

SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE COBERTURAS VERDES

Marcelo Ferreira da Rocha e Silva

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.^a Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira
Pinto França de Santana

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

Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Maio de 2014

Resumo

As coberturas verdes são uma solução para aumentar a área verde no meio urbano, para adaptar as cidades às condições climáticas extremas e na redução do consumo de energia do sistema de climatização e das emissões de CO₂. O presente estudo, tem o objetivo de analisar o impacto das coberturas verdes no desempenho energético dos edifícios, utilizando o programa computacional de simulação energética EnergyPlus, que possui um modelo de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008). Este modelo possibilita a definição de vários parâmetros nomeadamente a altura das plantas, a densidade da vegetação (LAI) e a espessura do substrato. Foi realizada uma validação do modelo utilizando resultados das campanhas de monitorização efetuados por Valadas (2014) em três edifícios localizados em Lisboa com coberturas verdes, revelando que o modelo simula corretamente esta solução construtiva. Numa primeira fase foi efetuado uma análise de sensibilidade do modelo num compartimento totalmente adiabático, exceto a cobertura em análise. Os resultados revelaram que coberturas verdes com solos mais espessos, plantas mais altas e mais densas são a melhor solução para reduzir o consumo de energia do sistema de climatização. Numa segunda fase, investigou-se as poupanças de energia do sistema de climatização de três tipologias de coberturas verdes (extensiva, semi-intensiva e intensiva) relativamente a uma cobertura escura e uma cobertura clara, para os três casos de estudo, localizados em Lisboa, e para vários níveis de isolamento térmico da cobertura. Os resultados demonstraram que as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva podem reduzir os consumos de energia, principalmente para níveis de isolamento térmico inferiores, quando comparados com as coberturas escuras e claras. Pelo contrário, as coberturas extensivas apenas revelaram ser um benefício para a redução dos consumos energéticos relativamente a coberturas escuras e não isoladas termicamente, sugerindo serem uma solução para edifícios antigos.

Palavras-chave: Coberturas verdes, Programa de simulação energética, EnergyPlus, Redução dos consumos de energia

Abstract

Green roofs are key to providing living space, adapting cities to the more extreme climatic conditions and reducing energy use and CO₂ emissions. This study explores the impact of green roofs on building energy performance using the building energy simulation program EnergyPlus. An integrated green roof simulation module, developed by Sailor (2008), was used, which allows the energy modeller to explore green roof design options including growing media depth and vegetation characteristics such as plant type, height and leaf area index. The model has been tested successfully using observations measured by Valadas (2014) from three monitored green roofs in Lisbon. A model sensitivity analysis was conducted on an adiabatic compartment, except the roof, and the findings showed that a combination of thicker soil, higher plant height and higher value of leaf area index (LAI) is the best solution to improve the building energy performance. Also, it was found that irrigation levels are very important in reducing cooling energy demand. Other simulations were conducted for both black and white roofs and three variations of green roofs (extensive, semi-intensive and intensive) for the three case studies located in Lisbon, and with different levels of roof insulation. The results reveal that semi-intensive and intensive green roofs can provide a reduction on energy consumptions when compared to black and white roofs, mostly for lower levels of roof insulation, and extensive green roofs are only a benefit for a non-insulated black roof, suggesting a solution for energy savings on old buildings.

Keywords: Green roofs, Building energy simulation, EnergyPlus, Energy consumptions reduction

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 à Prof.^a Cristina Matos Silva e à Prof.^a Maria da Glória Gomes, pela disponibilidade, paciência, e acompanhamento durante a realização deste trabalho.

Ao Eng. Morgado Fonseca e ao Eng. Carlos Oliveira pela disponibilidade e, que permitiram a montagem dos equipamentos de monitorização na Fundação Calouste Gulbenkian e na ETAR de Alcântara, respetivamente.

Agradeço também a todos os meus amigos e família pelo interesse, apoio e compreensão que demonstraram durante este período. Em especial gostaria de agradecer aos meus pais, ao meu irmão e à Catarina Rocha pela paciência, apoio e incentivo nesta última fase do meu percurso académico.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. ENQUADRAMENTO | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 3 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 4 |
| 2. COBERTURAS VERDES..... | 5 |
| 2.1. CONTEXTO HISTÓRICO | 5 |
| 2.2. SISTEMA CONSTRUTIVO | 8 |
| 2.3. TIPOS DE COBERTURAS VERDES | 10 |
| 2.3.1. <i>Coberturas verdes extensivas</i> | 10 |
| 2.3.2. <i>Coberturas verdes intensivas</i> | 11 |
| 2.3.3. <i>Coberturas verdes semi-intensivas</i> | 11 |
| 2.3.4. <i>Coberturas castanhas</i> | 11 |
| 2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS | 12 |
| 2.4.1. <i>Vantagens estéticas e de utilização</i> | 13 |
| 2.4.2. <i>Vantagens ambientais</i> | 14 |
| 2.4.2.1. Biodiversidade | 14 |
| 2.4.2.2. Retenção e melhoria da qualidade das águas pluviais | 14 |
| 2.4.2.3. Qualidade do ar | 15 |
| 2.4.2.4. Efeito ilha de calor | 15 |
| 2.4.2.5. Transmissão sonora | 15 |
| 2.4.3. <i>Vantagens económicas</i> | 15 |
| 2.4.4. <i>Desvantagens</i> | 16 |
| 2.5. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE COBERTURAS VERDES | 18 |
| 2.5.1. <i>Consumo energético</i> | 22 |
| 2.5.2. <i>Coefficiente de transmissão térmica, temperaturas, evapotranspiração e albedo da vegetação</i> . | 25 |
| 2.5.3. <i>Considerações finais</i> | 29 |
| 3. ENERGYPLUS | 31 |
| 3.1. DESCRIÇÃO DO ENERGYPLUS | 31 |
| 3.2. CAMPOS DE ENTRADA | 33 |
| 3.2.1. <i>Thermal Zones and Surfaces</i> | 33 |
| 3.2.1.1. Global Geometry Rules | 34 |
| 3.2.1.2. Zone..... | 34 |
| 3.2.1.3. Building Surface: Detailed * | 35 |
| 3.2.1.4. Fenestration Surface: Detailed * | 35 |
| 3.2.1.5. Window Property: Shading Control * | 36 |
| 3.2.1.6. Internal Mass * | 36 |
| 3.2.1.7. Shading: Zone: Detailed * | 36 |
| 3.2.2. <i>Simulation Parameters</i> | 38 |
| 3.2.2.1. Version..... | 38 |
| 3.2.2.2. Simulation Control..... | 38 |
| 3.2.2.3. Building * | 38 |
| 3.2.2.4. Shadow Calculation | 39 |
| 3.2.2.5. Surface Convection Algorithm: Inside | 39 |
| 3.2.2.6. Surface Convection Algorithm: Outside | 40 |
| 3.2.2.7. Heat Balance Algorithm..... | 40 |
| 3.2.2.8. Timestep | 40 |
| 3.2.3. <i>Location and Climate</i> | 41 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.3.1. | Run Period * | 41 |
| 3.2.3.2. | Weather File | 42 |
| 3.2.3.3. | Site: Precipitation | 43 |
| 3.2.3.1. | Roof Irrigation | 43 |
| 3.2.4. | <i>Schedules</i> | 44 |
| 3.2.4.1. | Schedule Type Limits | 44 |
| 3.2.4.2. | Schedule: Day: Hourly * | 45 |
| 3.2.4.3. | Schedule: Week: Daily * | 45 |
| 3.2.4.4. | Schedule: Year * | 45 |
| 3.2.5. | <i>Surface Construction Elements</i> | 46 |
| 3.2.5.1. | Material * | 46 |
| 3.2.5.2. | Material: AirGap * | 47 |
| 3.2.5.3. | Material: RoofVegetation * | 47 |
| 3.2.5.4. | Window Material: Glazing * | 49 |
| 3.2.5.5. | Window Material: Gas * | 49 |
| 3.2.5.6. | Window Material: Shade * | 49 |
| 3.2.5.7. | Window Material: Blind * | 49 |
| 3.2.5.8. | Construction * | 50 |
| 3.2.6. | <i>Internal Gains</i> | 51 |
| 3.2.6.1. | Lights * | 51 |
| 3.2.7. | <i>Zone Airflow</i> | 52 |
| 3.2.7.1. | Zone Infiltration: Design Flow Rate* | 52 |
| 3.2.8. | <i>HVAC Template</i> | 53 |
| 3.2.8.1. | HVAC Template: Thermostat | 53 |
| 3.2.8.2. | HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System | 53 |
| 3.2.9. | <i>Output Reporting</i> | 54 |
| 3.2.9.1. | Output: Variable: Dictionary (<i>Output: Variável: Dicionário</i>) | 54 |
| 3.2.9.2. | Output: Variable | 54 |
| 3.2.9.3. | Output: SQLite | 55 |
| 3.3. | MODELO DE COBERTURAS VERDES | 55 |
| 4. | DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO E VALIDAÇÃO | 59 |
| 4.1. | CASO DE ESTUDO 1: GULBENKIAN – CABINE DE SOM | 59 |
| 4.1.1. | <i>Localização e caracterização da cabine de som</i> | 59 |
| 4.1.2. | <i>Modelo da cabine de som no EnergyPlus</i> | 60 |
| 4.1.2.1. | Caraterísticas dos materiais | 61 |
| 4.1.2.2. | Cobertura verde de referência | 62 |
| 4.1.2.3. | Calendários | 63 |
| 4.1.2.4. | Ganhos Internos e ventilação | 63 |
| 4.1.3. | <i>Validação do modelo</i> | 63 |
| 4.1.3.1. | Considerações da validação | 63 |
| 4.1.3.2. | Validação | 64 |
| 4.2. | CASO DE ESTUDO 2: GULBENKIAN – SALA DE ENSAIOS | 66 |
| 4.2.1. | <i>Localização e caracterização da sala de ensaios</i> | 66 |
| 4.2.2. | <i>Modelo da sala de ensaios no EnergyPlus</i> | 68 |
| 4.2.2.1. | Caraterísticas dos materiais | 69 |
| 4.2.2.2. | Cobertura verde de referência | 70 |
| 4.2.2.1. | Calendários | 70 |
| 4.2.2.2. | Ganhos Internos e ventilação | 71 |
| 4.2.3. | <i>Validação do modelo</i> | 71 |
| 4.3. | CASO DE ESTUDO 3: ETAR – SALA DE REUNIÕES | 75 |
| 4.3.1. | <i>Localização e caracterização da sala de reuniões</i> | 75 |
| 4.3.2. | <i>Modelo da sala de reuniões no EnergyPlus</i> | 76 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3.2.1. | Caraterísticas dos materiais..... | 77 |
| 4.3.2.2. | Cobertura verde de referência | 79 |
| 4.3.2.3. | Calendários | 79 |
| 4.3.2.4. | Ganhos Internos e ventilação | 80 |
| 4.3.3. | <i>Validação do modelo</i> | 80 |
| 4.4. | CONSIDERAÇÕES FINAIS DA VALIDAÇÃO..... | 82 |
| 5. | DESEMPENHO ENERGÉTICO DE COBERTURAS VERDES | 83 |
| 5.1. | ANÁLISE DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE LISBOA | 83 |
| 5.1.1. | <i>Temperatura</i> | 83 |
| 5.1.2. | <i>Radiação solar</i> | 84 |
| 5.1.3. | <i>Precipitação</i> | 84 |
| 5.2. | ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DA COBERTURA VERDE SEM UTILIZAR O MODELO DE SAILOR (2008)..... | 85 |
| 5.3. | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE SAILOR (2008) – CABINE DE SOM | 87 |
| 5.3.1. | <i>Parâmetros da cobertura verde: vegetação e solo</i> | 87 |
| 5.3.2. | <i>Tipologias de coberturas verdes</i> | 90 |
| 5.4. | ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE COBERTURAS – CABINE DE SOM..... | 93 |
| 5.5. | ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE COBERTURAS PARA OS TRÊS CASOS DE ESTUDO | 98 |
| 6. | CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... | 105 |
| 6.1. | CONCLUSÕES..... | 105 |
| 6.2. | DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 106 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 107 |
| | ANEXO A | I |
| | ANEXO B | IX |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Variação da temperatura média da superfície do solo e dos oceanos relativamente ao período 1961-1990 (adaptado de IPCC, 2013) | 1 |
| Figura 1.2 - Ciclo de vida de utilização de energia num edifício e consumo de energia por setores | 2 |
| Figura 1.3 - Estimativa das trocas de calor num edifício (LiderA, 2014) | 3 |
| Figura 2.1 – Representação dos jardins suspensos da Babilónia, imaginados por Martin Heemskerck. (Jardins Suspensos da Babilónia, 2014) | 6 |
| Figura 2.2 – Cobertura ajardinada, Islândia (Stater, 2008) | 6 |
| Figura 2.3 - Contraste da cidade de Linz antes e depois da aprovação da lei de 1985 (adaptado de Living Roofs, 2014) | 7 |
| Figura 2.4 – Hospital em Deventer, Holanda, com coberturas vivas (Living Roofs, 2014) | 7 |
| Figura 2.5 - Cobertura verde em Pequim, China (Treehunger, 2014) | 8 |
| Figura 2.6 - Coberturas verdes no complexo de escritórios e de entretenimento Potsdamer Platz em Berlim, Alemanha (The solutions journal, 2014) | 8 |
| Figura 2.7 – Coberturas vivas na Vila Olímpica e Paralímpica de Vancouver, Canada (GreenRoofs Projects, 2014) | 8 |
| Figura 2.8 - Cobertura verde sobre a estação de metro da Trindade no Porto (Estação da trindade, 2014) | 8 |
| Figura 2.9 – Sistema construtivo de uma cobertura verde (adaptado de Arq e Tec, 2014) | 9 |
| Figura 2.10 – Pormenor da camada de drenagem com pequenos depósitos (Green Roofs Blocks, 2014) | 9 |
| Figura 2.11 – Exemplo de uma cobertura verde: a) extensiva; b) intensiva; c) semi-intensiva (Coberturas Verdes, 2014) | 11 |
| Figura 2.12 - Exemplo de uma cobertura castanha depois da construção e ao fim de dois anos da construção (adaptado de Brown Roofs, 2014) | 12 |
| Figura 2.13 – Hotel em Blumau, Áustria – A vila térmica (Thermal Village, 2014) | 13 |
| Figura 2.14 - Cobertura verde num edifício de Chicago (Open House Chicago, 2014) | 13 |
| Figura 2.15 - Cobertura do Hotel Fairmont em Vancouver, Canadá (Hotel Fairmont, 2014) | 14 |
| Figura 2.16 - Exemplo de um sistema de recuperação de água. (adaptado de Ascione et al., 2013) . | 17 |
| Figura 2.17 - Relação linear entre o teor de humidade e do valor de U (adaptado de Kotsiris et al., 2012) | 26 |
| Figura 2.18 – Temperaturas da folhagem, da superfície do solo, da superfície exterior da laje da cobertura verde e da convencional, e do ambiente exterior (adaptado de Jaffal, Ouldboukhite e Belarbi, 2012) | 27 |
| Figura 2.19 - Comparação das trocas de energia de uma cobertura verde com solo em condições secas e húmidas e de uma cobertura convencional (adaptado de Lazzarin, Castellotti e Busato, 2005) | 28 |
| Figura 3.1 - Aspeto do EP-Launch, do EnergyPlus | 32 |
| Figura 3.2 - Aspeto do IDF-Editor, do EnergyPlus | 32 |
| Figura 3.3 - Aspeto do programa GoogleSketchup com as barras de ferramentas do Plug-in Open Studio | 32 |
| Figura 3.4 - Grupo Thermal Zones and Surfaces | 37 |
| Figura 3.5 - Objeto Global Geometry Rules | 37 |
| Figura 3.6 - Objeto Zone | 37 |
| Figura 3.7 - Objeto Building Surface: Detailed | 37 |
| Figura 3.8 – Objeto Fenestration Surface: Detailed | 37 |
| Figura 3.9 - Objeto Window Property: Shading Control | 37 |
| Figura 3.10 – Objeto Internal Mass | 37 |
| Figura 3.11 - Objeto Shading: Zone: Detailed | 37 |
| Figura 3.12 - Grupo Simulation Parameters | 41 |
| Figura 3.13 - Objeto Version | 41 |
| Figura 3.14 - Objeto Simulation Control | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.15 - Objeto Building..... | 41 |
| Figura 3.16 –Objeto Shadow Calculation..... | 41 |
| Figura 3.17 – Surface Convection Algorithm: Inside..... | 41 |
| Figura 3.18 - Objeto Surface Convection Algorithm: Outside | 41 |
| Figura 3.19 - Objeto Heat Balance Algorithm..... | 41 |
| Figura 3.20 – Objeto Time Step | 41 |
| Figura 3.21 – Grupo Location and Climate | 44 |
| Figura 3.22 - Objeto Run Period | 44 |
| Figura 3.23 - Objeto Site: Precipitation | 44 |
| Figura 3.24 – Objeto Roof Irrigation | 44 |
| Figura 3.25 - Grupo Schedules | 46 |
| Figura 3.26 – Objeto Schedules Type Limits | 46 |
| Figura 3.27 – Objeto Schedule: Week: Daily | 46 |
| Figura 3.28 – Objeto Schedule: Day: Hourly..... | 46 |
| Figura 3.29 - Objeto Schedule: Year..... | 46 |
| Figura 3.30 - Grupo Surface Construction Elements | 50 |
| Figura 3.31 - Objeto Material..... | 50 |
| Figura 3.32 - Objeto Material: Air Gap | 50 |
| Figura 3.33 - Objeto Material: Roof Vegetation..... | 50 |
| Figura 3.34 - Objeto Window Material: Glazing | 50 |
| Figura 3.35 - Objeto Window Material: Gas | 50 |
| Figura 3.36 - Objeto Window Material: Shade | 51 |
| Figura 3.37 - Objeto Window Material: Blind..... | 51 |
| Figura 3.38 – Objeto Construction | 51 |
| Figura 3.39 - Grupo Internal Gains..... | 52 |
| Figura 3.40 - Objeto Lights..... | 52 |
| Figura 3.41 - Grupo Zone Airflow | 52 |
| Figura 3.42 - Objeto Zone Infiltration: Design Flow Rate | 52 |
| Figura 3.43 - Grupo HVAC Templates | 53 |
| Figura 3.44 - Objeto HVAC Template: Thermostat | 53 |
| Figura 3.45 - Objeto Zone | 53 |
| Figura 3.46 - Grupo Output Reporting..... | 55 |
| Figura 3.47 - Objeto Output: Variable: Dictionary | 55 |
| Figura 3.48 - Objeto Output: Variable | 55 |
| Figura 3.49 - Objeto Output: SQLite..... | 55 |
| Figura 3.50 - Balanço de energia de uma cobertura verde (adaptado de Sailor, Hutchinson e Bokovoy, 2008)..... | 56 |
| Figura 3.51 - Fluxograma representativo do fluxo de calor na folhagem do modelo de Sailor (2008) . | 57 |
| Figura 3.52 - Fluxograma representativo do fluxo de calor no solo do modelo de Sailor (2008) | 58 |
| Figura 4.1 - Orientação e localização da Cabine de Som na Fundação Calouste Gulbenkian | 59 |
| Figura 4.2 – Vista do exterior da cabine de som..... | 59 |
| Figura 4.3 – Plante e Corte AB da cabine de som..... | 60 |
| Figura 4.4 – Modelo geométrico da cabine de som no Google SketchUp..... | 60 |
| Figura 4.5 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Valadas (2014), na cabine de som..... | 65 |
| Figura 4.6 - Orientação e localização da sala de ensaios na Fundação Calouste Gulbenkian..... | 66 |
| Figura 4.7 – Vista interior da sala de ensaios | 66 |
| Figura 4.8 - Planta da sala de ensaios..... | 67 |
| Figura 4.9 - Corte AB da sala de ensaios | 67 |
| Figura 4.10 – Corte CD da sala de ensaios | 68 |
| Figura 4.11 - Modelo do Google SketchUp da sala de ensaios..... | 68 |
| Figura 4.12 - Cobertura verde sobre a sala de ensaios | 70 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.13 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de ensaios para o período de 21 a 30 de janeiro de 2013..... | 72 |
| Figura 4.14 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de ensaios para o período de 5 a 11 de julho de 2013..... | 73 |
| Figura 4.15 - a) Localização da ETAR de Alcântara (GoogleMaps, 2014); b) Vista da cobertura da ETAR de Alcântara (Jardins do Paço, 2014) | 75 |
| Figura 4.16 - a) Planta da cobertura da ETAR de Alcântara e localização da sala de reuniões (a vermelho); b) Vista do interior da sala de reuniões da ETAR | 75 |
| Figura 4.17 - Planta da sala de reuniões da ETAR de Alcântara | 76 |
| Figura 4.18 - Corte AB da sala de reuniões da ETAR de Alcântara | 76 |
| Figura 4.19 - Modelo da sala de reuniões da ETAR de Alcântara..... | 77 |
| Figura 4.20 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de reuniões para o período de 26 de fevereiro a 18 de março de 2013..... | 80 |
| Figura 4.21 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de reuniões para o período de 8 de junho a 2 de julho de 2013 | 81 |
| Figura 5.1 - Temperatura do ambiente exterior máxima, mínima e média em Lisboa | 83 |
| Figura 5.2 - Radiação Solar máxima e média diária em Lisboa | 84 |
| Figura 5.3 - Precipitação anual em Lisboa (ano 2013) (Precipitação Lisboa, 2014) | 84 |
| Figura 5.4 - Consumo de energia para as combinações de LAI, altura de plantas e espessura do solo para uma rega de 6 mm/dia ativa apenas na estação de arrefecimento..... | 89 |
| Figura 5.5 - Poupança energética de um solo com massa volúmica de 300 kg/m ³ relativamente ao solo da cobertura de referência de 1500 kg/m ³ , com as restantes características iguais para dois caudais de rega..... | 90 |
| Figura 5.6 - Quantidade de água média diária libertada por evapotranspiração das três tipologias de coberturas verdes..... | 92 |
| Figura 5.7 – Consumo de energia para as diferentes soluções de coberturas para a cabine de som | 94 |
| Figura 5.8 -Temperatura superficial exterior do solo /membrana (T _{se} , solo/membrana), temperatura interior (T _{int}) e fluxo de calor superficial interior na laje (F _{si,laje}) para as várias soluções de coberturas na cabine de som, para três dias tipo e sem sistema de climatização ativo | 95 |
| Figura 5.9 - Poupanças de energia das soluções de coberturas verdes relativamente à cobertura escura e clara na cabine de som | 99 |
| Figura 5.10 - Poupanças de energia das soluções de coberturas verdes relativamente à cobertura escura e clara na sala de ensaios..... | 100 |
| Figura 5.11 - Poupanças de energia das soluções de coberturas verdes relativamente à cobertura escura e clara na sala de reuniões | 101 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 - Comparação entre as quatro principais tipologias de coberturas verdes..... | 10 |
| Tabela 2.2 - Resumo das vantagens e desvantagens das coberturas verdes | 12 |
| Tabela 2.3 – Resumo dos estudos de simulação energética | 19 |
| Tabela 2.4 - Resumo dos fatores que influenciam o consumo energético utilizando uma cobertura verde | 29 |
| Tabela 4.1 - Características dos materiais da cabine de som | 61 |
| Tabela 4.2 - Características da cobertura verde de referência da cabine de som | 62 |
| Tabela 4.3 – MBE e RMSE entre os resultados da simulação e os medidos experimentalmente para a cabine de som | 64 |
| Tabela 4.4 – Características dos materiais da sala de ensaios..... | 69 |
| Tabela 4.5 – Características do vidro da sala de ensaios | 70 |
| Tabela 4.6 – Características da proteção solar da sala de ensaios | 70 |
| Tabela 4.7 - MBE e RMSE dos parâmetros da sala de ensaios entre os resultados da simulação e os medidos experimentalmente | 74 |
| Tabela 4.8 - Características dos materiais da sala de reuniões | 78 |
| Tabela 4.9 – Características do vidro da sala de reuniões..... | 78 |
| Tabela 4.10 – Características da proteção solar da sala de reuniões..... | 78 |
| Tabela 4.11 - Características da cobertura verde de referência da sala de reuniões | 79 |
| Tabela 4.12 - MBE e RMSE dos parâmetros da sala de reuniões entre os resultados da simulação e dos medidos experimentalmente | 81 |
| Tabela 4.13 - Comparação dos valores de MBE e RMSE da temp. superficial do solo com outros autores | 82 |
| Tabela 5.1 - Características do material "Terra" | 85 |
| Tabela 5.2 – Consumo energético com e sem o modelo de Sailor (2008) para a cabine de som e temperaturas da superfície exterior do solo e do material "Terra" com 0 cm de XPS..... | 86 |
| Tabela 5.3 - Consumo energético com e sem o modelo de Sailor (2008) para a sala de ensaios e temperaturas da superfície exterior do solo e do material "Terra" com 0 cm de XPS..... | 86 |
| Tabela 5.4 - Consumo energético com e sem o modelo de Sailor (2008) para a sala de reuniões e temperaturas da superfície exterior do solo e do material "Terra" com 0 cm XPS..... | 86 |
| Tabela 5.5 – Consumo de energia para várias combinações dos parâmetros do solo e da vegetação da cobertura verde da cabine de som..... | 88 |
| Tabela 5.6 – Consumo de energia para diferentes combinações com rega ativa de 6mm/dia na estação de arrefecimento e com rega desativa na estação de aquecimento para a cobertura verde da cabine de som | 88 |
| Tabela 5.7 - Consumo de energia para uma cobertura verde com massa volúmica do solo reduzida | 90 |
| Tabela 5.8 – Características das três tipologias de coberturas verdes definidas..... | 91 |
| Tabela 5.9 - Consumo de energia para as três tipologias de coberturas verdes para a cabine de som | 92 |
| Tabela 5.10 - Características das membranas de impermeabilização clara e escura | 93 |
| Tabela 5.11 - Características dos dias-tipo do ficheiro climático de Lisboa | 94 |
| Tabela 5.12 - Benefício das diferentes soluções de coberturas | 97 |
| Tabela 5.13 - Cabine de som | 99 |
| Tabela 5.14 – Sala de ensaios..... | 100 |
| Tabela 5.15 – Sala de reuniões | 101 |
| Tabela 5.16 - Poupança de energia total anual para os casos de estudo das três tipologias de coberturas verdes (CS – cabine de som; SE – Sala de ensaios; SR – sala de reuniões)..... | 103 |

Simbologia

C_f – Coeficiente de transferência de calor na folhagem.

C_{hg} – Coeficiente de transferência de calor no solo

C_{hmf} – Coeficiente de transferência de calor na folhagem em condições atmosféricas quase neutras

C_{hng} – Coeficiente de transferência no solo em condições atmosféricas quase neutras

$C_{p,a}$ – Calor específico do ar a pressão constante (1005,6 J/(kgK))

e_a – Pressão do vapor de ar (Pa)

$e_{f,sat}$ – Pressão do vapor de ar saturado à temperatura da folha (Pa)

f_1 – Fator multiplicativo para o efeito da radiação solar na resistência estomática

f_2 – Fator multiplicativo para o efeito da humidade do solo na resistência estomática

f_3 – Fator multiplicativo adicional para a resistência estomática

F_f – Fluxo de calor na folhagem (W/m²)

F_g – Fluxo de calor na superfície do solo (W/m²)

g – aceleração da gravidade (9,8m/s²)

g_d – Caraterística específica da planta relacionada com a resistência estomática

H_f – Fluxo de calor sensível da folhagem (W/m²)

H_g – Fluxo de calor sensível do solo (W/m²)

I_s – Radiação total de comprimento de onda curta incidente (W/m²)

I_{lr} – Radiação total de comprimento de onda longa incidente (W/m²)

k – Condutibilidade térmica do solo (W/(m.K))

K_v – Constante de von Karman (0,4)

l_f – Calor latente de evaporação à temperatura da folhagem (J/kg)

l_g – Calor latente de vaporização à temperatura da superfície do solo (J/kg)

L_f – Fluxo de calor latente da folhagem (W/m²)

L_g – Fluxo de calor latente do solo (W/m²)

LAI – índice de área de folhas (Leaf área Index) (m²/m²)

M_g – Índice de saturação de humidade do solo

q_a – Razão de mistura do ar

q_{af} – Razão de mistura do ar na zona da folhagem

q_g – Razão de mistura do ar à temperatura da superfície do solo

$q_{f,sat}$ – Razão de mistura saturada à temperatura da folhagem

$q_{g,sat}$ – Razão de mistura saturada à temperatura da superfície do solo

r_a – Resistência aerodinâmica para a difusão do vapor de água (s/m)

r_s – Resistência estomática das folhas (s/m)

$r_{s,min}$ – Resistência estomática mínima da folha (s/m)
 r'' – Teor de humidade na superfície das folhas
 R_{ib} – Número de Richardson
 r_{ch} – Número de turbulência de Schmidt
 T_a – Temperatura do ar à altura do instrumento de medição (Kelvin)
 T_{af} – Temperatura do ar na zona da folhagem (Kelvin)
 T_f – Temperatura da folhagem (Kelvin)
 T_g – Temperatura da superfície do solo (Kelvin)
 W – Velocidade do vento do ficheiro climático (m/s)
 W_{af} – Velocidade do vento na zona da folhagem (m/s)
 z – Profundidade do solo (m)
 Z_a – Altura do instrumento de medição do vento (m)
 Z_d – Deslocamento do plano zero (m)
 $Z_{0,f}$ – Comprimento da rugosidade da folhagem (m)
 $Z_{0,g}$ – Comprimento de rugosidade do solo (m)

Letras gregas:

α_f – Albedo da folhagem
 α_g – Albedo da superfície do solo
 Γ_h – Fator de estabilidade atmosférica
 ϵ_f – Emissividade da folhagem
 ϵ_g – Emissividade da superfície do solo
 ϵ_1 – Relação entre a emissividade do solo e da folhagem ($\epsilon_g + \epsilon_f - \epsilon_f \epsilon_g$)
 ρ_{af} – Densidade do ar à temperatura da folhagem (kg/m³)
 ρ_{ag} – Densidade do ar à temperatura da superfície do solo (kg/m³)
 $\bar{\theta}$ – Teor de humidade média do solo (m³/m³).
 θ_{max} – Nível de humidade máximo do solo (m³/m³)
 θ_r – Teor de humidade residual (m³/m³)
 σ – Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x 10⁻⁸ W/(m²K⁴)).
 σ_f – Fração de cobertura com vegetação

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Desde a revolução industrial, foi registado um crescimento económico assente num consumo elevado de recursos naturais. A queima de combustíveis fósseis e a alteração do uso do solo estão a provocar um crescente aumento da concentração de gases com efeito de estufa (GEE), nomeadamente do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, causando graves alterações climáticas no planeta. A existência de alterações climáticas foi demonstrada cientificamente em 2007 pelo painel internacional IPCC (*Interdisciplinary Panel on Climate Change*), sendo que o atual cenário de alterações climáticas pode ser o maior desafio da humanidade no século XXI (IPCC, 2013).

O efeito de estufa é o processo natural responsável pela regulação da temperatura na Terra. Com o aumento artificial da concentração dos gases de efeitos de estufa na atmosfera, rompe-se o equilíbrio natural e é devolvida uma quantidade maior de radiação, produzindo um aumento artificial da temperatura, ou seja, do fenómeno de aquecimento global. Na Figura 1.1 apresenta-se o aumento da temperatura média da superfície do solo combinada com a superfície dos oceanos desde 1850.

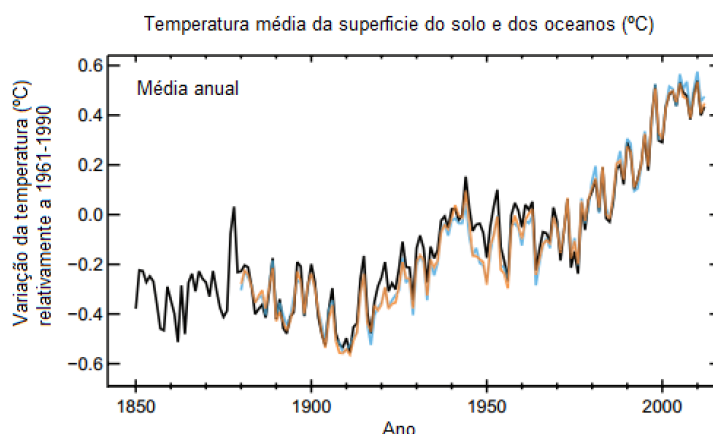


Figura 1.1 - Variação da temperatura média da superfície do solo e dos oceanos relativamente ao período 1961-1990 (adaptado de IPCC, 2013)

Relativamente à média do período entre 1961 e 1990, verificou-se um aumento da temperatura média de cerca de 0,55°C no ano de 2013 e estima-se que continue a crescer. O aquecimento global tem desencadeado consequências graves nomeadamente na alteração dos ciclos de água, na diminuição das massas de gelo nos polos, no aumento do nível médio das águas do mar, no aumento da frequência de fenómenos climáticos extremos e na alteração de ecossistemas (IPCC, 2013).

