontram-se referidos os parâmetros RMSE e r do modelo de Malys et al. (2013) para o Atlântico Blue Studio, introduzindo os valores do coeficiente de transmissão térmica de $U_{(i)}$ e $U_{(iii)}$ apresentados no capítulo (5).

Tabela 6.17 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura, com o valor de $U_{(i)}$, Atlântico Blue Studio

	13 a 19 de Fevereiro		27 de Fevereiro a 13 de Março		18 de Junho a 2 de Julho		5 a 10 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext\ Zona1}$ (°C)	1,168	0,932	1,355	0,941	1,722	0,921	1,728	0,966
$T_{s.ext\ Zona2}$ (°C)	0,930	0,944	1,515	0,908	1,462	0,821	1,583	0,920
$T_{s.ext\ Cobertura}$ (°C)	2,996	0,869	2,651	0,931	2,561	0,890	3,151	0,889

Tabela 6.18 - RMSE e r para a zona 1 e 2 da fachada e cobertura com o valor de $U_{(iii)}$, Atlântico Blue Studio

	13 a 19 de Fevereiro		27 de Fevereiro a 13 de Março		18 de Junho a 2 de Julho		5 a 10 de Julho	
	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)	RMSE	Corre. (0-1)
$T_{s.ext\ Zona1}$ (°C)	1,070	0,948	1,440	0,947	1,887	0,907	1,867	0,961
$T_{s.ext\ Zona2}$ (°C)	1,030	0,950	1,640	0,911	1,621	0,787	1,764	0,906
$T_{s.ext\ Cobertura}$ (°C)	2,757	0,875	2,666	0,925	2,483	0,898	2,981	0,900

Com base nos resultados mencionados nas Tabelas (6.17) e (6.18) para a zona 1 e zona 2 da fachada verde, apurou-se o seguinte:

1. *RMSE* (zona 1 e 2): apresenta valores < 2°C para os meses das campanhas experimentais, sendo que no mês de Fevereiro o erro encontra-se próximo de 1°C. Verifica-se que a zona 1 tem maior erro que a zona 2, embora tal não se verifique no mês de Março.
2. *r* (zona 1 e 2): regista valores > 0,9 para a zona 1 e zona 2, embora, entre os dias 18 de Junho e 2 de Julho, a correlação dos valores experimentais e simulados na zona 2 fosse próxima de 0,8.

A partir dos resultados inscritos nas Tabelas (6.17) e (6.18) para a cobertura, concluiu-se o seguinte:

1. *RMSE* (cobertura): exhibe valores < 3°C para todos os meses, embora nos dias 18 de Junho a 2 de Julho do cálculo de $U_{(i)}$ se tenha registado o valor > 3°C. Constata-se que o erro da temperatura superficial exterior é maior na cobertura, sendo mais do que o dobro do verificado no mês de Fevereiro.
2. *r* (cobertura): mostra uma correlação próxima de 0,9 para todos os meses das campanhas experimentais.

Nas Figuras (6.33) à (6.36) exibem-se a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (simulada) para os meses Fevereiro e de Março, bem como a validação das zonas 1 e 2 da fachada verde. Já na campanha experimental dos meses de Junho e de Julho, e respetiva validação das zonas 1 e 2 da fachada verde encontram-se presentes nas Figuras (6.37) à (6.40), a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (experimental). Quanto à cobertura, as campanhas experimentais e validação encontram-se nas Figuras (6.41) à (6.44), as quais incluem a temperatura superficial exterior (experimental e simulada), a superficial interior (experimental), a do ar exterior (experimental), a da folha (simulada) e a da radiação solar incidente (experimental).

No Atlântico Blue Studio também não foram incluídas as temperaturas do ar entre as folhas e registaram-se apenas os valores simulados com o valor de $U_{(iii)}$ nas Figuras (6.33) à (6.40).

13 a 19 de Fevereiro de 2014

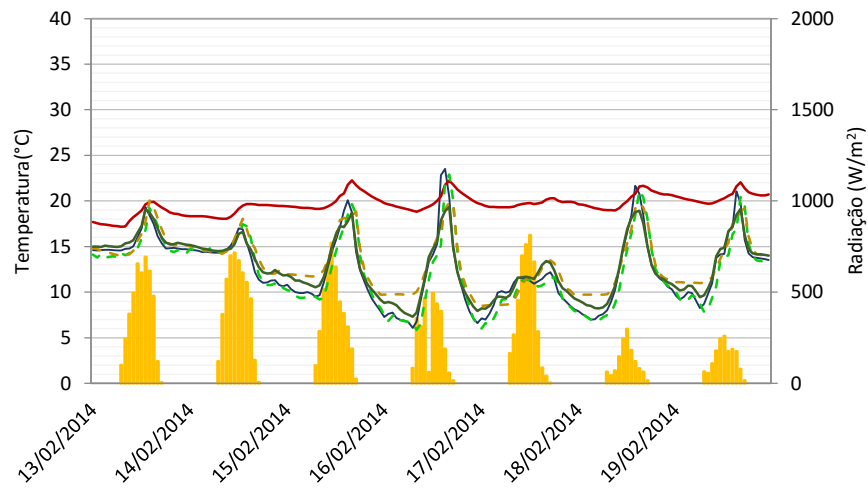


Figura 6.33 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Fevereiro, zona 1, Atlântico Blue Studio

27 de Fevereiro a 13 de Março de 2014

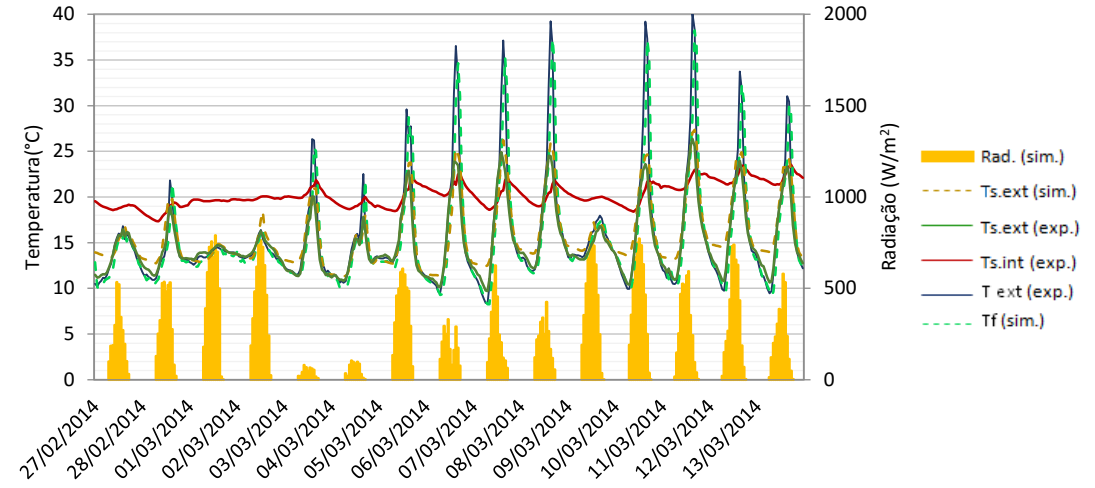


Figura 6.34 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Março, zona 1, Atlântico Blue Studio

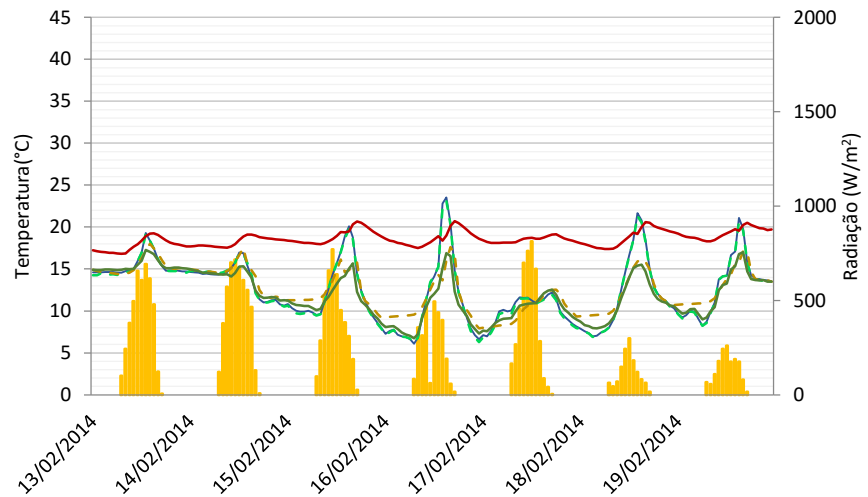


Figura 6.35 – Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Fevereiro, zona 2, Atlântico Blue Studio

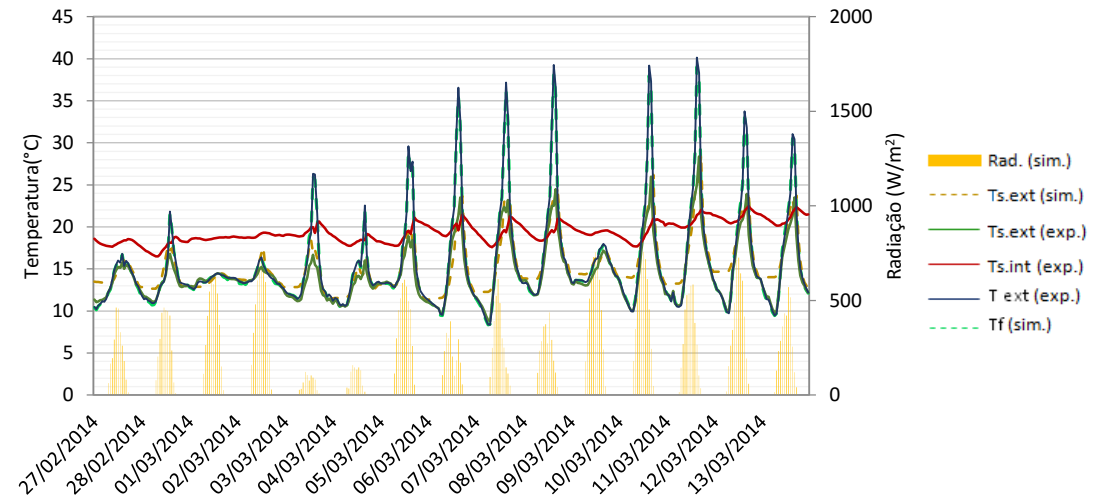


Figura 6.36 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Março, zona 2, Atlântico Blue Studio

18 de Junho a 2 de Julho de 2014

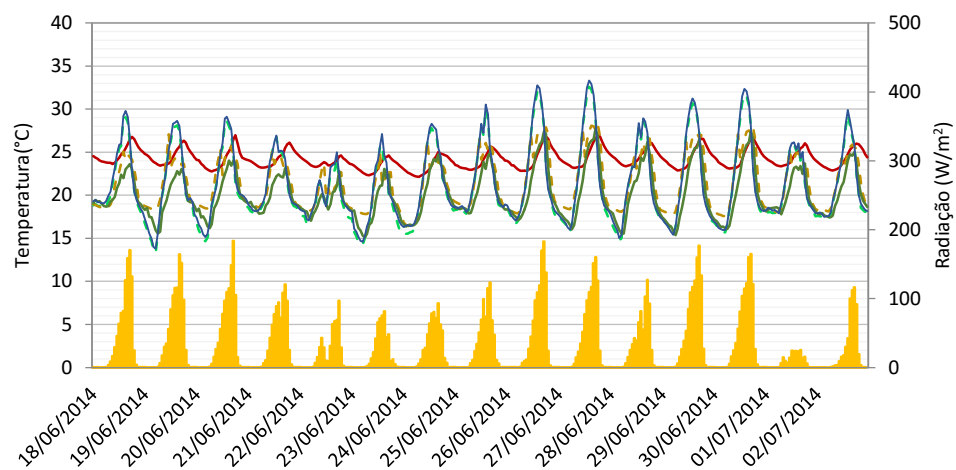


Figura 6.37 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Junho, zona 1, Atlântico Blue Studio

5 a 10 de Julho de 2014

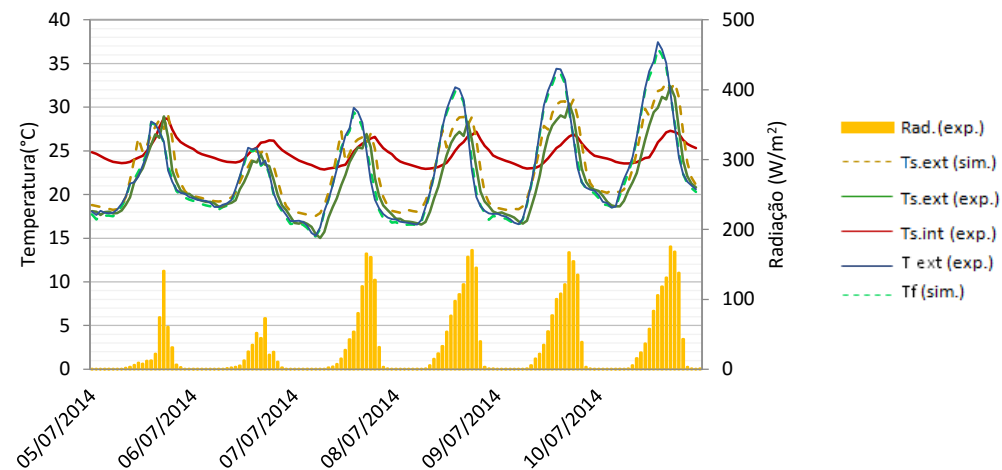


Figura 6.38 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Prazeres (2015), Julho, zona 1, Atlântico Blue Studio