Neste contexto, e com o principal objetivo de promover um desenvolvimento sustentável, as presentes gerações têm de assumir um compromisso de responsabilidade com o ambiente, garantindo a sua qualidade e manutenção. Não se trata de um problema à escala nacional mas global, onde terá de ser solucionado o problema das alterações climáticas.

O protocolo de Quioto foi o primeiro tratado jurídico internacional que pretende limitar as emissões de GEE dos países desenvolvidos e que apesar de ter sido criado em 1997 em Quioto, no Japão, apenas em 2005 entrou em vigor, com a entrada da Rússia, totalizando 55% das emissões mundiais. Este protocolo propunha-se a reduzir os GEE em pelo menos 5,2% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012.

Em 2008, o Parlamento Europeu aprovou o plano 20-20-20 que foi lançado em Março do ano anterior, sendo o atual plano europeu que pretende contornar as alterações climáticas. Esta política tem como principal objetivo exigir aos países-membros a prática de comportamentos adequados à atual situação climática que visa alcançar em 2020 as seguintes metas (Plano Portugal, 2013):

- 20% de redução das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990 (sendo 15% superior ao proposto pelo protocolo de Quioto).
- 20% de quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto.
- 20% de redução do consumo de energia primária relativamente a 2007

No quadro das metas europeias foi estabelecido, especificamente para Portugal e para o horizonte de 2020, os seguintes objetivos (Plano Portugal, 2013):

- 25% de redução no consumo de energia primária (30% para a Administração Pública).
- 31% consumo final bruto e 10% da energia utilizada nos transportes provir de fontes endógenas renováveis.
- Reduzir a dependência energética do país e garantir a segurança de abastecimento.

O modo de alcançar as metas e os compromissos internacionais assumidos por Portugal, são estabelecidos através do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e do Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PANAER). Neste sentido, a solução passa por dois grandes vetores de ação:

- Maior sustentabilidade das fontes de energia utilizadas
- Maior eficiência no consumo de energia

O presente trabalho insere-se no segundo vetor, de eficiência no consumo de energia e em particular em edifícios. Os edifícios consomem cerca de 40% da energia mundial, demonstrando a clara importância na redução do consumo nestes (Caldas, 2010). Dentro do consumo energético dos edifícios, a fração de energia que é gasta durante a utilização do edifício representa cerca de 84% do total ao longo do seu ciclo de vida, e deste, 37% corresponde aos sistemas de climatização, conforme se pode observar pela Figura 1.2.



Figura 1.2 - Ciclo de vida de utilização de energia num edifício e consumo de energia por setores (Caldas, 2010)

A presente dissertação tem como objeto de estudo o consumo de energia dos sistemas de climatização dos edifícios. Esta otimização do sistema de climatização, com o objetivo de reduzir o consumo de energia, pode ser realizado de diversas formas, nomeadamente na melhoria da eficiência dos equipamentos dos sistemas de climatização, na orientação dos edifícios, na utilização de elementos de sombreamento, na utilização responsável dos equipamentos de AVAC e na melhoria das características dos elementos da envolvente do edifício.

No presente estudo apenas será investigado o impacto da variação das características dos elementos da envolvente, mais precisamente da cobertura, no consumo de energia dos sistemas de climatização em Portugal. Na Figura 1.3 apresenta-se um exemplo de uma estimativa das trocas de calor pelos diferentes elementos construtivos da envolvente de um edifício de habitação, demonstrando a importância no estudo das características de uma cobertura.

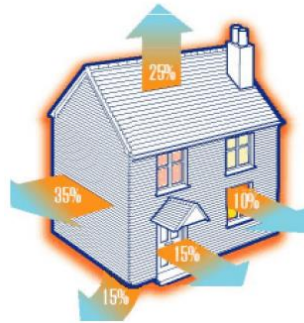


Figura 1.3 - Estimativa das trocas de calor num edifício (LiderA, 2014)

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal analisar a influência da utilização de coberturas verdes no consumo energético do sistema de climatização em edifícios em Portugal. A avaliação do consumo energético foi realizada no programa computacional EnergyPlus que permite uma correta modelação do edifício e das características da envolvente. Como casos de estudo foram seleccionados dois compartimentos na Fundação Calouste Gulbenkian (uma sala de som e uma sala de ensaios) e uma sala de reuniões na ETAR de Alcântara, ambos em Lisboa, que apresentam coberturas verdes na sua constituição e onde foram realizadas campanhas de monitorização térmica, por Valadas (2014).

Para a concretização do objetivo principal foram realizadas as seguintes tarefas:

- Compreender o funcionamento do programa de simulação energética EnergyPlus.
- Comparação entre as medições experimentais e os resultados da modelação de modo a validar o modelo.
- Avaliação do consumo energético de várias soluções de coberturas verdes, variando as características do substrato e da vegetação.
- Análise do consumo de energia de uma cobertura verde relativamente a uma cobertura convencional de alta e baixa refletância.

1.3. Organização do trabalho

O Trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos e 2 anexos, entre os quais se insere este primeiro capítulo de introdução.

O segundo capítulo introduz o tema de coberturas verdes, apresentando o contexto histórico, sistema construtivo, tipologias de coberturas verdes, vantagens e desvantagens da utilização desta solução e por fim uma análise bibliográfica de estudos relativos à análise do consumo energético de edifícios com coberturas verdes.

No terceiro capítulo é abordado o programa de simulação energético EnergyPlus, sendo discutido o seu funcionamento, apresentação dos campos de entrada do programa e uma análise do modelo de coberturas verdes implementado no mesmo.

No quarto capítulo apresentam-se os casos de estudo em termos de características da envolvente e considerações para a modelação. Compara-se ainda as temperaturas e fluxos de calor medidos experimentalmente com os resultados da modelação com o objetivo de validar o modelo.

O quinto capítulo tem como finalidade a avaliação do modelo de coberturas verdes implementado no EnergyPlus, através da comparação dos resultados com uma modelação sem a utilização deste modelo. Também é realizado uma análise do consumo de energia do compartimento da cabine de som, variando as características do substrato e da vegetação da cobertura verde. Avalia-se ainda as temperaturas e fluxos de calor com a utilização de várias soluções de coberturas. Por último, analisam-se os consumos e poupanças de energia utilizando várias soluções de coberturas verdes, comparando-os com coberturas convencionais, para os três casos estudados.

O sexto capítulo é dedicado às conclusões e desenvolvimentos futuros.

No anexo A, como complemento ao trabalho, apresenta-se uma descrição detalhada do modelo de coberturas verdes utilizado, onde se analisa o balanço de energia no solo e na folhagem separadamente.

No anexo B, apresenta-se uma metodologia para a modificação de parâmetros do ficheiro climático do EnergyPlus, que é necessário para a validação do modelo realizado no EnergyPlus.

2. Coberturas verdes

Uma cidade moderna, apresenta tipicamente uma pegada ecológica (quantidade de terra e água necessária para sustentar a população, tendo em conta todos os recursos materiais e energéticos) de 100 a 300 vezes a área total da cidade (Stater, 2008). Acrescentando o facto de o desenvolvimento urbano continuar em ascensão, compreende-se que o *design* urbano deve ser rapidamente mudado (Stater, 2008).

As construções deverão ser uma continuidade do ambiente natural envolvente, de forma a permitir a reestruturação dos ecossistemas, redução da emissão de gases com efeito de estufa e adaptação às mudanças climáticas. Assim, as coberturas verdes surgem como uma solução pois permitem a transformação dos espaços da cobertura em espaços verdes, alterando o uso da área de implementação dos edifícios sem comprometer o desenvolvimento urbano (Stater, 2008).

De um modo simplista, uma cobertura verde é caracterizada por ter instalada, sobre a laje estrutural e camadas intermédias de membranas protetoras e de isolamento, uma camada de substrato (terra) com vegetação (plantas). Em Portugal, são aplicadas várias terminologias para este tipo de coberturas: coberturas verdes, coberturas ajardinadas e coberturas vivas. Internacionalmente, e na língua inglesa, a nomenclatura mais usual é *green roofs* (coberturas verdes), mas também é comum a terminologia *eco roof* (cobertura ecológica), *living roofs* (coberturas vivas) e *vegetated roofs* (coberturas com vegetação).

Este capítulo terá uma componente de enquadramento ao estudo efetuado nesta dissertação, de forma a se compreender a importância de ser analisado e implementado este tipo de solução construtiva. Iniciar-se-á com a apresentação da evolução histórica das coberturas verdes, seguido de uma breve descrição sobre o sistema construtivo, vantagens e desvantagens e, por último, de uma análise bibliográfica pormenorizada relativa ao estado da arte da simulação energética de coberturas verdes.

2.1. Contexto histórico

As coberturas verdes não podem ser consideradas propriamente como uma solução recente. Efetivamente, a adoção de coberturas verdes tem sido uma prática relativamente comum na construção em muitos países por milhares de anos. Os primeiros registos aparecem nas antigas civilizações do rio Tigre e Eufrates, como é exemplo os conhecidos jardins suspensos da Babilónia no século VII e VIII a.C.. Estes jardins consistiam em terraços arborizados, apoiados em colunas de 25 a 100 metros de altura que eram irrigados por água bombeada do rio Eufrates (Jardins suspensos da babilónia. 2014). Continham árvores, flores tropicais e palmeiras de grande porte, contudo, foram destruídos e pouco mais se sabe sobre esta maravilha do mundo antigo. Acredita-se, no entanto, que é uma das primeiras construções deste tipo (Figura 2.1).

Na Noruega e na Islândia também foram encontrados vestígios de construções que utilizavam vegetação como cobertura, datados aproximadamente da mesma altura que os Jardins da Babilónia. Eram utilizadas espécies de relva que eram conhecidas pela sua durabilidade e isolamento térmico nestas zonas mais frias e que ainda hoje são tradição (Figura 2.2) (Stater, 2008).



Figura 2.1 – Representação dos jardins suspensos da Babilónia, imaginados por Martin Heemskerck. (Jardins Suspensos da Babilónia, 2014)



Figura 2.2 – Cobertura ajardinada, Islândia (Stater, 2008)

Os Romanos também utilizaram este tipo de solução de cobertura nas suas construções. Na antiga cidade do Império Romano, Pompeia, foram encontradas várias coberturas deste tipo enterradas durante a erupção do vulcão Vesúvio em 79 d.C. (Peck, Callaghan e Kuhn, 1999). Os Romanos, também colocavam árvores no topo de importantes edifícios como no Mausoléu de Augusto e Adriano. Também os Vikings, por volta do século VIII d.C., utilizavam a vegetação como forma de proteção da chuva e do vento e para isolar coberturas (Peck, Callaghan e Kuhn, 1999).

Foram também encontrados alguns registos históricos de coberturas verdes nos séculos XIII, XIV e XV em várias cidades de França e Itália, sobretudo em palácios e edifícios religiosos onde estas eram implementadas com o objetivo de ornamentar os edifícios. Na Rússia, no século XVII foi instalado um jardim sobre a cobertura do palácio do Kremlin, em Moscovo. Nesta altura, Czarista, os jardins nas coberturas eram considerados como uma característica de ostentação de riqueza (Costa, 2010).

Foi apenas no século XX que as técnicas construtivas de coberturas planas foram desenvolvidas, e implementadas em grande parte dos edifícios. Assim, tornou-se possível a colocação de maiores cargas nas coberturas, o que levou ao desenvolvimento e expansão da tecnologia das coberturas verdes (Neoturf, 2014). Em meados do século XX muitos países já tinham adotado esta solução principalmente na zona Norte da Europa: Alemanha, Suíça, Áustria e Escandinávia, devido ao interesse crescente da qualidade do ambiente urbano.

Na década de 60 do século XX, a tecnologia de coberturas verdes evoluiu significativamente em vários países, particularmente na Suíça e Alemanha. Em 1975, com a criação da Sociedade Alemã de Pesquisa, Desenvolvimento e Construção da Paisagem, iniciou-se uma investigação significativa dos diferentes componentes de uma cobertura verde, de onde resultaram desenvolvimentos e melhorias de diversos elementos como membranas anti-raiz, membranas impermeáveis, sistemas de drenagem de águas pluviais, substratos e vegetação (FLL-Guidelines, 2014).

Na década de 80 do século XX, o mercado alemão de coberturas vivas evoluiu rapidamente com um crescimento anual entre 15 a 20%. Na Alemanha, em 1989 estas já cobriam uma área de um 1 milhão de m², atingindo 10 milhões de m² em 1996. Estes números foram incentivados pelo governo alemão que oferecia entre 35 a 40 marcos por metro quadrado de cobertura verde. Em Estugarda e Mannheim, também na Alemanha, em 1989, foi divulgada uma lei municipal em que obrigava a instalação de coberturas verdes em coberturas planas em edifícios industriais. Também outros estados e cidades europeias adotaram incentivos similares para a construção de coberturas verdes. Um dos casos foi a cidade de Viena, na Áustria, que proporcionava subsídios para as fases de planeamento, construção e manutenção destas coberturas durante três anos de modo a assegurar uma correta manutenção e utilização desta solução (Peck, Callaghan e Kuhn, 1999).

Em 1997, a Áustria, a Alemanha e a Suíça criaram uma Federação Europeia de Associações de coberturas verdes (EFB, sigla em Alemão) com a função principal de promover a utilização de

coberturas e fachadas verdes na Europa, devido à sua reconhecida melhoria da qualidade de vida nas cidades. Até hoje, esta Federação tem crescido com a contribuição das associações de vários países, como a Holanda, Bélgica, Países Escandinavos, Reino Unido, entre outros, para a promoção deste tipo de solução construtiva (EFB, 2014).

Hoje em dia a instalação de coberturas verdes pode ser considerada uma área em franca expansão com uma indústria bastante organizada. O reconhecimento público das vantagens deste tipo de solução, conduziu ao estabelecimento de incentivos governamentais para quem adote este tipo de solução construtiva, como se exemplifica de seguida.

Copenhaga tem um ambicioso objetivo para se tornar na primeira capital do mundo com zero emissões de carbono até 2025. Para cumprir estes objetivos, foi a primeira cidade da Escandinávia a ter uma política de obrigatoriedade para a construção de coberturas verdes. Esta política cobre todas as coberturas que apresentem uma inclinação inferior a 30°, incluindo a remodelação e reconstrução de coberturas antigas (Living Roofs, 2014).

Linz, na Áustria, também apresenta uma política de obrigatoriedade da construção deste tipo de coberturas para edifícios novos com uma área superior a 100 m² e uma inclinação inferior a 20°, assim como um incentivo percentual de 30% do valor total da construção da cobertura verde (Design for London, 2008). Provavelmente possui um dos maiores complexos industriais com coberturas verdes do mundo. Esta política de obrigatoriedade foi publicada em 1985 e como se pode observar na Figura 2.3, verifica-se um grande contraste nas coberturas dos edifícios antes e depois da aprovação (Living Roofs, 2014).

Na Holanda, várias cidades como Rotterdam, Eindhoven ou Amsterdão também possuem subsídios de incentivo à construção destas coberturas que podem chegar até 50% do valor total da instalação (Design for London, 2008). Na Figura 2.4 apresenta-se um hospital em Deventer, Holanda, cuja cobertura é maioritariamente coberta de vegetação. Em Pequim, na China, os jogos Olímpicos de 2008 motivaram a melhoria da qualidade do ar através da transformação de 30% das coberturas de edifícios altos e 60% das coberturas de edifícios baixos (menos de 12 andares) em coberturas verdes (Design for London, 2008). Na Figura 2.5 apresenta-se um exemplo de uma cobertura verde nesta cidade.



Figura 2.3 - Contraste da cidade de Linz antes e depois da aprovação da lei de 1985 (adaptado de Living Roofs, 2014)



Figura 2.4 – Hospital em Deventer, Holanda, com coberturas vivas (Living Roofs, 2014)

A Alemanha é o maior investidor tecnológico a nível das coberturas verdes, onde esta indústria foi estimada, em 2008, em 77 milhões de dólares. Este país apresenta 13,5 km² de coberturas verdes, equivalente a 14% do total de coberturas planas (Castleton, 2010). Em Berlim existe uma política de obrigatoriedade à construção de zonas verdes que é controlada através de um sistema pioneiro denominado de fator de área biótopo (Biotope Area Factor – BAF) que representa a razão entre a área ecologicamente efetiva (jardins, coberturas verdes, etc.) e a área total de implantação do edifício (Design for London, 2008). Para edifícios novos, este fator tem de ser igual ou superior a 0,6. A área

ecologicamente efetiva é ponderada dependendo do tipo de solução apresentada. Por exemplo, para uma cobertura convencional o fator BAF é 0, enquanto numa cobertura verde, este fator pode atingir valores até 0,7, o que representa uma grande motivação à construção destas coberturas, como se tem verificado (Design for London, 2008). Na Figura 2.6 apresenta-se um complexo de escritórios e centro comercial em Berlim com coberturas ajardinadas espalhadas por todo o complexo.



Figura 2.5 - Cobertura verde em Pequim, China (Treehunger, 2014)



Figura 2.6 - Coberturas verdes no complexo de escritórios e de entretenimento Potsdamer Platz em Berlim, Alemanha (The solutions journal, 2014)

Nos Estados Unidos da América, existem várias cidades com políticas de obrigatoriedade e de incentivo à construção das coberturas ajardinadas nomeadamente em Portland, Oregon, onde em todos os edifícios municipais é exigido que pelo menos 70% da cobertura seja ajardinada. Outro incentivo é a redução na taxa da gestão das águas pluviais em 35%. No Canadá, também este tipo de coberturas já é bastante reconhecido e, por exemplo, na zona da Vila Olímpica e Paralímpica de Vancouver (Figura 2.7) foi determinado que pelo menos 50% das coberturas seriam ajardinadas como programa piloto desta solução na cidade. Também em Toronto um programa piloto similar foi inserido nos planos municipais (Design for London, 2008). Em Portugal, não existe qualquer incentivo governamental ou algum regulamento sobre a construção de coberturas verdes. Apesar disso, existem alguns exemplos desta construção, como é o caso da ETAR de Alcântara e da Fundação Calouste Gulbenkian, ambas em Lisboa, e que foram objeto de estudo nesta dissertação. Outro exemplo é a estação de metro da Trindade no Porto (Figura 2.8).



Figura 2.7 – Coberturas vivas na Vila Olímpica e Paralímpica de Vancouver, Canada (GreenRoofs Projects, 2014)



Figura 2.8 - Cobertura verde sobre a estação de metro da Trindade no Porto (Estação da trindade, 2014)

2.2. Sistema construtivo

O sistema construtivo de uma cobertura verde tem como objetivo principal proporcionar um crescimento natural das plantas sem interferir com os elementos construtivos sob esta. Devido à existência de organismos vivos permanentemente em crescimento, esta solução necessita de ter

cuidados complementares comparativamente com uma cobertura convencional. Na Figura 2.9 apresenta-se, de um modo geral, os elementos construtivos de uma cobertura verde e na Figura 2.10 um pormenor da camada de drenagem da cobertura verde.

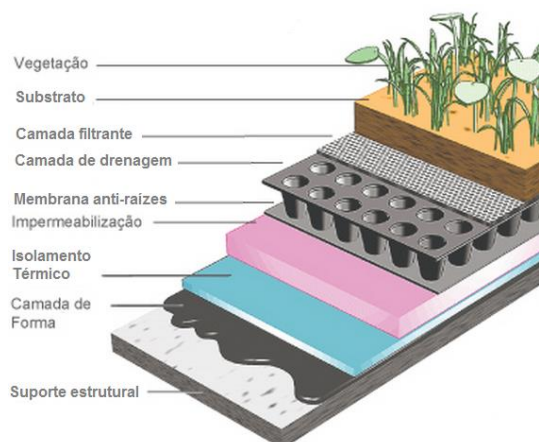


Figura 2.9 – Sistema construtivo de uma cobertura verde (adaptado de Arq e Tec, 2014)



Figura 2.10 – Pormenor da camada de drenagem com pequenos depósitos (Green Roofs Blocks, 2014)

De seguida, apresenta-se uma breve explicação de cada camada, desde o suporte estrutural até à vegetação:

- Suporte estrutural – laje de betão armado, madeira ou outros materiais similares, de função estrutural.
- Camada de forma – betonilha ou outro material similar com a função de nivelar a cobertura.
- Isolamento térmico – camada de Isolamento de XPS ou de um material similar de forma a proporcionar uma condutibilidade térmica inferior.
- Membrana de impermeabilização – existindo um ser vivo neste tipo de coberturas, a presença de água será permanente o que eleva a importância desta camada.
- Membrana anti-raízes – função de proteger as camadas sob esta da vegetação. Camada muito importante para manter uma boa qualidade da cobertura.
- Camada de drenagem – a camada de drenagem tem a função de permitir o escoamento da água em excesso e reter parte dela, de modo a manter uma boa quantidade de água para o correto crescimento das plantas. Na Figura 2.10 apresenta-se um exemplo de uma camada de drenagem usual em novas construções.
- Camada de filtragem – camada de estabilização da camada de drenagem filtrando a água que passa, não deixando passar substrato que poderia entupir os canais de drenagem.
- Substrato – a constituição do substrato pode ser muito variável, em termos de espessura e constituição, dependendo do tipo de cobertura e de vegetação pretendido.
- Vegetação – pode ser muito variada e depende totalmente do objetivo da cobertura.

De referir que a solução construtiva descrita é geral e não abrange todas as tipologias construtivas, como é exemplo o sistema de cobertura invertida, em que o isolamento térmico se encontra sobre a membrana de impermeabilização, ou o sistema de cobertura sem isolamento térmico. Outro aspeto a ter em conta é o facto de várias coberturas ajardinadas existentes atualmente, poderem não possuir algumas das camadas enunciadas. Isso deve-se à possibilidade da construção ser antiga e também, em alguns países como é o caso de Portugal, não existir qualquer regulamento ou norma a cumprir nesta área.

O processo construtivo de uma cobertura verde deve ser bastante cuidado e realizado por especialistas da área. Assim, esta breve descrição não poderá servir como guia para construir uma cobertura deste tipo mas, apenas como um elemento informativo do funcionamento da cobertura verde. Para maiores esclarecimentos, sugere-se a leitura do regulamento Alemão, FLL-Guidelines que é sugerido por grande parte de entidades desta área (FLL-Guidelines, 2014).

Para além do sistema construtivo, aqui descrito de um modo bastante simplista, outras considerações terão de ser tidas em conta na construção de uma cobertura verde por pessoas qualificadas. Estes incluem projetos específicos estruturais (devido ao peso acrescido do substrato e vegetação), de proteção contra incêndios, térmicos e acústicos, de drenagem de águas e o cuidado de seguir planos urbanos de arquitetura (seleção da vegetação de acordo com a envolvente) (IGRA, 2014). Deste modo, a interdisciplinaridade do projeto e a coordenação, entre as diversas áreas nomeadamente do Arquiteto, Engenheiro Civil e Engenheiro Agrónomo, é muito importante para a qualidade da cobertura verde.

2.3. Tipos de coberturas verdes

As coberturas verdes podem ser classificadas em dois grupos principais: coberturas extensivas e intensivas. Existem ainda, duas outras tipologias, a semi-intensiva, que apresenta características intermédias dos dois grupos principais e as coberturas castanhas, que são um conceito mais recente. Estas 4 tipologias estão caracterizados nos subcapítulos seguintes. De notar que o sistema construtivo referido no ponto 2.2 pode ser aplicado a qualquer uma destas tipologias sendo os cuidados a ter proporcionais à complexidade da cobertura verde adotada. Na Tabela 2.1 apresenta-se uma comparação das várias tipologias, onde os valores apresentados são apenas representativos.

Para além das tipologias aqui referidas, pode também aplicar-se o conceito de cobertura acessível ou não acessível. Apesar de serem coberturas verdes, a tipologia extensiva e castanha, geralmente, estão mais relacionadas com coberturas não acessíveis tendo funções de proteção e isolamento. Em contrapartida, as tipologias semi-intensiva e intensiva têm, geralmente, uma função de utilização estando relacionadas com coberturas acessíveis.

Tabela 2.1 - Comparação entre as quatro principais tipologias de coberturas verdes (adaptado de IGRA, 2014)

| | Tipologia | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------|
| | Extensiva | Semi-Intensiva | Intensiva | Castanha |
| Manutenção | Baixa ou nenhuma | Média | Elevada | Nenhuma |
| Rega | Baixa ou nenhuma | Média | Elevada | Sem rega |
| Tipo de Vegetação | Sedums; Herbáceas; Espécies de relva | Arbustos; Herbáceas | Arbustos; Árvores | Qualquer |
| Profundidade do Substrato (cm) | 6-25 | 12-40 | 15-70 | 6-25 |
| Peso (kg/m ²) | 60-150 | 120-200 | 180-500 | 60-200 |
| Custo | Baixo | Médio | Elevado | Baixo |
| Utilização | Proteção e Funções Ecológicas | Biodiversidade, Lazer | Lazer e Convívio | Proteção e Funções Ecológicas |

2.3.1. Coberturas verdes extensivas

As coberturas verdes extensivas são caracterizadas por serem bastante simples e utilizarem plantas resistentes e com pouca necessidade de irrigação. São bastante leves e apresentam custos reduzidos na sua instalação e manutenção. Podem ir desde simples construções de 6 a 10 cm de

profundidade com pequenos sedums e relva, a substratos de profundidades até 25 cm com flores e pequenas plantas (Coberturas verdes, 2014). Na Figura 2.11 a), apresenta-se um exemplo deste tipo de cobertura.

2.3.2. Coberturas verdes intensivas

As coberturas verdes intensivas são espaços mais completos que até podem possuir cursos de água e outros elementos mais sofisticados. O topo do edifício é transformado num verdadeiro jardim repleto de flores, arbustos e árvores. É caracterizado por ter um custo mais elevado de instalação e de manutenção sendo necessárias regas frequentes. Outro aspeto importante é o da carga que esta cobertura acrescenta ao edifício que só poderá ser instalada num edifício que tenha resistência para tal, sendo assim usualmente aplicadas a novos edifícios projetados para este efeito. As espessuras do substrato têm de ser elevadas podendo atingir espessuras superiores a 50cm. Esta solução é bastante interessante para quem pretende transformar a cobertura numa zona ecológica (Coberturas Verdes, 2014). Na Figura 2.11 b) apresenta-se um exemplo desta cobertura.

2.3.3. Coberturas verdes semi-intensivas

Esta tipologia é intermédia entre as duas tipologias anteriores em termos de características. A filosofia ecológica é respeitada igualmente como na cobertura intensiva, contudo são utilizados substratos de espessuras inferiores, entre 12 a 40 cm, que mesmo assim permitem uma vasta escolha de espécies a utilizar (Neoturf, 2014). Na Figura 2.11 c), apresenta-se um exemplo deste tipo de cobertura.

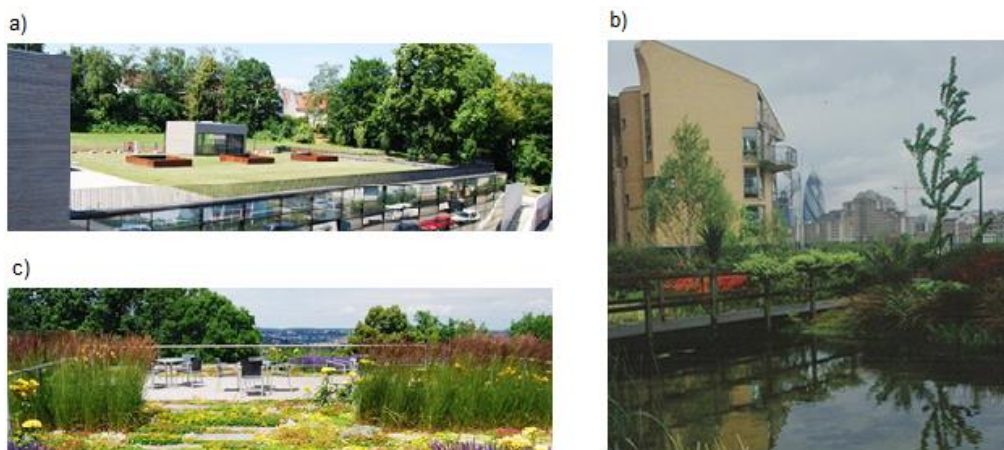


Figura 2.11 – Exemplo de uma cobertura verde: a) extensiva; b) intensiva; c) semi-intensiva (Coberturas Verdes, 2014)

2.3.4. Coberturas castanhas

As coberturas castanhas são um conceito recente, ainda em desenvolvimento, que consiste numa cobertura sem qualquer cobertura vegetal, apenas com o substrato (Neoturf, 2014). A ideia deste novo conceito é o crescimento de biodiversidade espontânea para a ocupação deste espaço com o objetivo de maximizar o número de espécies e proporcionar habitat para espécies específicas (Brown Roofs, 2014). Na Figura 2.12 apresenta-se um exemplo deste novo conceito logo após a construção e a sua evolução ao fim de dois anos.



Depois da construção



Ao fim de dois anos

Figura 2.12 - Exemplo de uma cobertura castanha depois da construção e ao fim de dois anos da construção (adaptado de Brown Roofs, 2014)

2.4. Vantagens e desvantagens

Atualmente a preocupação com a proteção do ambiente e a recuperação dos impactos negativos provenientes das construções humanas tem vindo a aumentar o interesse em construções sustentáveis. As coberturas verdes, como solução sustentável, apresentam muitos benefícios, e alguns deles subestimados. A estética natural é apenas uma das inúmeras vantagens destas coberturas. Outras vantagens incluem a proteção das membranas de impermeabilização e de isolamento, a retenção de águas pluviais, o isolamento térmico, melhoria da qualidade do ar, entre outras. Prevê-se com esta solução construtiva um vasto leque de efeitos positivos para os edifícios, habitantes e meio ambiente. Além destes benefícios, este tipo de coberturas encontra uma das condições fundamentais no desenvolvimento sustentável – a reconciliação entre a economia e a ecologia (Coberturas verdes, 2014). Um resumo das vantagens e desvantagens da utilização de coberturas verdes apresenta-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resumo das vantagens e desvantagens das coberturas verdes

| Vantagens | | Desvantagens |
|---------------------------|--|---|
| Estéticas e de Utilização | <ul style="list-style-type: none"> • Aumento significativo da área verde em contexto urbano • Possibilidade de cultivo na cobertura • Aumento do espaço útil • Compensação ecológica - Oásis de bem-estar • Apelo estético | <ul style="list-style-type: none"> • Mão-de-obra especializada • Aumento das cargas na cobertura • Manutenção • Investimento inicial • Economia a curto prazo • Pouco conhecido |
| Ambientais | <ul style="list-style-type: none"> • Aumento da biodiversidade e nichos ecológicos • Oferece um habitat natural • Diminui o risco de inundações • Despoluição das águas • Absorção / filtragem de gases poluentes e partículas em suspensão da atmosfera • Redução do efeito ilha de calor • Diminui a transmissão sonora • Melhora o microclima | |
| Económicas | <ul style="list-style-type: none"> • Isolamento térmico • Aumento da eficiência energética e redução dos custos com energia • Proteção das membranas da Cobertura • Aumento do tempo de vida-útil das coberturas • Economia a longo prazo • Valorização do imóvel | |

De seguida apresenta-se uma análise geral dos benefícios das coberturas verdes que será dividida em três grandes grupos: estéticos e de utilização, ambientais, e económicas. Não se pode deixar de referir que as vantagens aqui apresentadas devem-se a uma recolha bibliográfica que tem por base a experiência e estudos de investigação realizados. Deste modo os valores apresentados são valores médios que se tem observado e que dependem da tipologia e características de cada caso.