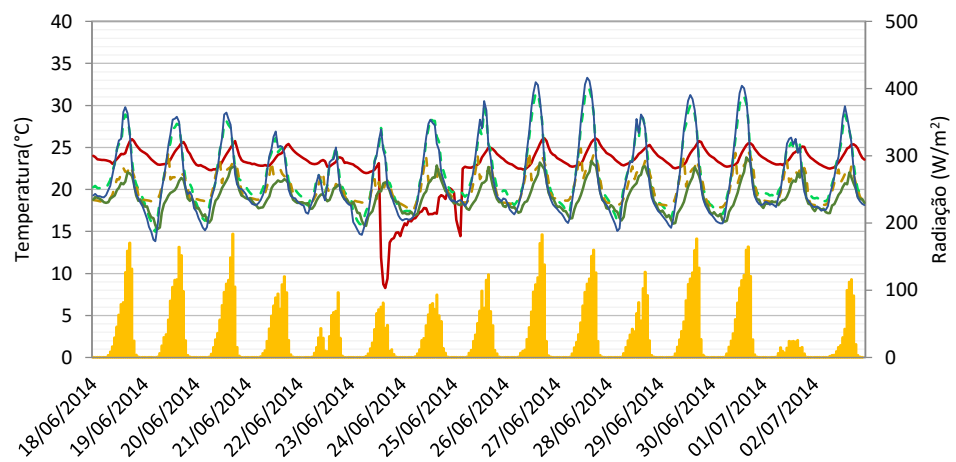


Figura 6.39 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Junho, zona 2, Atlântico Blue Studio

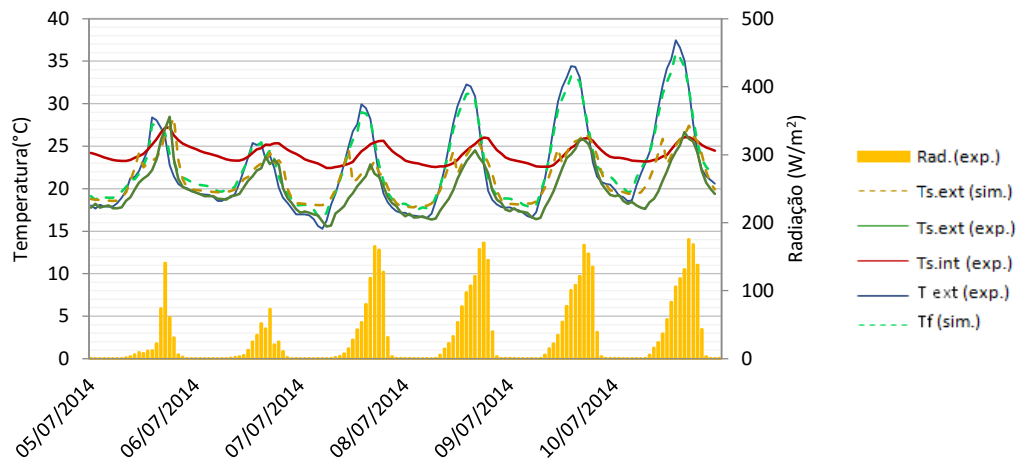


Figura 6.40 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015), Julho, zona 2, Atlântico Blue Studio

13 a 19 de Fevereiro de 2014

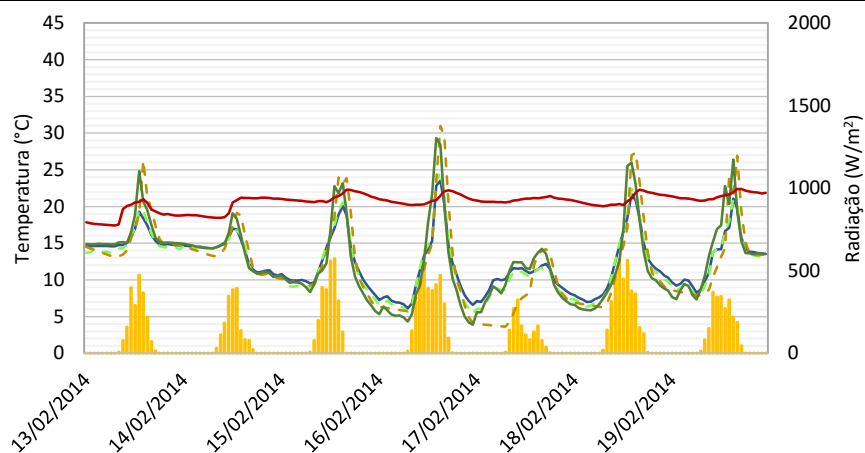


Figura 6.41 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Fevereiro, Cobertura, Atlântico Blue Studio

27 de Fevereiro a 13 de Março de 2014

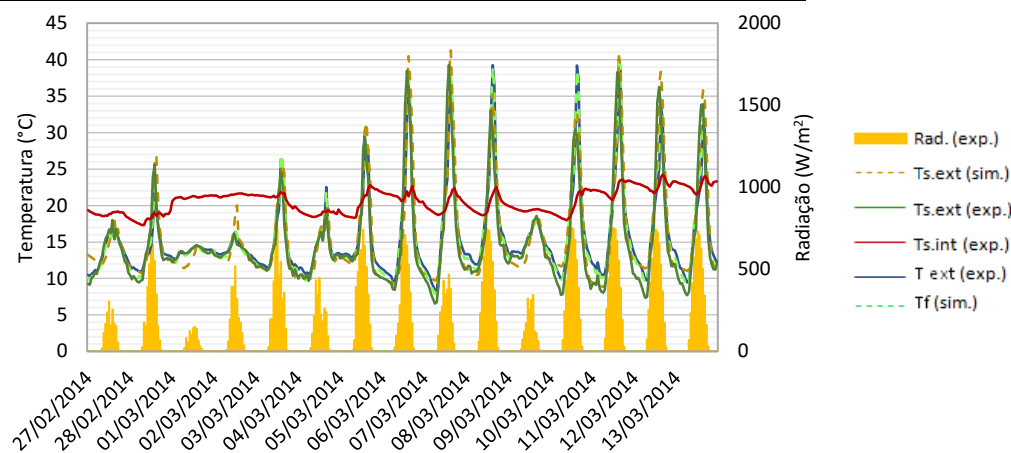


Figura 6.42 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Março, Cobertura, Atlântico Blue Studio

18 de Junho a 2 de Julho de 2014

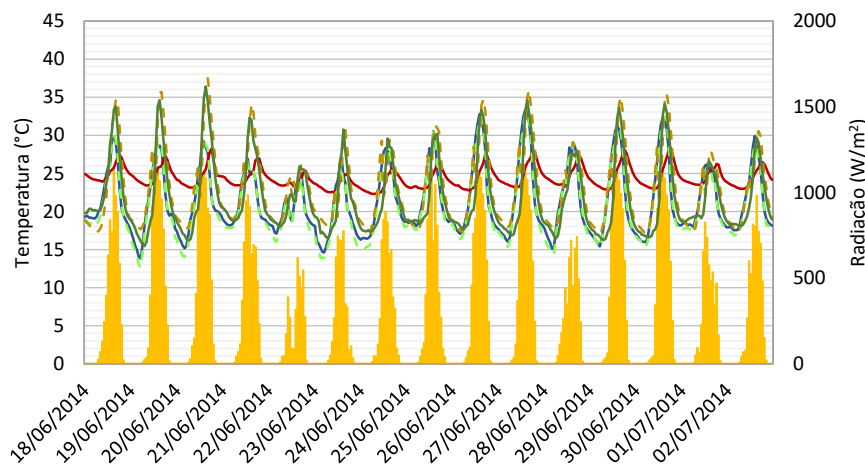


Figura 6.43 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Junho, Cobertura, Atlântico Blue Studio

5 a 10 de Julho de 2014

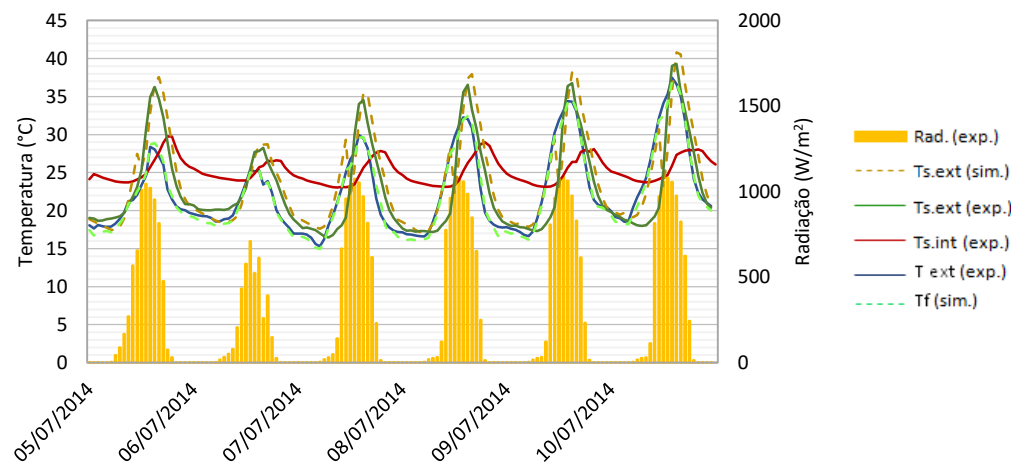


Figura 6.44 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por (Prazeres,2015) Julho, Cobertura, Atlântico Blue Studio

Para a fachada verde, nos meses de Fevereiro e de Março, constatou-se que as temperaturas superficiais exteriores simuladas e experimentais foram superiores na zona 1, enquanto nos dias 10 e 11 de Março as simuladas registaram valores superiores na zona 2. Nos meses de Junho e de Julho, também a zona 1 registou maiores temperaturas superficiais exteriores simuladas e experimentais do que a zona 2. Concluiu-se que o aumento do LAI e a dimensão da planta na zona 2 proporcionou um decréscimo da temperatura superficial exterior.

Para a cobertura verde, nos meses de Fevereiro, de Março, de Junho e de Julho, notou-se que as temperaturas superficiais exteriores experimentais e simuladas são superiores às da fachada. O motivo para tal, prende-se com a maior exposição solar que se encontra a cobertura verde.

Na campanha de inverno, a diferença entre os valores simulados com os experimentais da temperatura da superfície exterior teve alguns valores máximos que importa reter: 3,27°C no dia 12 de Março para a zona 1, 4,12°C no dia 11 de Março para a zona 2 e 6,10°C no dia 17 de Fevereiro para a cobertura. Em relação à campanha de verão, detetaram-se valores máximos de 6,63°C no dia 19 de Junho para a zona 1, 5,71°C no dia 7 de Julho para a zona 2 e 6,45°C no dia 10 de Julho para a cobertura.

A temperatura superficial interior experimental utilizada no modelo de Malys et al. (2014) é a mesma da validação do modelo de Susorova et al. (2013). As respetivas justificações encontram-se no final do capítulo (6.2.1).

A temperatura da folha é ligeiramente inferior à do ar exterior nos períodos diurnos e noturnos da campanha experimental de inverno para a fachada e cobertura verdes. No verão, a temperatura da folha manteve o mesmo comportamento, mas na zona 2 registaram-se valores superiores à temperatura do ar exterior durante a noite. Quanto à temperatura superficial exterior, concluiu-se que é inferior à da folha, para a zona 1 e zona 2 da fachada verde, na maior parte dos dias das campanhas experimentais. Já na cobertura confirmou-se o contrário.

6.2.3. Comparação entre modelos

A comparação da temperatura superficial exterior da fachada para a zona 1 da fachada verde do Atlântico Blue Studio entre os modelos de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014) com a temperatura medida experimentalmente por Prazeres (2015) apresenta-se nas Figuras (6.45) e (6.46). Ambas as temperaturas dos modelos englobam o cálculo do coeficiente de transmissão térmica calculado por $U_{(iii)}$. No que diz respeito às figuras da zona 2 da fachada verde e da cobertura, encontram-se no Anexo (A.5).

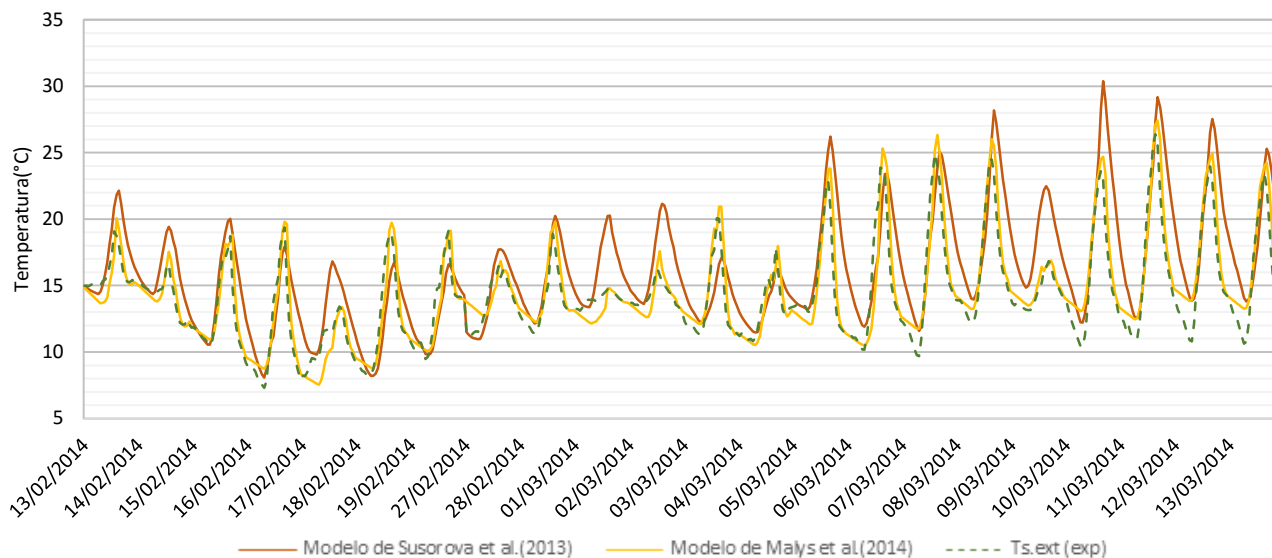


Figura 6.45 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, zona 1, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio

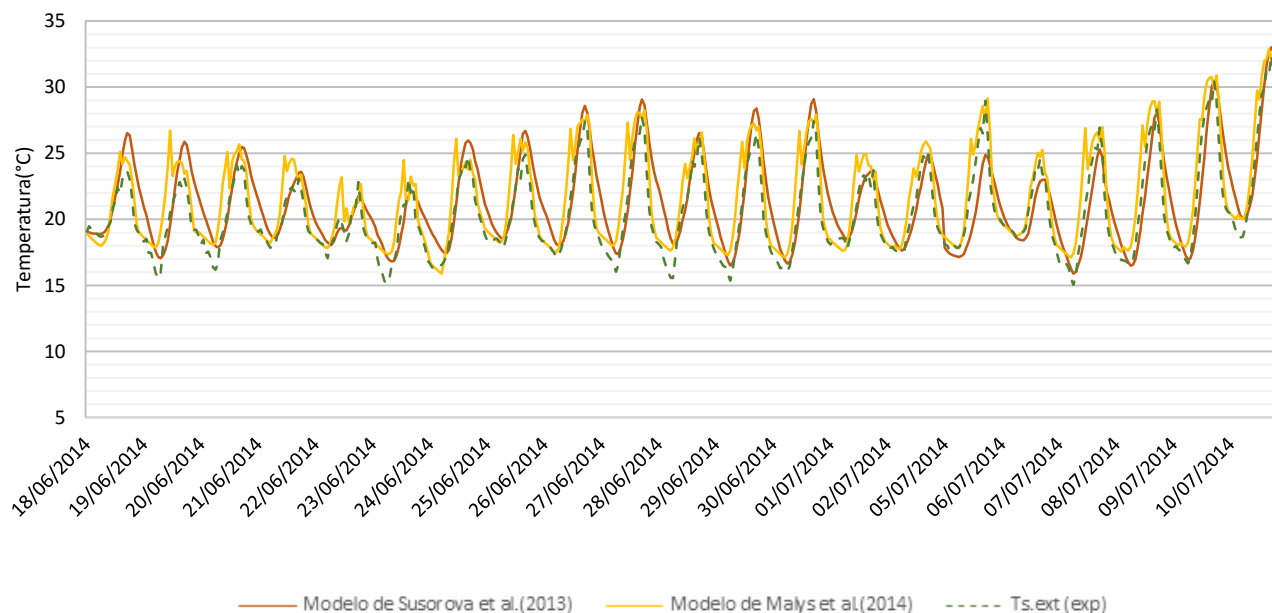


Figura 6.46 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, zona 1, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio

Da análise das Figuras (6.45) e (6.46) confirmou-se que a temperatura superficial exterior calculada através do modelo de Malys et al. (2014) aliou-se melhor à experimental. As maiores diferenças entre os modelos apareceram nos dias 1 e 3 de Março com os respetivos valores de 5,23 °C e 5,55 °C. Nos meses de Junho e de Julho verificou-se que no modelo de Susorova et al. (2013) a temperatura superficial exterior simulada se aproximou mais da temperatura superficial exterior experimental depois do pico diário. Já nos meses de Fevereiro e de Março, a diferença foi maior. O motivo para tal, deveu-se à utilização de radiação solar incidente

experimental no desenvolvimento do modelo nos meses de verão. Assim, concluiu-se que a radiação solar calculada proporcionou um aumento da temperatura superficial exterior na campanha de inverno. Nos meses de Junho e de Julho, os valores da temperatura superficial exterior do modelo de Malys et al. (2014) apresentaram as mesmas variações nas horas de pico dos dados experimentais. No que concerne ao modelo de Susorova et al. (2013), essas variações não existiram. Concluiu-se então que, o modelo de Malys et al. (2014) é mais sensível às mudanças de temperatura.

6.3. Considerações finais da validação para os dois casos de estudo

Na análise dos parâmetros simulados e experimentais existiram divergências que podem ser devidas aos seguintes fatores:

- Erros possíveis na monitorização por parte dos equipamentos ou humanos;
- Considerações de modelação: materiais e as suas características, radiação solar, coeficiente de transmissão térmica e velocidade do vento podem não representar exatamente a realidade;
- Características das plantas com muitos graus de liberdade, sendo que não foi possível quantificar alguns dos parâmetros, como é o caso do parâmetro *LAI*, que tem uma grande influência no modelo;
- Omissão de dados relativamente à drenagem e retenção de água nas fachadas verdes;
- Modelo unidimensional, funcionando apenas na direção perpendicular à superfície respetiva, não tendo em conta pontes térmicas lineares em contacto com o ambiente interior.

Apesar dos fatores enunciados, que podem causar divergências significativas, considera-se que, no geral, os parâmetros comparados nos dois casos de estudo apresentam diferenças relativamente reduzidas e que os modelos representam corretamente as temperaturas superficiais exteriores. Concluiu-se que os modelos de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014) conseguiram cumprir a validação dos dados recolhidos por Prazeres (2015). Na Tabela (6.19) apresentam-se os valores do coeficiente de correlação obtidos por outros autores, bem como os calculados pelo modelo de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014). Já na Tabela (6.20) encontram-se presentes os coeficientes de transmissão térmica da cobertura verde de Wong et al. (2010) com os calculados para os casos de estudo da Travessa do Patrocínio e do Atlântico Blue Studio. No que diz respeito à variação de temperaturas superficiais exteriores na presença de vegetação para o clima mediterrânico, registam-se na Tabela (6.21).

Tabela 6.19 – Comparação do coeficiente de correlação com diferentes autores para as temperaturas superficiais exteriores

Comparação do coeficiente de correlação da temperatura superficial exterior da parede de diferentes autores				
	Holm (1989)	Stec et al. (2005)	Com modelo de Susorova et al. (2013)	Com modelo de Malys et al. (2014)
Coeficiente de correlação (r)	0,93 - Verão 0,97 - Inverno	>0,98	0,81 – Verão 0,75 - Inverno	0,84 – Verão 0,87 - Inverno

Tabela 6.20 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica com diferentes autores para as temperaturas superficiais exteriores

Comparação do coeficiente de transmissão térmica de diferentes autores			
	Wong et al. (2010)	Travessa do Patrocínio	Atlântico Blue Studio
U, W/(m².°C)	0,365 – c/ plantas 3,344 – s/ plantas	0,362 – c/plantas (U através de (i), parede Piso 2)	0,493 – c/plantas (parede, U _(i)) 0,413 – c/plantas(cobertura, U _(i))

Tabela 6.21 - Comparação da variação da temperatura superficial exterior da parede com e sem vegetação de diferentes autores para o clima Mediterrânico

Comparação da temperatura superficial exterior da parede com e sem vegetação de diferentes autores			
	Eumorfopoulou et al. (2009)	Olivieri et al. (2013)	Travessa do Patrocínio
Aumento da T_{s,ext} da parede s/vegetação(°C)	1,9°C a 8,3°C	15°C a 30°C	Inverno: 0,5°C a 8,1°C Verão: 1,5°C a 8,4°C

Através da análise da Tabela (6.19) verificou-se que os valores do coeficiente de correlação de outros autores se encontraram muito próximos de 1, enquanto os calculados através do modelo de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014) apresentaram registos ligeiramente menores. A razão para tal, prende-se com o facto da monitorização da fachada verde de Stec et al. (2005) ter sido realizada em laboratório, proporcionando uma maior facilidade no controlo dos aparelhos de medição (menores erros humanos e de equipamentos). Já no modelo de Holm (1989), atribuiu-se com maior asseveração as características das plantas presentes na sua fachada verde. Quanto aos casos de estudo da Travessa do Patrocínio e do Atlântico Blue Studio, houve a necessidade em admitir vários parâmetros, não só as características das plantas mas também as características da parede e da cobertura. Ainda na Tabela (6.19) concluiu-se que existe melhor correlação entre valores experimentais e simulados quando se utiliza o modelo de Malys et al. (2014).

A partir da Tabela (6.20) constatou-se que na utilização do coeficiente de transmissão térmica calculado por U_(i), os valores de Wong et al. (2010) para as coberturas verdes são muito próximos dos resultados obtidos através do modelo de Susorova et al. (2013) e do Malys et al. (2014) para paredes e coberturas verdes. A diferença de valores resulta dos diferentes materiais utilizados em cada caso específico, no entanto subentende-se que o coeficiente de transmissão térmica de fachadas verdes do tipo LW seja desta ordem de grandeza.

Concluiu-se que a presença da vegetação reduz efetivamente a temperatura superficial exterior da fachada. Da Tabela (6.21) constatou-se que Eumorfopoulou et al. (2013) regista um intervalo de valores muito próximo do monitorizado na Travessa do Patrocínio. Já Olivieri et al. (2013), não se verificou, dado que, a superfície da fachada deste caso de estudo foi de metal, o que levou a um aumento significativo das suas temperaturas de pico.

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1. Conclusões

No presente estudo propôs-se estudar o comportamento térmico de fachadas ajardinadas em edifícios em Portugal.

A primeira parte debruçou-se sobre a evolução histórica das fachadas verdes, os diferentes sistemas construtivos, as vantagens ambientais, económicas e sociais daquelas, bem como algumas desvantagens na sua utilização. Compreendeu-se a relação e as diferenças entre as características de fachadas e de coberturas verdes, assim como os incentivos à construção deste tipo de sistemas por todo o mundo. Constatou-se que os estudos acerca deste tipo de solução construtiva são bastante recentes e em número muito reduzido. Em Portugal, a utilização de fachadas verdes é ainda escassa, seguramente devido aos poucos estudos realizados e à falta de regulamentação para a sua construção.

Numa segunda fase apresentaram-se dois modelos matemáticos em tipologias diferentes de fachadas verdes, uma delas do tipo DGF de Susorova et al. (2013) e outra do tipo LW de Malys et al. (2014). O modelo de Susorova et al. (2013) caracteriza-se pela radiação de onda curta, radiação de onda longa, fluxo de calor por convecção e por condução, trocas de radiação entre a parede e a vegetação, bem como o calor armazenado no material da parede. Já o modelo de Malys et al. (2014) descreve a relação do ar entre as plantas, as plantas e a parede. Este modelo trata os fenómenos de radiação de onda curta, radiação de onda longa, fluxo de calor por convecção e condução, fluxo de calor latente (evapotranspiração) e o calor armazenado nas plantas, ar e parede. A diferença notória entre os modelos baseia-se no cálculo da evapotranspiração e da convecção. No modelo de Susorova et al. (2013) a evapotranspiração estimou-se através da equação de Campbell (1998) para a temperatura da folha e a convecção traduziu-se apenas pela relação entre a folha e a superfície exterior da fachada. Já no modelo de Malys et al. (2014), a evapotranspiração avaliou-se pela equação de Penman-Monteith fornecida por Zotarelli et al. (2009), e a convecção pela relação do ar entre as folhas, as folhas e a superfície exterior da fachada.

Por sua vez, na terceira parte descreveram-se os dois casos de estudo monitorizados por Prazeres (2015), tratando-se o primeiro de uma habitação unifamiliar com uma fachada verde localizada na Travessa do Patrocínio em Lisboa e o segundo, de uma fachada e cobertura verde num estúdio de música (Atlântico Blue Studio) situado em Paço de Arcos. Retenha-se que nas duas fachadas e cobertura verdes apenas têm terra para fixação mecânica das plantas.

No caso de estudo da Travessa do Patrocínio monitorizaram-se as temperaturas superficiais exteriores e interiores, bem como os respetivos fluxos da parede exterior do escritório do Piso 0

(sem vegetação) e da sala de jantar do Piso 2 (com vegetação). No caso de estudo do Atlântico Blue Studio controlaram-se as temperaturas superficiais exteriores e interiores, e também os respetivos fluxos de duas zonas na parede e na cobertura verdes.

No que diz respeito ao coeficiente de transmissão térmica (U), foi determinado através de três cálculos distintos: $U_{(i)}$ com base nas resistências térmicas das diferentes camadas, $U_{(ii)}$ a média progressiva com base nas temperaturas ambientais e $U_{(iii)}$ a média progressiva com base nas temperaturas superficiais. Concluiu-se que nos dois casos de estudo, os valores do coeficiente de transmissão térmica calculados através de $U_{(i)}$ divergiram significativamente dos resultados de $U_{(ii)}$ e de $U_{(iii)}$, uma vez que $U_{(i)}$ adveio de materiais presentes no documento do LNEC ITE-50 (2006), enquanto os outros métodos consideraram dados experimentais. A introdução de vegetação, substrato e caixa-de-ar, aumentaria a resistência térmica de uma fachada e não a diminuição da mesma, demonstrada por $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$. A grande diferença entre valores não era expectável, daí se interpretar que os coeficientes de transmissão térmica calculados por $U_{(ii)}$ e $U_{(iii)}$ não transmitiram corretamente o comportamento de uma fachada e uma cobertura verdes. Na análise de $U_{(i)}$ registou-se o valor de $0,362 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para a parede do Piso 2 do edifício da Travessa do Patrocínio, bem como $0,493 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ e $0,413 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para a parede e cobertura do Atlântico Blue Studio. Sendo que, estes valores se aproximaram do coeficiente de transmissão térmica utilizado por Wong, et al. (2010) numa cobertura verde de $0,365 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Se houvesse mais terra na cobertura verde no Atlântico Blue Studio o coeficiente de transmissão térmica aproximar-se-ia mais da de Wong et al. (2010).

Na validação dos modelos de Susorova et al. (2013) e de Malys et al. (2014) foi necessário recorrer a dados experimentais monitorizados por Prazeres (2015) e a dados recolhidos na estação meteorológica do Instituto Superior Técnico (METEO-IST). A razão para o uso de registos da METEO-IST prendeu-se com a inexistência de valores necessários para a simulação dos modelos e a falhas de equipamentos durante as atividades experimentais. Também se utilizaram os programas computacionais, EnergyPlus (2013), OpenStudio (2013) e GoogleSketchup (2013), de forma a calcular a radiação solar incidente nas fachadas verdes. Concluiu-se que a radiação solar simulada se encontrou ligeiramente inflacionada da experimental, proporcionando maiores desvios dos valores simulados face aos experimentais. O motivo para tal prendeu-se com a utilização de um edifício cúbico genérico nos programas computacionais que não tiveram em consideração o sombreamento da envolvente e do próprio edifício. Também o calor específico pode ser apontado como causa fundamental para o afastamento do comportamento dos modelos de fachadas verdes face aos experimentais. No modelo de Susorova et al. (2013) analisou-se em primeira mão, as alterações da temperatura da folha através da comparação entre Susorova et al. (2013) e Gates (2003). Os resultados do presente estudo verificaram que a temperatura da folha apresentou desvios $<1^\circ\text{C}$ dos registos apresentados nos documentos de Susorova et al. (2013) e de Gates (2003). Na validação do modelo foi considerada a temperatura superficial exterior como incógnita, sendo que, no instante

zero acolheu o valor da temperatura superficial exterior experimental. No modelo de Malys et al. (2013) estudou-se em primeiro lugar a evapotranspiração (ETP) de Penman Monteith, em que se comparou com sucesso o andamento do calor latente calculado com o apresentado no modelo. No instante zero da validação do modelo admitiu-se que o valor da temperatura da folha e do ar entre as folhas seria o experimental do ar exterior, enquanto o valor da temperatura da superfície exterior calculado seria igual ao experimental. Quanto ao erro e à correlação entre as temperaturas superficiais exteriores simuladas face às experimentais, usou-se o parâmetro RMSE e o coeficiente de correlação de Pearson (r). Para o modelo de Susorova et al. (2013) registaram-se para o Piso 2 (com vegetação) da Travessa do Patrocínio, o valor de RMSE de 4°C e r de 0,5, enquanto no Atlântico Blue Studio exibiram-se os valores respetivos de RMSE de 3,5°C e de 4,6°C, bem como os resultados de r de 0,76 e de 0,75 para a fachada e cobertura verde. Já o modelo de Malys et al. (2014) apresentou para o Piso 2 (com vegetação) da Travessa do Patrocínio, o valor de RMSE de 3,2°C e r de 0,58. Por sua vez, no tocante ao Atlântico Blue Studio registaram-se os valores de RMSE de 1,9°C e 3,2°C, bem como r de 0,91 e de 0,87 na fachada e cobertura verde. Concluiu-se assim que o modelo de Malys et al. (2014) simulou melhor os casos de estudo por apresentar menor erro RMSE e melhor correlação de valores simulados com os experimentais.

Na Travessa do Patrocínio concluiu-se que nos meses de Fevereiro e de Março, as temperaturas superficiais exteriores da parede do escritório no Piso 0 (sem vegetação) foram menores que as da parede da sala de jantar no Piso 2 (com vegetação). No tocante aos meses de Junho e de Julho verificou-se o contrário. A variação de valores das temperaturas superficiais exteriores entre o Piso 0 e o Piso 2 situou-se no intervalo de 0,5°C a 8,1°C na campanha de inverno e no verão de 1,5°C a 8,4°C. As razões para tais acontecimentos deveram-se à presença de vegetação na fachada. As plantas proporcionaram ao edifício menores perdas de calor do interior para o exterior nos dias mais frios, enquanto nos dias mais quentes ampararam a radiação solar incidente no edifício. Assim, evitaram que a temperatura superficial exterior diminuísse nos meses mais frios e aumentasse nos dias mais quentes.

No Atlântico Blue Studio concluiu-se que a temperatura superficial exterior diminuiu com o aumento do LAI e com o aumento da dimensão das plantas presentes na fachada verde. Estes aumentos proporcionaram um melhor isolamento da superfície exterior. Quanto à cobertura verde, verificou-se que as temperaturas superficiais exteriores foram significativamente superiores às apresentadas pela fachada verde em ambas as campanhas experimentais. O motivo para esta diferença centrou-se na maior exposição solar em que se encontrava a cobertura.

No que se refere a temperatura da folha, concluiu-se que se aproximou consideravelmente da temperatura do ar exterior e que demonstrou em geral, um aumento face à temperatura

superficial exterior das fachadas. Já na cobertura, a temperatura da folha apareceu inferior à temperatura superficial exterior.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Esta dissertação confirma que na presença de vegetação existe redução nas temperaturas das superfícies exteriores e que as características das folhas têm grande influência nessa redução. De Seguida, apresentam-se sugestões para próximas investigações, dado que, ainda existe muito para conhecer acerca dos seus benefícios para o edifício e para a envolvente deste. Sugere-se assim, a continuação de estudos com incidência nesta solução construtiva, nomeadamente com os seguintes desenvolvimentos:

- Perceber a relação entre a velocidade do vento e a altura da fachada verde;
- Avaliar a toxicidade e a qualidade do ar na presença de uma fachada verde;
- Averiguar quais as melhores plantas a utilizar em fachadas e coberturas verdes para diminuir a concentração de CO₂ em cidades muito poluídas;
- Estimar o comportamento térmico de uma fachada verde em climas frios;
- Investigar potenciais poupanças de energia em edifícios com fachadas verdes recorrendo a modelos de energia que englobem o edifício todo;
- Criar procedimentos para a implementação sistemas de fachadas verdes em edifícios existentes;
- Estabelecer normas e regulamentação para a utilização destes sistemas em Portugal;
- Realizar um balanço económico englobando os custos de investimento e manutenção (rega, equipamentos, jardineiros, entre outros) de fachadas verdes em Portugal e estudar o período de retorno deste tipo de sistemas.

Referências bibliográficas

Dissertações, Livros, Artigos, Relatórios, Apontamentos e Revistas:

- Akbari, H., Pomerantz, M. e Taha, H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Urban Environment*. Vol. 70:295-310.
- Alexandri, Eleftheria e Jones, Phil. 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43. pp. 480-493.
- Buck, A. L. 1981. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *J. Appl. Meteorol.* 20: 1527–1532.
- Cameron, Ross W.F., Taylor, Jane E. e Emmett, Martin R. 2014. What´s cool in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*. Vols. 73:198-207.
- Campbell, S. Gaylon. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*. Second edition, Springer. USA
- Casado, C. Heredia, A. 2001. Specific heta determination of plant barrier lipophilic components: biological implications. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*. Vol. 1511:291-296.
- Castleton, H.F., et al. 2010. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. Vol. 42:1582-1591.
- Chen, Qiuyu, Li, Baofeng e Liu, Xiaohu. 2013. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*. Vol. 61:298-307.
- Di, H.F. e Wang, D.N. 1999. Cooling Effect of Ivy on a Wall. *A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*. Vol. 12:3, 235-245.
- Eumorfopoulou, E.A. e Kontoleon, K.J. 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*. Vol. 44:1024-1038.
- Eumorfopoulou, E.A. e Kontoleon, K.J.. 2010. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered Wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment* 45. pp. 1287-1303.
- Fjeld, Tove, et al. 1998. The effect of Indoor Foliage Plants on Health and Discomfort Symptoms among Office Workers. *Indoor and Built Environment*. Vol. 7:204-209.
- Francis, R.A. e Lorimer, J. 2011. Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management* . Vol. 92:1429-1437.
- Gao, Xiaolu e Asami, Yasushi. 2007. Effect on urban landscapes on land prices in two Japanese cities. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 81:155-166.
- Garrido, L. 2011. *Artificial Nature Architecture*. s.l. : Monsa Ediciones. ISBN. 978-84-152-2319-1.
- Gates, David M., 2003. *Biophysical Ecology*. Publicado por Springer-Verlag New York, Inc.
- Gerwig, Kathy. 2014. *Greening Health Care: how hospitals can heal the planet*. Oxford : Oxford University Press. ISBN-10: 0199385831.
- Holm, D. 1989. Thermal Improvement by means of Leaf Cover on External Walls - A Simulation Model. *Energy and Buildings*. Vol. 14:19-30.
- Ismail, Mostafa. 2013. Quiet environment: Acoustics of vertical green wall systems of the Islamic urban form. *Frontiers of Architectural Research*. Vol. 2:162-177.
- Kocbeker, Z. e Onder, S. 2012. Importance of the Green Belts to Reduce Noise Pollution and Determination of Roadside Noise Reduction Effectiveness of Bushes in Konya, Turkey. *International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering*. 2012, Vol. 6:6.
- Köhler. 2008. A view back and some visions. *Urban Ecosyst*. pp. 11:423-36.
- Kontoleon, K.J. e Eumorfopoulou, E.A. 2010. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*. Vol. 45:1287-1303.

- Malys, Laurent, Musy, Marjorie e Inard, Christian. 2014. A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment* 73. pp. 187-197.
- Mazzali, Ugo, et al. 2013. Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment*. Vol. 64:67-66.
- Meier. 1991. Strategic landscaping and air-conditioning savings: A literature review. *Energy and Buildings*. pp. 15-16:479-86.
- Mendes, Keila. Marengo, Ricardo. 2010. Leaf traits and gas exchange in saplings of native tree species in the Central Amazon. INPA
- Mendonça, Paulo. 2005. *Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil, Guimarães.
- Neves, Diana. 2009. *Dissertação de mestrado. Conforto térmico num edifício de ensino superior: análise da situação actual e identificação dos parâmetros relevantes para melhoramento energético*. Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, departamento de engenharia geográfica, geofísica e energia.
- Olivieri, F., et al. 2014. Experimental characterization and implementation of an integrated autoregressive model to predict the thermal performance of vegetal façades. *Energy and Buildings*. Vol. 72:309-321.
- Ottelé, Marc, Bohemen, Hein D. van e Fraaij, Alex L.A. 2010. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*. Vol. 36:154-162.
- Ottelé, Marc, et al. 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living Wall systems. *Energy and Buildings*. Vol. 43:3419-3429, pp. 3419-3429.
- Pérez, Gabriel, et al. 2011. Green Vertical Systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*. Vol. 88:4854-4859.
- Perini, Katia e Rosasco, Paolo. 2013. Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*. Vol. 70:110-121.
- Prazeres, Rita. 2015. *Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Monitorização de Fachadas Verdes*.
- Rosiers, François Des, et al. 2002. Landscaping and House Values: An Empirical Investigation. *Journal of Real Estate Research*. Vol. 23:139-61.
- Sailor, D. 2008. Energy and urban climate benefits of green roofs. *Energy and Buildings* 40. pp. 1466-1478.
- Sheweka, Dr.Samar Mohamed e Mohamed, Arch. Nourhan Magdy. 2012. Green Façades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change. *Energy Procedia*. Vol. 18:507-520.
- Skov, P., Valbjorn, O. e Pedersen, B.V. 1990. Influence of indoor climate on the sick building syndrome in an office environment. The Danish Indoor Climate Study Group. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. Vol. 16(5):363-71.
- Silva, Marcelo. 2014. *Simulação energética de coberturas verdes. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico*.
- Sousa, Rogério de. 2012. *Dissertação de mestrado. Um contributo para os espaços verdes urbanos e oportunidade na reabilitação do edificado*. Universidade Lusófona do Porto: s.n. Vol. pg.62-63. pg.62-63.
- Stav, Yael. 2008. *Living Walls and Their Potential Contribution to Sustainable Urbanism in Brisbane*. Phd. Faculty of Built Environment and Engineering Queensland University of Technology.
- Stec, W.J., Paassen, A.H.C. van e Maziarz, A. 2005. Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*. Vol. 37:419-427.
- Susorova, Irina, et al. 2013. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*. Vol. 67:1-13.
- Zotarelli, Lincoln, Michael D. Dukes, Consuelo C. Romero, Kati W.Migliaccio, Kelly T. Morgan, 2009. Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). University of Florida. IFAS Extension

Wong, Nyuk Hien, et al. 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*. Vol. 45:663-672.

Normas, Decretos, Códigos, Especificações, Estratégias e Protocolos:

LNEC ITE-50, 2006. http://home.fa.utl.pt/~lcaldas/LNEC_ITE_50.pdf

Mam. 2009. Ministério da Agricultura e do Mar. Emissões de gases com efeito de estufa.

Open. 2014. Establishes a green walls tax abatement for certain properties in N.Y. city. Law Section: Real Property Tax Law.

República, Diário da. 2013. 1.ª série - Nº70. Resolução do Conselho de Ministros nº.20/2013. Presidência do Conselhos de Ministros.

Scherer, Minéia Johann e Fedrizzi, Beatriz. 2013. Jardins Verticais: Potencialidades para o Ambiente Urbano. Encontro LatinoAmericano de Edificações e Comunidades Sustentáveis. <http://www.elecs2013.ufpr.br/Anais/edifica%C3%A7%C3%B5es/7.pdf>.

Strategy, Green Roofs and Walls. 2012. Green Roofs and Walls Policy. City of Sydney. http://www.cityofsydney.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0011/200243/2014_126384__policy__green_roofs_and_walls2.pdf.

Sítios da Internet:

ADN Design, Garden. 2012. Arquitectura: um jardim que sobe pelas paredes. *Jornal Público*. <http://p3.publico.pt/cultura/arquitectura/4865/arquitectura-um-jardim-que-sobe-pelas-paredes>.

Blanc, Patrick. 2012. The Vertical Garden - A scientific and artistic approach by Patrick Blanc. <http://www.verticalgardenpatrickblanc.com/documents>.

Blunden, Mark. 2010. Council spends another £130.000 on a living wall after the first one died. *London Evening Standard*. <http://www.standard.co.uk/news/council-spends-another-130000-on-living-wall-after-the-first-one-died-6462162.html>.

Britânica, Enciclopédia. 2010. <http://escola.britannica.com.br/assembly/134410/A-energia-solar-aquece-a-superficie-e-a-atmosfera-terrestres?view=print>.