2.4.1. Vantagens estéticas e de utilização

As vantagens estéticas das coberturas verdes são geralmente compreensíveis, tal como se ilustra com o exemplo do Hotel na Áustria da Figura 2.13. Basta imaginar-se a alteração de todas as coberturas de uma cidade, em coberturas ajardinadas para facilmente entender-se essa vantagem estética. Em vez de se observar uma cobertura cinzenta de asfalto ou gravilha, começar-se-ia a usufruir de paisagens naturais que nos transmitiriam sensações de conforto. Estas paisagens e zonas verdes, possuem efeitos terapêuticos no dia-a-dia das pessoas, já reconhecidos, que incluem a redução do stress, diminuição da pressão arterial, diminuição da tensão muscular e o aumento dos pensamentos positivos (Neoturf, 2014). As melhorias da saúde mental e física das pessoas não se aplicam apenas no centro das cidades, mas também em zonas rurais e industriais, onde as construções cinzentas poderão passar mais despercebidas.

Estes claros benefícios levam à implementação de medidas, como a de “English Nature” (agência governamental do Reino Unido) que sugeriu que todas as pessoas tenham acesso a zonas verdes numa distância máxima de 300 metros de qualquer habitação de modo a ir ao encontro da necessidade que as pessoas têm de estar em contacto com a natureza e os benefícios que daí advêm. O aumento de espaços verdes pode estar em risco devido ao elevado valor dos terrenos que impossibilita a criação destes novos espaços. Assim as coberturas verdes poderão ser uma excelente solução criando espaços verdes acessíveis para o lazer, como se apresenta na Figura 2.14. Estes espaços, além de serem um incentivo à atividade social e física das pessoas, também acrescentam valor ao edifício.



Figura 2.13 – Hotel em Blumau, Áustria – A vila térmica (Thermal Village, 2014)



Figura 2.14 - Cobertura verde num edifício de Chicago (Open House Chicago, 2014)

Outra grande vantagem é a possibilidade do cultivo na cobertura, mesmo no centro de uma cidade. A distância que os alimentos percorrem até chegar ao centro da cidade começa a ser preocupante devido aos custos de transporte, da energia e poluição relacionados para além da qualidade nutricional destes alimentos, que se deteriora ao longo do tempo (Heneine, 2008). Um excelente exemplo do uso de uma cobertura verde para o cultivo é o hotel Fairmont em Vancouver, no Canadá. Este exemplo, além de ter sido uma das primeiras coberturas verdes nesta cidade, construída em 1991, é local de produção de mais de 60 tipos de plantas, vegetais e frutas que são usados diariamente pelo Chefe do restaurante do Hotel (Figura 2.15). Para além disto, atrai animais como pássaros (mais de 10 tipos de aves diferentes) e abelhas que produzem grandes quantidades de mel, também usados pelo Hotel (Hotel Fairmont, 2014).



Figura 2.15 - Cobertura do Hotel Fairmont em Vancouver, Canadá (Hotel Fairmont, 2014)

2.4.2. Vantagens ambientais

A utilização de coberturas verdes em substituição das coberturas convencionais traz uma maior valia ao ambiente de várias formas. Os benefícios passam pelo aumento da biodiversidade, qualidade do ar, redução do efeito de ilha de calor, redução da transmissão sonora e retenção das águas pluviais, de modo a prevenir cheias.

2.4.2.1. Biodiversidade

As coberturas vivas dão um contributo bastante significativo à proliferação de espécies na cobertura, que outrora já não existiam nesses locais devido à destruição da flora e da fauna com a construção massiva. Este efeito é mais evidente em zonas urbanas onde a envolvente não apresenta as condições necessárias para alguns seres vivos viverem. Com as coberturas verdes, abelhas, borboletas, aves, insetos entre outros animais e plantas podem começar a utilizar este espaço que se transforma numa autêntica ilha ecológica. Assim, as coberturas verdes funcionam como uma compensação ecológica num meio urbano que, havendo um aumento da variedade de seres vivos, alguns dos quais transportarão sementes que tornarão cada cobertura verde única (Living Roof, 2014)

Janet Sassi, um estudante Universitário de aves e artrópodes, estudou 4 novas coberturas verdes em Nova Iorque, EUA, e concluiu que desde a construção destas coberturas, o número de aves a sobrevoar a zona e a parar nas coberturas triplicou. Para além do número ter aumentado, novas espécies foram observadas nestas coberturas. Por fim, concluiu que as coberturas verdes podem ser uma excelente solução para Nova Iorque já que existem várias espécies em risco de extinção nesta zona (Fordham University, 2014).

2.4.2.2. Retenção e melhoria da qualidade das águas pluviais

Um problema grave, nos dias de hoje, são as cheias nos meios urbanos. O grande número de construções, que se traduz em área impermeável, é a causa deste problema pois as águas pluviais não são absorvidas e escorrem superficialmente. Apesar da existência de sistemas de drenagem de águas, se a quantidade de precipitação for de pico não haverá capacidade de escoamento causando cheias. Em Portugal, é conhecido o número de cheias que acontece por ano causando cortes nas estradas e inundações nas habitações. No Reino Unido, por exemplo, são construídos reservatórios para armazenar a água das chuvas no momento da precipitação e são descarregados mais tarde, de modo a atenuar a quantidade de água que chega ao mesmo tempo aos sistemas de drenagem ou a rios e afluentes.

As coberturas verdes são um instrumento muito útil na prevenção das cheias. Dependendo do sistema de cobertura e da espessura do substrato, a redução de água encaminhada para o sistema de drenagem pluvial atinge valores entre 70-80% no verão e entre 25-40% no inverno (EFB, 2014). Esta água é retida pelo substrato e pela vegetação onde grande parte é consumida pelas plantas, sendo

libertada através transpiração e evaporação. A restante é libertada gradualmente para o sistema de drenagem associado à cobertura, reduzindo a quantidade de água que é drenada ao mesmo tempo (EFB, 2014).

Para além do controlo da descarga de água, estas coberturas também têm o efeito de despoluição das águas. As coberturas verdes têm a característica de poder limitar a contaminação em forma de poeira ou de partículas suspensas, removendo cerca de 95% dos metais pesados e cerca de 75% de sólidos suspensos (Design for London. 2008).

2.4.2.3. Qualidade do ar

A melhoria na qualidade do ar devido à existência de plantas nas cidades já é largamente reconhecida. As coberturas verdes contribuem positivamente na redução do número de partículas poluentes, não apenas pelas plantas mas também pelo substrato. As plantas têm a capacidade de reduzir a quantidade de dióxido de carbono, consumindo-o e libertando por sua vez oxigénio, e de remover metais pesados e outras partículas poluentes transportadas pelo ar. Contudo, esta melhoria apenas será notória perante grandes áreas verdes (Living Roofs, 2014). A melhoria da qualidade do ar tem consequências significativas na melhoria das condições de saúde das populações, em particular na redução do número de doenças respiratórias e alérgicas.

2.4.2.4. Efeito ilha de calor

O aquecimento global, causado pelas emissões de gases com efeito de estufa como são exemplo as emissões dos grandes complexos industriais e dos veículos, conduz a um aumento da temperatura nos centros urbanos. A diferença de temperatura entre a cidade e a zona envolvente é conhecida como efeito ilha de calor urbano. Esta diferença pode chegar até 10°C no verão (IGRA, 2014). Assim, este é um efeito que é necessário contrariar pois reduz drasticamente a qualidade de vida dos habitantes das cidades. As áreas verdes de grande dimensão conseguem absorver cerca de 80% do calor emitido, contudo, a extensão das zonas verdes nos centros urbanos, não tem sido suficiente para reduzir este efeito. Neste contexto, a possibilidade do aumento das zonas verdes no topo dos edifícios com a instalação de coberturas ajardinadas, pode ser benéfica para a redução da temperatura através da evapotranspiração do conjunto solo-planta e da humedificação do ar (IGRA, 2014). Apesar de existirem alguns estudos a respeito deste benefício, a sua quantificação tem de revelado difícil (Neoturf, 2014).

2.4.2.5. Transmissão sonora

A combinação solo-planta atua como um isolamento sonoro de boa qualidade. O substrato tende a bloquear a maior parte dos ruídos de baixas frequências, enquanto as plantas o de frequências mais altas. A transmissão sonora é dependente do sistema e da espessura de solo utilizado, mas esta solução pode reduzir a transmissão de ruídos até 50dB (Neoturf, 2014). Este benefício pode ser uma excelente solução para construções próximas de aeroportos ou estradas de grande tráfego.

2.4.3. Vantagens económicas

Uma das vantagens mais reconhecidas é a poupança energética no aquecimento e arrefecimento dos edifícios através da melhoria do desempenho térmico que as coberturas verdes proporcionam. Esta depende bastante da altura do ano e das condições meteorológicas locais. A

cobertura ajardinada não só aumenta o isolamento térmico como também reduz a absorção de calor pela cobertura através da combinação solo-planta. Segundo Living Roofs (2014), esta poupança de energia pode variar entre 3 a 10%, comparativamente com uma cobertura convencional.

Esta percentagem de poupança poderá ainda aumentar com a maior extensão de coberturas verdes, atenuando a ilha de calor, reduzindo a temperatura exterior e assim levando a um gasto de energia menor no sistema de climatização do edifício. Na cidade de Toronto, no Canadá, foi estimado uma poupança de energia para o arrefecimento dos edifícios de 22 milhões de dólares com a adoção de coberturas verdes na cidade em grande escala, que equivale a uma poupança de 56,300 toneladas de petróleo por ano (Living Roofs, 2014). Em Chicago, EUA, a estimativa com a implementação em grande escala de coberturas verdes na cidade, seria de uma redução de 100 milhões de dólares no gasto de energia em climatização (Living Roofs, 2014).

Refira-se que estas vantagens acabam por não ser apenas económicas mas também ambientais, com a produção de menos gases poluentes e efeito de estufa, e com o gasto de menores quantidades de energia. No subcapítulo 2.5 apresentam-se vários estudos realizados em vários pontos do mundo atendendo ao facto da poupança energética para o arrefecimento e aquecimento do edifício.

Outra vantagem, é a do aumento do tempo que é possível usar o sistema *free cooling* (arrefecimento gratuito). Este sistema consiste em utilizar o ar exterior, a uma temperatura inferior, para arrefecer o elemento de refrigeração, poupando-se assim energia por não ser necessário a utilização de máquinas frigoríficas. O *free cooling* pode ser utilizado quando a diferença de temperatura é de pelo menos 1°C inferior à temperatura interior, e é utilizado principalmente em alturas mais amenas, como na Primavera ou no Outono. A cobertura verde, devido à diminuição de temperaturas do ambiente exterior na sua envolvente, poderá aumentar o tempo de utilização deste sistema (Castleton, 2010).

Outra vantagem económica destas coberturas é o aumento da vida-útil da cobertura. Em coberturas convencionais, mesmo com uma instalação realizada por profissionais, vão ocorrendo danos nas membranas protetoras, de isolamento e de impermeabilização. Isto deve-se a reações químicas, físicas, biológicas, às grandes amplitudes térmicas e à radiação solar a que estas membranas são sujeitas. Em geral, apresentam uma vida útil entre 15 a 20 anos. As coberturas verdes proporcionam uma excelente proteção a essas membranas podendo duplicar a esperança de vida das coberturas (IGRA, 2014). Efetivamente, a amplitude térmica das membranas de 100°C numa cobertura convencional, decresce para 35°C numa cobertura verde (IGRA, 2014). Para além disso uma cobertura verde funciona como uma proteção à radiação solar impedindo que estes atinjam as membranas. Um bom exemplo da durabilidade das coberturas verdes é o Edifício Derry and Toms, situado no centro de Londres, Reino Unido, que mantém uma cobertura ajardinada desde 1938, com as membranas ainda em bom estado (Neoturf, 2014).

2.4.4. Desvantagens

Apesar das coberturas verdes poderem englobar problemas extras na construção e manutenção, muitas vezes resultantes do mau dimensionamento ou da má qualidade da obra, estes não serão objeto de estudo nesta dissertação. Uma das principais desvantagens desta solução construtiva é o aumento da carga na estrutura do edifício o que poderá impossibilitar a sua implementação num edifício já construído. Contudo para estes edifícios existe uma solução que passa pelas coberturas verdes com substratos leves e pequenas vegetações. Este tipo de solução, poderá apresentar uma carga adicional compatível com a estrutura, e então ser implementada em estruturas não projetadas para esse efeito. Na estimativa do peso da cobertura é importante ter em conta o estado inundado da cobertura no inverno que acrescenta bastante peso à estrutura.

Dependendo do tipo de cobertura e da utilização, o custo de manutenção poderá ser outra desvantagem. A necessidade de equipamentos para tratar da vegetação, como corta-relvas ou tesouras, ou até um jardineiro poderá significar um acréscimo de custo. Coberturas verdes que não sejam acessíveis, necessitam de muito pouca manutenção, o que pouco significará no custo da mesma. Em contrapartida coberturas mais complexas e acessíveis poderão representar um custo acrescido. Outro fator relacionado com a manutenção da cobertura verde é o consumo de água em coberturas que necessitem de um sistema de rega. Dependendo da localização, o sistema de rega poderá só ser necessário no verão. Outros sistemas poderão ser implementados para poupar água, como é o caso de um sistema de aproveitamento de águas pluviais representado na Figura 2.16. Contudo, a instalação de um sistema destes significaria um custo acrescido que seria amortizado ao longo do tempo.

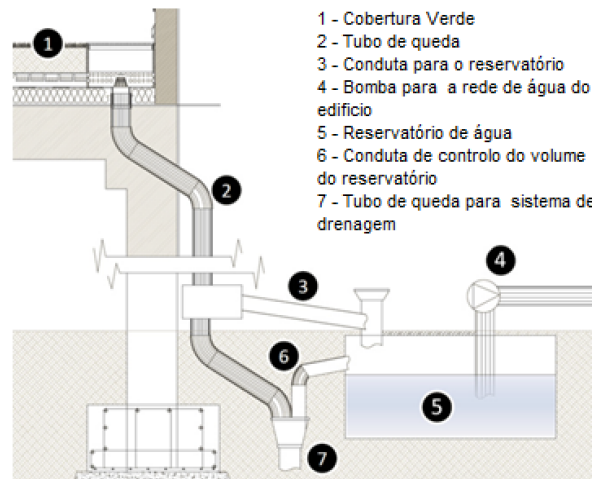


Figura 2.16 - Exemplo de um sistema de recuperação de água. (adaptado de Ascione et al., 2013)

O custo total de uma cobertura verde é obviamente superior ao de uma cobertura convencional. Este custo poderá ser o dobro ou 10 vezes superior a uma cobertura convencional (Design for London, 2008), dependendo totalmente do sistema de cobertura pretendido, da altura do edifício, do tamanho da cobertura e da complexidade da construção. Um custo aproximado de uma cobertura semi-intensiva é entre 140 €/m² a 170 €/m², estimativa em Londres e no ano de 2008, mas que pode ser superior se forem acrescentados sistemas de rega, plantas seleccionadas ou algum tipo de mobiliário (Design for London, 2008). De modo a ter uma perceção do custo adicional real de uma cobertura deste tipo terá de ser feito um estudo económico que tenha em conta a poupança de energia, a longevidade da vida-útil da cobertura e todos os sistemas adicionais a uma cobertura convencional.

2.5. Simulação energética de coberturas verdes

O interesse em práticas de construção sustentáveis tem vindo a aumentar ao longo do tempo, conseqüentemente, as coberturas verdes são cada vez mais alvo de estudos devido aos seus potenciais benefícios. Alguns benefícios como a estética ou o valor recreativo são difíceis de quantificar. Por outro lado, benefícios como a drenagem de águas pluviais e o impacto no consumo energético nos edifícios podem ser investigados e quantificados. No presente trabalho será estudado os benefícios energéticos através da simulação energética de edifícios com coberturas verdes.

Existem vários programas computacionais que modelam e simulam térmica e energeticamente um edifício como é o caso do eQuest, do DOE-2, do TRNSYS e do EnergyPlus. Os programas mais usuais são os últimos dois referidos, já que são mais detalhados e têm a capacidade de implementação de modelos para colmatar situações específicas, como é o caso das coberturas verdes. Estas, não são fáceis de serem modeladas pois necessitam de muitos parâmetros para a sua correta definição. Todavia, já existem modelos que tentam, da melhor forma, traduzir os efeitos de uma cobertura com vegetação num edifício. Quando existem dados experimentais, estes modelos são acompanhados por uma validação, com resultados que se têm revelado muito próximo dos resultantes das simulações. De notar que existem estudos que modelam uma cobertura verde de forma simples, como se fosse apenas um isolamento extra.

Em Portugal, o estudo de coberturas verdes é quase inexistente, existindo algumas dissertações, nomeadamente da Universidade de Aveiro, que abordam parâmetros medidos experimentalmente como temperaturas e fluxos de calor. Uma dissertação com o índole experimental em coberturas verdes está também a decorrer, em paralelo com esta dissertação, no Instituto Superior Técnico, por Valadas (2014). Em termos de simulação energética apenas foi encontrado duas dissertações da Universidade do Porto, mas que não remetem para uma análise do consumo energético, mas sim para o conforto higratérmico das coberturas verdes.

Existem vários parâmetros de uma cobertura verde que podem ser avaliados através da modelação. Este subcapítulo de pesquisa bibliográfica está dividido em dois pontos fundamentais: consumo energético e coeficiente de condutibilidade térmica, temperaturas, evapotranspiração e albedo. É verdade que o ponto essencial desta dissertação é o referente ao consumo de energia e a sua comparação com outras soluções de cobertura, porém, o outro ponto tem a função de ajudar a entender a razão do benefício energético destas coberturas.

Na Tabela 2.3 apresenta-se um resumo de alguns dos estudos analisados e considerados mais relevantes, onde é exposto a poupança energética em relação a uma cobertura convencional. A cobertura convencional normalmente não é definida exaustivamente contudo representa uma cobertura com valores de albedo e de condutibilidade térmica usuais no país respetivo. De salientar que o objetivo é entender a relação entre uma cobertura convencional e uma cobertura verde em termos do consumo de energia, sendo que todos os autores mantiveram as características da cobertura variando apenas o tipo de proteção da cobertura. A definição do tipo de vegetação também não é sempre clara, não sendo comum relacionar as características definidas no modelo com espécies de plantas. Outras conclusões relativas ao coeficiente U, temperaturas, evapotranspiração e albedo da vegetação são também apresentadas.

Tabela 2.3 – Resumo dos estudos de simulação energética

| Referência | Programa de modelação | Modelo de cobertura verde | Validação | Consumo energético | | | | | | | | Coeficiente de transm. térmica (U) | Temperaturas | Evapotranspiração | Albedo das plantas |
|---------------------------------------|--|--|-----------|--------------------|----------------------------|-----------------|---|--|-----------------------|-----------------------|--|--|--|-------------------|--------------------|
| | | | | Edifício | | | | Poupança de energia de uma cobertura verde comparativamente com uma cobertura convencional (%) | | | | | | | |
| | | | | Localiza. | Caraterísticas | | | Aque. | Arrefe. | Total | Observações | | | | |
| Saiz et al. (2006) | ESP-r (Environmental Systems Performance – research) | Representado pela diminuição do valor de U e pelo aumento do albedo | - | Madrid (Espanha) | Habituação (8 pisos) | Cobertura verde | Extensiva | 0,1 | 6 | 1,2 | A poupança é apenas sentida nos 3 últimos andares do edifício | Coeficiente (U) aumenta com o teor de humidade do solo | - | - | - |
| Kasera, Nayyar e Sharma (2012) | eQUEST (QUick Energy Simulation Tool) | Representado pelo aumento do albedo e da massa volúmica da cobertura | - | Jaipur (Índia) | Escritórios (3 pisos) | Cobertura verde | Relva Sem isolamento | - | 3 | - | Salientaram a importância do solo para a inércia térmica da cobertura | - | - | - | - |
| Wong et al. (2003) | DOE-2 | Estimada por um valor de U a partir de dados experimentais | - | Singapura | Centro comercial (5 pisos) | Cobertura verde | Relva Sem isolamento Com isolamento | - | - | 10 1 | Concluíram ainda que para vegetações mais densas e mais altas a poupança era maior | Coeficiente (U) aumenta com o teor de humidade do solo | - | - | - |
| Niachou et al. (2001) | TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation) | Estimada por um valor de U a partir de dados experimentais | - | Atenas (Grécia) | Hotel | Cobertura verde | Sem Isolamento Isolamento moderado Alto nível de Isolamento | 45 - 46 13 8 - 9 | 22 - 45 0 - 4 0 | 31 - 44 3 - 7 2 | Variaram o nível de ventilação durante a noite. Com o aumento da ventilação a poupança é acrescida | - | Reduzida amplitude térmica na superfície exterior da laje numa cobertura verde | - | - |

Tabela 2.3 - Resumo dos estudos de simulação energética (cont.)

| Referência | Programa de modelação | Consumo energético | | | | | | | | | | Coeficiente de transm. térmica (U) | Temperaturas | Evapotranspiração | Albedo das plantas | |
|--|--|--|---|----------------------|---|------------------|--|-------------------------------|-------|-------------|--|--|--|-------------------|--|---|
| | | Modelo de cobertura verde | Validação | Edifício | | | Poupança de energia de uma cobertura verde comparativamente com uma cobertura convencional (%) | | | | | | | | | |
| | | | | Localiza. | Caraterísticas | | Aque. | Arrefe. | Total | Observações | | | | | | |
| Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014) | TRNSYS (TRaNsient Systems Simulation) | Modelo implementado e baseado em Sailor (2008) | Temperaturas da superfície do solo: MBE =1°C (entre o modelo e a medida) | La Rochelle (França) | Modelo de um compartim. experiment. à escala 1:10 | Cobertura verde | Sem mais informação | 6 | 95 | 6 | O consumo de energia para o arrefecimento em La Rochelle é quase nulo devido ao clima frio durante quase todo o ano. | Coeficiente (U) aumenta com o teor de humidade do solo | Reduzida amplitude térmica na superfície exterior da laje da cobertura verde | | Valor de 0,23 | |
| Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012) | TRNSYS (TRaNsient Systems Simulation) | Modelo implementado e baseado em Sailor (2008) | - | La Rochelle (França) | Moradia | | Cobertura verde | 0 cm isolamento | 48 | 100 | | 50 | | | - | - |
| | | | | | | 5 cm isolamento | | 6 | 100 | 11 | | | | | | |
| | | | | | | 15 cm isolamento | | 0 | 86 | 5 | | | | | | |
| Kotsiris et al. (2012) | TRNSYS (TRaNsient Systems Simulation) e LORD | Representado pela diminuição do U e pela estimativa da evapotranspiração | - | Pikermi (Grécia) | Moradia | Cobertura verde | Relva | Substrat: 8 cm lâ-rocha | 8 | 12 | - | Sem isolamento, as poupanças atingem 28% para o aquecimento (relva – lâ-rocha) e 61% para o arrefecimento (lavanda). | Coeficiente (U) aumenta com o teor de humidade do solo | - | Poder de “retirar” calor de dentro do edifício | - |
| | | | | | | | Relva | Substrat: 8 cm terra arenosa | 3 | 12 | - | | | | | |
| | | | | | | | Lavanda | Substrat: 20 cm terra arenosa | 6 | 15 | - | | | | | |
| Sailor (2008) | EnergyPlus | Modelo de Sailor (2008) | Temperaturas da superfície do solo: MBE =2,9°C RMSE = 4,1°C (entre o modelo e a medida) | Chicago (EUA) | Escritórios (2 pisos) | Cobertura verde | LAI (Leaf Area Index) =2,0 | 9 | 2 | - | Chicago: temp. de -10°C a 28°C; Houston: 7°C e 35°C. Ainda variou o tipo de vegetação e a espessura do solo | - | Reduzida amplitude térmica na superfície exterior da laje numa cobertura verde | | - | |
| | | | | Houston (EUA) | | | | Altura das plantas = 50 cm | 11 | 2 | | | | | | - |

Tabela 2.3 - Resumo dos estudos de simulação energética (cont.)

| Referência | Programa de modelação | Consumo energético | | | | | | | | Coeficiente de transm. térmica (U) | Temperaturas | Evapotranspiração | Albedo das plantas | | |
|--|-----------------------|---------------------------|-----------|---------------------|----------------|--|--|---------|-------|--|--|---|--|---------------|---|
| | | Modelo de cobertura verde | Validação | Edifício | | | Poupança de energia de uma cobertura verde comparativamente com uma cobertura convencional (%) | | | | | | | | |
| | | | | Localiza. | Caraterísticas | | Aque. | Arrefe. | Total | | | | | Observações | |
| Zinzi e Agnoli (2012) | EnergyPlus | Modelo de Sailor (2008) | - | Barcelona (Espanha) | Moradia | Cobertura verde (Com isolamento) LAI = 1,2 Altura das plantas = 60 cm | 2 | 30 | 8 | Os diferentes locais foram escolhidos pela diferença de climas. Sem isolamento as poupanças anuais são superiores. | Coeficiente (U) aumenta com o teor de humidade do solo | - | As coberturas verdes têm o poder de “retirar” calor de dentro do edifício através da evapotranspiração. Para solos mais húmidos, este processo é facilitado. | Valor de 0,25 | |
| | | | | Cairo (Egipto) | | | 0 | 6 | 4 | | | | | | |
| | | | | Palermo (Itália) | | | 21 | 1 | 3 | | | | | | |
| Ascione et al. (2013) | EnergyPlus | Modelo de Sailor (2008) | - | Tenerife (Espanha) | Escritórios | Cobertura verde | LAI = 0,8 | 0 | 1 | Variação de tipos de vegetação. Oslo – Clima frio. Tenerife – Clima quente. | - | - | Poder de “retirar” calor de dentro do edifício | - | |
| | | | | | | | LAI = 5,0 | 0 | 11 | | | | | | |
| | | | | Oslo (Noruega) | | | LAI = 0,8 | 6 | (-)1 | | | | | | - |
| | | | | | | | LAI = 5,0 | 5 | 11 | | | | | | - |
| Theodosiou (2003) | Suncode P.C. | | | | | | - | | | - | - | Menor humidade relativa do ambiente exterior e maior velocidade do vento facilita o processo de evapotranspiração, reduzindo o fluxo de calor na cobertura no verão. As coberturas verdes têm o poder de “retirar” calor de dentro do edifício através deste processo | - | | |
| Lazzarin, Castellotti e Busato (2005) | TRNSYS | | | | | | - | | | - | - | | Valor de 0,24 | | |

2.5.1. Consumo energético

Muitos estudos têm sido realizados na última década sobre o potencial benefício energético das coberturas verdes, revelando que podem oferecer reduções no consumo de energia tanto no verão como no inverno. De seguida apresenta-se uma análise de cada ponto apresentando na Tabela 2.3, relativo ao consumo energético.

Programas computacionais e modelos de coberturas verdes:

Os quatro primeiros estudos apresentados na Tabela 2.3 são estudos que utilizaram modelos simples que, maioritariamente, modelaram a cobertura verde como um acréscimo do coeficiente de condutibilidade térmica (U) e do albedo tentando simular os efeitos da evapotranspiração e do sombreamento utilizando vários programas computacionais. Os restantes estudos utilizam modelos de coberturas verdes mais detalhados e mais recentes nos programas computacionais TRNSYS (assinalados pela cor cinzenta clara) e EnergyPlus (assinalados pela cor cinzento escuro). Refira-se ao estudo realizado por Niachou et al. (2001), que apesar de utilizar o programa de simulação TRNSYS, o modelo utilizado foi relativamente simples, por ser um estudo relativamente antigo.

Validação:

A validação não é um estudo usual neste tipo de estudos devido à falta de dados e/ou da impossibilidade de realizar medições, e como se verifica pela Tabela 2.3, apenas os estudos de Sailor (2008) e Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014) incluíram esta análise. A validação consiste numa análise da diferença de temperaturas entre os resultados do modelo e as medições experimentais, de forma a avaliar a sua qualidade.

Segundo Chan e Chow (2013), a comparação entre os valores de simulação e os medidos experimentalmente podem ser realizadas com base em dois parâmetros (equação (2.1) e (2.2)). Sailor (2008) e Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014), utilizaram estes parâmetros que pretendem quantificar a diferença entre os resultados da simulação (sim.) e os experimentais (exp.).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})}{n} \quad (2.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})^2}{n}} \quad (2.2)$$

O primeiro parâmetro, MBE (*mean bias error*), refere-se à média das diferenças entre os valores de simulação e experimentais, enquanto o parâmetro RMSE (*root-mean-square error*) representa o desvio médio dos valores de simulação relativamente aos experimentais.

Nos dois estudos, da Tabela 2.3, que incluíram a validação do modelo, apenas foi utilizado a temperatura da superfície do solo da cobertura verde como comparação, apresentando valores de MBE entre 1 e 2,9°C, e RMSE de 4,1°C. Segundo Sailor (2008) esta variação é aceitável devido ao modelo não ser otimizado, por não ser apropriado numa validação, mas que se fosse realizado esta otimização, esta diferença seria reduzida. Moody e Sailor (2013), não incluídos na tabela resumo, também estudaram as diferenças de temperaturas do solo, utilizando o modelo de Sailor (2008), e obtiveram

uma diferença média (MBE) de 1°C, demonstrando a qualidade deste modelo. Sailor (2008) acrescenta ainda que o fato do modelo de Sailor (2008) ter a capacidade de refletir as variações que existem durante o dia e durante as diferentes estações, proporciona uma confiança suficiente no uso deste modelo.

Como se pode verificar pela tabela resumo, o modelo de Sailor (2008), que está implementado no EnergyPlus, também serve como base para modelos utilizados no TRNSYS. Os autores que utilizaram este modelo como base ou no EnergyPlus, presentes nas tabelas resumo, e outros autores como Castleton et al. (2010), Ouldboukhitine et al. (2011), Moody e Sailor (2013) e Chan e Chow (2013) sugerem a sua utilização por representar com qualidade uma cobertura verde.

Estação de aquecimento:

Na estação de aquecimento as poupanças de energia variam entre 0 e 48%, utilizando uma cobertura verde relativamente à utilização de uma cobertura convencional. O nível de isolamento que o substrato proporciona (espessura e condutibilidade térmica) em conjunto com outro material de isolamento térmico tem uma elevada influência na poupança de energia, sendo que todas as comparações são realizadas com o mesmo nível de isolamento. A maior poupança energética é obtida por Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012), de 48%, sem isolamento térmico, e aumentando o nível de isolamento, a poupança de energia diminui pelo fato da qualidade térmica da cobertura convencional ser superior, sendo reduzida até 0%, para um nível de isolamento elevado. Esta conclusão é coerente com os estudos de Kotsiris et al. (2012), Zinzi e Agnoli (2012) e Niachou et al. (2001) de onde se verifica um aumento da poupança de energia na estação de aquecimento com a diminuição do nível de isolamento. Assim, estes autores referem o importante impacto que as coberturas verdes podem apresentar em edifícios sem isolamento térmico, sugerindo uma mais valia para edifícios antigos.

Para um mesmo nível de isolamento térmico, Kotsiris et al. (2012) variou o tipo de substrato com diferentes níveis de condutibilidade térmica, sendo, por ordem decrescente de condutibilidade térmica: 8cm terra arenosa; 20cm terra arenosa; 8cm lâ-rocha. Concluíram que para um nível de isolamento fixo da cobertura convencional e com a diminuição da condutibilidade térmica da cobertura verde através do substrato, as poupanças de energia são maiores. Sailor (2008) variou a espessura do solo, mantendo o mesmo nível de isolamento para a cobertura convencional, chegando à mesma conclusão.

Ainda na estação de aquecimento, a variação das plantas não apresenta uma grande influência como se pode observar pelo estudo realizado por Ascione et al. (2013), que variou o parâmetro LAI (Leaf Area Index). Este parâmetro representa a fração de área de folhas relativamente à área do solo, ou seja a densidade da vegetação. A poupança de energia de 6% está relacionada com a utilização de plantas menos densas (LAI menor) enquanto a poupança de 5% está relacionada com plantas mais densas (LAI maior). Sailor (2008) também estudou a influência do tipo de vegetação, variando o mesmo parâmetro (LAI), chegando à mesma conclusão, sugerindo que para menores valores de LAI a cobertura verde está menos protegida resultando numa maior exposição à radiação solar e o aumento do fluxo de calor absorvido pela cobertura, diminuindo assim os consumos energéticos.

Apesar de um valor de LAI superior ser desfavorável para os consumos de energia relativamente a valores de LAI inferiores, existe sempre uma poupança energética em relação a uma cobertura convencional. Segundo Sailor (2008), esta poupança deve-se à capacidade de estabilização das temperaturas do conjunto solo-planta, apesar de estar mais protegido do ambiente exterior.

Estação de arrefecimento:

Na estação de arrefecimento a variação da poupança de energia varia entre -1% e 45%. A maior poupança é observada para níveis de isolamento menores como se verifica no estudo de Niachou et al. (2001). Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012) e Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014) atingiram valores de poupança de 100 e 95%, respetivamente, mas sendo as necessidades de arrefecimento quase nulas não foi considerado relevante.

Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012) estudaram o comportamento da cobertura verde para vários níveis de isolamento e concluíram que, ao contrário da estação de aquecimento, a poupança de energia diminui não só pela melhoria da qualidade térmica da cobertura convencional mas também pelo fato do aumento do consumo de energia, o que na estação de aquecimento é sempre decrescente. Esta conclusão está de acordo com o estudo de Lazzarin, Castellotti e Busato (2005) que concluíram que a cobertura verde “retira” calor de dentro do edifício na estação de arrefecimento devido à evapotranspiração do conjunto solo-planta, funcionando como um sistema de arrefecimento passivo. Assim, com um isolamento térmico extra, além da inércia térmica do solo ter um menor contributo, a cobertura verde tem maior dificuldade em “retirar” calor do edifício. Kotsiris et al. (2012) também salientaram a importância da evapotranspiração no consumo energético na estação de arrefecimento. Deste modo, também se verifica uma maior vantagem na utilização destas coberturas em edifícios sem isolamento térmico.

Ascione et al. (2013) estudaram o efeito do tipo de vegetação na poupança de energia na estação de arrefecimento, e concluíram que para uma vegetação mais densa e mais alta, as poupanças são superiores. O tipo de vegetação tem uma influência considerável, variando entre -1 a 11 % na poupança de energia. Kotsiris et al. (2012) também estudaram a influência do tipo de vegetação, concluindo que para um substrato com maior condutibilidade térmica mas com plantas mais densas (20cm terra arenosa) apresenta um melhor comportamento do que para um substrato com menor condutibilidade térmica (8cm lâ-rocha) e plantas mais baixas e menos densas. Sailor (2008) estudou esta influência variando o parâmetro LAI e concluiu que para valores mais altos (vegetação mais densa) o consumo é menor, e em termos anuais, a poupança na estação de arrefecimento com valores de LAI altos prevalece sempre relativamente ao consumo de energia acrescido na estação de aquecimento. Estas conclusões reforçam a ideia da importância da evapotranspiração do conjunto solo-planta para a diminuição do consumo de energia. De referir também o aumento da área de cobertura protegida pelo aumento da densidade das plantas. Wong et al. (2003) também obteve a mesma conclusão.

Localização:

Outro fator que influencia o desempenho térmico das coberturas verdes é a localização. Sailor (2008) estudou as poupanças energéticas para dois locais com climas diferentes, Houston e Chicago nos EUA. Chicago, sendo o local mais frio, obtém-se consumos energéticos na estação de aquecimento maiores do que em Houston, porém foi sentida uma poupança superior em Houston como se pode verificar pela Tabela 2.3. Sailor (2008) salientou ainda a diferença do consumo de energia na estação de aquecimento em Houston, de 86 GJ e em Chicago, de 429 GJ, o que evidencia uma poupança significativa em Chicago (39 GJ), contrariamente à poupança menos relevante de Houston (9 GJ), apesar da percentagem de poupança inferior.

Também Zinzi e Agnoli (2012) estudaram a poupança energética para três locais diferentes, representando um local caracterizado por temperaturas maioritariamente altas e um nível reduzido de precipitação (Cairo), um local com temperaturas baixas e um nível de precipitação mais elevado (Barcelona) e um local ameno com características intermédias (Palermo). Concluíram uma maior poupança na estação de arrefecimento em Barcelona devido ao consumo de energia reduzido nesta

estação. Na estação de aquecimento a maior poupança foi registada em Palermo e em termos anuais Barcelona foi a que obteve uma percentagem de poupança superior, sugerindo a sua vantagem em climas maioritariamente frios.

Ascione et al. (2013) estudou para 6 cidades europeias a influência das coberturas verdes, apesar de na tabela resumo apenas ser referido a cidade com maiores necessidades de arrefecimento (Tenerife) e a cidade com maiores necessidades de aquecimento (Oslo). Verifica-se uma redução na estação de aquecimento apenas em Oslo devido ao consumo quase inexistente de energia em Tenerife, nesta estação. Na estação de arrefecimento as poupanças são similares, contudo a mesma conclusão de Sailor (2008) foi referida por estes autores. O consumo de energia na estação de arrefecimento em Tenerife é cerca de 5 vezes superior ao consumo de energia de Oslo significando uma considerável poupança de energia, contrariamente à poupança de Oslo, que não é refletido pela percentagem de poupança.

Castleton et al. (2010), que realizou um estudo bibliográfico sobre esta matéria, refere que a maioria dos estudos remetem para um melhor desempenho energético em climas mais frios, que é confirmado pelos estudos de Zinzi e Agnoli (2012), Sailor (2008) e Ascione et al. (2013).

Outros estudos:

Outro estudo, que não se apresenta na Tabela 2.3, é a comparação dos consumos e poupanças de energia das coberturas verdes com coberturas com albedos elevados, como é o caso das coberturas pintadas ou com revestimentos claros. Saiz et al (2006) e, Zinzi e Agnoli (2012) estudaram este fato e concluíram que para locais mais quentes a refletância elevada que as coberturas claras apresentam, resultam numa poupança superior, atingindo poupanças de 30% na estação de arrefecimento em Palermo e Cairo. Na estação de aquecimento estas coberturas revelam não serem tão eficazes devido ao não aproveitamento da radiação solar.

Por fim, refira-se ao estudo económico realizado por Ascione et al. (2013) onde incluiu, às poupanças de energia por parte da cobertura verde relativamente à cobertura convencional, os custos relacionados com a rega (consumo de água) e do investimento inicial. Realizaram o estudo para 6 cidades europeias e concluíram que apenas em Oslo (localidade mais fria) existem vantagens económicas em investir numa cobertura verde, apesar do período de retorno ser de cerca de 143 anos. Segundo Ascione et al. (2013), para as zonas mais a Sul e mais quentes, a solução de coberturas verdes nunca terá retorno financeiro quando apenas se considera a poupança de energia. Estes autores ainda estudaram os benefícios fiscais e incentivos financeiros dos governos e concluíram que, por exemplo, em Tenerife (Espanha), o período de retorno passaria a ser de 20 anos.

2.5.2. Coeficiente de transmissão térmica, temperaturas, evapotranspiração e albedo da vegetação

Este ponto tem o objetivo de abordar outros temas relacionados com as coberturas verdes e esclarecer alguns dos assuntos que o estudo do consumo energético revelou. De seguida apresenta-se uma análise dos restantes pontos apresentados na Tabela 2.3.

Coefficiente de transmissão térmica (U):

O coeficiente de transmissão térmica (U) representa a quantidade de calor transferido através de uma superfície com 1 m² com 1 m de espessura, em regime estacionário, quando a diferença de temperaturas entre as duas faces dessa superfície é de 1 °C. Usualmente este parâmetro é utilizado para avaliar o comportamento térmico de edifícios com a variação de algumas características da envolvente. Vários autores, como Wong et al. (2003) e Niachou et al. (2001), utilizaram este parâmetro como forma de avaliar o impacto no consumo energético das coberturas verdes, estimado através de dados experimentais, representando modelos simples.

Kotsiris et al. (2012) estudaram a influência do teor de humidade no solo no coeficiente de transmissão térmica (U) através do programa computacional LORD, concluindo que para um solo com um teor de humidade mais elevado este coeficiente é superior. Também concluíram que existe linearidade entre a variação do teor de humidade com o coeficiente de transmissão térmica, como mostra a Figura 2.17. Apesar do estudo realizado por Kotsiris et al. (2012) sobre esta influência, explicaram que esta variação no estudo dos consumos energéticos não foi utilizado pois a cobertura apenas representa 16% da envolvente exterior, não se revelando significativo.

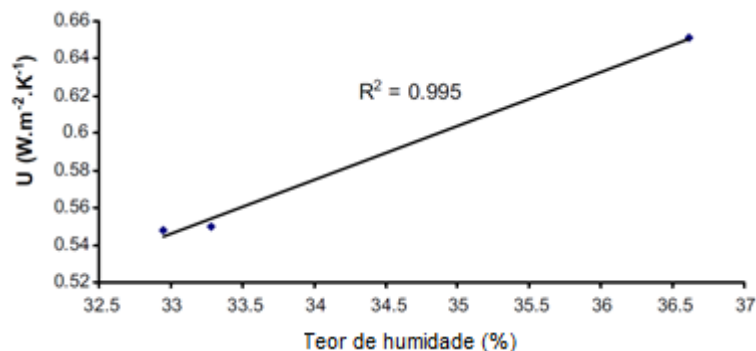


Figura 2.17 - Relação linear entre o teor de humidade e do valor de U (adaptado de Kotsiris et al., 2012)

Sailor (2008) também referiu esta linearidade e que os solos saturados podem atingir duas vezes mais a condutibilidade térmica relativamente aos solos secos. Também Wong et al. (2003) e Saiz et al. (2006) estudaram esta variação, no programa computacional DOE-2 e ESP-r, respetivamente, e concluíram o mesmo aumento do coeficiente de transmissão térmica com o aumento do teor de humidade. Os resultados foram os expectáveis, já que quando o teor de humidade aumenta, o ar que se encontra no solo é substituído pela água, que é um melhor condutor térmico.

Temperaturas:

A temperatura é o parâmetro mais usual para a validação dos modelos, como foi utilizado por Sailor (2008), Moody e Sailor (2013), e Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014). Essas validações já foram discutidas no subcapítulo 2.5.1, comparando-se de seguida apenas as temperaturas medidas em coberturas verdes e em coberturas convencionais.

Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012), compararam as temperaturas superficiais do solo e da folhagem, e as temperaturas superficiais exteriores da laje da cobertura verde e de uma cobertura convencional, obtidas pelo programa computacional TRNSYS, para o dia mais frio do ano, para o dia com maior radiação solar de inverno e para o dia mais quente do ano, apresentados na Figura 2.18.

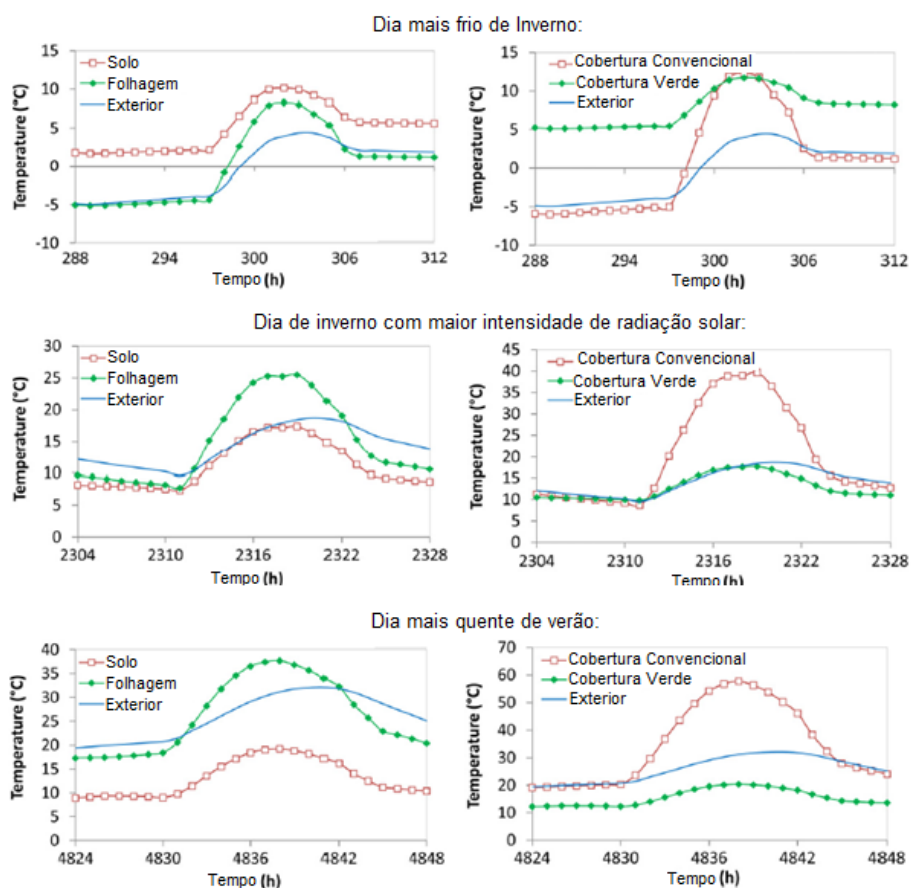


Figura 2.18 – Temperaturas da folhagem, da superfície do solo, da superfície exterior da laje da cobertura verde e da convencional, e do ambiente exterior (adaptado de Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi, 2012)

No dia mais frio do ano a temperatura do solo é sempre superior à temperatura do ambiente exterior, que os autores justificam pela presença da vegetação que impede grande parte das trocas de calor com o exterior (estabilização da temperatura) e também pela inércia térmica do solo. No dia de inverno com maior radiação solar, verificou-se que a temperatura do solo diminui relativamente à temperatura da folhagem, justificado pelo aumento da evapotranspiração que a radiação solar provoca e pelo sombreamento, arrefecendo o solo. Em relação ao dia mais quente, a temperatura do solo é cerca de 13°C mais baixa do que o ambiente exterior sobretudo devido ao sombreamento e à evapotranspiração. De notar que as folhas estando mais desprotegidas, apresentam sempre uma temperatura mais próxima ao ambiente exterior.

Em relação às temperaturas superficiais exteriores da laje de uma cobertura verde e de uma cobertura convencional, Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012), concluíram que a variação de temperaturas na cobertura verde é bastante inferior. Enquanto a cobertura convencional atinge -6°C no inverno e +58°C no verão, a cobertura verde varia apenas entre 4°C e 20°C durante todo o ano. A amplitude térmica no verão é reduzida em quase 30°C. Ouldboukhitine, belarbi e Sailor (2014) utilizaram o mesmo programa computacional, o TRNSYS, na realização da mesma comparação revelando também a reduzida amplitude térmica nas coberturas verdes comparativamente com as coberturas convencionais.

Estes autores referem a importância da reduzida amplitude térmica nas coberturas verdes para a redução dos consumos de energia e para a proteção das membranas constituintes, como as de impermeabilização que são de elevada importância num edifício. Esta conclusão está de acordo com o benefício da utilização de coberturas verdes no aumento do tempo de vida útil da cobertura relativamente a uma cobertura convencional, referido no capítulo 2.4.

Evapotranspiração:

A evapotranspiração consiste na evaporação de água do solo conjuntamente com a transpiração das plantas e é um aspeto bastante importante no efeito de arrefecimento, como se tem vindo a concluir, e bastante dependente das condições climáticas locais. Theodosiou (2003) utilizou um modelo analítico para estudar na estação de arrefecimento, em Salónica na Grécia, o benefício da evapotranspiração em relação às condições de humidade relativa do ar e da velocidade do vento. De modo a quantificar o benefício utilizou como comparação o fluxo de calor da cobertura. Concluiu que para humidades relativas do ar menores e maior velocidade do vento, o fluxo de calor na cobertura era menor pelo processo de evapotranspiração ser facilitado. Para humidades relativas do ar maiores, a vegetação apenas funciona como proteção do solo, devido ao ar encontrar-se mais próximo da saturação, dificultando o processo de evapotranspiração.

Segundo Theodosiou (2003) a velocidade do vento tem menos influência, contudo para maiores velocidades do vento as gotículas de água presentes na vegetação e no solo são transportadas, possibilitando a libertação de mais, ou seja, facilitando o processo de evapotranspiração. Assim, a velocidade do vento controla de certa forma, a humidade relativa do ar.

Lazzarin, Castellotti e Busato (2005) analisaram a influência da humidade do solo nas trocas de energia na cobertura, comparando duas coberturas verdes, uma com solo seco e outra com solo húmido, com uma cobertura convencional. Na Figura 2.19 apresenta-se os resultados destes autores.

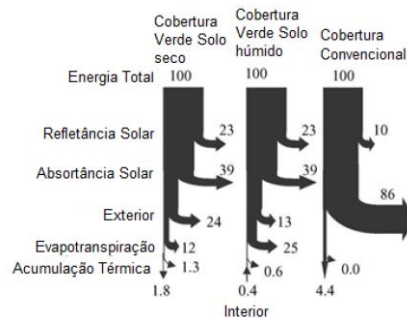


Figura 2.19 - Comparação das trocas de energia de uma cobertura verde com solo em condições secas e húmidas e de uma cobertura convencional (adaptado de Lazzarin, Castellotti e Busato, 2005)

Pela análise da Figura 2.19 verifica-se que a energia que a evapotranspiração “absorve” é cerca de duas vezes superior quando o solo está húmido. Segundo Lazzarin, Castellotti e Busato (2005), a evapotranspiração tem o poder de “retirar” calor de dentro do edifício quando em boas condições climáticas e de humidade do solo, atuando como um sistema de arrefecimento passivo, como se pode verificar pela cobertura verde com solo húmido.

Zinzi e Agnoli (2012) também estudaram a influência da humidade do solo no consumo energético, concluindo que, na estação de aquecimento, quanto mais seco o solo estiver menos energia em aquecimento é necessária, pois aumenta a resistência térmica do solo e não facilita a evapotranspiração. Na estação de arrefecimento um solo muito húmido apresenta poupanças de energia até cerca de 35% relativamente a um solo seco, pois facilita o processo de evapotranspiração.

Albedo da vegetação:

O albedo das plantas também foi alvo de estudo por parte de Ouldboukhite, Belarbi e Sailor (2014), Lazzarin, Castellotti e Busato (2005) e Zinzi e Agnoli (2012) onde obtiveram valores entre 0,23 e 0,25 através de medições experimentais.

2.5.3. Considerações finais

Da investigação realizada, conclui-se que a quantificação do benefício de uma cobertura verde está dependente de vários parâmetros. Compreendeu-se que a solução de coberturas verdes não é apenas um simples aumento na resistência térmica da cobertura mas também uma série de outros parâmetros que influenciam o consumo energético. De notar, que todos estes estudos aqui descritos não podem ser comparados diretamente pois cada um tem os seus pressupostos e simplificações, e localizam-se em zonas climáticas diferentes. Para além do programa computacional e modelo utilizado, as características dos diferentes edifícios, materiais considerados e a temperatura de conforto para a qual são calculados os consumos energéticos podem ser diferentes.

Refira-se ainda que utilizar parâmetros como temperaturas e fluxos de calor medidos experimentalmente numa cobertura verde não é uma metodologia para retirar conclusões relativas aos consumos de energia e potenciais impactos no clima urbano. Esta metodologia de estudo não consegue traduzir o impacto destas coberturas no consumo energético pois o sistema de climatização, que consiste num grande gasto de energia, depende não só das trocas de calor pela cobertura, mas também pelos restantes elementos da envolvente, como as janelas e paredes, e pelos ganhos solares e internos. Assim, reduzindo substancialmente as trocas de calor pela cobertura não significa necessariamente uma grande redução no consumo energético.

De um modo geral, a evapotranspiração e o sombreamento são favoráveis na estação de arrefecimento e desfavoráveis na estação de aquecimento. Na Tabela 2.4 apresenta-se um resumo dos fatores que influenciam o consumo energético, quando se utiliza uma cobertura verde num edifício, que se evidenciaram no estudo bibliográfico, assim como os parâmetros que os influenciam.

Tabela 2.4 - Resumo dos fatores que influenciam o consumo energético utilizando uma cobertura verde

| Fatores que influenciam o consumo energético | Aumenta com o aumento de: | Diminui com o aumento de: |
|--|---|--|
| Evapotranspiração | <ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de água disponível no solo (Rega e Precipitação) • Altura das plantas • LAI (Leaf Area Index) • Temperatura exterior • Velocidade do vento • Radiação Solar | <ul style="list-style-type: none"> • Resistência estomática da folha • Humidade relativa do ambiente exterior • Nível de isolamento térmico |
| 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 planta • LAI • Altura das plantas | - |
| Absorção de radiação solar do solo | <ul style="list-style-type: none"> • Radiação solar • Absortância do solo | <ul style="list-style-type: none"> • Sombreamento |
| Inércia térmica | <ul style="list-style-type: none"> • Massa volúmica do solo • Espessura do solo • Condutibilidade térmica | <ul style="list-style-type: none"> • Nível de isolamento da cobertura |
| Condutibilidade térmica do solo | <ul style="list-style-type: none"> • Teor de humidade no solo | - |

3. EnergyPlus

Neste capítulo será introduzido os princípios e funcionalidades do programa de modelação EnergyPlus, utilizado nesta dissertação. Seguidamente, serão apresentados todos os campos de entrada necessários às simulações, onde se abordará os princípios de funcionamento e as várias opções do programa, e por fim será exposto o modelo desenvolvido por Sailor (2008), para simular coberturas verdes.

3.1. Descrição do EnergyPlus

O EnergyPlus é um programa de simulação desenvolvido para modelar edifícios (ou zonas de um edifício) orientado para o estudo e análise do seu comportamento e desempenho energético. É um programa gratuito e acessível no sítio da Internet EnergyPlus Version 8.1.0. (2013). Foi desenvolvido pelo *US Department of energy – USDOE* (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América) – e tem as suas raízes em dois programas mais antigos, desenvolvidos entre 1970 e 1980, o BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e o DOE-2 (Department of Energy), que nasceram devido à crise energética do início dos anos de 1970, onde se constatou a importância dos consumos energéticos nos edifícios (Getting started with EnergyPlus, 2012).

Estes dois programas tinham funções muito semelhantes, cada um com as suas vantagens e limitações, e ambos escritos em linguagem Fortran. A problemática da interação com os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) e a má organização, consistia numa das maiores limitações destes programas. O EnergyPlus foi desenvolvido em linguagem Fortran 90 e com o grande objetivo de poder ter novas funções e modelos, sem a necessidade de entender a totalidade da estrutura do programa. Assim, o EnergyPlus combina as melhores capacidades e funcionalidades dos programas BLAST e DOE-2 de um modo organizado e modular, ou seja, apresenta uma estrutura separada que não afeta as diversas funções (Getting started with EnergyPlus, 2012).

A implementação de um modelo desenvolvido para simular, o mais próximo possível da realidade, o balanço energético das coberturas verdes, aliado à grande aceitação (Sailor, 2008; Castleton, 2010; Ouldboukhitine et al., 2011; Moody e Sailor, 2013; Zinzi e Agnoli, 2012; Ascione et al., 2013), e de ser um dos mais avançados programas em termos de modelação energética, são as principais razões para a escolha do EnergyPlus. Este modelo, desenvolvido graças à propriedade modular do EnergyPlus, pretende explorar os vários componentes de uma cobertura verde como a espessura do solo e as características das plantas.

De um modo geral, o EnergyPlus é um modelo unidimensional que permite calcular e prever temperaturas interiores, fluxos de calor, consumos de energia, caudais de ventilação, modelando, entre outros, os sistemas de sombreamento, de aquecimento, de arrefecimento, de iluminação e de ventilação (EnergyPlus Engineering Reference, 2013). A modelação só é possível com a correta definição de todos os parâmetros que o programa necessita, que são preenchidos no formato IDF (Input Data File). O preenchimento destes parâmetros é realizado através do IDF-Editor, que é possível ter acesso a partir do EP-Launch.

O EP-Launch foi criado para apoiar os utilizadores do Windows, com um aspeto mais fácil e prático, comparando com a possibilidade de realizar a simulação apenas com o recurso à linha de comandos DOS. A Figura 3.1, apresenta a janela do programa onde se irá controlar todos os aspetos da simulação, como a introdução do ficheiro IDF e do ficheiro climático (Weather File - ficheiro com dados climáticos de um ano tipo de uma dada localidade, que será abordado no ponto 3.2) e é, também, a janela onde se inicia a simulação.

Os parâmetros são introduzidos com recurso ao IDF-Editor e estão organizados em grupos, que possuem objetos, e dentro destes encontram-se um ou mais campos de entrada. A Figura 3.2 mostra o aspeto geral do IDF-Editor. Os grupos e objetos encontram-se na zona superior esquerda e os campos de entrada, pertencentes aos objetos, na zona inferior da Figura 3.2. Uma pequena explicação de cada campo também é apresentada, à direita da zona dos grupos e objetos. Os valores que se encontram à esquerda dos objetos, referem-se à quantidade de objetos que existe deste tipo, só existindo valor quando está a ser utilizado.

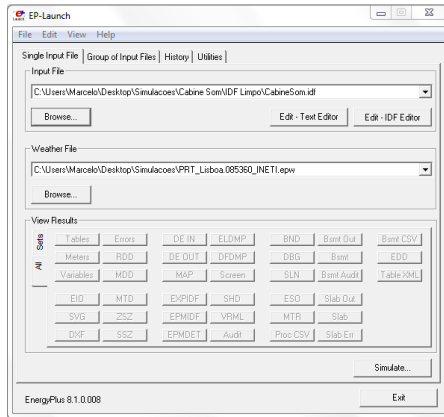


Figura 3.1 - Aspeto do EP-Launch, do EnergyPlus

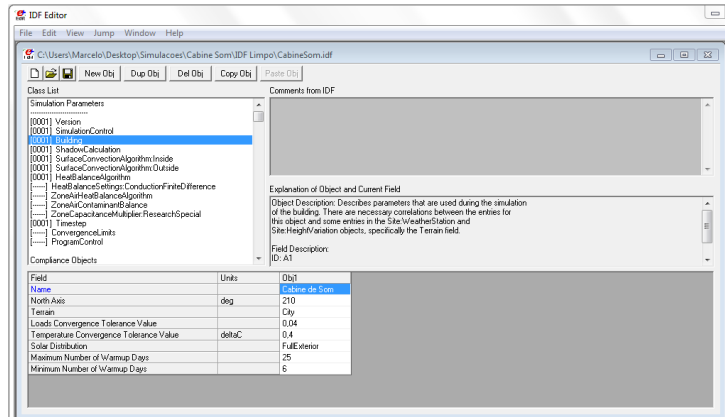


Figura 3.2 - Aspeto do IDF-Editor, do EnergyPlus

Uma das limitações do programa é a inexistência de uma interface gráfica, levando a uma dificuldade acrescida na definição da geometria do edifício (ou um compartimento do edifício). De forma a ultrapassar esta dificuldade foi utilizado o programa Google Sketchup, disponível no sítio da Internet Google SketchUp Version 13 (2013) que possibilita o desenho e a definição da geometria de forma rápida e intuitiva. Para associar este programa ao EnergyPlus, é necessário recorrer ao Plug-in – OpenStudio, disponível em OpenStudio Version 1.2 (2013) – que preenche de forma automática os campos de entrada referentes à geometria, já que proporciona a gravação em formato IDF. Na Figura 3.3 apresenta-se o programa Google Sketchup com as barras de ferramentas do Plug-in Open Studio. Para mais informações sobre esta interação deverá ser consultado Nunes, Gomes e Silva (2012).

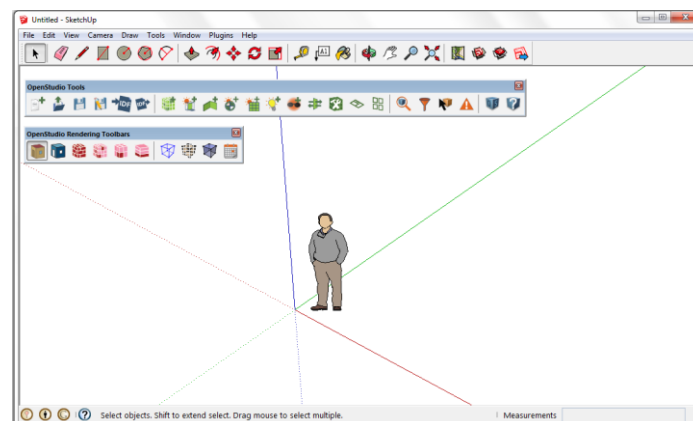


Figura 3.3 - Aspeto do programa GoogleSketchup com as barras de ferramentas do Plug-in Open Studio

3.2. Campos de entrada

Neste subcapítulo são descritos todos os campos de entrada utilizados e definidos aqueles que são comuns em todos os casos de estudo. Além do programa computacional EnergyPlus, é utilizado o Google SketchUp, para a definição da geometria do edifício/compartimento, sendo que o preenchimento dos restantes campos será realizado no IDF Editor do EnergyPlus. Alguns campos apresentam uma significativa complexidade e sugere-se a leitura do documento EnergyPlus Engineering Reference, (2013) e EnergyPlus Input Output Reference (2013), para uma descrição mais pormenorizada.

De notar que o EnergyPlus apresenta muitos parâmetros e nem todos foram preenchidos, uns porque não são relevantes para as simulações realizadas nesta dissertação, e outros porque já se encontram definidos por defeito no programa, e não afetam os resultados. Assim, só se irá referir o conjunto de parâmetros que foram efetivamente preenchidos e editados. No final de cada grupo existirá um conjunto de figuras, retiradas diretamente do programa com um exemplo de preenchimento referente ao segundo caso de estudo: Sala de ensaios da Fundação Calouste Gulbenkian (Capítulo 4.3). A ordem de apresentação dos campos de entrada segue a ordem de preenchimento adotado em todas as simulações. Os parâmetros específicos para cada caso de estudo estão apresentados no capítulo respetivo e os objetos que necessitam de ser editados em cada caso estão, neste ponto, marcados com um asterisco (*). Os restantes são comuns em todas as simulações.

3.2.1. Thermal Zones and Surfaces

Em primeiro lugar é necessário definir as características geométricas do edifício ou compartimento a estudar que se efetua no grupo *Thermal Zones and Surfaces*. Além das características geométricas, este grupo também define a zona ou zonas térmicas (*Zone*) e massas interiores (*Internal Mass*) que ajudam na estabilização da temperatura interior, ou seja, massas adicionais à inércia térmica da envolvente. Na Figura 3.4 apresenta-se este grupo com os objetos que serão preenchidos (os que possuem números associados).

A geometria, de acordo com o *Tips & Tricks for Using EnergyPlus* (2013), pode ser definida de três maneiras distintas: pela medida interior da envolvente exterior (paredes e lajes do edifício ou do compartimento), pela medida exterior da envolvente exterior, ou pela medida ao eixo da envolvente exterior, apesar da diferença de qualquer opção ser residual. Isto deve-se ao fato de o EnergyPlus apenas considerar as superfícies com espessura e com os materiais correspondentes para o cálculo de fluxos de calor, e inércias térmicas. Para os restantes cálculos a superfície é considerada sem espessura e apenas como uma superfície limitadora da zona térmica. Adotou-se, no presente estudo, a medida pelo interior da superfície.

Como referido, devido à facilidade de introdução dos dados das características geométricas foi utilizado o programa Google SketchUp. Neste programa auxiliar, apenas foram introduzidas as características geométricas e os nomes de cada superfície de modo a serem identificados corretamente no IDF Editor. Apesar de ser possível a inserção de mais parâmetros neste programa como algoritmos, exposição solar, ganhos internos e a possibilidade de ser realizado a própria simulação, foi decidido apenas preencher os dois parâmetros referidos. Contudo mais parâmetros pré-definidos provêm do Google SketchUp. Os objetos *Global Geometry Rules* (Regras globais de geometria) e *Building Surface: Detailed* (Superfícies do edifício: Detalhados) vêm preenchidos automaticamente, sendo que apenas o segundo será editado. Em oposição, os objetos *Zone* (Zona), *Internal Mass* (Massa Interna), *Fenestration Surface: Detailed* (Superfícies de Fenestração: Detalhadas) e *Window Property: Shadow Control* (Propriedades das Janelas: Controlo do Sombreamento) pertencentes a este grupo, são definidos no IDF Editor.