Bristow-Campbell. 2009.

http://agsys.cra-cin.it/tools/solarradiation/help/Model_Bristow-Campbell.html

Clorofila. 2010. Portfólio. <http://www.clorofilatotal.com/>

Design, Arquitetura e. 2010. Prédio sustentável com fachada verde se destaca em bairro paulistano. *Ciclo Vivo, plantando notícias*. http://www.ciclovivo.com.br/noticia/predio_sustentavel_com_fachada_verde_se_destaca_em_bairro_paulistano.

Económico. 2013. Raquel Carvalho . Portugal atento à eficiência energética. http://economico.sapo.pt/noticias/portugal-atento-a-eficiencia-energetica_170224.html.

EPA. 2012. Reducing Urban Heat Island Compendium of Strategies. Us Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/heatland/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf>

Eurostat. 2010. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-31-09-272/EN/KS-31-09-272-EN.PDF

Excel, Microsoft. 2011. http://www.microsoftstore.com/store/mseea/pt_PT/home.

Foundation, Graham. 2012. <http://www.grahamfoundation.org/grantees/4834-reconstructing-the-vegetation-bearing-architectonic-structure-and-system-1938>

GoogleMaps. 2015. <https://www.google.pt/#q=google+maps+lisboa>

Green, Guide Growing. 2013. Victoria's guide to Green Roofs, Walls & Facades. <http://imap.vic.gov.au/uploads/Growing%20Green%20Guide/Growing%20Green%20Guide%20FINAL%20DRAFT%20website4.pdf>

Green Wall, Systems. 2010. Green Wall Benefits. <http://www.green-walls.co.uk/green-wall-benefits.html>

Hindle, Richard. 2012. Reconstructing the Vegetation-Bearing Architectonic Structure and System. Graham Foundation. <http://www.grahamfoundation.org/grantees/4834-reconstructing-the-vegetation-bearing-architectonic-structure-and-system-1938>.

ICESS. 1999. <http://www.icesb.ucsb.edu/modis/EMIS/html/leaf.html>

ID3D, Ideias e Design, Pub. Lda, 2012. http://id3d.idesign.pt/portfolio-item/id3d_1012/

IEA. 2013. Key World Energy Statistics. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>.

IPma. 2013. Base climática da ENAAC. http://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/AlteracoesClimaticas/Adaptacao/ENAA/Apresentacoes/ENAA_C_Clima.pdf.

Isover, Saint-Gobain. 2010. <http://www.isover.pt/Isolamento-na-CONSTRUCAO/Produtos/CALIBEL>

Keys, David. 2013. Biggest wonder about the Hanging Gardens of Babylon? They weren't in Babylon. The independent. <http://www.independent.co.uk/news/science/archaeology/features/the-biggest-wonder-about-the-hanging-gardens-of-babylon-they-werent-in-babylon-8604649.html>.

Klein, Christopher. 2013. Hanging Gardens Existed, but not in Babylon. History. <http://www.history.com/news/hanging-gardens-existed-but-not-in-babylon>.

Nature. (N.A.) World Wide Fund for. World Wide Fund for Nature. www.wwf.pt/o_nosso_planeta/alteracoes_climaticas/.

Naturlink. 2012. Nações Unidas prolongam Quioto. <http://naturlink.sapo.pt/Noticias/Noticias/content/Nacoes-Unidas-prolongam-Quioto?bl=1>.

OpenStudio, Version 1.2.0. 2013 – US Department of Energy, OpenStudio software. <http://openstudio.nrel.gov/downloads>,

Peck, Steven W. e Callaghan, Chris. 1999. Benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada. <http://www.w.carmelacanzonieri.com/3740/readings/greenroofs%20green%20design/Greenbacks%20from%20greenroofs.pdf>

Plantscapes, Creative Interior. 2012. Benefits of Living Walls. Creative Interior Plantscapes. <http://creativeinteriorplantscapes.com/services/living-walls/>.

Plubee. 2013. Hidroponia - segredos, vantagens, passos para produção. <http://www.plubee.com/hidroponia/>.

Resh, Howard. 2003. Advantages of Hydroponics. Hydroponics - Simplified. <http://www.hydroponics-simplified.com/advantages-of-hydroponics.html>.

Reurb. 2014. Ilha de calor urbano/ Urban heat island. <http://reurb.blogspot.pt/2014/05/ilha-de-calor-urbano-urban-heat-island.html>.

Roofs, Green. 2008. Introduction to green walls technology, benefits & design. http://www.greenscreen.com/Resources/download_it/IntroductionGreenWalls.pdf.

SketchUp. Google Version 13 .2013- – Google SketchUp software. <http://www.sketchup.com/pt-BR/products/sketchup-make>,

Tclf. 2008. Stanley Hart White. The Cultura Landscape Foundation. <http://tclf.org/pioneer/stanley-white>.

Unifrax, 2011. http://www.rsifibre.com/pdfs/Ceramic_Fiber_Technical_Bulletin.pdf

Wolmarans, Andries. 2013. Green Fail. Proect Green Shack. <http://projectgreenshack.blogspot.pt/2013/03/fig.html>.

Wolverton, B.C. 1989. Interior Landscape Plants For Indoor Air Pollution Abatement. Final Report - PH.D. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930073077.pdf>.

Woollaston, Victoria. 2013. Mystery of the missing Hanging Gardens of Babylon solved? Expert claims to have found the elusive wonder of the world. Mail Online. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2513819/Mystery-missing-Hanging-Gardens-Babylon-solved-Expert-claims-elusive-wonder-world.html>.

A.1 Evapotranspiração de Penman-Monteith segundo Zotarelli et al. (2009)

A Equação (A.1.1) representa a evapotranspiração (ETP) de Penman-Monteith segundo Zotarelli et al. (2009) que pode ser expressa para valores diários.

$$ETP = \frac{(R_n - G) \Delta + \rho_{ar} C_{p,ar} \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{L_v \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \quad (A1.1)$$

Em que,

R_n - Balanço de radiação - MJ/(m².dia)

G - Fluxo de calor sensível para o solo - MJ/(m².dia)

Δ - Gradiente da pressão-temperatura da saturação de vapor - kPa/°C

e_s - Pressão de vapor saturado - kPa

e_a - Pressão parcial de vapor saturado - kPa

ρ_{ar} - Densidade do ar - 1.2922 kg/m³)

$C_{p,ar}$ - Calor específico do ar - 1,1013x10⁻³ MJ/(kg.°C)

r_a - Resistência total aerodinâmica - s/m

r_s - Resistência da superfície - s/m

L_v - Calor latente de vaporização da água - 2,45 MJ/kg

γ - Constante psicométrica 0.000666 1/°C, resulta da razão ($C_{p,ar} / L_v$)

O balanço da radiação solar (Rn) medido em MJ/(m².dia) resulta da subtração entre o balanço de radiação solar de onda curta (Rns) e o balanço de radiação de onda longa (Rnl), Equação (A.1.2).

$$Rn = Rns - Rnl \quad (A1.2)$$

O Rns e Rnl encontram-se definidos nas equações (A1.3) e (A1.4).

$$Rns = (1 - Af)Rs \quad (A1.3)$$

$$Rnl = \sigma \left[\frac{(T_{ar,ext} \text{ máx} + 273,15)^4 + (T_{ar,ext} \text{ mín} + 273,15)^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{Rs}{Rso} - 0.35 \right) \quad (A1.4)$$

A Equação (A1.3) inclui o albedo da vegetação (A_f) adimensional e a radiação solar global horizontal (R_s) medida em MJ/(m².dia), sendo que R_s se obtém experimentalmente através de uma estação meteorológica ou de um campo de estudo. A Equação (A1.4) caracteriza-se pela constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 4,903 \times 10^{-9}$ MJ/(m².°C⁴.dia), pela radiação solar direta horizontal (R_{so}) medido em MJ/(m².dia) e pela temperatura do ar exterior ($T_{ar,ext}$) em °C. O R_{so} caracteriza-se pelas frações de radiação solar (a_s e b_s) em dias de céu limpo ($n=N$) e pela radiação solar extraterrestre (R_a), Equação (A1.5). Se não existir informação acerca destes coeficientes assume-se, $a_s + b_s = 0.75 + 2 \times 10^{-5}z$, em que z é a altitude acima do nível do mar.

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \quad (A.1.5)$$

O cálculo de R_a engloba a constante solar ($G_{sc} = 0.0820$ MJ/(m².min)), a distância inversa relativa Terra-Sol (d_r), o ângulo horário dependente do pôr do sol (ω_s), a latitude (φ) convertida em radianos e o ângulo de declinação solar (δ), Equação (A1.6).

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (A.1.6)$$

O parâmetro d_r encontra-se definido na Equação (A1.7), enquanto ω_s , φ e δ apresentam-se respetivamente nas Equações (A1.8), (A1.9) e (A1.10).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (A.1.7)$$

O J representa o número de dias num ano (por exemplo, 1 Janeiro equivale a $J = 1$ e 1 de Fevereiro a $J = 32$).

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (A.1.8)$$

$$\varphi[\text{Rad}] = \frac{\pi}{180} \varphi [^\circ\text{C}] \quad (A.1.9)$$

A latitude em radianos é positiva para o hemisfério norte e negativa para o hemisfério sul.

$$\delta = 0.409 \text{sen}\left[\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right] \quad (A.1.10)$$

Segundo o boletim da FAO 56, o G pode ser desprezável para períodos diários.

O gradiente da pressão-temperatura da saturação de vapor (Δ) medido em kPa/°C depende da temperatura do ar exterior apresenta-se na equação (A1.11).

$$\Delta = 44.352 \cos\left(\frac{T_{ar,ext}}{3}\right) \left(1 + \sqrt{2} \text{sen}\left(\frac{T_{ar,ext}}{3}\right)\right)^{7.827} \quad (A1.11)$$

A pressão de vapor saturado (e_s) medido em kPa é definido pela Equação (A1.12).

$$e_s = \left[\frac{e^o(T_{ar,ext} \text{ máx}) + e^o(T_{ar,ext} \text{ mín})}{2} \right] \quad (\text{A.1.12})$$

A Equação (A1.12) expõe a pressão de vapor saturado à temperatura máxima $e^o(T_{máx})$ e a pressão de vapor saturado à temperatura mínima $e^o(T_{mín})$, presentes nas Equações (A1.13) e (A1.14).

$$e^o(T_{ar,ext} \text{ máx}) = 0,6108 * e^{\left[\frac{17,27 T_{ar,ext} \text{ máx}}{T_{ar,ext} \text{ máx} + 237,3} \right]} \quad (\text{A.1.13})$$

$$e^o(T_{ar,ext} \text{ mín}) = 0,6108 * e^{\left[\frac{17,27 T_{ar,ext} \text{ mín}}{T_{ar,ext} \text{ mín} + 237,3} \right]} \quad (\text{A.1.14})$$

A pressão parcial de vapor saturado (e_a) medido em kPa encontra-se na equação (A1.15). Esta, caracteriza-se pela humidade relativa máxima ($HR_{máx}$) e mínima ($HR_{mín}$) medidas em (%).

$$e_a = \left[\frac{e^o(T_{ar,ext} \text{ máx}) \frac{HR_{máx}}{100} + e^o(T_{ar,ext} \text{ mín}) \frac{HR_{mín}}{100}}{2} \right] \quad (\text{A.1.15})$$

A resistência total aerodinâmica (r_a) medida em s/m abrange a altura de medição da velocidade do vento (z_m) em m, a altura da medição da humidade (z_h) em m, o comprimento da rugosidade tendo em conta a transferência dinâmica (z_{om}) em m, o comprimento da rugosidade tendo em conta as transferências de calor e vapor (z_{oh}) em m, a altitude zero (d) em m, a constante de Karman ($k = 0.42$) e a velocidade do vento na altura (v) em m/s, Equação (A1.16).

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{(z_m - d)}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{(z_h - d)}{z_{oh}} \right]}{k^2 v} \quad (\text{A.1.16})$$

O valor de d pode ser estimado segundo a dimensão da planta (D_f) em m, Equação (A1.18), enquanto o de z_{om} é calculado através da Equação (A1.18) e o de z_{oh} a partir da Equação (A1.19).

$$d = \frac{2}{3} D_f \quad (\text{A.1.17})$$

$$z_{om} = 0.123 D_f \quad (\text{A.1.18})$$

$$z_{oh} = 0.1 z_{om} \quad (\text{A.1.19})$$

A resistência da superfície é dada pela equação (A1.21).

$$r_s = \frac{r_l}{0.5 LAI} \quad (A.1.20)$$

Em que, r_l é a resistência estomática de uma folha bem iluminada (s/m) e LAI (leaf área index) o índice de área de folhagem (m^2/m^2).

A.2 Procedimento Sketchup – OpenStudio - EnergyPlus para o cálculo da radiação incidente na fachada verde

O procedimento para o cálculo da radiação incidente segue os seguintes passos:

- Na página do U.S. Department of Energy, relativamente ao EnergyPlus Energy Simulation Software, escolher a região “Europe (WMO Region 6)” e depois seleccionar “PRT-Portugal”. Nessa pasta existem 8 cidades portuguesas, seleccionar “Lisboa 085360 (INETI)”. Guardar o ficheiro no ambiente de trabalho para ser mais fácil a sua localização;
- Dentro dessa pasta existem três ficheiros com formatos epw, stat e ddy;
- Abrir no EnergyPlus o “Weather Statistics and Conversions”;
- No campo “Select File to Convert”, localizar o ficheiro com o formato epw e seleccioná-lo. Notar que aparece por defeito no campo “Data Type” o “EnergyPlus / ESP (r) format”
- No campo “Select Output Format”, aparece por defeito no campo “Data Type” o “EnergyPlus weather format (EPW), no entanto pretende-se ter o “CSV format of EPW data”
- No campo “Save File As...”, gravar com um nome aleatório, p.e. “Livro1”;
- Seleccionar o campo “Convert File”;
- Verificar se existem 4 novos ficheiros com os seguintes formatos: stat, ddy, epw e csv;
- Abrir um ficheiro Excel novo, seleccionar o campo “Dados” e seleccionar “do texto” e localizar o ficheiro “Livro1” com formato CSV, “Livro1.csv”;
- Aparece um Assistente de Importações de Texto com 3 passos;
- No primeiro passo, seleccionar “Delimitado” e depois “Seguinte”;
- No segundo passo, seleccionar “Vírgula” e depois “Seguinte”;
- No terceiro passo, seleccionar “Texto” e depois “Concluir”;
- Seleccionar uma célula do Excel para colarmos os dados;
- Substituir os valores de acordo com os dados experimentais em qualquer dos campos implícitos;
- Gravar o ficheiro do Excel com um nome aleatório, p.e. “Livro2” com o formato CSV (Separado por vírgulas), “Livro2.csv”;
- Vão aparecer dois avisos, seleccionar “OK” na primeira e “Sim” na segunda;

- Guardar as alterações no ficheiro “Livro2.csv”;
- Criar uma cópia do ficheiro climático original de Lisboa no formato epw, “Lisboacopia.epw”;
- No ficheiro “Livro2.csv”, apagar todo o texto inicial antes de aparecerem os dados, até onde começa o ano 2005/1/1...;
- No ficheiro “Lisboacopia.epw”, apagar todos os dados e deixar o texto inicial;
- Selecionar todos os dados do ficheiro “Livro2.csv” e colar a seguir ao texto do ficheiro “Lisboacopia.epw”;
- De forma a termos a mesma formatação que o ficheiro original de “Lisboa.epw” é preciso fazer as seguintes alterações no ficheiro “Lisboacopia.epw”:
- Utilizar o comando “Substituir” através dos botões “Ctrl+U” e localizar “/” e substituir por “, ”, depois selecionar o comando “Substituir tudo”;
- Utilizar o comando “Substituir” através dos botões “Ctrl+U” e localizar “,” e substituir por “, ”, depois selecionar o comando “Substituir tudo”;
- Para as horas estarem com a mesma formatação é preciso fazer para cada hora o seguinte procedimento:
- Utilizar o comando “Substituir” através dos botões “Ctrl+U” e localizar “01:00” e substituir por “1,60”, depois selecionar o comando “Substituir tudo”. Fazer o mesmo para as horas seguintes p.e. localizar “02:00” e substituir por “2,60”;
- Para concluir existem 17 vírgulas no final de cada hora, de forma a eliminá-las utiliza-se o mesmo comando “Substituir” através dos botões “Ctrl+U” e localizar “,,,,,,,,,,,,,” e substituir por “” (nada dentro), depois selecionar o comando “Substituir tudo”.
- Gravar e agora o ficheiro encontra-se com o formato epw e já pode ser utilizado para simular dados no Eplus.

Através do programa SketchUp (2013) criou-se um cubo genérico com as paredes e cobertura definidos como, Norte, Sul, Este, Oeste e Cobertura, de forma a ser mais fácil identifica-las após a simulação no Energyplus (2013) estar concluída. De forma a passar esta informação para o Energyplus (2013) foi utilizado o OpenStudio Plug-in (2013), o qual cria uma ligação direta com o IDF-Editor do Energyplus (2013), não sendo necessário preencher novamente os parâmetros respetivos às paredes e telhados.

1. Abrir o Eplus-Launch e selecionar o comando “Edit- IDF Editor”;
2. Localizar o modelo criado no Sketchup e selecioná-lo;
3. Por norma aparece um ficheiro com dados pré estabelecidos, como só interessa a radiação incidente não interessa mudá-los do “default”;
4. No comando “Output Reporting”, selecionar “Output: Variable” e adicionar um novo objeto, “Obj1”;
5. No parâmetro “Key Value”, colocar “**”;

6. No parâmetro “Variable Name”, colocar “Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area”;
7. No parâmetro “Reporting Frequency”, colocar Hourly.
8. Fechar o IDF-Editor e no Eplus selecionar no comando “Input File”, o ficheiro correspondente ao desenho do Sketchup com formato idf, p.e. “Desenho.idf”;
9. No comando “Weather File”, selecionar o ficheiro com as alterações do ficheiro original em formato epw, “Lisboacopia.epw”;
10. Selecionar o comando “Simulate” e “Spreadsheets” após a simulação acabar.

A.3 Código desenvolvido no VBA para a função Solver

Na realização do modelo de Malys decidiu-se não utilizar o programa Solene Microclimate, pelo facto de não haver licença gratuita para o executar. Sendo assim, houve a necessidade em utilizar três suplementos gratuitos (add-in, em inglês) do Microsoft Office Excel, o Analysis ToolPak, Analysis ToolPak – VBA (Visual Basic for Applications) e o suplemento Solucionador (Solver, em inglês). Para instalar estes suplementos foi necessário:

- Selecionar o botão do Office => Selecionar Opções do Excel => Selecionar Suplementos => Selecionar Gerir: Suplementos do Excel e premir “Ir...” => Seleccionar os suplementos disponíveis: Analysis ToolPak, Analysis ToolPak –VBA e Suplemento Solver e premir “OK”.

Após a instalação dos suplementos foi necessário disponibilizá-los através do seguinte procedimento: premir Ferramentas (Tools, em inglês), Referências (References, em inglês) e selecionar os suplementos. A seguir, escreveu-se o código com a definição dos parâmetros e respetivas restrições, em que as três incógnitas presentes caracterizam-se pela, temperatura da folha, do ar entre as folhas e da superfície exterior do substrato (um esquema de três incógnitas para três equações). As restrições tiveram como base o valor das temperaturas ser superior a 0°C. A descrição dos parâmetros utilizados neste código em VBA apresentam-se de seguida:

1. “Sub” e “End Sub” servem para definir uma ação com um nome aleatório, na qual esta apresenta dois parêntesis representando uma função;
2. “For...to...” e “Next” definem um ciclo (loop, em inglês) e interpretam quais as linhas do Microsoft Office Excel que a função percorre;
3. “SolverOk (*SetCell, MaxMinVal, ValueOf, ByChange, Engine, EngineDesc*)”, em que “Set Cell” define a célula, “MaxMinVal” apresenta três valores possíveis, 1 maximiza, 2 minimiza e 3 iguala a um valor escolhido pelo utilizador, “ByChange” define as células que irão ser alteradas, os parâmetros do “Engine” permitem escolher o método

selecionador, 1 método linear, 2 não linear e 3 método evolucionário, e são logo definidos na caixa de diálogo do suplemento “Solver”.

4. “SolverDelete (*CellRef, Relation, FormulaText*)” e “SolverAdd (*CellRef, Relation, FormulaText*)” apresentam a mesma constituição, no entanto um elimina e o outro adiciona uma restrição. O “SolverDelete” está a ser utilizado para eliminar as restrições utilizadas no instante anterior e o “SolverAdd” adiciona novas restrições no instante em questão, de forma a não sobrecarregar o ficheiro. Em que “CellRef” refere-se a uma ou conjunto de células que forma ao lado esquerdo da restrição, “Relation” é definida por um dos 5 valores, sendo os mais usuais: 1 “<=”, 2 “=”, 3 “> =”, e “FormulaText” define o lado direito da restrição.
5. É de notar que todo o corpo das funções do Solve estão separadas por vírgula, de forma a não bloquear as células quando o programa correr. Para tal, utilizaram-se células dinâmicas. Estas células dinâmicas representam-se por “\$...” & x, isto é, o símbolo do dólar (\$) bloqueia a coluna e o símbolo do “E comercial” (&) faz com que a linha não fique bloqueada. Esta restrição não é proporcionada pelo Solver, dado que ele bloqueia a linha e a coluna, isto é, bloqueia a célula tornando-a fixa e não dinâmica.
6. SolverSolve (*UserFinish, ShowRef*). Em que o “UserFinish” retorna o valor do Solve, “True” retorna os resultados sem mostrar a caixa de diálogo do Solve e “False” o contrário. O “ShowRef” pode mostrar o nome da macro como argumento.

Na Figura (A.3.1) encontram-se um exemplo do código utilizado para o modelo de Malys et al. (2014).

```
Sub solverVBA()

For x = 18 To 19
SolverOk SetCell:="$BP$" & x, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$BM$" & x & ":$BO$" & x
SolverDelete CellRef:="$BJ$" & x - 1, Relation:=2, FormulaText:="$BG$" & x - 1
SolverADD CellRef:="$BJ$" & x, Relation:=2, FormulaText:="$BG$" & x
SolverOk SetCell:="$BP$" & x, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$BM$" & x & ":$BO$" & x
SolverDelete CellRef:="$BK$" & x - 1, Relation:=2, FormulaText:="$BH$" & x - 1
SolverADD CellRef:="$BK$" & x, Relation:=2, FormulaText:="$BH$" & x
SolverOk SetCell:="$BP$" & x, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$BM$" & x & ":$BO$" & x
SolverDelete CellRef:="$BL$" & x - 1, Relation:=2, FormulaText:="$BI$" & x - 1
SolverADD CellRef:="$BL$" & x, Relation:=2, FormulaText:="$BI$" & x
SolverOk SetCell:="$BP$" & x, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$BM$" & x & ":$BO$" & x
SolverDelete CellRef:="$BM$" & x - 1, Relation:=3, FormulaText:="$BQ$" & x - 1
SolverADD CellRef:="$BM$" & x, Relation:=3, FormulaText:="$BQ$" & x
SolverOk SetCell:="$BP$" & x, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$BM$" & x & ":$BO$" & x
SolverDelete CellRef:="$BN$" & x - 1, Relation:=3, FormulaText:="$BQ$" & x - 1
SolverADD CellRef:="$BN$" & x, Relation:=3, FormulaText:="$BQ$" & x
SolverOk SetCell:="$BP$" & x, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$BM$" & x & ":$BO$" & x
SolverDelete CellRef:="$BO$" & x - 1, Relation:=3, FormulaText:="$BQ$" & x - 1
SolverADD CellRef:="$BO$" & x, Relation:=3, FormulaText:="$BQ$" & x
SolverSolve
Next
End Sub
```

Figura A.3.1 - Código utilizado para definir os parâmetros e restrições do modelo de Malys et al. (2014)

A.4 Análise das condições climáticas

As condições climáticas representam um fator fundamental no desempenho energético dos edifícios e das soluções construtivas. Deste modo, apresenta-se neste anexo as condições climáticas referentes à localização dos casos de estudo e da estação meteorológica do Instituto Superior Técnico (METEO-IST). Como alguns dos parâmetros não foram monitorizados durante as campanhas experimentais, recorreram-se aos dados do METEO-IST e simulações com o EnergyPlus (2013) do ficheiro climático do Ano Base (2005) em Lisboa.

A.4.1. Temperatura do ar exterior

A temperatura do ar exterior ao longo das campanhas experimentais de inverno e de verão são variáveis e influenciam tanto os fluxos de calor na fachada e cobertura verdes como os fenómenos das plantas. Nas Figuras (A.4.1) e (A.4.2) apresentam-se os valores da temperatura para cada dia das campanhas experimentais de Inverno e de Verão com o intuito de entender as amplitudes térmicas durante as mesmas e perceber quais os períodos que têm maiores necessidades de arrefecimento e de aquecimento.

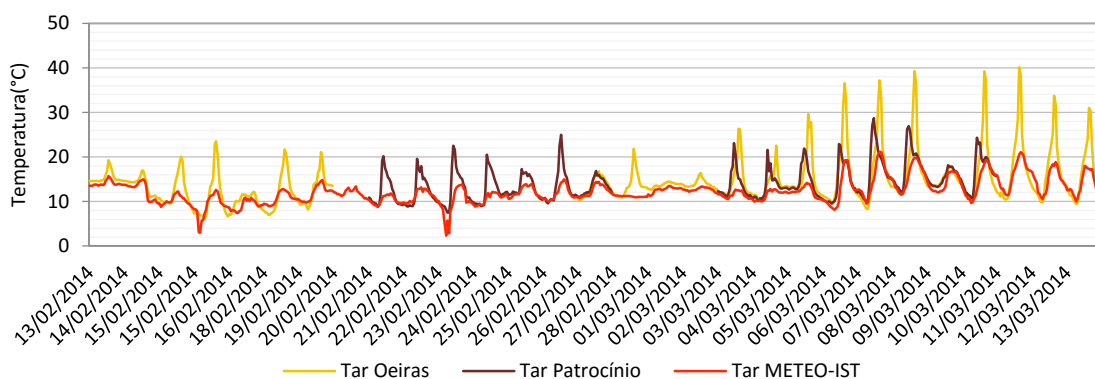


Figura A.4.1 - Temperatura do ar exterior no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio e da estação METEO-IST, Fevereiro e Março

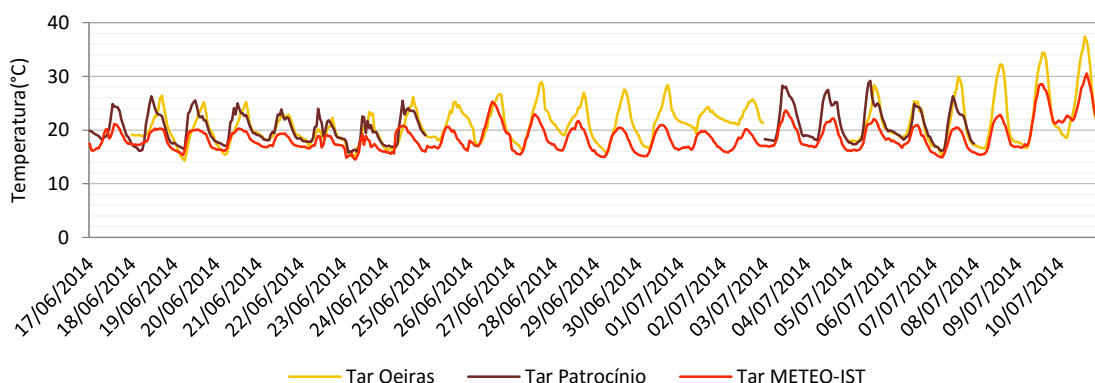


Figura A.4.2 - Temperatura do ar exterior no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio e da estação METEO-IST, Junho e Julho

Durante a campanha experimental de inverno, as temperaturas do ar exterior oscilaram entre 6,10°C e 40,14°C para o Atlântico Blue Studio (Oeiras), 7,47°C e 28,73°C para a Travessa do Patrocínio e 2,3°C e 21,18°C para a METEO-IST. Na campanha experimental de verão as temperaturas do ar exterior oscilaram entre 14,3°C e 37,5°C para o Atlântico Blue Studio (Oeiras), 15,8°C e 29,2°C para o caso de estudo da Travessa do Patrocínio, e 14,5°C e 30,6°C para o METEO-IST.