Para a definição da geometria, tendo em conta o seguimento do preenchimento dos dados no EnergyPlus, têm de ser seguidos os seguintes passos:

- Abrir o programa Google Sketchup com o Plug-in Open studio já instalado.
- Utilizar o comando *New Space*, da barra de ferramentas do plug-in Open studio, para criar um novo espaço e de seguida selecioná-lo (linhas descontinuas).
- Com os comandos do Google Sketchup criar a geometria, por exemplo com os comandos *retangule* e *push pull*. A ajuda do *tape measure tool* é importante para definir corretamente as medidas.
- Selecionar o botão *Inspetor*, da barra de ferramentas do plug-in Google SkecthUp, onde aparece uma série de dados referentes à geometria definida. No grupo *Openstudio Geometry* selecionar o comando *Surface* e modificar o nome das superfícies de modo a serem identificadas corretamente no EnergyPlus.
- No mesmo botão, *Inspetor*, selecionar o comando *Thermal Zone* no grupo *Openstudio HVAC*, e criar uma *Thermal Zone* (Zona Térmica). Seguidamente, no grupo *OpenStudio Geometry*, selecionar o comando *Space* e definir a *Thermal zone* criada, de modo a não haver problemas de interação entre os dois programas. Este nome pode ser posteriormente modificado.
- Para criar sombreamentos no edifício/compartimento é possível através da criação de uma zona de sombreamento (*New Shading Surface Group*) e com esta zona ativa desenhar a superfície de sombreamento.
- Por fim, gravar esta geometria apenas através do botão da barra de ferramentas do plugin Openstudio, *Export EnergyPlus IDF*.
- De seguida pode-se abrir este ficheiro no EnergyPlus, que dependendo da versão do EnergyPlus, terá de ser transitada, através de *File – transition version*, no EP-Launch. Também existe a possibilidade de abrir novamente este ficheiro no Google SketchUp. Para isso, abre-se o programa e a partir do comando *Import EnergyPlus IDF*, do plug-in Openstudio, abre-se o ficheiro. Como o ficheiro pode possuir dados que o programa não consegue ler, sugere-se que as definições mais complexas deverão ser tratadas somente no EnergyPlus.

3.2.1.1. Global Geometry Rules

No objeto *Global Geometry Rules* são definidos as regras geométricas utilizadas para introduzir os vértices de cada superfície através do sistema de coordenadas (*Coordinate System*) e ordem de numeração (*Starting Vertex Position* e *Vertex Entry Direction*). Como referido, é um objeto preenchido automaticamente que apesar de não ser editado, na Figura 3.5 apresenta-se o preenchimento deste.

3.2.1.2. Zone

O objeto *Zone* possibilita a criação de zonas térmicas. É designado por zona térmica um determinado volume onde a temperatura no seu interior é constante. Todas as características estão associadas a uma zona e assim poderá ser pedido como *output*, dados específicos de cada zona. Em todos os casos estudados, nesta dissertação, apenas será criada uma zona, pois os compartimentos serão estudados separadamente. Na Figura 3.6 apresenta-se este objeto preenchido. Estes parâmetros são iguais em todas as simulações, incluindo o nome “Zona”.

3.2.1.3. Building Surface: Detailed *

As superfícies são especificadas no objeto *Building Surface: Detailed*, sendo que existem campos de entrada que serão editados posteriormente pois são necessários parâmetros que ainda não estão definidos até aqui. São definidos os seguintes parâmetros:

- Nome da superfície (proveniente do Google SketchUp) – *Name*.
- Tipo de superfície (cobertura, parede ou pavimento) – *Surface Type*.
- Nome do tipo de construção (materiais, definidos posteriormente e editados aqui) – *Construction Name*.
- Nome da zona térmica (definida posteriormente e editado aqui) – *Zone Name*;
- Condição de fronteira exterior (adiabático, exterior, entre outros) – *Outside Boundary Condition*. Nesta dissertação apenas serão definidos dois tipos de fronteira dos elementos construtivos:
 - a) Adiabático – Esta condição implica que não há transferência de calor entre as superfícies, constituintes do elemento construtivo, exceto na superfície interior onde haverá absorção e liberação de calor devido à sua inércia térmica.
 - b) Exterior – A fronteira implica a existência de trocas de calor entre as superfícies interiores e exteriores e a liberação e absorção de calor através da inércia térmica do elemento construtivo.
- Exposição solar (sim ou não) – *Sun Exposure*.
- Exposição ao vento (sim ou não) – *Wind Exposure*.
- Coordenadas geométricas da localização dos vértices da superfície respetiva (proveniente no Google SketchUp) – *Vertex coordinate*.

Neste objeto são controladas vários parâmetros importantes na simulação, que serão definidos em detalhe em cada caso de estudo. Na Figura 3.7 apresenta-se um exemplo de preenchimento deste objeto.

3.2.1.4. Fenestration Surface: Detailed *

Os vãos envidraçados, que são denominados por sub-superfícies, são especificadas no objeto *Fenestration Surface: Detailed*, sendo que existem campos de entrada que serão editados posteriormente pois são necessários parâmetros que ainda não estão definidos até aqui. São definidos os seguintes parâmetros (Figura 3.8):

- Nome da superfície (proveniente do Google SketchUp) – *Name*.
- Tipo de superfície (cobertura, parede ou pavimento) – *Surface Type*.
- Nome do tipo de construção (materiais, definidos posteriormente e editados aqui) – *Construction Name*.
- Nome da superfície onde a sub-superfície se encontra – *Building Surface Name*.
- Nome do tipo de controlo do sombreamento utilizado - *Shading Control Name*.
- Coordenadas geométricas da localização dos vértices da superfície respetiva (proveniente no Google SketchUp) – *Vertex coordinate*.

3.2.1.5. Window Property: Shading Control *

A calendarização do sistema de proteção dos vãos envidraçados é definida no objeto *Window Property: Shading Control*, sendo necessário definir os seguintes parâmetros (Figura 3.9):

- Nome do controlo da proteção – *Name*.
- Tipo de sombreamento (interior, exterior) – *Shading Type*.
- Nome do tipo de construção da proteção – *Construction with Shading Name*.
- Tipo de controlo da proteção (calendário da proteção) – *Shading Control Type*.
- *Set point*.

Para definir o intervalo de tempo em que a proteção solar está ativa, é necessário definir a janela e a proteção solar no objeto *Construction (ponto 3.2.5.8)* e no objeto *Fenestration Surface: Detailed* apenas a janela. O campo de entrada *Construction with Shading Name* remeterá para a janela + proteção solar definida no objeto *Construction* e este objeto (*Window Property: Shading Control*) é referido no objeto *Fenestration Surface: Detailed*. Deste modo a proteção solar fica corretamente definida e ativa para o intervalo de tempo definido nos dois últimos campos de entrada deste objeto (*Shading Control Type* e *Set point*). Em todos os casos de estudo foi utilizado a proteção solar sempre que a temperatura exterior ultrapassa os 25°C, que é definido conforme se apresenta na Figura 3.9.

3.2.1.6. Internal Mass *

A massa interna tem como objetivo inserir massas adicionais às da envolvente exterior de modo a contabilizar a inércia térmica de toda a zona térmica. As paredes da envolvente são automaticamente tidas em conta no cálculo desta inércia, assim este objeto tem como objetivo introduzir a constituição de paredes interiores que tenham o poder de estabilizar a temperatura interior através da sua massa. É descrita através de uma construção (*Construction Name*) especificada, de uma zona térmica (*Zone Name*) e da área de material correspondente (*Surface Area*), como se verifica na Figura 3.10.

3.2.1.7. Shading: Zone: Detailed *

As superfícies de sombreamento são definidas no objeto *Shading: Zone: Detailed* que se for desenhado no Google SketchUp através da zona de sombreamento, este campo é preenchido automaticamente. Na Figura 3.11 apresenta-se um exemplo de preenchimento.

| Thermal Zones and Surfaces | |
|--|--|
| [0001] GlobalGeometryRules | |
| [.....] GeometryTransform | |
| [0001] Zone | |
| [.....] ZoneList | |
| [.....] ZoneGroup | |
| [0036] BuildingSurface:Detailed | |
| [.....] Wall:Detailed | |
| [.....] RoofCeiling:Detailed | |
| [.....] Floor:Detailed | |
| [.....] Wall:Exterior | |
| [.....] Wall:Adiabatic | |
| [.....] Wall:Underground | |
| [.....] Wall:Interzone | |
| [.....] Roof | |
| [.....] Ceiling:Adiabatic | |
| [.....] Ceiling:Interzone | |
| [.....] Floor:GroundContact | |
| [.....] Floor:Adiabatic | |
| [.....] Floor:Interzone | |
| [0004] FenestrationSurface:Detailed | |
| [.....] Window | |
| [.....] Door | |
| [.....] GlazedDoor | |
| [.....] Window:Interzone | |
| [.....] Door:Interzone | |
| [.....] GlazedDoor:Interzone | |
| [0001] WindowProperty:ShadingControl | |
| [.....] WindowProperty:FrameAndDivider | |
| [.....] WindowProperty:AirflowControl | |
| [.....] WindowProperty:StormWindow | |
| [0001] InternalMass | |
| [.....] Shading:Site | |
| [.....] Shading:Building | |
| [.....] Shading:Site:Detailed | |
| [.....] Shading:Building:Detailed | |
| [.....] Shading:Overhang | |
| [.....] Shading:Overhang:Projection | |
| [.....] Shading:Fin | |
| [.....] Shading:Fin:Projection | |

Figura 3.4 - Grupo Thermal Zones and Surfaces

| Field | Units | Obj1 |
|---|-------|------------------|
| Starting Vertex Position | | UpperLeftCorner |
| Vertex Entry Direction | | Counterclockwise |
| Coordinate System | | Relative |
| Daylighting Reference Point Coordinate System | | Relative |
| Rectangular Surface Coordinate System | | Relative |

Figura 3.5 - Objeto Global Geometry Rules

| Field | Units | Obj1 |
|-----------------------------|-------|------|
| Name | | Zona |
| Direction of Relative North | deg | 0 |
| X Origin | m | 0 |
| Y Origin | m | 0 |
| Z Origin | m | 0 |

Figura 3.6 - Objeto Zone

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 |
|-----------------------------------|-------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Name | | Cob. 120TF 1 | Cob. 120TF 2 | Cob. 120TF 3 | Cob. 120TF 4 |
| Surface Type | | Roof | Roof | Roof | Roof |
| Construction Name | | Cob. 120TF | Cob. 120TF | Cob. 120TF | Cob. 120TF |
| Zone Name | | Zona | Zona | Zona | Zona |
| Outside Boundary Condition | | Outdoors | Outdoors | Outdoors | Outdoors |
| Outside Boundary Condition Object | | | | | |
| Sun Exposure | | SunExposed | SunExposed | SunExposed | SunExposed |
| Wind Exposure | | WindExposed | WindExposed | WindExposed | WindExposed |
| View Factor to Ground | | | | | |
| Number of Vertices | | | | | |
| Vertex 1 X-coordinate | m | 7,6 | 0 | 3,60956710E-16 | 3,60956710E-16 |
| Vertex 1 Y-coordinate | m | 0 | 1,8 | 3,7 | 7,4 |
| Vertex 1 Z-coordinate | m | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |
| Vertex 2 X-coordinate | m | 7,6 | -7,21911420E-16 | -7,21911420E-16 | -7,21911420E-16 |
| Vertex 2 Y-coordinate | m | 1,8 | 3,3 | 7 | 10,7 |
| Vertex 2 Z-coordinate | m | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |
| Vertex 3 X-coordinate | m | 0 | -3,4 | -3,4 | -3,4 |
| Vertex 3 Y-coordinate | m | 1,8 | 3,3 | 7 | 10,7 |
| Vertex 3 Z-coordinate | m | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |
| Vertex 4 X-coordinate | m | 0 | -3,4 | -3,4 | -3,4 |
| Vertex 4 Y-coordinate | m | 0 | 1,8 | 3,7 | 7,4 |
| Vertex 4 Z-coordinate | m | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |

Figura 3.7 - Objeto Building Surface: Detailed

| Field | Units | Obj1 |
|-----------------------------------|-------|-----------|
| Name | | Janela |
| Surface Type | | Window |
| Construction Name | | Janela |
| Building Surface Name | | Parede S0 |
| Outside Boundary Condition Object | | |
| View Factor to Ground | | |
| Shading Control Name | | Estores |
| Frame and Divider Name | | |
| Multiplier | | |
| Number of Vertices | | |
| Vertex 1 X-coordinate | m | 8,6 |
| Vertex 1 Y-coordinate | m | 0,1 |
| Vertex 1 Z-coordinate | m | 2,8 |
| Vertex 2 X-coordinate | m | 8,6 |
| Vertex 2 Y-coordinate | m | 0,1 |
| Vertex 2 Z-coordinate | m | 0,8 |
| Vertex 3 X-coordinate | m | 8,6 |
| Vertex 3 Y-coordinate | m | 4,1 |
| Vertex 3 Z-coordinate | m | 0,8 |
| Vertex 4 X-coordinate | m | 8,6 |
| Vertex 4 Y-coordinate | m | 4,1 |
| Vertex 4 Z-coordinate | m | 2,8 |

Figura 3.8 - Objeto Fenestration Surface: Detailed

| Field | Units | Obj1 |
|---------------------------------------|----------------|----------------------|
| Name | | Estores |
| Shading Type | | InteriorBlind |
| Construction with Shading Name | | Estores |
| Shading Control Type | | OnHighOutdoorAirTemp |
| Schedule Name | | |
| Setpoint | W/m2, W or deg | 25 |
| Shading Control Is Scheduled | | No |
| Glare Control Is Active | | No |
| Shading Device Material Name | | |
| Type of Slat Angle Control for Blinds | | FixedSlatAngle |
| Slat Angle Schedule Name | | |
| Setpoint 2 | W/m2 or deg C | |

Figura 3.9 - Objeto Window Property: Shading Control

| Field | Units | Obj1 |
|-------------------|-------|--------------------|
| Name | | Paredes interiores |
| Construction Name | | BA25 La MDF |
| Zone Name | | Zona |
| Surface Area | m2 | 19,25 |

Figura 3.10 - Objeto Internal Mass

| Field | Units | Obj1 |
|-----------------------------|-------|----------------|
| Name | | Pala |
| Base Surface Name | | Parede S0 |
| Transmittance Schedule Name | | |
| Number of Vertices | | |
| Vertex 1 X-coordinate | m | 9,6 |
| Vertex 1 Y-coordinate | m | 0 |
| Vertex 1 Z-coordinate | m | 2,92571796E+00 |
| Vertex 2 X-coordinate | m | 9,6 |
| Vertex 2 Y-coordinate | m | 16,5 |
| Vertex 2 Z-coordinate | m | 2,92571796E+00 |
| Vertex 3 X-coordinate | m | 8,6 |
| Vertex 3 Y-coordinate | m | 16,5 |
| Vertex 3 Z-coordinate | m | 2,92571796E+00 |
| Vertex 4 X-coordinate | m | 8,6 |
| Vertex 4 Y-coordinate | m | 0 |
| Vertex 4 Z-coordinate | m | 2,92571796E+00 |

Figura 3.11 - Objeto Shading: Zone: Detailed

3.2.2. Simulation Parameters

O grupo *Simulation Parameters* é o primeiro grupo que o IDF Editor apresenta, onde é possível introduzir os parâmetros gerais utilizados em todas as simulações, que controlarão todo o processo de cálculo dos modelos, tais como os algoritmos de cálculo, os passos-de-tempo das simulações e as definições de convergência. Na Figura 3.12 encontram-se os objetos presentes neste grupo, assim como os que são necessários de preencher (com número associado)

3.2.2.1. Version

Foi utilizada a versão mais recente até à data de realização deste trabalho – 8.1, como mostra a Figura 3.13.

3.2.2.2. Simulation Control

O objeto *Simulation Control* permite ao utilizador escolher o tipo de simulação pretendida, como por exemplo, uma simulação para um cálculo de dimensionamento de um equipamento ou de um fluxo de energia sem utilizar nenhum ficheiro climático, ou então uma simulação onde todos os equipamentos e fluxos de energia estão previamente definidos e o que se pretende é um estudo a partir de um ficheiro climático ou outro equiparável num dado período de tempo. A última situação é a que se enquadra nos objetivos do presente estudo, tendo sido considerado o ficheiro climático de Lisboa que corresponde à localização de todos os edifícios estudados. Este ficheiro climático está explicado no ponto 3.2.3.1. Assim, foi definido que a simulação apenas irá utilizar o ficheiro climático e num dado período de tempo de simulação – *Run Simulation for Weather File Run Periods: Yes* – como mostra a Figura 3.14, onde todas as outras opções são *No* (Não).

3.2.2.3. Building *

O grupo referente ao Edifício (*Building*), contém dois parâmetros que são alusivos ao caso de estudo, especificamente, e que não são tratados aqui: *Name* (Nome do edifício/compartimento em estudo) e *North Axis* (O ângulo que o edifício/compartimento em estudo faz com o norte). Este último é muito importante pois define a posição da construção e depende totalmente da maneira como o edifício foi desenhado no Google SketchUp. O sentido positivo corresponde ao dos ponteiros do relógio e a partir do Norte verdadeiro.

Os restantes parâmetros são iguais em todas as simulações:

- Terreno (*Terrain*): O tipo de terreno onde está localizado o edifício afeta a exposição ao vento. Estando todos os edifícios estudados em Lisboa, (no meio urbano e no centro da cidade) foi definido como campo de entrada – *City* (Cidade).
- Algoritmo de Distribuição Solar (*Solar Distribution*): A radiação solar que atinge o edifício pode ser tratada de 5 maneiras diferentes (EnergyPlus Input Output Reference, 2013). Estas opções referem-se à forma como a radiação é refletida pela superfície exterior, e como é refletida ou absorvida a radiação que entra dentro do edifício através das janelas. A opção escolhida – *Full Interior and Exterior* – tem em consideração todos os sombreamentos e quando a radiação solar atinge o interior (através de uma janela), o programa assume que a radiação incide nos elementos e é absorvida dependendo da absorptância dos mesmos. Toda a

radiação refletida é adicionada à radiação difusa e distribuída uniformemente por todas as superfícies interiores.

- Definições de *Warmup*: O *Warmup* tem o objetivo de assegurar que os primeiros resultados dos primeiros dias da simulação sejam fidedignos, para isso tem de garantir um número suficiente de dados de fluxos e temperaturas anteriores para se basear. Os primeiros resultados são provenientes de variadas iterações, onde o programa começa com temperaturas e fluxos elevadas até convergir. O *Warmup* é realizado segundo os seguintes parâmetros:
 - a) Valor de tolerância na convergência das cargas térmicas (W) (*Loads Convergence Tolerance Value*): Este valor indica a diferença máxima que as cargas térmicas podem apresentar até se dar a convergência. Como *input* foi colocado o valor por defeito do programa – 0,04 W.
 - b) Valor de tolerância até à convergência da temperatura (°C) (*Temperature Convergence Tolerance Value*): À semelhança do parâmetro anterior, indica a diferença máxima que as temperaturas podem ter até se dar a convergência. Foi colocado o valor por defeito de programa – 0,4 °C.
 - c) Números de dias máximo para o *Warmup* (*Maximum Number of Warmup Days*): O valor utilizado é o por defeito – 25 dias. Apenas para construções muito complexas é que poderá não ser suficiente e terá de ser aumentado, o que não acontece nos casos estudados.
 - d) Números de dias mínimo para o *Warmup* (*Minimum Number of Warmup Days*): O *input* foi o por defeito – 6. Este mínimo tem a função de evitar convergências falsas e muito rápidas. De acordo com o EnergyPlus Input Output Reference (2013), um estudo concluiu que quanto maior o número de *Warmup days* (dias de *Warmup*) melhores resultados se obteria para os primeiros resultados. O valor 6 foi considerado o número aceitável para a qualidade da convergência.

Na Figura 3.15 apresentam-se os campos preenchidos com o exemplo da Gulbenkian – Sala de ensaios.

3.2.2.4. Shadow Calculation

De modo a controlar as sombras do modelo, através do movimento solar, será escolhido no objeto *Shadow Calculation* o método de cálculo por defeito e o mais simples – *Average Over Days In Frequency* (Frequência média durante os dias) – com uma frequência de cálculo de 20 dias, valor este também por defeito do programa. Significa que neste intervalo de tempo serão usados valores médios (dos 20 dias respetivos) da posição do sol e da área de superfície exposta à radiação solar. De notar que a frequência de cálculo é bastante importante pois determina a quantidade de radiação solar que incide no compartimento/edifício que afetará todos os valores de fluxo e energia. O cálculo da posição solar é baseado no algoritmo astronómico de Meeus, usando as coordenadas geográficas do local que se encontram no ficheiro climático. Estes parâmetros são iguais em todos os casos de estudo e na Figura 3.16 apresenta-se o preenchimento deste objeto.

3.2.2.5. Surface Convection Algorithm: Inside

O campo *Surface Convection Algorithm: Inside* permite controlar o modelo de cálculo para as trocas de calor por convecção do interior de todas as superfícies. Foi usado o modelo TARP que

correlaciona as trocas de calor com a diferença de temperatura. A escolha do algoritmo, além de ser a definida por defeito do programa, foi a escolhida por Sailor (2008), que desenvolveu o modelo de coberturas verdes para o EnergyPlus, aquando da validação do modelo desenvolvido. Este modelo será explicado com detalhe no ponto 3.3. Na Figura 3.17 apresenta-se o preenchimento deste campo, que é igual em todas as simulações.

3.2.2.6. Surface Convection Algorithm: Outside

À semelhança do campo anterior, o campo *Surface Convection Algorithm: Outside* controla o modelo de cálculo para as trocas de calor por convecção do exterior de todas as superfícies e foi escolhido o modelo DOE-2, por defeito do programa e que também é o usado por Sailor (2008). O algoritmo foi desenvolvido a partir de medições experimentais e vai ser utilizado em todos os casos de estudo. Na Figura 3.18 apresenta-se o preenchimento deste campo.

3.2.2.7. Heat Balance Algorithm

No objeto *Heat Balance Algorithm* define-se o tipo de algoritmo para o controlo da transferência de calor e difusão do vapor de água através de todos os elementos construtivos. Foi utilizado o algoritmo por defeito do programa – Conduction Transfer Function (CTF). Este também foi utilizado por Sailor (2008) e até ao momento é o único algoritmo que suporta o modelo de coberturas verdes (*RoofVegetation*). É o algoritmo mais simples que o EnergyPlus tem disponível e só tem em conta o calor sensível. Futuras melhorias do modelo de Sailor (2008) passará, certamente, pela possibilidade de utilizar um algoritmo de maior complexidade como o *Conduction Finite Difference* (CFD), que apresentará melhorias no modelo, como a variação da condutibilidade térmica do solo com a humidade, que o algoritmo CTF não tem em consideração. Na Figura 3.19 apresenta-se este objeto preenchido, sendo que os restantes campos, referentes a limites de temperaturas e coeficientes de transmissão térmica, são definidas por defeito do programa.

3.2.2.8. Timestep

O objeto *Timestep* representa o número que define os passos-de-tempo numa hora em que são realizados os cálculos do modelo. Para a simulação apresentar passos-de-tempo suficientes para a estabilização do modelo, e tendo em conta o valor mínimo que o modelo de coberturas verdes necessita (12), foi escolhido o valor 60. Isto quer dizer que o EnergyPlus irá fazer cálculos de um em um minuto. De referir que apenas valores múltiplos de 60 poderão ser utilizados. Na Figura 3.20 apresenta-se este campo preenchido.

| Simulation Parameters | |
|--|--|
| [0001] Version | |
| [0001] SimulationControl | |
| [0001] Building | |
| [0001] ShadowCalculation | |
| [0001] SurfaceConvectionAlgorithm:Inside | |
| [0001] SurfaceConvectionAlgorithm:Outsic | |
| [0001] HeatBalanceAlgorithm | |
| [.....] HeatBalanceSettings:ConductionFin | |
| [.....] ZoneAirHeatBalanceAlgorithm | |
| [.....] ZoneAirContaminantBalance | |
| [.....] ZoneCapacitanceMultiplier:Researcl | |
| [0001] Timestep | |
| [.....] ConvergenceLimits | |
| [.....] ProgramControl | |

Figura 3.12 - Grupo Simulation Parameters

| Field | Units | Obj1 |
|--------------------|-------|------|
| Version Identifier | | 8.1 |

Figura 3.13 - Objeto Version

| Field | Units | Obj1 |
|---|-------|------|
| Do Zone Sizing Calculation | | No |
| Do System Sizing Calculation | | No |
| Do Plant Sizing Calculation | | No |
| Run Simulation for Sizing Periods | | No |
| Run Simulation for Weather File Run Periods | | Yes |

Figura 3.14 - Objeto Simulation Control

| Field | Units | Obj1 |
|---|--------|-------------------------|
| Name | | Cabine de Som |
| North Axis | deg | 150 |
| Terrain | | City |
| Loads Convergence Tolerance Value | | 0,04 |
| Temperature Convergence Tolerance Value | deltaC | 0.4 |
| Solar Distribution | | FullInteriorAndExterior |
| Maximum Number of Warmup Days | | 25 |
| Minimum Number of Warmup Days | | 6 |

Figura 3.15 - Objeto Building

| Field | Units | Obj1 |
|--|-------|----------------------------|
| Calculation Method | | AverageOverDaysInFrequency |
| Calculation Frequency | | 20 |
| Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations | | 15000 |
| Polygon Clipping Algorithm | | |
| Sky Diffuse Modeling Algorithm | | |

Figura 3.16 - Objeto Shadow Calculation

| Field | Units | Obj1 |
|-----------|-------|------|
| Algorithm | | TARP |

Figura 3.17 - Surface Convection Algorithm: Inside

| Field | Units | Obj1 |
|-----------|-------|-------|
| Algorithm | | DOE-2 |

Figura 3.18 - Objeto Surface Convection Algorithm: Outside

| Field | Units | Obj1 |
|--|--------|----------------------------|
| Algorithm | | ConductionTransferFunction |
| Surface Temperature Upper Limit | C | 200 |
| Minimum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Value | W/m2-K | 0.1 |
| Maximum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Value | W/m2-K | 1000 |

Figura 3.19 - Objeto Heat Balance Algorithm

| Field | Units | Obj1 |
|------------------------------|-------|------|
| Number of Timesteps per Hour | | 60 |

Figura 3.20 - Objeto Time Step

3.2.3. Location and Climate

No grupo *Location and Climate*, apesar dos vários campos existentes, são apenas preenchidos os três campos correspondentes ao período de simulação (*Run Simulation*), à precipitação (*Site: Precipitation*) e ao período de rega da cobertura (*Roof irrigation*). Isto deve-se ao facto da utilização de um ficheiro climático referente à cidade onde se localizam todos os casos de estudo, Lisboa, que possui grande parte das informações relevantes. Na Figura 3.21 são apresentados os objetos deste grupo.

3.2.3.1. Run Period *

O período de simulação é definido no objeto *Run Period*, onde se introduz o dia e mês do começo da simulação e o dia e mês em que acaba. Este dependerá do estudo que se realiza e será definido com clareza nos capítulos dos casos de estudo respetivos. Existem, contudo, campos de entrada que são iguais em todas as simulações:

- Utilizar os dias de feriados e de dias especiais do ficheiro climático (*Use Weather File Holidays and Special Day*) – Optou-se por não utilizar esta função já que na calendarização será prevista este tipo de dias e no ficheiro climático não existir este tipo de informação.

- Utilizar as mudanças de horário do ficheiro climático (*Use Weather File Daylight Saving Period*) – Foi optado por não se usar esta mudança, contudo não traz diferença nenhuma à simulação pois as horas de consumo vão ser iguais já que a mudança de inverno e a de verão anulam-se.
- Utilizar a regra do feriado que calha no fim-de-semana (*Apply Weekend Holiday Rule*) – Nos EUA se o feriado coincide no fim-de-semana é passado para um dia da semana. Em Portugal tal não acontece.
- Utilizar os indicadores de precipitação do ficheiro climático (*Use Weather File Rain Indicators*) – Como já referido, o ficheiro climático não possui esta informação.
- Utilizar os indicadores de neve do ficheiro climático (*Use Weather File Snow indicators*) – À semelhança do último campo de entrada, o ficheiro climático também não possui esta informação.
- Número de vezes que o período de simulação será repetido (*Number of Times Runperiod to be Repeated*) – Apenas será repetido uma vez em todas as simulações.

Na Figura 3.22 apresentam-se os campos de entrada preenchidos, com o exemplo de um período de simulação de um ano.

3.2.3.2. Weather File

O ficheiro climático (*Weather File*) não representa nenhum objeto ou grupo do EnergyPlus, porém foi decidido colocar aqui a sua explicação, já que o grupo *Location and Climate* (Localização e Clima) não é preenchido mais exaustivamente devido à existência dos dados necessários neste ficheiro. Este é introduzido no EP-Launch no momento da simulação, como já foi referido, e no formato EPW (EnergyPlus Weatherfiles). O ficheiro climático está disponível no sítio da Internet Weather Files EP (2014).

O ficheiro climático utilizado em todas as simulações foi desenvolvido pelo LNEG e baseado na interpolação de dados climáticos publicados pelo Instituto de Meteorologia combinados com os dados do LNEG. O Ficheiro data de 2005 e traduz um ano tipo (1 de Janeiro a 31 de Dezembro) com valores horários das condições climáticas. De seguida, são apresentados os parâmetros medidos pelo Instituto de Meteorologia e pelo LNEG:

- Coordenadas Geográficas: Latitude e Longitude
- Altitude
- Fuso Horário
- Temperatura ambiente, medida sem estar em contacto com qualquer humidade ou com incidência direta de radiação (Dry Bulb Temperature (°C))
- Humidade relativa (Relative Humidity (%))
- Radiação total, incluindo a difusa e direta, que incide num plano horizontal à superfície do terreno (Global Horizontal Radiation (Wh/m²))
- Direção do vento (Wind Direction (°))
- Velocidade do Vento (Wind Speed (m/s))

O ficheiro apresenta outros parâmetros que foram estimados a partir destes últimos, e apresentam-se apenas os que o EnergyPlus utiliza nas simulações:

- Temperatura do ponto de orvalho (Dew point Temperature (°C))
- Pressão atmosférica (Atmospheric Pressure (Pa))

- Radiação horizontal infravermelha proveniente do céu (Horizontal Infrared Radiation Intensity from sky (Wh/m²))
- Radiação direta num plano perpendicular à radiação solar (Direct Normal Radiation (Wh/m²))
- Radiação difusa num plano horizontal ao solo (Diffuse Horizontal Radiation (Wh/m²))
- Fração do céu coberta por nuvens (Total Sky Cover)
- Fração do céu que se apresenta opaco e que impossibilita a visibilidade acima das nuvens (Opaque Sky Cover)

A razão para o uso deste ficheiro foi a impossibilidade de possuir todos os dados climáticos de todos os locais estudados e com a precisão necessária. Uma das limitações deste ficheiro é a inexistência de dados em relação à precipitação, que como se verá com mais pormenor no ponto 3.3, é muito importante quando se pretende modelar coberturas verdes. A precipitação foi modelada no EnergyPlus através da calendarização no grupo *Schedules* (Calendários). Esta modelação da precipitação é analisada e definida no capítulo 5.

3.2.3.3. Site: Precipitation

Devido à inexistência de dados quanto à precipitação em Lisboa no ficheiro climático, foi necessário preencher o objeto *Site: Precipitation*. Este é preenchido através de uma calendarização, onde se introduz o valor de precipitação em metros por hora. Para tal, através do único modelo que o EnergyPlus tem disponível (Schedule and Design Level) e de uma calendarização, que será explicada com detalhe no ponto 5., e dos valores de precipitação de Lisboa recolhidos em Precipitação Lisboa (2014), simula-se a precipitação. Na Figura 3.23 apresenta-se os dados preenchidos, em que existem três hipóteses: duas anuais, onde se apresenta um valor grosseiro anual de precipitação e o da hipótese da calendarização, a opção escolhida. O preenchimento deste objeto é igual em todas as simulações.

3.2.3.1. Roof Irrigation

O objeto *Roof Irrigation* foi desenvolvido por Sailor (2008) para acompanhar o modelo de coberturas verdes desenvolvido pelo mesmo autor. Foi introduzido no EnergyPlus devido à importância que a quantidade de água no solo da cobertura verde tem na sua modelação e também para representar a realidade, já que todas as coberturas verdes necessitam de um sistema de rega, principalmente na altura do verão. Existem duas hipóteses para a utilização deste campo, uma calendarização dos horários e caudal de rega em metros por hora (*Irrigation Rate Schedule Name*) ou uma função que permite calcular o nível de saturação do solo e limitar esta saturação, assim quando atingir o nível pretendido a rega calendarizada é interrompida (*Irrigation Maximum Saturation threshold*). Esta opção está dependente do modelo escolhido (*Irrigation Model Type*). A opção selecionada para todos os casos de estudo foi a “calendarização inteligente” (*SmartSchedule*), com um nível de humidade de saturação mínimo de 40% (sugerido por Sailor (2008)) (Figura 3.24).

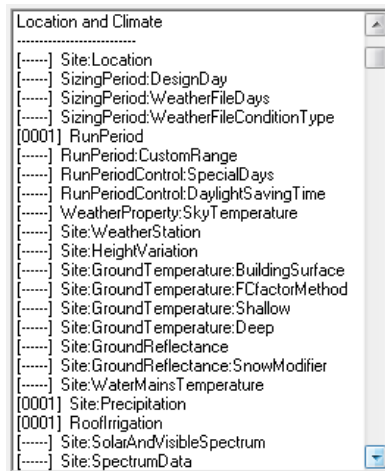


Figura 3.21 – Grupo Location and Climate

| Field | Units | Obj1 |
|--|-------|--------|
| Name | | Ano |
| Begin Month | | 1 |
| Begin Day of Month | | 1 |
| End Month | | 12 |
| End Day of Month | | 31 |
| Day of Week for Start Day | | Sunday |
| Use Weather File Holidays and Special Days | | No |
| Use Weather File Daylight Saving Period | | No |
| Apply Weekend Holiday Rule | | No |
| Use Weather File Rain Indicators | | No |
| Use Weather File Snow Indicators | | No |
| Number of Times Runperiod to be Repeated | | 1 |
| Increment Day of Week on repeat | | |
| Start Year | | |

Figura 3.22 - Objeto Run Period

| Field | Units | Obj1 |
|---|-------|------------------------|
| Precipitation Model Type | | ScheduleAndDesignLevel |
| Design Level for Total Annual Precipitation | m/yr | 0.6505 |
| Precipitation Rates Schedule Name | | Precipitacao |
| Average Total Annual Precipitation | m/yr | 0.6505 |

Figura 3.23 - Objeto Site: Precipitation

| Field | Units | Obj1 |
|---|---------|---------------|
| Irrigation Model Type | | SmartSchedule |
| Irrigation Rate Schedule Name | | Rega |
| Irrigation Maximum Saturation Threshold | percent | 40 |

Figura 3.24 – Objeto Roof Irrigation

3.2.4. Schedules

A utilização do grupo *Schedules* possibilita a definição de um horário de utilização, ou seja, calendarizar, todos os processos que envolvem o modelo, como por exemplo a iluminação, o horário em que o edifício está aberto (ocupado), o horário de funcionamento do ar condicionado e/ou as temperaturas de controlo. De referir que os valores e horários só serão definidos nos casos de estudos específicos, sendo que aqui só será explicado o funcionamento do grupo.

Nesta dissertação, em todas as simulações, serão controlados através da calendarização, os seguintes aspetos:

- Horário de ocupação do edifício/compartimento – “Aberto”.
- Temperaturas e horário de funcionamento do ar condicionado – “Aquecimento” e “Arrefecimento”.
- Horário e quantificação da rega da cobertura verde – “Rega”.
- Horário e quantificação da Precipitação – “Precipitação”.

Na Figura 3.25 apresentam-se todos os campos deste grupo sendo que para caracterizar o calendário, de cada aspeto referido anteriormente, será necessário apenas preencher os 4 campos que apresentam valores associados e que se desenvolvem nos subcapítulos seguintes.

3.2.4.1. Schedule Type Limits

O nome (*Name*), os valores limites (*Lower limit value* e *Upper limit value*) e o tipo numérico (*Numeric type*) de cada tipo de calendário são definidos no objeto *Schedule Type Limits*. O horário de ocupação é definido com o nome “Aberto” e terá como limites 0 e 1, em que 0 significa que está fechado e 1 que se encontra em funcionamento. Já as temperaturas do Ar Condicionado (A/C) terão como limite -60°C e 200°C, de modo a englobarem um grande leque de temperaturas. A precipitação e a rega terão

valores limite entre 0 e 1000 m/h, já que ambos estão associados a quantidades de água. Em todos estes casos o tipo numérico escolhido é contínuo, de modo a possibilitar valores decimais, exceto o calendário de ocupação, que é discreto, pois pretende-se apenas saber se está aberto (1) ou fechado (0). Na Figura 3.26 apresenta-se o preenchimento deste objeto, que é igual em todos os caso de estudo. De notar que a última opção deste objeto que se refere ao tipo de unidades não é utilizado pelo EnergyPlus tendo sido colocado adimensional em todos os tipos de calendários.

3.2.4.2. Schedule: Day: Hourly *

O objeto *Schedule: Day: Hourly* define o dia tipo, ou seja, o horário ao longo das 24 horas do dia, em que os tipos de calendários funcionam e no caso do ar condicionado, da rega e da precipitação, qual o valor a que funcionam. Note-se que neste objeto apenas é possível referir-se a horas certas, e não meias horas por exemplo, o que neste estudo não constituiu um problema. Para o dia tipo do horário de abertura optou-se pelo nome “Aberto” e colocou-se 1 no horário em que o edifício/compartimento está aberto e 0 quando está fechado. Para o sistema de ar condicionado, na altura do inverno (aquecimento), colocou-se o nome de “Aquecimento” e optou-se pelo valor de -20°C quando este não está em funcionamento e o valor que está programado quando está em funcionamento. O valor de -20°C foi escolhido pois só a partir deste valor é que o ar condicionado começa a funcionar, o que, neste caso, nunca acontece. Para o sistema de ar condicionado em regime de arrefecimento deu-se o nome de “Arrefecimento” e colocou-se o valor de 100 °C quando este não está em funcionamento e o valor programado quando está. O raciocínio análogo aplica-se à escolha do valor 100°C. A rega e a precipitação também serão definidas da mesma forma, sendo que quando não existe nem rega nem precipitação o valor é 0. Na Figura 3.28 apresenta-se um exemplo de campos preenchidos que variam dependendo do caso de estudo.

De referir que a hora 1 (Hour 1) é referente ao intervalo 00:01h – 01:00h e que na figura só está apresentado até à hora 20 devido à impossibilidade de colocar as 24 horas na Figura 3.28. Outro aspeto a referir é a possibilidade de se criar vários dias tipo para o mesmo tipo de calendário, como é exemplo vários níveis de precipitação diferentes, como é o caso.

3.2.4.3. Schedule: Week: Daily *

Cada dia tipo, caracterizado no objeto anterior, será associado a uma semana tipo. Será definido cada dia da semana (Domingo a Sábado), onde se indicará os dias em que o dia tipo funcionará. Denominou-se para a semana do horário de abertura “Aberto”, para o ar condicionado em regime de aquecimento “Aquecimento” e em regime de arrefecimento de “Arrefecimento”, para a rega e precipitação, “Rega” e “Precipitação”, respetivamente. Na Figura 3.27 apresenta-se um exemplo do preenchimento destes campos que depende do caso de estudo. Neste objeto, de acordo com os dias tipo definidos anteriormente, também poderão existir várias semanas tipo. De referir que apesar dos restantes campos não serem utilizados em nenhuma simulação, foram preenchidos devido a conflitos com o programa.

3.2.4.4. Schedule: Year *

No objeto *Schedule: Year*, é associado cada semana definida no campo anterior a um ano tipo. Cada ano tipo terá que corresponder ao ano inteiro mesmo que o período de simulação não seja a totalidade do ano, caso contrário a simulação resulta em erro. Para o horário de abertura, o ano tipo foi denominado de “Aberto”, para o A/C em regime de aquecimento “A/C - Aquecimento” e em regime de

arrefecimento “A/C – Arrefecimento”, e para a rega e precipitação, “Rega” e “Precipitação”, respetivamente. Na Figura 3.29 apresenta-se um exemplo de preenchimento dos campos que varia consoante o caso estudo.

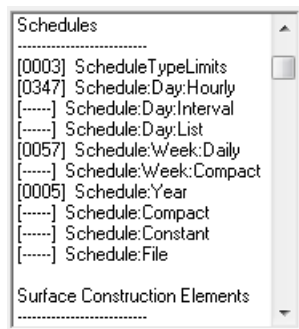


Figura 3.25 - Grupo Schedules

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 |
|-------------------|--------|---------------------|---------------|-----------------|
| Name | | Precipitacao e Rega | Aberto | Ar Condicionado |
| Lower Limit Value | varies | 0 | 0 | -100 |
| Upper Limit Value | varies | 1000 | 1 | 200 |
| Numeric Type | | Continuous | Discrete | Continuous |
| Unit Type | | Dimensionless | Dimensionless | Dimensionless |

Figura 3.26 – Objeto Schedules Type Limits

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 |
|-----------------------------------|-------|----------|--------|-------------|---------------|
| Name | | Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Sunday Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Monday Schedule:Day Name | | Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Tuesday Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Wednesday Schedule:Day Name | | Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Thursday Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Friday Schedule:Day Name | | Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Saturday Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| Holiday Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| SummerDesignDay Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| WinterDesignDay Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| CustomDay1 Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |
| CustomDay2 Schedule:Day Name | | Sem Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento |

Figura 3.27 – Objeto Schedule: Week: Daily

| Field | Units | Obj1 | Obj2 |
|---------------------------|--------|---------------------|---------------------|
| Name | | Rega | Sem Rega |
| Schedule Type Limits Name | | Precipitacao e Rega | Precipitacao e Rega |
| Hour 1 | varies | 0 | 0 |
| Hour 2 | varies | 0 | 0 |
| Hour 3 | varies | 0 | 0 |
| Hour 4 | varies | 0 | 0 |
| Hour 5 | varies | 0 | 0 |
| Hour 6 | varies | 0 | 0 |
| Hour 7 | varies | 0 | 0 |
| Hour 8 | varies | 0 | 0 |
| Hour 9 | varies | 0 | 0 |
| Hour 10 | varies | 0,003 | 0 |
| Hour 11 | varies | 0 | 0 |
| Hour 12 | varies | 0 | 0 |
| Hour 13 | varies | 0 | 0 |
| Hour 14 | varies | 0,003 | 0 |
| Hour 15 | varies | 0 | 0 |
| Hour 16 | varies | 0 | 0 |
| Hour 17 | varies | 0 | 0 |
| Hour 18 | varies | 0 | 0 |
| Hour 19 | varies | 0 | 0 |
| Hour 20 | varies | 0 | 0 |
| Hour 21 | varies | 0 | 0 |
| Hour 22 | varies | 0 | 0 |

Figura 3.28 – Objeto Schedule: Day: Hourly

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 | Obj5 |
|---------------------------|-------|---------------------|--------|-----------------|-------------------|---------------------|
| Name | | Rega | Aberto | A/C Aquecimento | A/C Arrefecimento | Precipitacao |
| Schedule Type Limits Name | | Precipitacao e Rega | Aberto | Ar Condicionado | Ar Condicionado | Precipitacao e Rega |
| Schedule:Week Name 1 | | Rega | Aberto | Aquecimento | Arrefecimento | sem1 |
| Start Month 1 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Start Day 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| End Month 1 | 9 | 12 | 12 | 12 | 12 | 1 |
| End Day 1 | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 7 |
| Schedule:Week Name 2 | | Sem Rega | | | | sem2 |
| Start Month 2 | 1 | | | | | 1 |
| Start Day 2 | 1 | | | | | 8 |
| End Month 2 | 5 | | | | | 1 |
| End Day 2 | 31 | | | | | 14 |
| Schedule:Week Name 3 | | Sem Rega | | | | sem3 |
| Start Month 3 | 10 | | | | | 1 |
| Start Day 3 | 1 | | | | | 15 |
| End Month 3 | 12 | | | | | 1 |
| End Day 3 | 31 | | | | | 21 |

Figura 3.29 - Objeto Schedule: Year

3.2.5. Surface Constrution Elements

No grupo *Surface Construction Elements* são definidos os materiais e as soluções construtivas da envolvente exterior e interior do edifício/compartimento: Paredes, Pavimentos, Coberturas, Janelas e Portas. Na Figura 3.30 apresentam-se todos os campos possíveis de preenchimento e os que serão preenchidos (com um valor associado).

O funcionamento deste grupo baseia-se na definição dos materiais da envolvente e seguida de uma associação dos materiais com as soluções construtivas respetivas, através do objeto *Construction* (Construção). As soluções construtivas serão associadas com as superfícies desenhadas no Google SkecthUp, que se encontra no IDF Editor em forma de coordenadas, através do objeto *Building Surface: Detailed* (Superfícies do edifício: Detalhados) do grupo *Thermal Zones and Surfaces* (Zonas Térmicas e Superfícies).

3.2.5.1. Material *

A definição da envolvente inicia-se com a caracterização de todos os materiais opacos existentes no objeto *Material*. De modo a não entrar em conflito com o programa, materiais muito finos (igual ou

inferior a 3mm) e/ou com condutibilidades térmicas muito elevadas (iguais ou superiores a 5,0 W/(m.°C), não são introduzidos. De acordo com EnergyPlus Input Output Reference (2013), estes materiais, além de não contribuírem para a resistência térmica do conjunto nem para a armazenagem de calor, podem causar problemas graves na modelação da transferência de calor. Os parâmetros de preenchimento neste campo são apresentados na Figura 3.31, e explicados individualmente de seguida.

- Nome (*Name*): Nome definido para o material.
- Rugosidade (*Roughness*): Este parâmetro apenas influencia o coeficiente de convecção exterior, contudo foi preenchido em todos os materiais de modo a não provocar erros no programa. O preenchimento será de muito rugoso a muito liso.
- Espessura (*Thickness*): Espessura do material na direção perpendicular à camada, em metros.
- Condutibilidade térmica (*Conductivity*): Representa a quantidade calor transferido através de uma superfície de 1 m² com 1 m de espessura, quando a diferença de temperaturas entre as duas faces dessa superfície é de 1 °C. As unidades são em W/(m.°C).
- Massa volúmica (*Density*): Massa volúmica do material em kg/m³.
- Calor específico (*Specific heat*): Define a variação térmica de um material ao receber determinada quantidade de calor. As unidades são J/(kg.°C).
- Absorptância térmica (*Thermal absorptance*): Representa a fração de radiação incidente de comprimentos de onda longa – Calor – que é absorvida. Este afeta a transferência de calor entre as superfícies interiores e exteriores.
- Absorptância solar (*Solar absorptance*): À semelhança do parâmetro anterior, representa a fração de radiação solar incidente que é absorvida, afetando a transferência de calor entre as superfícies. A radiação solar inclui os comprimentos de onda do espectro visível, do infravermelho e ultravioleta.
- Absorptância visível (*Visible absorptance*): O raciocínio análogo dos dois parâmetros anteriores é aplicado à radiação de comprimento de onda do espectro visível. Este é diferente da radiação solar devido ao menor intervalo de frequências.

3.2.5.2. Material: AirGap *

O espaço de ar é usado para caracterizar espaços vazios entre dois materiais opacos. Como se verifica pela Figura 3.32 o único campo necessário a preencher no objeto *Material: AirGap*, além do nome, é a resistência térmica do ar. Este objeto será usado para o espaço de ar entre o teto falso e a laje.

3.2.5.3. Material: RoofVegetation *

A cobertura verde é simulada no objeto *Material: RoofVegetation*. O modelo foi criado por Sailor (2008) e estes parâmetros representam a influência de uma cobertura com vegetação num edifício, sendo utilizada como um material exterior. O modelo que possibilita esta simulação é explicado no ponto 3.3, sendo que aqui serão explicados apenas os campos de entrada a preencher. Na Figura 3.33 apresenta-se um exemplo de preenchimento dos parâmetros, referente à Gulbenkian – Sala de ensaios, e são explicados de seguida:

- Nome (*Name*): Nome da cobertura verde.
- Altura das Plantas (*Height of Plants*): altura das plantas (m) é definida aqui e é limitada entre 0,005 m e 1,0 m.
- Índice de área de folhas (LAI – *Leaf Area Index*): área projetada de folhas por unidade de área de superfície. É limitada entre 0,001 e 5,0.
- Refletividade das folhas (*Leaf Reflectivity*): representa a fração de radiação incidente que é refletida pelas folhas (albedo). A radiação inclui os espectros visíveis, infravermelhos e ultravioletas e o valor tem limite de 0,5.
- Emissividade das folhas (*Leaf Emissivity*): consiste na radiação térmica emitida pelas folhas, comparando com um corpo negro à mesma temperatura. Este é utilizado na troca de radiação de comprimento de onda comprido e o valor tem de estar compreendido entre 0,8 e 1,0.
- Resistência Estomática mínima (*Minimum Stomatal Resistance*): representa a resistência das plantas para transpirarem. Valores baixos facilitam o transporte de humidade pela planta para o ambiente exterior. O valor é limitado entre 50 s/m a 300 s/m.
- Nome da camada do solo (*Soil Layer Name*): nome do substrato.
- Rugosidade do solo (*Roughness*): este parâmetro apenas influencia o coeficiente de convecção exterior. O preenchimento será de muito rugoso a muito liso.
- Espessura do solo (*Thickness*): espessura do solo em metros. O valor deve estar compreendido entre 0,05 m e 0,7 m.
- Condutibilidade do solo seco (*Conductivity of dry soil*): condutibilidade em $W/(m \cdot ^\circ C)$, com limites de 0,35 e 1,5.
- Massa volúmica do solo seco (*Density of dry soil*): a massa volúmica deve ser entre 300 e 2000 kg/m^3 ;
- Calor específico do solo seco (*Specific Heat of dry soil*): as unidades deste parâmetro são $J/(kg^\circ C)$. O documento EnergyPlus Input Output Reference (2013) esclarece que as unidades não são comuns.
- Absorptância Térmica do solo (*Thermal Absorptance*): representa a fração de radiação incidente de comprimentos de onda longa – Calor – que é absorvida. Este afeta a transferência de calor entre as superfícies interiores e exteriores. O valor deve estar compreendido entre 0,0 e 1,0, em que 1,0 representa um corpo negro.
- Absorptância Solar do solo (*Solar Absorptance*): à semelhança do parâmetro anterior, representa a fração de radiação solar incidente que é absorvida, afeta a transferência de calor entre as superfícies. A radiação solar inclui os comprimentos de onda do espectro visível, do infravermelho e ultravioletas. O valor deve estar compreendido entre 0,0 e 1,0, em que 1,0.
- Absorptância Visível do solo (*Visible Absorptance*): o raciocínio análogo dos dois parâmetros anteriores é aplicado à radiação de comprimento de onda do espectro visível. Este é diferente da radiação solar devido ao menor intervalo de frequências. O valor deve estar compreendido entre 0,5 e 1,0.
- Teor de humidade de saturação do solo (*Saturation Volumetric Moisture Content of the Soil Layer*): permite definir o teor de humidade para o qual o solo fica saturado. O valor deve variar entre 0,1 e 0,5.
- Teor de humidade residual do solo (*Residual Volumetric Moisture Content of the Soil Layer*): permite a definição do teor de humidade residual. O valor deve estar compreendido entre 0,01 e 0,1.
- Teor de humidade Inicial do solo (*Initial Volumetric Moisture Content of the Soil Layer*): define o teor de humidade inicial do solo. Deve estar compreendido entre 0,05 e 0,5.

- Método de cálculo da difusão da humidade (*Moisture Diffusion Calculation Method*): permite a escolha do algoritmo que modela o transporte de humidade pelo solo através de um dos dois modelos possíveis: *Simple* e *Advanced*. O escolhido foi o *Advanced*, já que é o mais recente e modela este transporta de um modo mais realista. Esta escolha pode levar a um grande número de passos-de-tempo para atingir a estabilidade.

3.2.5.4. Window Material: Glazing *

Os vãos envidraçados são definidos no objeto *Window Material: Simple Glazing System*. Quando a definição das características do vão envidraçado são incertas e as únicas informações disponíveis são o tipo de envidraçado (vidro simples ou duplo) é possível utilizar os exemplos que o EnergyPlus fornece de preenchimento de campos de entrada, disponíveis na conjunto *Data Set* do programa. Na Figura 3.34 apresenta-se o preenchimento deste objeto.

3.2.5.5. Window Material: Gas *

No objeto *Window Material: Gas* define-se o tipo de gás que separa as duas camadas de um vidro duplo. O EnergyPlus possui vários gases já definidos que podem ser utilizados, o qual foi definido ar. Este objeto não é necessário preencher no caso da sala de ensaios contudo na Figura 3.35 apresenta-se um exemplo de preenchimento.

3.2.5.6. Window Material: Shade *

O objeto *Window Material: Shade* define uma proteção solar composta por estores de rolo e é necessário preencher os seguintes parâmetros: transmitância e refletância dos vários espectros de radiação (*Transmittance* e *reflectance*), espessura (*thickness*), condutibilidade térmica (*conductivity*) e espaçamento entre o estore e a janela (*shade to glass distance*). Os restantes parâmetros estão preenchidos automaticamente pelo EnergyPlus. Este objeto não é necessário preencher no caso de estudo sala de ensaios contudo na Figura 3.36 apresenta-se um exemplo de preenchimento.

3.2.5.7. Window Material: Blind *

A proteção do vão envidraçado por estores venezianos é definida no objeto *Window Material:Blind*. As características necessárias para a sua correta definição são: orientação das ripas (*slat orientation*); largura das ripas (*slat width*); separação entre as ripas (*slat separation*); espessura das ripas (*slat thickness*); ângulo das ripas (*slat angle*); condutibilidade das ripas (*slat conductivity*); transmitância da radiação solar, difusa, visível e visível difuso das ripas (*slat beam solar, diffuse solar, beam visible and diffuse visble transmittance*); refletância da radiação solar, difusa, visível e visível difuso da face interior e da face exterior das ripas (*front nad back side slat beam solar, diffuse solar, beam visible and diffuse visble reflectance*); distância entre o estore veneziano e o vão envidraçado (*blind to glass distance*). As restantes definições são preenchidas automaticamente pelo EnergyPlus e todos os valores que dizem respeito aos diversos espectros de radiação são consideradas iguais. As características de vários tipos de estores venezianos podem ser encontradas no conjunto *Data Set* do programa EnergyPlus. Na Figura 3.37 apresenta-se o preenchimento deste campo.

3.2.5.8. Constrution *

A partir dos materiais definidos, constituem-se os vários elementos construtivos (Figura 3.38). São compostos por camadas (materiais) e dispostos do exterior para o interior do edifício/compartimento. É possível compor até 10 camadas para materiais opacos e 8 para janelas, o que não cria nenhuma restrição no estudo.

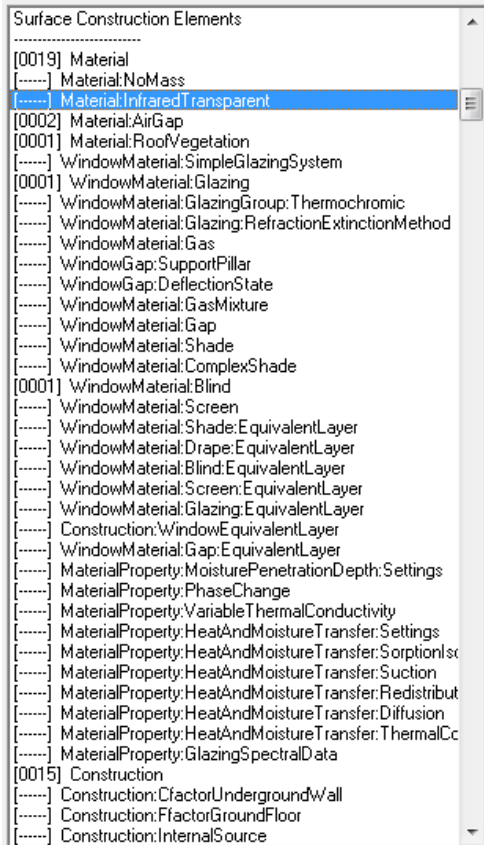


Figura 3.30 - Grupo Surface Construction Elements

| Field | Units | Obj5 | Obj6 | Obj7 |
|---------------------|--------|------------|-----------|--------------|
| Name | | B. A. 90cm | Brita | La Rocha 6cm |
| Roughness | | Rough | VeryRough | MediumRough |
| Thickness | m | 0,9 | 0,1 | 0,06 |
| Conductivity | W/m-K | 2,3 | 2 | 0,042 |
| Density | kg/m3 | 2350 | 2000 | 100 |
| Specific Heat | J/kg-K | 880 | 840 | 710 |
| Thermal Absorptance | | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Solar Absorptance | | 0,5 | 0,4 | 0,4 |
| Visible Absorptance | | 0,5 | 0,4 | 0,4 |

Figura 3.31 - Objeto Material

| Field | Units | Obj1 |
|--------------------|--------|------------|
| Name | | Caivadeair |
| Thermal Resistance | m2.K/W | 0,08 |

Figura 3.32 - Objeto Material: Air Gap

| Field | Units | Obj1 |
|--|---------------|-----------------|
| Name | | Obj. Verde Ref. |
| Height of Plants | m | 0,1 |
| Leaf Area Index | dimensionless | 2 |
| Leaf Reflectivity | dimensionless | 0,25 |
| Leaf Emissivity | | 0,95 |
| Minimum Stomatal Resistance | s/m | 180 |
| Soil Layer Name | | Solo |
| Roughness | | Rough |
| Thickness | m | 0,25 |
| Conductivity of Dry Soil | W/m-K | 1 |
| Density of Dry Soil | kg/m3 | 1500 |
| Specific Heat of Dry Soil | J/kg-K | 1900 |
| Thermal Absorptance | | 0,9 |
| Solar Absorptance | | 0,8 |
| Visible Absorptance | | 0,8 |
| Saturation Volumetric Moisture Content of the Soil Layer | | 0,3 |
| Residual Volumetric Moisture Content of the Soil Layer | | 0,01 |
| Initial Volumetric Moisture Content of the Soil Layer | | 0,1 |
| Moisture Diffusion Calculation Method | | Advanced |

Figura 3.33 - Objeto Material: Roof Vegetation

| Field | Units | Obj1 |
|--|-------|-----------------|
| Name | | Janela |
| Optical Data Type | | SpectralAverage |
| Window Glass Spectral Data Set Name | | |
| Thickness | m | 0,02 |
| Solar Transmittance at Normal Incidence | | 0,653 |
| Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence | | 0,064 |
| Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence | | 0,064 |
| Visible Transmittance at Normal Incidence | | 0,841 |
| Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence | | 0,077 |
| Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence | | 0,077 |
| Infrared Transmittance at Normal Incidence | | 0 |
| Front Side Infrared Hemispherical Emissivity | | 0,84 |
| Back Side Infrared Hemispherical Emissivity | | 0,84 |
| Conductivity | W/m-K | 0,9 |

Figura 3.34 - Objeto Window Material: Glazing

| Field | Units | Obj1 |
|-----------|-------|-----------|
| Name | | Ar janela |
| Gas Type | | Air |
| Thickness | m | 0,02 |

Figura 3.35 - Objeto Window Material: Gas

| Field | Units | Obj1 |
|-----------------------------------|---------------|-----------------|
| Name | | Estores de rolo |
| Solar Transmittance | dimensionless | 0,4 |
| Solar Reflectance | dimensionless | 0,4 |
| Visible Transmittance | dimensionless | 0,4 |
| Visible Reflectance | dimensionless | 0,4 |
| Infrared Hemispherical Emissivity | dimensionless | 0,9 |
| Infrared Transmittance | dimensionless | 0 |
| Thickness | m | 0,005 |
| Conductivity | W/m-K | 0,1 |
| Shade to Glass Distance | m | 0,05 |
| Top Opening Multiplier | | 0,5 |
| Bottom Opening Multiplier | | 0,5 |
| Left-Side Opening Multiplier | | 0,5 |
| Right-Side Opening Multiplier | | 0,5 |
| Airflow Permeability | dimensionless | 0 |

Figura 3.36 - Objeto Window Material: Shade

| Field | Units | Obj1 |
|---|-------|------------|
| Name | | Estores |
| Slat Orientation | | Horizontal |
| Slat Width | m | 0,025 |
| Slat Separation | m | 0,02 |
| Slat Thickness | m | 0,001 |
| Slat Angle | deg | 45 |
| Slat Conductivity | W/m-K | 0,9 |
| Slat Beam Solar Transmittance | | 0 |
| Front Side Slat Beam Solar Reflectance | | 0,5 |
| Back Side Slat Beam Solar Reflectance | | 0,5 |
| Slat Diffuse Solar Transmittance | | 0 |
| Front Side Slat Diffuse Solar Reflectance | | 0,5 |
| Back Side Slat Diffuse Solar Reflectance | | 0,5 |
| Slat Beam Visible Transmittance | | 0 |
| Front Side Slat Beam Visible Reflectance | | 0,5 |
| Back Side Slat Beam Visible Reflectance | | 0,5 |
| Slat Diffuse Visible Transmittance | | 0 |
| Front Side Slat Diffuse Visible Reflectance | | 0,5 |
| Back Side Slat Diffuse Visible Reflectance | | 0,5 |
| Slat Infrared Hemispherical Transmittance | | 0 |
| Front Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity | | 0,5 |
| Back Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity | | 0,5 |
| Blind to Glass Distance | m | 0,05 |
| Blind Top Opening Multiplier | | 0,5 |

Figura 3.37 - Objeto Window Material: Blind

| Field | Units | Obj6 | Obj7 | Obj8 | Obj9 | Obj10 | Obj11 | Obj12 |
|---------------|-------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|----------------|
| Name | | BA 15 Linoleo | Cob. Viga | Cob. 120TF | Cob. 30TF | Cob. Viga 50TF | Janela | Lajeta 120TF |
| Outside Layer | | B.A. 15cm | Cob. Verde Ref. | Cob. Verde Ref. | Cob. Verde Ref. | Cob. Verde Ref. | Janela | B.A. 5cm |
| Layer 2 | | Linoleo | Brita | Brita | Brita | Brita | | Brita |
| Layer 3 | | | B.A. 90cm | B.A. 20cm | B.A. 20cm | B.A. 90cm | | B.A. 20cm |
| Layer 4 | | | | Caixadear | Caixadear | Caixadear | | Caixadear |
| Layer 5 | | | | La Rocha 3cm | La Rocha 3cm | La Rocha 3cm | | La Rocha 3cm |
| Layer 6 | | | | Ripas aluminio | Ripas aluminio | Ripas aluminio | | Ripas aluminio |

Figura 3.38 – Objeto Construction

3.2.6. Internal Gains

Os ganhos internos incluem qualquer fonte de calor, nomeadamente os ganhos associados ao metabolismo dos ocupantes, dos equipamentos e dispositivos de iluminação. De modo a facilitar a modelação, em cada caso de estudo é definido um valor fixo em W/m^2 que traduz os ganhos internos, admitindo-se que o período de funcionamento é igual ao horário de ocupação do edifício/compartimento. Assim, o único campo preenchido é o correspondente às luzes (*Lights*) onde se coloca a estimativa dos ganhos internos. Na Figura 3.39 apresenta-se este grupo e verifica-se que apenas o objeto luzes (*Lights*) tem um valor associado.

3.2.6.1. Lights *

Neste objeto é definido os ganhos internos em W/m^2 e um exemplo de preenchimento está representado pela Figura 3.40. O preenchimento passa pela associação destes ganhos a uma zona e um tipo de calendário e pela definição do modo de cálculo. Este modo de cálculo abrange um valor único em W , um valor dependendo do número de pessoas ($W/pessoa$) e um valor dependendo da área (W/m^2). Em todas as simulações foi escolhido o último caso.

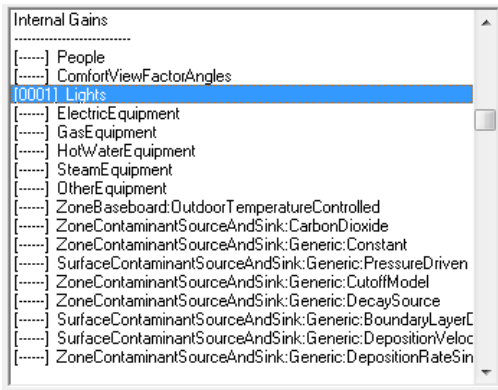


Figura 3.39 - Grupo Internal Gains

| Field | Units | Obj1 |
|--|----------|-----------------|
| Name | | Ganhos Internos |
| Zone or ZoneList Name | | Zona |
| Schedule Name | | Aberto |
| Design Level Calculation Method | | Watts/Area |
| Lighting Level | W | |
| Watts per Zone Floor Area | W/m2 | 7 |
| Watts per Person | W/person | |
| Return Air Fraction | | |
| Fraction Radiant | | |
| Fraction Visible | | |
| Fraction Replaceable | | |
| End-Use Subcategory | | Lights |
| Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature | | |
| Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co | | |
| Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co | 1/K | |

Figura 3.40 - Objeto Lights

3.2.7. Zone Airflow

Uma importante característica no cálculo de fluxos de calor é a ventilação, natural ou mecânica, do edifício/compartimentos, pois com a renovação do ar as necessidades de aquecimento ou arrefecimento sofrem variações. Na estação de aquecimento será considerada com uma perda, já que o ar exterior arrefece o ar interior, enquanto na estação de arrefecimento, esta ventilação poderá ser benéfica em certas situações. Esta ventilação é regida por valores mínimos, definidos pelo RECS 2 (2013) e é admitido que todos os edifícios/compartimentos estudados estão em conformidade com este regulamento. Como se pode observar na Figura 3.41, o único objeto utilizado para indicar o caudal de ventilação é o *Zone Ventilation: Design Flow Rate* (Ventilação da zona: Caudal dimensionado). Este tem a capacidade de modelar este parâmetro de uma forma bastante simplificada.