A.4.2. Humidade relativa do ar

A humidade relativa do ar é um fator determinante na retenção de calor, visto que em lugares mais secos, há menor retenção de calor bem como maior diferença entre temperaturas máxima e mínima. É de esperar que na campanha de verão haja menor humidade que na campanha experimental de inverno. Nas Figuras (A.4.3) e (A.4.4) apresentam-se os valores da humidade para cada dia das campanhas experimentais.

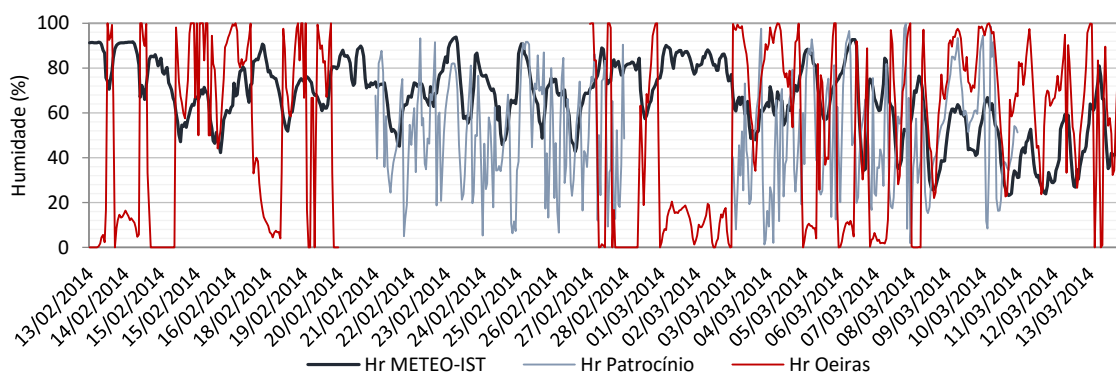


Figura A.4.3 - Humidade relativa no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio e da estação METEO-IST, campanha de verão

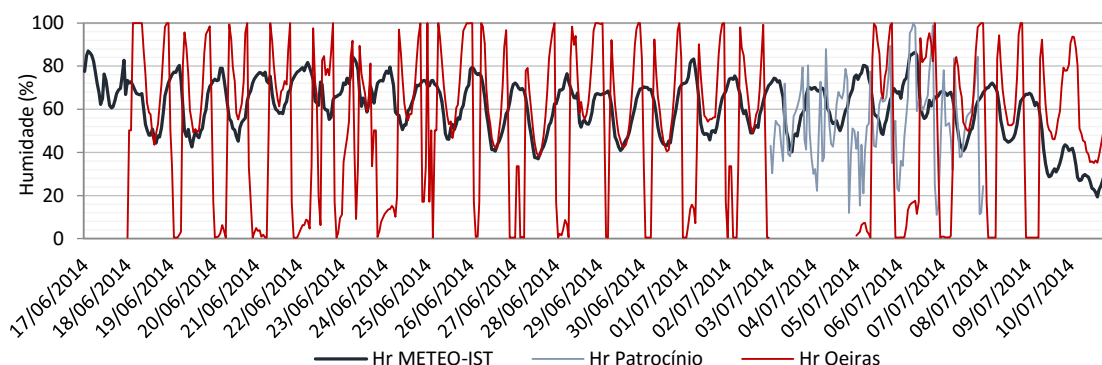


Figura A.4.4 – Humidade relativa no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio e da estação METEO-IST, campanha de verão

De acordo com as Figuras (A.4.3) e (A.4.4) tornou-se complicado distinguir os valores da humidade relativa do ar nos dois casos de estudo, sendo que em Oeiras ocorrem oscilações durante o mesmo dia entre 0% e 100. Na figura (A.4.4) foi possível verificar que a campanha experimental de verão na Travessa do Patrocínio não está completa, visto o aparelho só ter

funcionado a partir de 29 de Junho de 2014. Assim, decidiu-se utilizar os valores recolhidos pelo METEO-IST para caracterizar a humidade relativa em Oeiras e parte da campanha experimental de Verão da Travessa do Patrocínio.

A.4.3. Velocidade do Vento

A velocidade do vento do ar está dependente da localização do edifício e do período horário. Afeta diretamente o fluxo de calor na fachada e cobertura como também os fenómenos das plantas. Deste modo, a localização dos casos de estudo perto do rio e do oceano permitiu a ocorrência de brisa marítima (ar desloca-se do mar para a superfície terrestre) durante o dia e de brisa terrestre (ar desloca-se da superfície terrestre para o mar) durante a noite. Nas Figuras (A.4.5) e (A.4.6) encontram-se os valores da velocidade do vento recolhidas pelo METEO-IST para cada dia das campanhas experimentais.

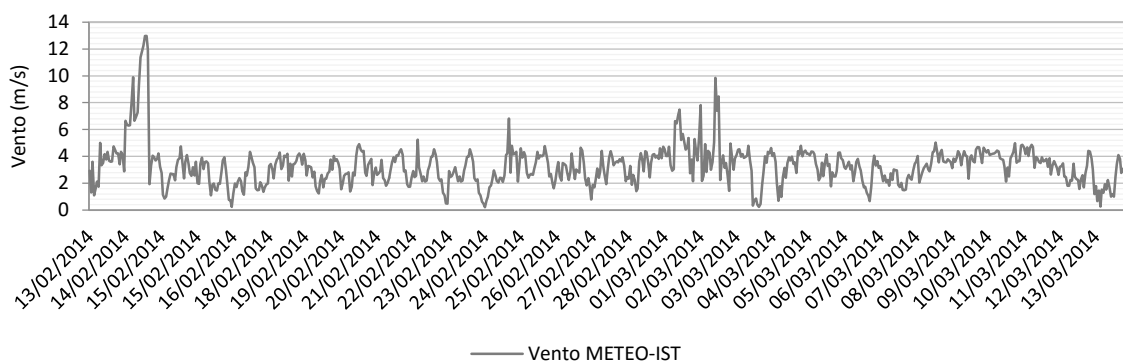


Figura A.4.5 – Velocidade do vento utilizada no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio da estação METEO-IST, campanha de Inverno

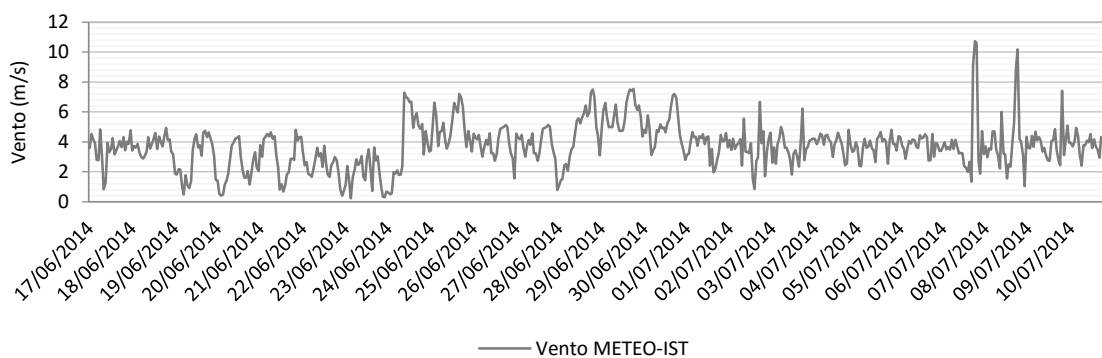


Figura A.4.6 – Velocidade do vento utilizada no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio da estação METEO-IST, campanha de Verão

O parâmetro vento não foi monitorizado durante as campanhas experimentais, no entanto em dias pontuais realizaram-se medições do mesmo, verificando-se que os dados eram ligeiramente inferiores aos recolhidos pelo METEO-IST. A diferença dos valores da velocidade do vento deve-se às zonas mais resguardadas que se encontram as fachadas dos edifícios. Na campanha

experimental de inverno, a velocidade do vento oscilou entre 0,23m/s e 12,97m/s, enquanto para a campanha experimental de verão, a velocidade do vento oscilou entre 0,24m/s e 10,73m/s.

A.4.4. Radiação solar incidente

A radiação solar tem uma grande influência nas trocas de calor nas fachadas dos edifícios. Concluiu-se que na presença de vegetação, o efeito do aquecimento da superfície exterior da fachada pela radiação solar é consideravelmente atenuado. Nas Figuras (A.4.7) e (A.4.8) apresentam-se as comparações entre os valores das radiações simuladas através do EnergyPlus (2013) para o ano corrente (2014) e ano base (2005) bem como as radiações experimentais de ambos os casos de estudo para cada dia das campanhas experimentais.

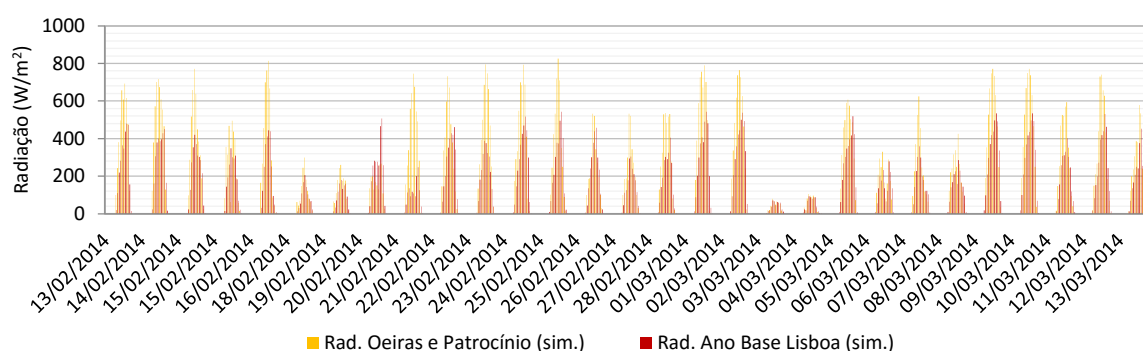


Figura A.4.7 – Comparação entre Radiação solar incidente utilizada no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio e a radiação solar do EnergyPlus (2013) do Ano Base em Lisboa, campanha de inverno

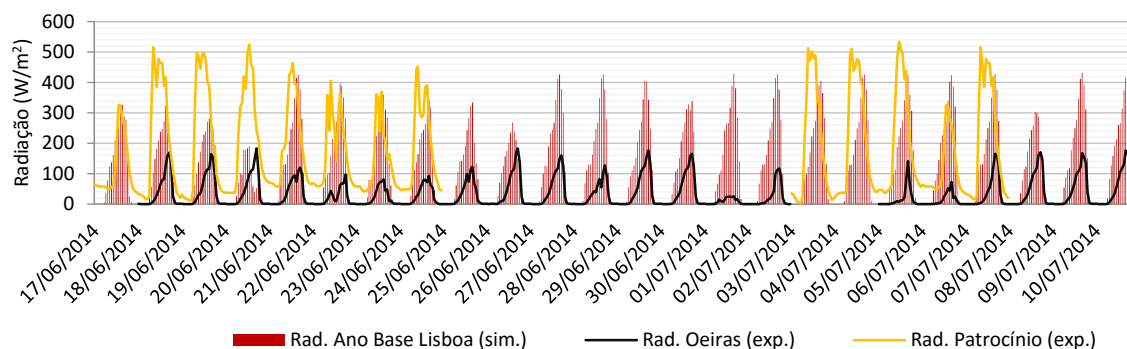


Figura A.4.8 – Comparação entre Radiação solar incidente utilizada no caso de estudo em Oeiras e Travessa do Patrocínio e a radiação solar do EnergyPlus (2013) do Ano Base em Lisboa, campanha de verão

A radiação solar incidente na fachada para a campanha experimental de inverno de ambos os casos de estudo foi obtida através de uma simulação do EnergyPlus (2013) e teve um valor máximo de 825,91W/m², enquanto no ano Base do ficheiro climático de Lisboa apresentou um valor máximo de 543,3W/m². Na campanha experimental de verão, a radiação teve um valor máximo de 183,61W/m² em Oeiras e 533,33W/m² na Travessa do Patrocínio, enquanto para o

ano Base registou o valor de 432,71W/m². A radiação solar incidente na fachada da Travessa do Patrocínio na campanha experimental de Verão não exibiu mínimos de 0W/m², uma vez que, encontravam-se candeeiros na envolvente da mesma.

A.4.5. Precipitação

A precipitação tem especial importância na quantidade de água no substrato e no comportamento das plantas, influenciando o consumo de energia do edifício. Este efeito não foi avaliado nos modelos por inexistência de valores monitorizados durante as campanhas experimentais. No entanto, recolheram-se os dados da estação METEO-IST a fim de se perceber se ocorreu precipitação. Nas Figuras (A.4.9) e (A.4.10) apresenta-se a precipitação diária em Lisboa durante as campanhas experimentais.