3.2.7.1. Zone Infiltration: Design Flow Rate*

No objeto *Zone Infiltration: Design Flow Rate* é definido o caudal de ventilação no compartimento em caudal por unidade de área (m^3/m^2), tal como representado no exemplo da Figura 3.42. Em alternativa, e analogamente aos ganhos internos, a ventilação também pode ser definida de outros modos, como pelo caudal ou por renovações por hora. De referir que se admite o funcionamento desta ventilação apenas no horário em que o edifício está aberto e é diferente para cada caso de estudo.

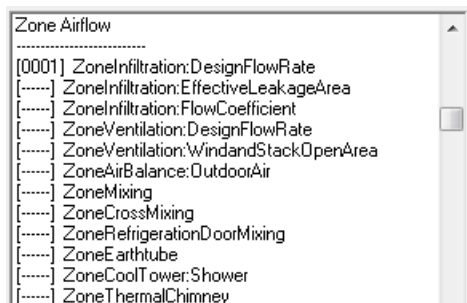


Figura 3.41 - Grupo Zone Airflow

| Field | Units | Obj1 |
|-------------------------------------|---------|--------------|
| Name | | Ventilacao |
| Zone or ZoneList Name | | Zona |
| Schedule Name | | Aberto |
| Design Flow Rate Calculation Method | | Flow/Area |
| Design Flow Rate | m3/s | |
| Flow per Zone Floor Area | m3/s-m2 | 0,0008333333 |

Figura 3.42 - Objeto Zone Infiltration: Design Flow Rate

3.2.8. HVAC Template

Por último, a indicação do funcionamento do ar-condicionado é definida no grupo *HVAC Template*. Como explicado no sub-grupo *Schedules*, o horário e as temperaturas de funcionamento estão aí definidas, portanto no grupo *HVAC Template* apenas será remetido a esse calendário. Para isso definiu-se o termostato em – *HVAC template: Thermostat* – onde se fez referência aos calendários de aquecimento e de arrefecimento e definiu-se no objeto *HVAC Template:Zone:Ideal Loads Air System* o termostato utilizado. Na Figura 3.43 apresenta-se o grupo preenchido.

3.2.8.1. HVAC Template: Thermostat

No objeto *HVAC Template: Thermostat* são associados os calendários de aquecimento e arrefecimento com o termostato. As temperaturas de *set point* e os horários de funcionamento estão presentes nestes calendários, portanto este preenchimento é igual em todos os caso de estudo (Figura 3.43)

3.2.8.2. HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System

De modo ao sistema de AVAC entrar em funcionamento é necessário o preenchimento do objeto *HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System*. Aqui associou-se o termostato definido ao sistema de ar condicionado e à zona. Outros parâmetros são necessários mas como não têm influência nos casos de estudo específicos, foram adotados os por defeito do programa. Na Figura 3.44 apresenta-se os campos de entrada deste objeto preenchidos, que são iguais em todos os casos de estudo.

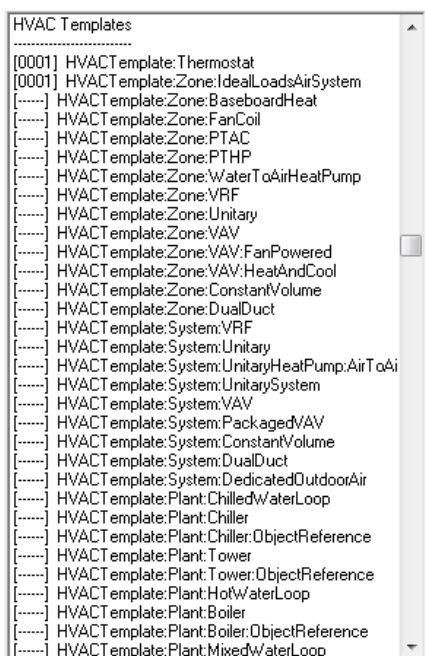


Figura 3.43 - Grupo HVAC Templates

| Field | Units | Obj1 |
|--------------------------------|-------|-------------------|
| Name | | Air Condicionado |
| Heating Setpoint Schedule Name | | A/C Aquecimento |
| Constant Heating Setpoint | C | |
| Cooling Setpoint Schedule Name | | A/C Arrefecimento |
| Constant Cooling Setpoint | C | |

Figura 3.44 - Objeto HVAC Template: Thermostat

| Field | Units | Obj1 |
|--|------------------|---------------------------|
| Zone Name | | Zona |
| Template Thermostat Name | | Air Condicionado |
| System Availability Schedule Name | | |
| Maximum Heating Supply Air Temperature | C | 50 |
| Minimum Cooling Supply Air Temperature | C | 13 |
| Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio | kgWater/kgDryAir | 0,0156 |
| Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio | kgWater/kgDryAir | 0,0077 |
| Heating Limit | | NoLimit |
| Maximum Heating Air Flow Rate | m3/s | |
| Maximum Sensible Heating Capacity | W | |
| Cooling Limit | | NoLimit |
| Maximum Cooling Air Flow Rate | m3/s | |
| Maximum Total Cooling Capacity | W | |
| Heating Availability Schedule Name | | |
| Cooling Availability Schedule Name | | |
| Dehumidification Control Type | | ConstantSensibleHeatRatio |
| Cooling Sensible Heat Ratio | dimensionless | 0,7 |
| Dehumidification Setpoint | percent | 60 |
| Humidification Control Type | | None |
| Humidification Setpoint | percent | 30 |
| Outdoor Air Method | | None |
| Outdoor Air Flow Rate per Person | m3/s | 0,00944 |
| Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area | m3/s-m2 | |
| Outdoor Air Flow Rate per Zone | m3/s | |
| Design Specification Outdoor Air Object Name | | |

Figura 3.45 - Objeto Zone

3.2.9. Output Reporting

Os *outputs* que serão utilizados e analisados em todas as simulações serão aqui indicados e explicados (Figura 3.46). De notar que nem todos estes *outputs* são pedidos em simultâneo, e em cada caso de estudo este tema será abordado com mais detalhe. Os *outputs* que serão analisados são os seguintes:

- Temperatura do ambiente interior (°C) – *Zone Mean Air Temperature*.
- Temperatura do ambiente exterior (°C) – *Site Outdoor Air Drybulb Temperature*.
- Temperatura superficial interior (°C) – *Surface Inside Face Temperature*.
- Temperatura da superfície do solo da cobertura verde (°C) – *Green Roof Soil Temperature*.
- Fluxo de calor (W/m²) – *Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate per Area*.
- Consumo energético na estação de aquecimento (J) – *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy*.
- Consumo energético na estação de arrefecimento (J) – *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*.
- Ângulo que o sol faz com o horizonte (°) – *Site Solar Altitude Angle*.
- Profundidade de evapotranspiração instantâneo na cobertura verde (mm) – *Green roof current evapotranspiration depth*.

De referir que também existe a possibilidade de pedir o consumo de energia em W, contudo esta é uma média horária de todos os dias. Assim foi decidido pedir como *output* o consumo em Joules. A conversão de Joules para kWh é feita através da equação (3.1).

$$1 \text{ kW} = 3,6 \times 10^6 \text{ Joules} \quad (3.1)$$

3.2.9.1. Output: Variable: Dictionary (*Output: Variável: Dicionário*)

De modo a obter-se todos os *outputs* possíveis, o primeiro passo consiste no preenchimento do objeto *Output: Variable: Dictionary*. As opções de preenchimento apenas remetem para a organização dos vários parâmetros de *output*. A organização escolhida foi por tipo (IDF) (luzes, superfície, zona, local, etc) e por ordem alfabética (*Name*). Na Figura 3.47 apresenta-se este objeto preenchido que é igual em todas as simulações.

3.2.9.2. Output: Variable

Depois de simular uma primeira vez com apenas o objeto anterior, os *outputs* já se encontram na lista das variáveis. Na Figura 3.48 apresenta-se três das variáveis referidas, onde se pode seleccionar a frequência do output (*Reporting Frequency*).

3.2.9.3. Output: SQLite

O objeto *Output: SQLite* tem como função apresentar os *outputs* solicitados em ficheiro do tipo SQLite de modo a ser lido pelo programa Results Viewer, programa este que faz parte integrante do EnergyPlus. Este programa permite a observação dos resultados em gráficos, de um modo bastante simples e rápido. Assim, é fácil a observação de determinados resultados e a análise de variadas situações. O Results Viewer apenas foi utilizado na análise de dificuldades nas simulações e de comportamento geral do modelo, não sendo utilizado nas análises realizadas neste trabalho. Na Figura 3.49 apresenta-se este objeto preenchido.

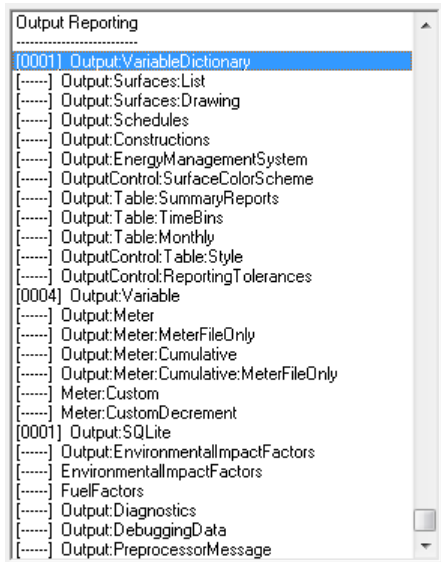


Figura 3.46 - Grupo Output Reporting

| Field | Units | Obj1 |
|-------------|-------|------|
| Key Field | | IDF |
| Sort Option | | Name |

Figura 3.47 - Objeto Output: Variable: Dictionary

| Field | Units | Obj1 |
|---------------------|-------|-----------------------------|
| Key Value | | * |
| Variable Name | | Green Roof Soil Temperature |
| Reporting Frequency | | Hourly |
| Schedule Name | | |

Figura 3.48 - Objeto Output: Variable

| Field | Units | Obj1 |
|-------------|-------|--------|
| Option Type | | Simple |

Figura 3.49 - Objeto Output: SQLite

3.3. Modelo de coberturas verdes

O modelo de coberturas verdes permite simular os efeitos de uma cobertura com vegetação num edifício. O reconhecimento da redução do consumo energético e a limitada existência de ferramentas de análise e dimensionamento de coberturas deste tipo levou ao desenvolvimento deste modelo para assistir engenheiros e arquitetos. Um resultado espetável, da criação deste modelo, é o crescimento da utilização das coberturas verdes e a sua inserção em regulamentos que traduzam o seu benefício energético.

O modelo localiza-se no grupo *Surface Constructions Elements* e no objecto *Material:RoofVegetation*, como referido no ponto 3.2. Este modelo simula o balanço energético de coberturas com vegetação e tem como principal objetivo traduzir os efeitos da evapotranspiração, das trocas de radiação do solo com a vegetação e do sombreamento. O modelo foi desenvolvido por Sailor (2008) do Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade de Portland State, em Portland, nos Estados Unidos da América, e implementado no programa de simulação energética EnergyPlus. Este subcapítulo explicará, de um modo o mais conciso possível, o funcionamento deste modelo com base nos documentos EnergyPlus Engineering Reference (2013) e Sailor (2008).

A formulação do modelo foi baseada no modelo unidimensional – Fast All-Season Soil Strength (FASST) – desenvolvido por Frankenstein e Koeing para o US Army Corps of Engineers (Frankenstein e Koeing, 2004) – que por sua vez foi baseado em outros dois modelos de vegetação, o Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) e o Simple Biosphere model (SIB). O FASST foi formulado para

permitir a previsão do estado dos terrenos para o movimento de veículos e de pessoas. Assim, modela o balanço de energia e de humidade (incluindo o gelo e a neve) num solo com vegetação. Foram realizadas ligeiras modificações de modo a adaptar o modelo para solos com espessuras inferiores.

De notar que este modelo não tem em conta os efeitos de camadas como as de impermeabilização e de membranas de proteção, os quais deverão ser modulados separadamente. Salienta-se ainda para uma das limitações da interação entre este modelo e o EnergyPlus que não possibilita estudar várias coberturas verdes na mesma simulação, sendo apenas possível definir uma.

Tal como numa cobertura convencional, as trocas de calor numa cobertura verde são muito dependentes da radiação proveniente do sol. O balanço de energia de uma cobertura com vegetação, é traduzido pela absorção de radiação solar, pelo fluxo de calor sensível (convecção) e latente (evaporação) do solo e das plantas, combinado com as trocas de radiação entre os mesmos e com a transferência de calor por condução para o interior do solo. A Figura 3.50 representa o balanço de energia referido.

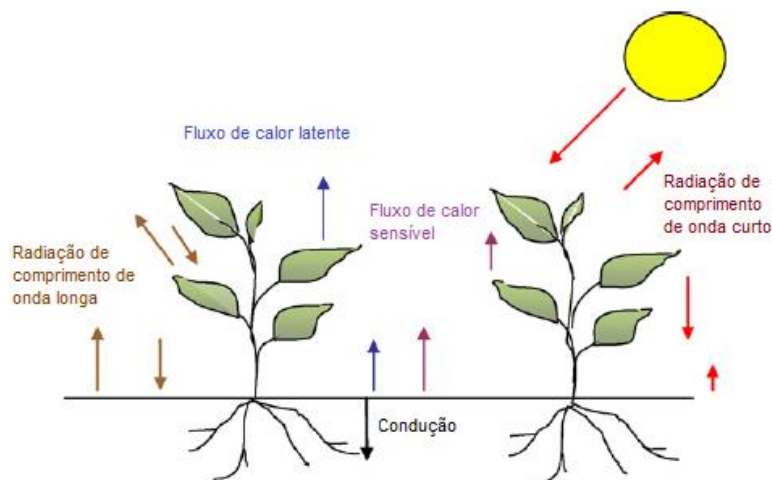


Figura 3.50 - Balanço de energia de uma cobertura verde (adaptado de Sailor, Hutchinson e Bokovoy, 2008)

O modelo de Sailor (2008) tem em conta os seguintes parâmetros:

- Radiação de comprimento de onda curto e longo.
- O efeito que o tipo de vegetação tem na transferência de calor.
- A transpiração das plantas e a evaporação de água do solo.
- A condução e armazenamento de calor no solo.
- A variação das propriedades térmicas do solo com o teor de humidade – este ponto não está funcional no programa EnergyPlus devido à utilização de um algoritmo que não permite a variação destas propriedades (CTF, abordado no ponto 3.2). Futuras melhorias de interação entre o modelo e o EnergyPlus levará à correta variação das propriedades térmicas do solo com a humidade.

De um modo geral, o modelo funciona através da definição de duas camadas (folhagem e solo), onde se definem duas equações, para cada uma das camadas, representando os fluxos de calor. Estas duas equações permitem o cálculo das duas incógnitas que interligam as duas camadas, sendo elas, a temperatura da folhagem e do solo.

Uma explicação mais detalhada do funcionamento do modelo está presente no Anexo A, e na Figura 3.51 e Figura 3.52 apresentam-se dois fluxogramas que pretendem traduzir de forma mais simples e englobando os parâmetros principais deste modelo, o processo de cálculo do fluxo de calor da folhagem e do solo.

Os fluxogramas são baseados nos principais parâmetros que aumentam os fluxos de calor no solo e na folhagem, de forma a entender-se as suas influências. Analogamente, conclui-se que o contrário é verdade. Admite-se também que existe sempre uma quantidade de água no solo suficiente para permitir os efeitos da evaporação de água do solo e transpiração das plantas.

Salienta-se ainda, que o poder da evapotranspiração referido no ponto 2.5, que “retira” calor do edifício é representado pelo fluxo de calor latente do solo e da folhagem que em determinadas condições diminui o fluxo de calor total absorvido pelos mesmos, consumindo assim o calor.

De seguida apresentam-se os principais parâmetros necessários para se compreender o funcionamento de uma cobertura verde (utilizando o modelo de Sailor (2008)) e que se encontram nos fluxogramas (Figura 3.51 e Figura 3.52):

- Absortância das folhas – caraterizado pela absortância e pela emissividade das folhas.
- Projeção da área de folhas por unidade de área do solo (LAI).
- Altura da vegetação.
- Resistência estomática mínima das folhas.
- Absortância do solo – caraterizado pela absortância dos diferentes comprimentos de onda.
- Espessura do solo.
- Condutibilidade térmica do solo.
- Irrigação da cobertura verde.

Para além dos parâmetros aqui referidos, para um correta definição de uma cobertura verde no EnergyPlus, é necessário a definição de parâmetros complementares apresentados no capítulo 3.2.5.3.

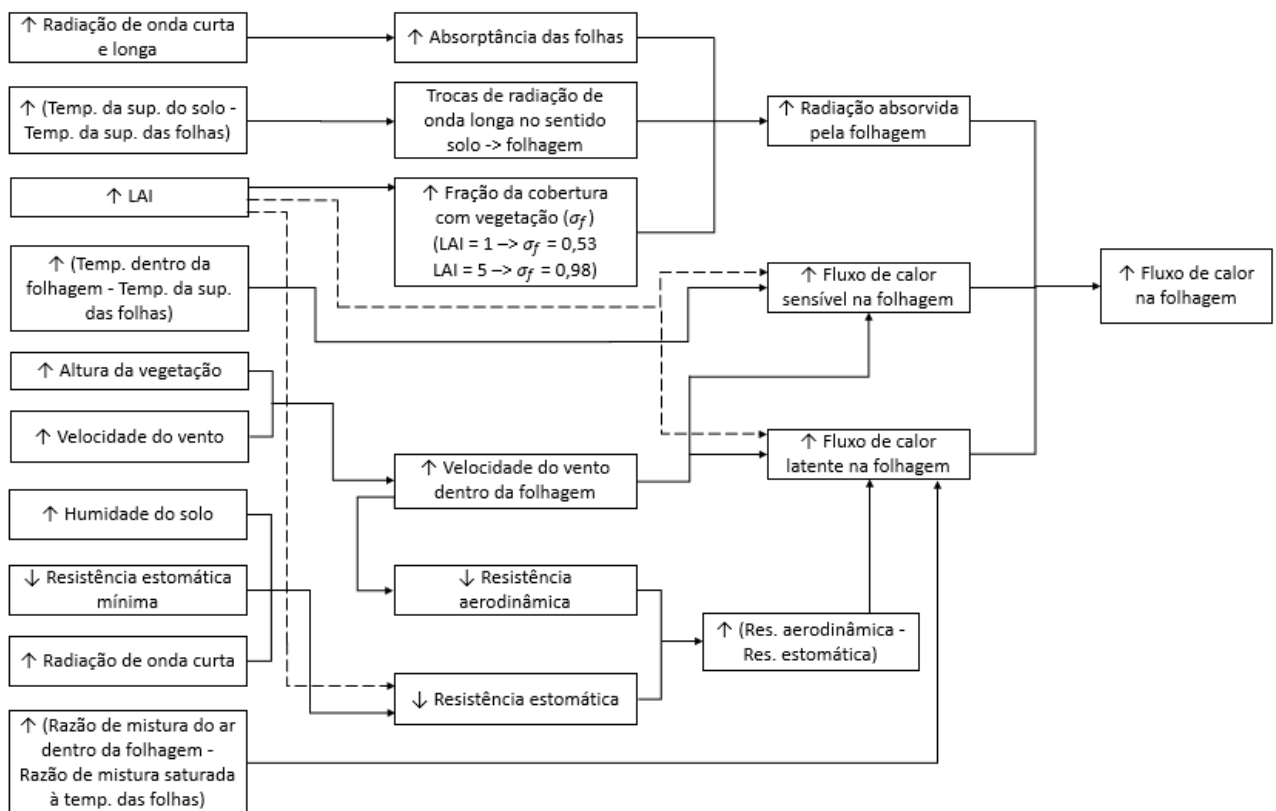


Figura 3.51 - Fluxograma representativo do fluxo de calor na folhagem do modelo de Sailor (2008)

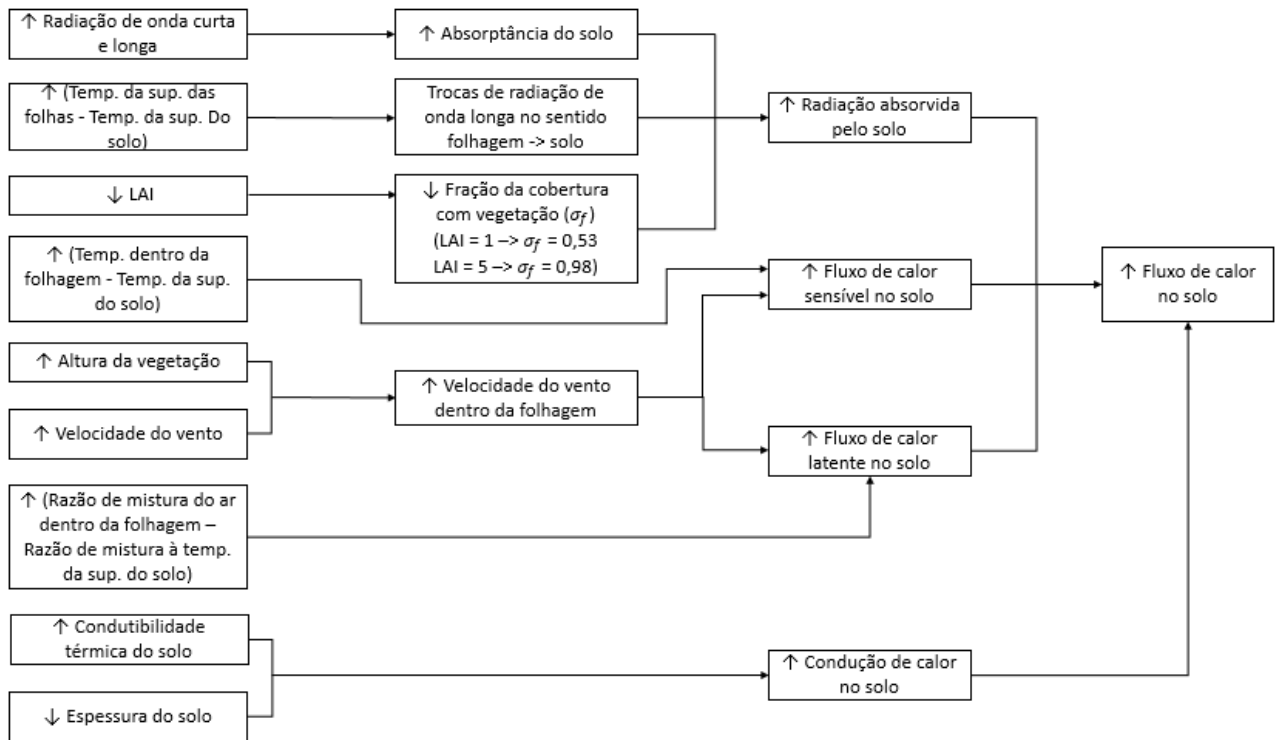


Figura 3.52 - Fluxograma representativo do fluxo de calor no solo do modelo de Saylor (2008)

4. Descrição dos casos de estudo e validação

Este capítulo tem como objetivo apresentar e descrever os três casos de estudo: cabine de som (Gulbenkian), sala de ensaios (Gulbenkian) e sala de reuniões (ETAR de Alcântara), e validar os seus modelos criados no EnergyPlus com base em dados medidos experimentalmente por Valadas (2014).

4.1. Caso de estudo 1: Gulbenkian – Cabine de som

4.1.1. Localização e caracterização da cabine de som

O primeiro caso de estudo é uma cabine técnica de som, de apoio a uma sala de conferências na Fundação Calouste Gulbenkian em Lisboa que foi selecionado devido à grande extensão de cobertura verde no edifício. O edifício da Fundação localiza-se no centro de Lisboa, perto da Praça de Espanha, na Avenida de Berna (45A), no interior de um parque de 7,5 hectares e foi inaugurado em 1969. Na Figura 4.1 apresenta-se uma imagem retirada do sítio da Internet Google Maps (2014) onde se pode observar a área verde que cobre o edifício, a localização do compartimento estudado e a sua orientação. Na Figura 4.2 apresenta-se uma fotografia do exterior da cabine de som.



Figura 4.1 - Orientação e localização da Cabine de Som na Fundação Calouste Gulbenkian



Figura 4.2 – Vista do exterior da cabine de som

Na Figura 4.3 apresenta-se a planta e um corte detalhado da cabine de som, que inclui todas as medidas e materiais relevantes.

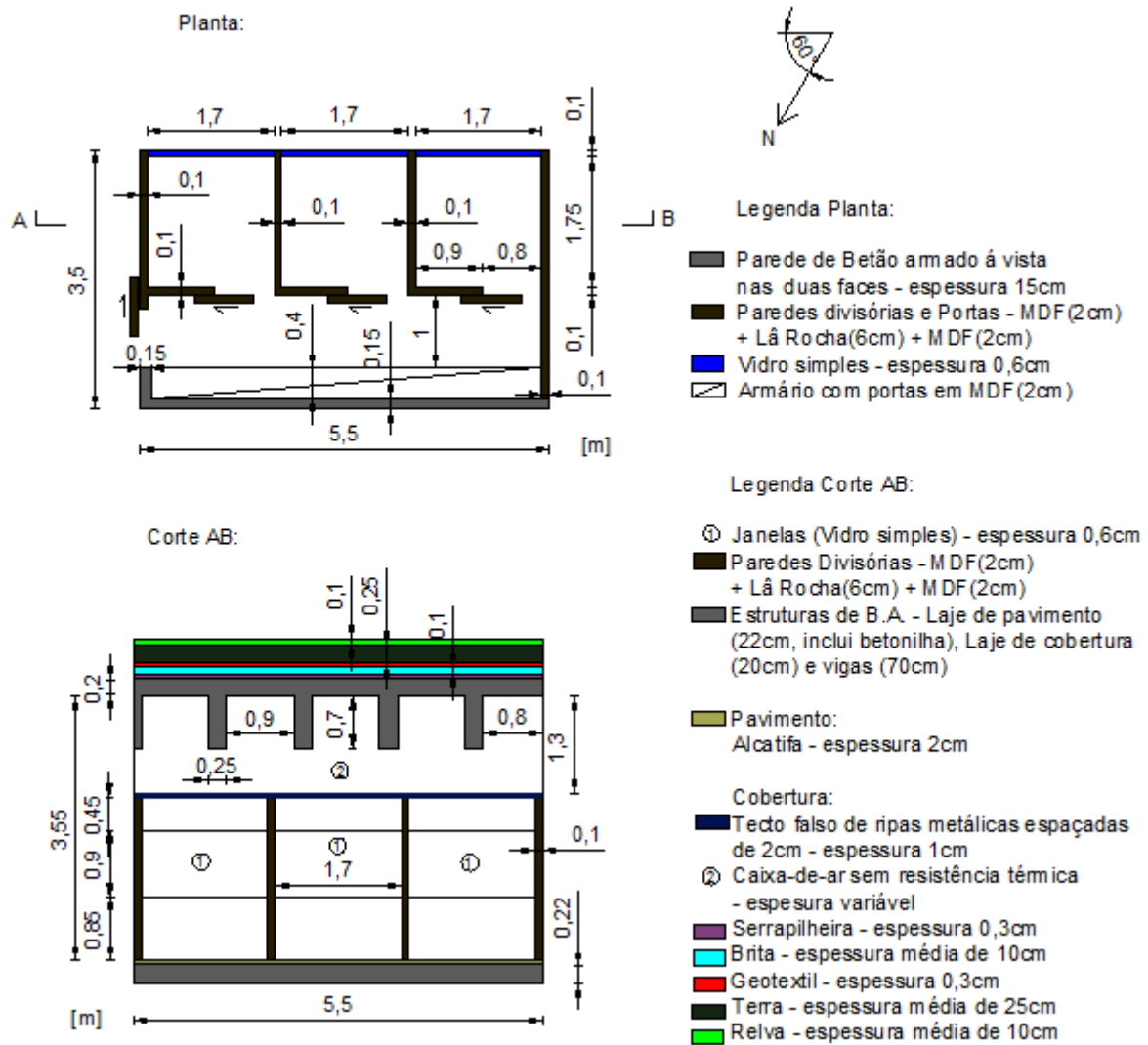


Figura 4.3 – Plante e Corte AB da cabine de som

4.1.2. Modelo da cabine de som no EnergyPlus

O modelo geométrico da Cabine de Som realizado no Google SketchUp apresenta-se na Figura 4.4.

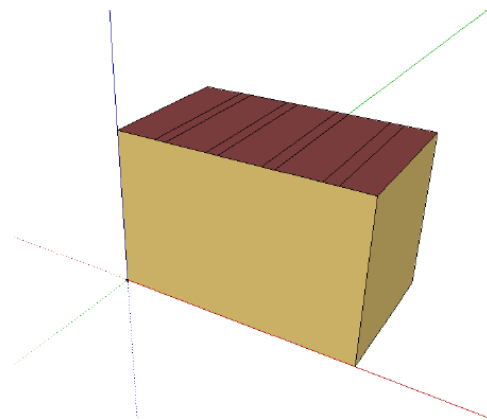


Figura 4.4 – Modelo geométrico da cabine de som no Google SketchUp

A realização do modelo consiste numa “caixa” com uma área total de 17,2 m², com a cobertura dividida em 9 partes correspondentes a zonas da laje com viga e sem viga. A porta exterior da cabine foi considerada sempre fechada, e como é constituída pelo mesmo material das paredes da envolvente, não existiu a necessidade de modelar este elemento. Para a caracterização da inércia térmica foi acrescentado ao modelo a massa das paredes divisórias dos 3 pequenos gabinetes da cabine de som. Este compartimento encontra-se no centro do edifício rodeado por salas de conferências e por um corredor ambos associados ao mesmo sistema de climatização, permitindo estudar este compartimento com todas as envolventes adiabáticas (incluindo o pavimento que se localiza sobre salas similares) exceto a cobertura em análise. As janelas não foram incluídas pois o EnergyPlus não permite a utilização de janelas em elementos adiabáticos, contudo como o elemento não tem trocas de calor com o exterior da cabine, apenas iria influenciar na massa (que iria ser reduzida), sem influência significativa para a simulação.

Quanto ao pé direito, definiu-se 3,5 m, considerando que o teto falso não apresenta qualquer resistência térmica devido ao espaçamento entre as ripas metálicas (de cerca de 2 cm) permitir a renovação de ar. Segundo o ITE-50 (2006), referido por REH (2013), a relação entre a área total de orifícios de ventilação e a área total da cobertura (s/A) é superior a 1500 mm²/m² sendo assim considerado um espaço de ar fortemente ventilado, cuja resistência térmica é nula. Também pela análise dos resultados experimentais de Valadas (2014) concluiu-se que a diferença entre a temperatura interior do teto falso e do interior da cabine de som é residual, o que reforça esta ideia.

Outro aspeto a referir é a definição do ângulo que o norte verdadeiro faz com o norte do Google SketchUp (referencial verde da Figura 4.4). O modo como este foi desenhado (janelas viradas para o referencial verde) remete para um ângulo de 150° (no sentido dos ponteiros do relógio, desde o verdadeiro norte) para ficar na posição correta.