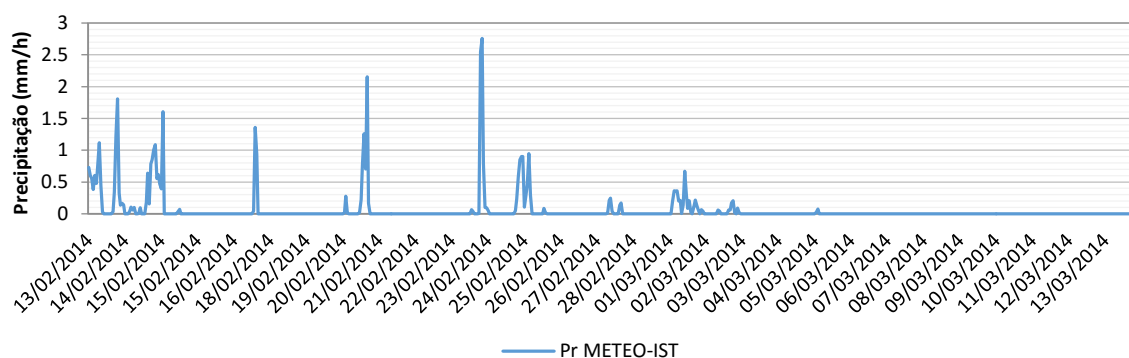


Figura A.4.9 – Precipitação em Lisboa através do METEO-IST, campanha de inverno

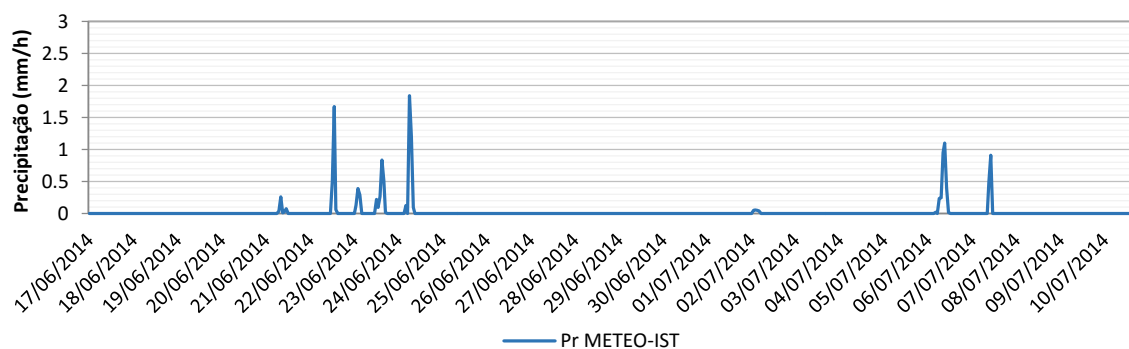


Figura A.4.10 – Precipitação em Lisboa através do METEO-IST, campanha de verão

Durante a campanha experimental de inverno, segundo a METEO-IST, a precipitação teve como valor máximo 2,76mm/h, enquanto no verão registou o valor máximo de 1,84 mm/h. A partir da análise das figuras (A.4.9) e (A.4.10) verifica-se que ocorreram maiores períodos de precipitação durante o mês de Fevereiro.

A.5 Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental no Atlântico Blue Studio

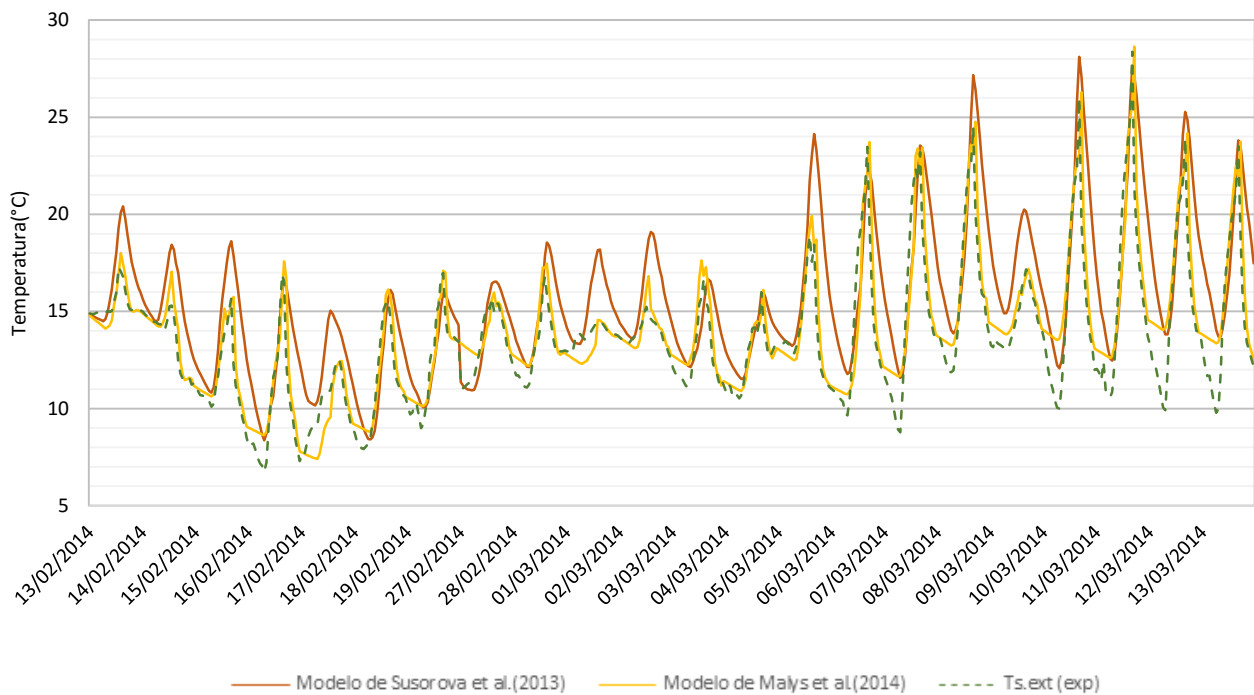


Figura A.5.1 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, zona 2, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio

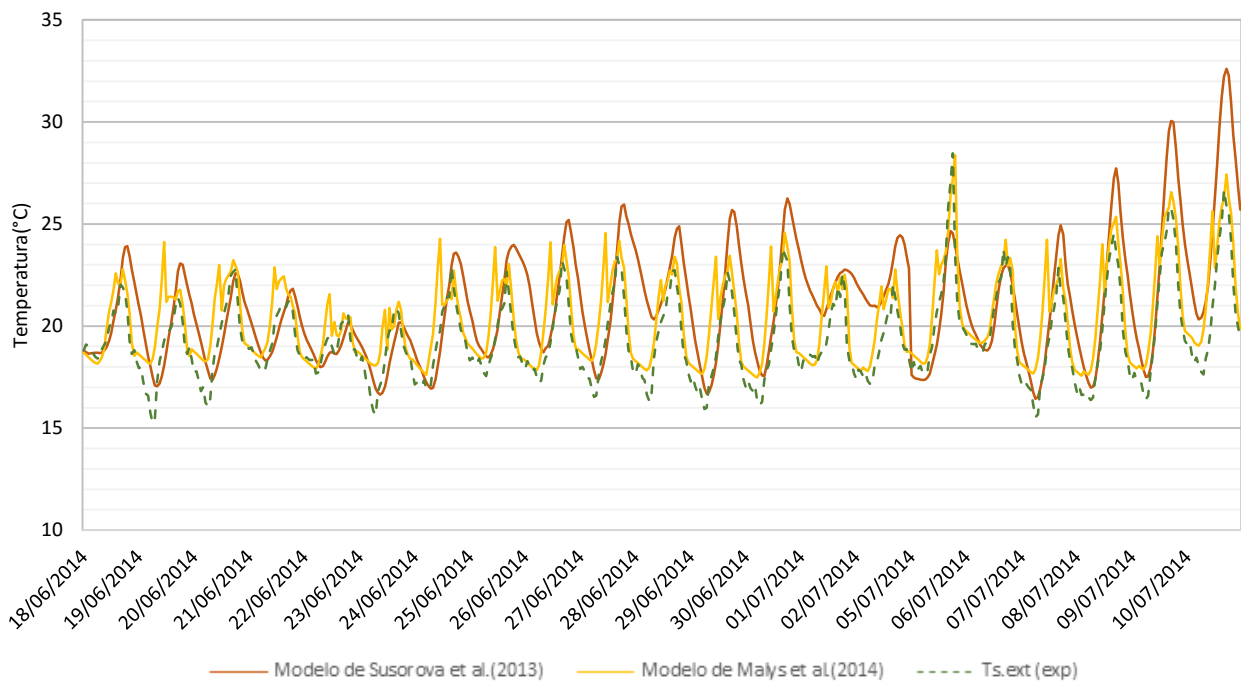


Figura A.5.2 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, zona 2, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio

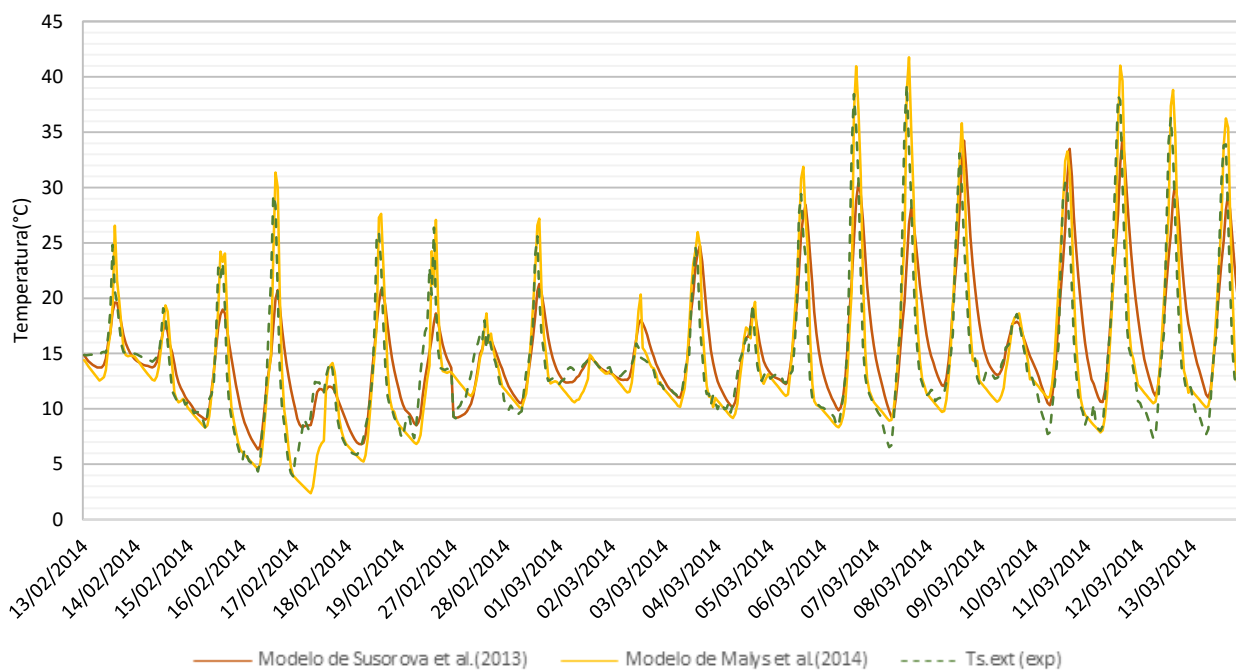


Figura A.5.3 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, cobertura, Fevereiro e Março, Atlântico Blue Studio

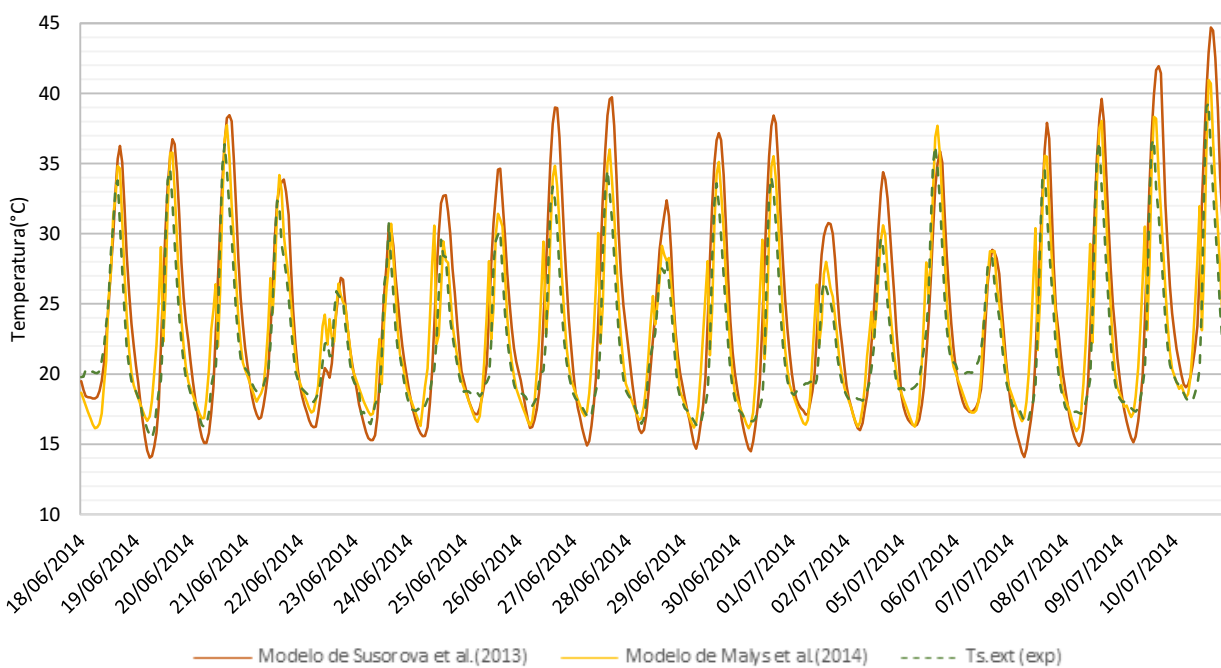


Figura A.5.4 - Comparação da temperatura superficial exterior dos modelos e experimental, cobertura, Junho e Julho, Atlântico Blue Studio