4.1.2.1. Características dos materiais

As características de todos os materiais constituintes dos elementos da envolvente da cabine de som estão definidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos materiais da cabine de som

| Material | B.A. 5cm,15cm, 20cm, 22cm, 90cm (1-2 % Armadura) | Brita 10cm | MDF 2cm | Lã-Rocha 3cm, 6cm | Alcatifa 2cm |
|--|---|--------------|---------|-------------------------|--------------|
| Rugosidade | Rugoso | Muito Rugoso | Liso | Moderadamente Rugoso | Rugoso |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 2,3 | 2,0 | 0,14 | 0,042 | 0,060 |
| Massa volúmica (kg/m ³) | 2350 | 2000 | 600 | 100 | 200 |
| Calor específico (J/(kg.°C)) | 880 | 840 | 1380 | 710 | 1400 |
| Absorptância térmica | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Absorptância solar | 0,5 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,4 |
| Absorptância visível | 0,5 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,4 |

A condutibilidade térmica e a massa volúmica foram consultadas no ITE-50 (2006), tendo-se adotado as mesmas designações no presente documento. O calor específico foi consultado no

documento Propriedades de Materiais (2014), com as seguintes correspondências: Betão Armado – Concrete stone mix; Brita – Lightweight agregates; MDF – Softwoods; Alumínio – Aluminium; Alactifa - Carpet and fibrous pad; Lã-rocha – Loose fill mineral fibre. A absorptância solar foi retirada do REH (2013) a partir das cores dos materiais, em que a absorptância do espectro visível foi considerada igual à solar e a absorptância térmica igual a 0,9 para todos os materiais.

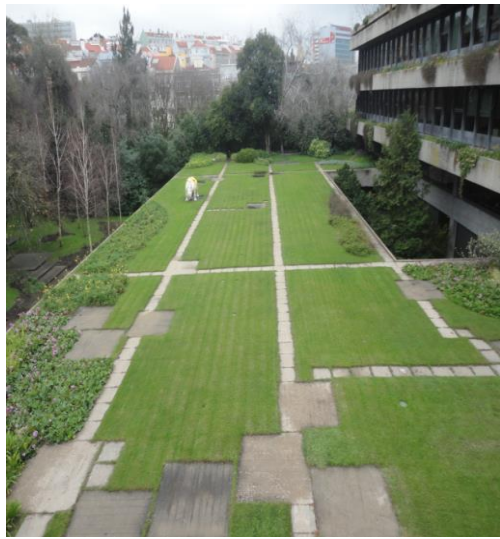
Apesar de muitos parâmetros definidos na Tabela 4.1 não serem necessários para o cálculo, por motivos de potenciais conflitos com o programa, optou-se por preenchê-los na totalidade. Por exemplo, neste caso não existe radiação solar incidente dentro do compartimento, devido à ausência de janelas para o exterior, o que invalida a utilização das absorptâncias solares dos materiais do compartimento. Também para evitar eventuais problemas de cálculo do programa, apenas são utilizados os materiais que tenham mais de 3 mm de espessura e menos de 5 W/m°C, como a serapilheira e o geotêxtil que, por serem materiais muito finos e pouco resistentes termicamente, não foram considerados.

4.1.2.2. Cobertura verde de referência

A cobertura verde sobre a cabine de som é do tipo extensiva, sendo constituída por relva, como se verifica na figura da Tabela 4.2. As características da planta e do solo estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características da cobertura verde de referência da cabine de som

| Cobertura verde de Referência – Cabine de Som | | |
|---|---|----------|
| Planta | Altura das Plantas (m) | 0,10 |
| | LAI (Índice de área de folhas) | 2 |
| | Refletividade da folha | 0,25 |
| | Emissividade da folha | 0,95 |
| | Mínima Resistência Estomática (s/m) | 180 |
| Solo | Rugosidade | Rugoso |
| | Espessura (m) | 0,25 |
| | Condutibilidade do solo seco (w/(m.°C)) | 1,0 |
| | Massa volúmica do solo seco (kg/m³) | 1500 |
| | Calor específico do solo seco (J/(kg.°C)) | 1900 |
| | Absorptância térmica | 0,9 |
| | Absorptância Solar | 0,8 |
| | Absorptância Visível | 0,8 |
| | Teor de humidade de saturação | 0,3 |
| | Teor de humidade residual | 0,01 |
| | Teor de humidade inicial | 0,1 |
| | Método de cálculo da difusão da humidade | Avançado |



Cobertura ajardinada sobre a cabine de som

A altura das plantas foi medida no local, o parâmetro LAI retirado do estudo de Ascione et al. (2013), que modelou o mesmo tipo de plantas (relva relativamente alta), a refletividade da folha retirada dos vários estudos referidos no ponto 2.5 (Ouldbou-khitine, Belarbi e Sailor (2014), Zinzi e Agnoli (2012) e Lazzarin, Castellotti e Busato (2005)), e as restantes características da planta assumidas com os valores definidos no EnergyPlus. Quanto às características do solo, a espessura foi medida no local e a condutibilidade térmica, a massa volúmica e o calor específico do solo seco foram retirados do documento Propriedade de Materiais (2014), para *dry soil*. A absorptância térmica, solar e visível foi

definida do mesmo modo da Tabela 4.1. Os restantes parâmetros do solo foram considerados com os valores definidos no EnergyPlus.

4.1.2.3. Calendários

Os calendários a definir são a rega, o ar-condicionado e o horário de ocupação. Para o horário de ocupação da Gulbenkian foi considerado o mesmo horário de funcionamento do ar-condicionado, estando aberto todos os dias (365 dias por ano) das 9:00 às 20:00. As temperaturas de *set point* são 19°C e 24°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Quanto à rega apenas se obteve informações relativas aos horários: Segundas, Quartas e Sextas em dois períodos de meia hora, com início às 10 e às 14 horas e apenas nos 4 meses mais quentes do ano, de Junho a Setembro, inclusive. Não foi possível obter a informação relativa ao caudal tendo-se utilizado um caudal de rega de plantas recomendado por Cudell (2000), de 6mm/dia na zona de Lisboa para os períodos de ponta, sendo ativa apenas quando a humidade de saturação do solo é inferior a 40% (valor sugerido por Sailor (2008)). Falta referir que na Gulbenkian existem espetáculos e conferências à noite que são difíceis de calendarizar, não estando aqui contabilizadas.

4.1.2.4. Ganhos Internos e ventilação

Os ganhos internos associados à iluminação, metabolismo das pessoas e outros equipamentos da cabine de som foram considerados de 7 W/m², adotando este valor para o horário de ocupação da Gulbenkian. Apesar do documento RECS (2013a) não indicar nenhum valor base, mas sim um método de cálculo para a estimação dos ganhos internos, foi considerado o valor do antigo regulamento RCCTE (2006) pela dificuldade de quantificar este parâmetro. Quanto à ventilação o RECS (2013b), indica o valor de caudal de ar novo de 3 m³/(hora.m²), considerando que as atividades não envolvem emissão de poluentes específicos e que este compartimento está em conformidade com o regulamento, o que foi adotado neste trabalho.

4.1.3. Validação do modelo

Neste subcapítulo pretende-se avaliar o modelo utilizado para a simulação da cabine de som, com o objetivo de averiguar o quão próximo da realidade o modelo se encontra, comparando-se os resultados experimentais medidos por Valadas (2014) com os do modelo no EnergyPlus.

4.1.3.1. Considerações da validação

Para um estudo mais rigoroso foram substituídos os dados, do ficheiro climático de Lisboa, relativos à temperatura ambiente exterior e à radiação solar direta normal, medidos experimentalmente por Valadas (2014). Os restantes dados foram mantidos. Uma metodologia para a substituição de dados no ficheiro climático encontra-se no Anexo B. A temperatura do ambiente exterior é substituída de forma simples, enquanto a radiação solar de forma mais complexa. Nas simulações, o EnergyPlus utiliza a radiação difusa em plano horizontal e a radiação direta normal, enquanto a radiação solar medida experimentalmente consistiu na radiação global no plano horizontal, que pode ser definida pela equação (4.1) (Auxiliary EnergyPlus Programs, 2013).

$$\text{Radiação glob. horiz.} = \text{Radiação dir. horiz.} + \text{Radiação dif. horiz.} \quad (4.1)$$

A radiação difusa horizontal foi considerada a do ficheiro climático original, e para a obtenção da radiação direta normal foi utilizado a equação (4.2), também retirada do documento Auxiliary EnergyPlus Programs (2013).

$$\text{Radiação dir. normal} = \frac{\text{Rad. dir. horiz.}}{\sin(\alpha)} \quad (4.2)$$

O ângulo (α) refere-se ao ângulo que a altura do solo faz com o horizonte, sendo calculado pelo EnergyPlus e possível de ser pedido como *output* (*Site Solar Altitude Angle*).

A avaliação do erro da modelação recorre aos dois parâmetros descritos no ponto 2.5 (MBE e RMSE), utilizado por Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014), Chan e Chow (2013), Sailor (2008) e Moody e Sailor (2013), para quantificar a qualidade do modelo.

4.1.3.2. Validação

Para a validação do modelo da cabine de som da Gulbenkian serão analisados e comparados 4 parâmetros na estação de aquecimento e de arrefecimento medidos experimentalmente (exp.) por Valadas (2014) com os resultados da simulação (sim.):

- Temperatura do ambiente interior (T_{int}).
- Temperatura superficial interior da laje ($T_{si, laje}$).
- Temperatura superficial interior da viga ($T_{si, viga}$).
- Fluxo de calor na superfície interior da laje ($F_{si, laje}$) – apenas na estação de aquecimento.

De referir ainda que na cabine de som não existiram medições na zona exterior da cobertura verde devido à impossibilidade de colocação dos equipamentos. O fluxo de calor na superfície interior da laje na estação de arrefecimento não foi considerado devido a valores incoerentes das medições experimentais.

Na Figura 4.5 e na Tabela 4.3 apresenta-se a comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultantes da simulação de 21 a 30 de janeiro (estação de aquecimento) e de 5 a 11 de julho (estação de arrefecimento) no ano de 2013.

Tabela 4.3 – MBE e RMSE entre os resultados da simulação e os medidos experimentalmente para a cabine de som

| Parâmetros | 21 a 30 de janeiro | | 5 a 11 de julho | |
|------------------------------------|--------------------|------|-----------------|------|
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| T_{int} (°C) | -0,95 | 1,41 | 0,61 | 1,24 |
| $T_{si, laje}$ (°C) | -1,05 | 1,42 | 1,05 | 1,58 |
| $T_{si, viga}$ (°C) | -1,57 | 1,75 | -0,67 | 1,33 |
| $F_{si, laje}$ (W/m ²) | 2,36 | 3,99 | - | - |

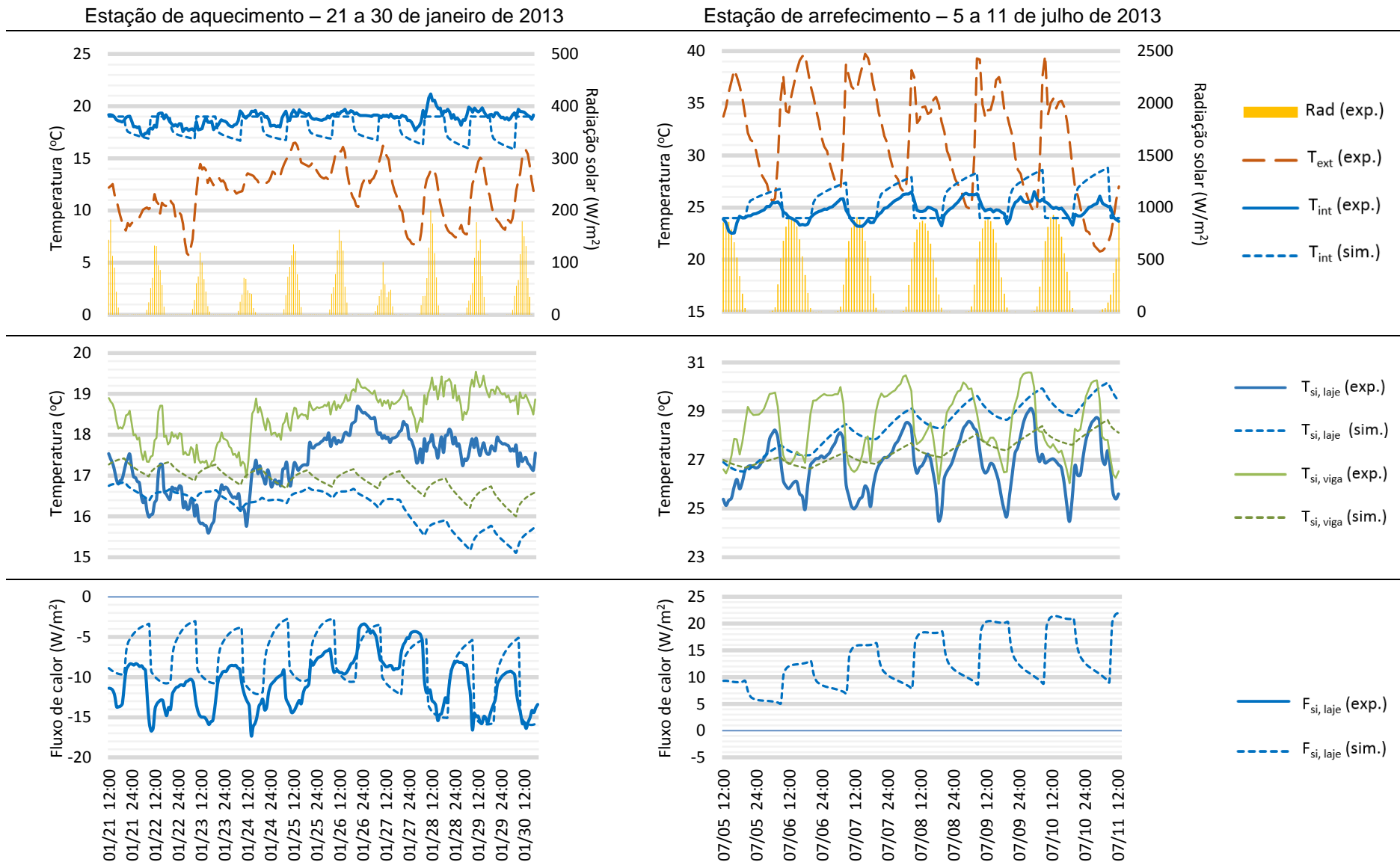


Figura 4.5 - Comparação dos resultados da simulação com os medidos experimentalmente por Valadas (2014), na cabine de som

Relativamente à evolução das temperaturas interiores nas duas estações, observa-se que os resultados da simulação evoluem da mesma forma que os registados experimentalmente, contudo nos horários sem climatização (20 horas – 09 horas, todos os dias), a diferença das temperaturas interiores é mais sentida (na ordem dos 3°C). Esta poderá ser explicada pela reduzida inércia térmica considerada no modelo, que na realidade é superior devido à existência de vários móveis e equipamentos dentro do compartimento.

Observa-se também, que a evolução das temperaturas superficiais interiores resultantes da simulação está coerente com os resultados experimentais. Verifica-se que nos resultados medidos experimentalmente a temperatura superficial interior da viga é superior à da laje, que poderá dever-se a uma fonte de calor nas proximidades da zona onde foi medido a temperatura superficial interior da viga. Pelo contrário, nos resultados da simulação verifica-se o contrário, devido à viga apresentar um nível de isolamento superior (maior espessura de betão armado).

De um modo geral, observa-se que o modelo tem sensibilidade às variações das condições climáticas e que a evolução das temperaturas e fluxos de calor são similares. Os valores de MBE e RMSE apresentam valores relativamente reduzidos e considera-se que o modelo simula corretamente o comportamento energético da cabine de som em análise.

4.2. Caso de estudo 2: Gulbenkian – Sala de ensaios

4.2.1. Localização e caracterização da sala de ensaios

O segundo caso estudado também se localiza na Fundação Calouste Gulbenkian em Lisboa sendo uma sala de ensaios de apoio ao grande anfiteatro da Fundação. Na Figura 4.6 apresenta-se uma imagem retirada do sítio da Internet Google Maps (2014) onde se pode verificar a área verde que cobre o edifício, a localização do compartimento estudado e a sua orientação e na Figura 4.7 apresenta-se uma fotografia do interior da sala de ensaios.



Figura 4.6 - Orientação e localização da sala de ensaios na Fundação Calouste Gulbenkian



Figura 4.7 – Vista interior da sala de ensaios

Nas Figura 4.8, Figura 4.9 e na Figura 4.10 apresentam-se a planta e dois cortes detalhados da Sala de Ensaios, que inclui todas as medidas e materiais relevantes.

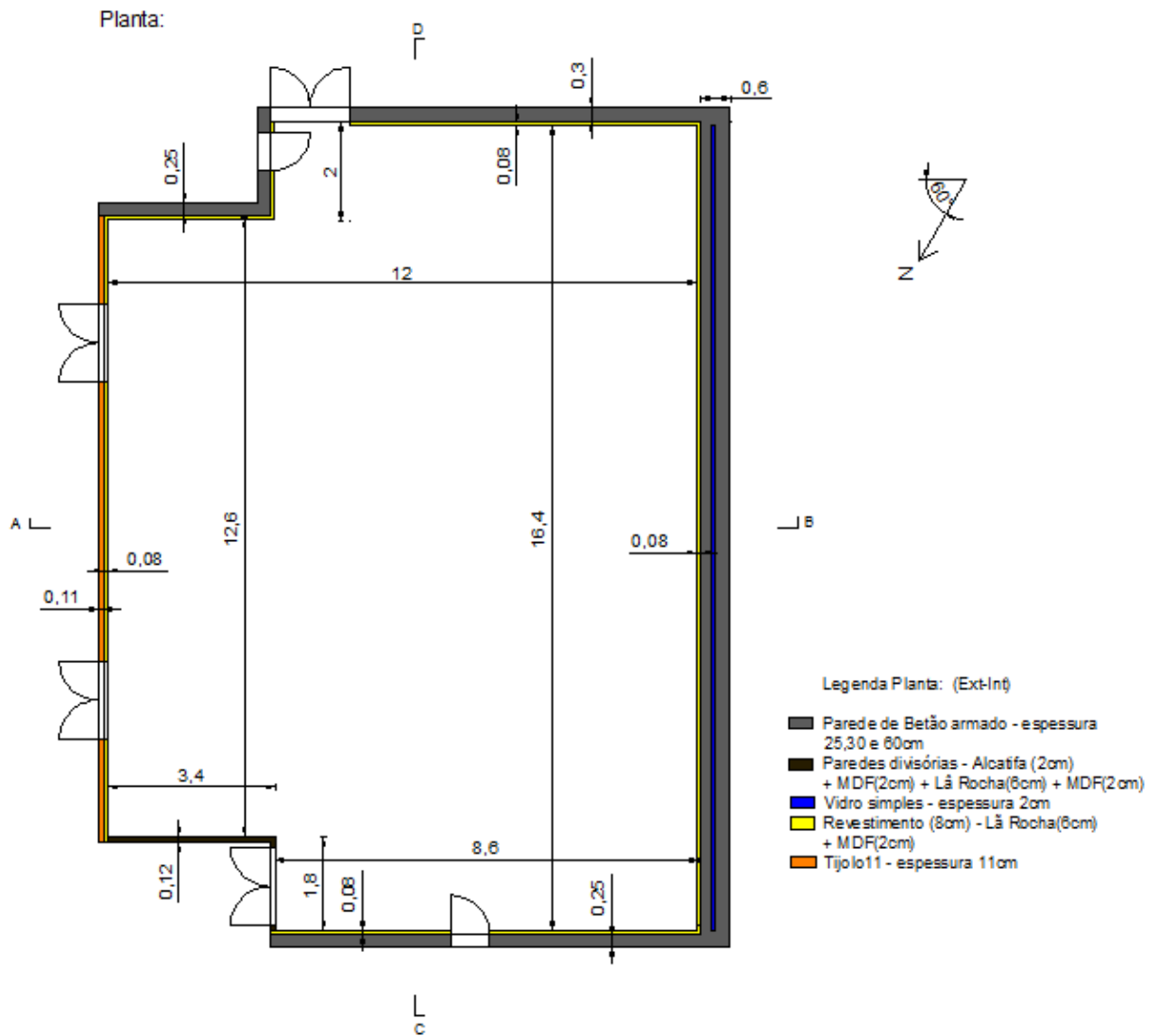


Figura 4.8 - Planta da sala de ensaios

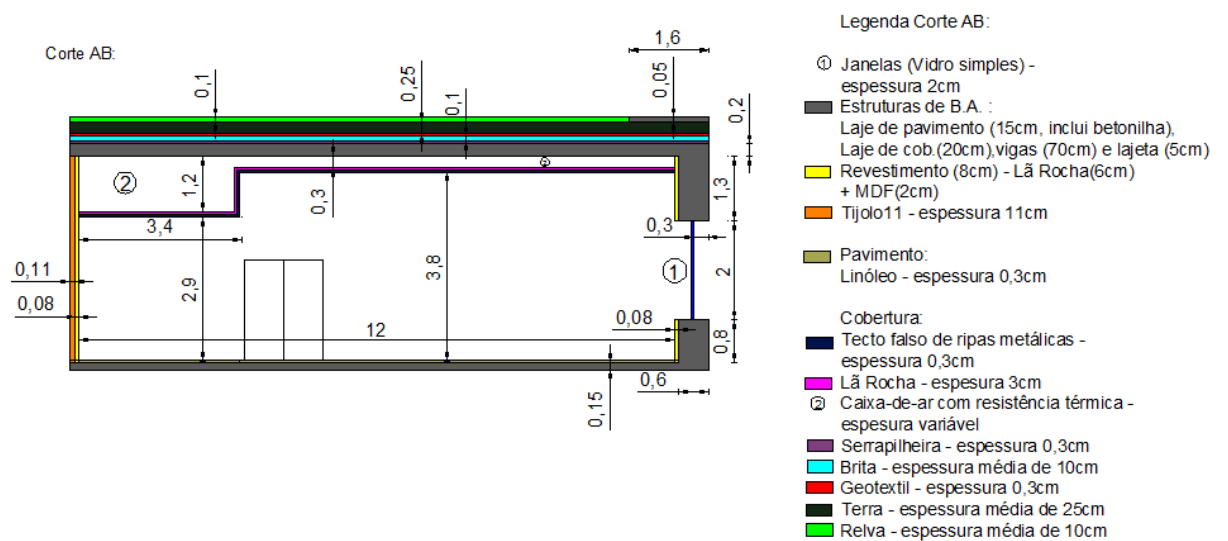


Figura 4.9 - Corte AB da sala de ensaios

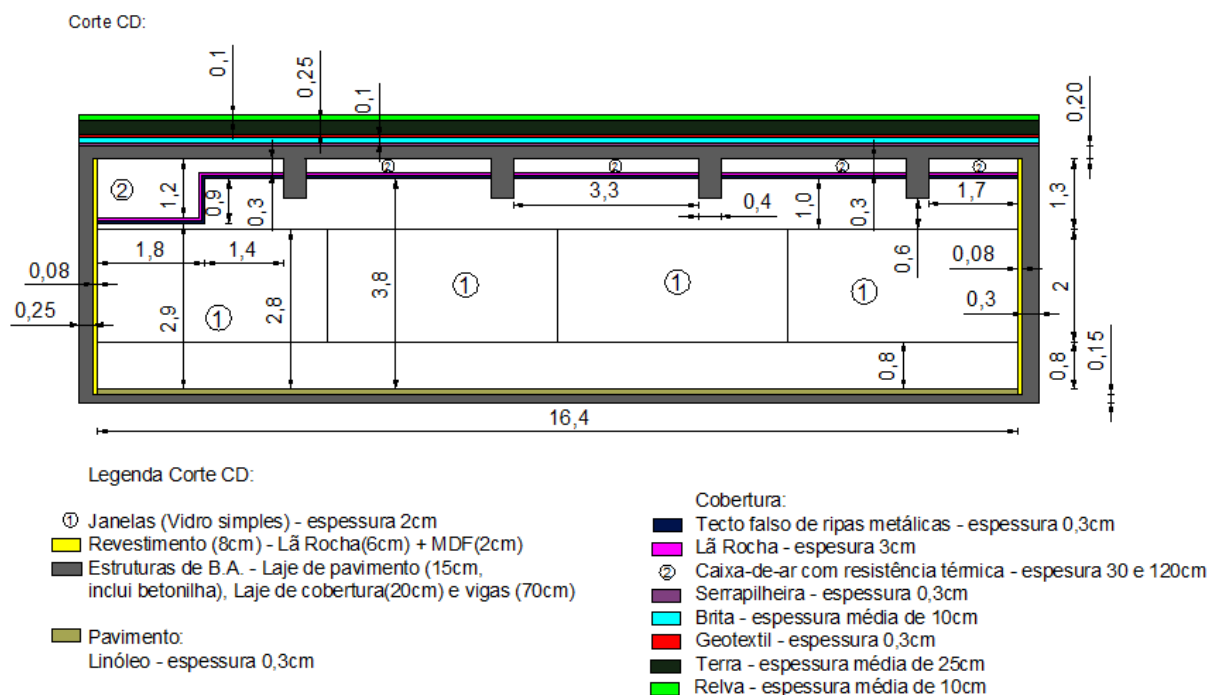


Figura 4.10 – Corte CD da sala de ensaios

4.2.2. Modelo da sala de ensaios no EnergyPlus

O modelo geométrico da sala de ensaios realizado no Google SketchUp, apresenta-se na Figura 4.11.

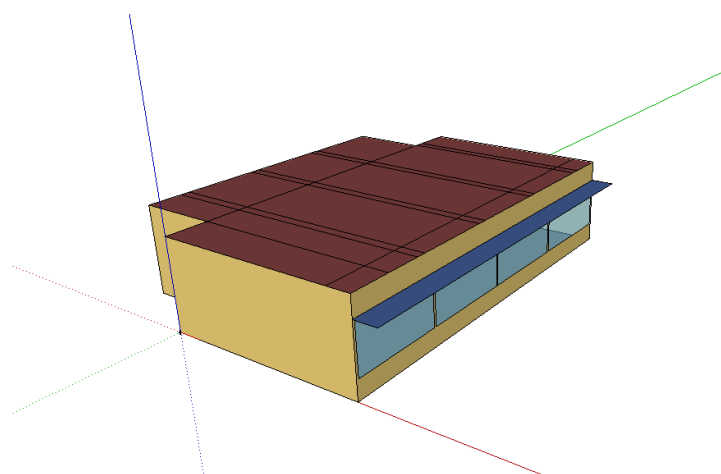


Figura 4.11 - Modelo do Google SketchUp da sala de ensaios

A realização do modelo consiste numa “caixa” com uma saliência e com uma área total de 184,8 m². A cobertura está dividida em 27 partes correspondentes a zonas da laje com viga, com teto falso e espessura do espaço de ar de 0,3m, com teto falso e espessura do espaço de ar de 1,2m e com a cobertura revestida com a lajeta e por vegetação. Este compartimento é distinto da cabine de som já que não é totalmente adiabático pois apresenta uma área de envidraçados considerável para o exterior. Assim será estudado o comportamento da cobertura verde com uma fachada envidraçada para o exterior e os restantes elementos de separação considerados adiabáticos já que dão para o interior deste edifício todo climatizado. Salienta-se ainda a existência de uma pala de 1 m por cima dos envidraçados.

Quanto ao pé direito, definiu-se 3,8 m considerando o teto falso já que apesar de ter ripas metálicas (material muito condutor térmico), apresenta uma camada de lâ-rocha e o espaço de ar apresenta resistência térmica. Todos os espaços de ar foram considerados fracamente ventilados já que possuem orifícios entre os vários elementos que compõe o teto falso, resultando numa relação s/A superior a 500 e inferior a 1500 mm²/m², segundo o ITE-50 (2006). A definição do ângulo que o norte do Google SketchUp (referencial verde da Figura 4.11) faz com o norte verdadeiro remete para um ângulo de +150° (no sentido dos ponteiros do relógio, desde o verdadeiro norte) para ficar na posição correta.

4.2.2.1. Caraterísticas dos materiais

As caraterísticas de todos os materiais constituintes dos elementos da envolvente da sala de ensaios estão definidas na Tabela 4.1 e na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Caraterísticas dos materiais da sala de ensaios

| Material | Ripas de alumínio 0,3cm | Tijolo 11cm | Linóleo 0,3cm |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------|
| Rugosidade | Liso | Moderadamente Rugoso | Liso |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 230 | 0,69 | 0,17 |
| Massa volúmica (kg/m ³) | 2700 | 1700 | 1200 |
| Calor específico (J/(kg.°C)) | 896 | 790 | 1260 |
| Absorptância térmica | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Absorptância solar | 0,5 | 0,5 | 0,4 |
| Absorptância visível | 0,5 | 0,5 | 0,4 |

A condutibilidade e a massa volúmica foram consultadas no ITE-50 (2006), tendo-se adotado as mesmas designações no presente documento. O calor específico foi consultado no documento Propriedades de Materiais (2014), com as seguintes correspondências: Alumínio – Aluminium; Tijolo – Brick common; Linóleo – Linoleum. A absorptância solar foi retirada do REH (2013) a partir da cor dos materiais, em que a absorptância do espetro visível foi considerada igual à solar e a absorptância térmica igual a 0,9 para todos os materiais. À semelhança da cabine de som, os materiais serapilheira e geotêxtil não foram considerados por serem materiais muito finos e pouco resistentes termicamente.

As janelas são constituídas por vidros simples e incolores de 20 mm de espessura. A proteção das janelas foi considerada ativa para temperaturas exteriores acima de 25°C, sendo composta por estores venezianos metálicos do lado interior do compartimento. Na Tabela 4.5 apresentam-se as caraterísticas do vão envidraçado sem qualquer tipo de proteção e na Tabela 4.6 as caraterísticas dos estores venezianos.

Tabela 4.5 – Características do vidro da sala de ensaios

| Material | Vidro incolor (clear) 2 cm |
|------------------------------------|----------------------------|
| Transmitância de radiação solar | 0,653 |
| Refletância solar | 0,064 |
| Transmitância de radiação visível | 0,841 |
| Refletância da radiação visível | 0,077 |
| Transmitância de infravermelhos | 0 |
| Refletância de infravermelhos | 0,84 |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 0,9 |

Tabela 4.6 – Características da proteção solar da sala de ensaios

| Material | Estores venezianos |
|--|--------------------|
| Orientação das ripas | Horizontal |
| Largura das ripas (m) | 0,04 |
| Separação entre as ripas (m) | 0,02 |
| Espessura das ripas (m) | 0,001 |
| Condutibilidade térmica das ripas (W/(m.°C)) | 0,9 |
| Ângulo das ripas (°) | 45 |
| Transmitância das ripas | 0,0 |
| Refletância das ripas | 0,5 |
| Distância entre as ripas e o vidro (m) | 0,05 |

As características destes dois materiais correspondem a características de referência do conjunto *Data Set* incluído no programa do EnergyPlus e considerou-se as mesmas características para as diferentes faces dos estores e do vidro. Em relação às ripas dos estores, considerou-se o mesmo valor de transmitância e refletância para todos os espectros de radiação.

Quanto à resistência térmica do espaço de ar foi considerado de 0,08 (m².°C)/W), considerando o sentido ascendente durante todo o ano, e metade do valor tabelado no ITE-50 (2006) para espaços de ar não ventilados, por ser fracamente ventilado.

4.2.2.2. Cobertura verde de referência

A cobertura verde sobre a sala de ensaios apresenta características iguais às da cobertura verde sobre a cabine de som como se pode observar pela Figura 4.12. Assim, as características da cobertura verde de referência da sala de ensaios estão definidas no ponto 4.2.2.3.



Figura 4.12 - Cobertura verde sobre a sala de ensaios

4.2.2.1. Calendários

Os calendários a definir são iguais aos definidos na cabine de som, no ponto 4.2.2.1 pois localiza-se no mesmo edifício, à exceção da temperatura de *set point* do sistema de climatização que toma o valor de 22°C para a estação de aquecimento e de 23°C para a estação de arrefecimento.

4.2.2.2. Ganhos Internos e ventilação

Os ganhos internos e a ventilação a definir são exatamente iguais aos definidos na cabine de som, no ponto 4.2.2.4., pois localiza-se no mesmo edifício e com as mesmas condições de ocupação e ventilação.

4.2.3. Validação do modelo

Na validação do modelo da sala de ensaios serão analisados e comparados, na estação de aquecimento e de arrefecimento, os seguintes parâmetros medidos experimentalmente (exp.) por Valadas (2014) com os resultados da simulação (sim.):

- Temperatura do ambiente interior (T_{int}).
- Temperatura superficial interior da laje sob a lajeta ($T_{si, laje sob lajeta}$) – apenas na estação de arrefecimento.
- Temperatura superficial interior da laje sob a cobertura verde ($T_{si, laje sob cob. verde}$) – apenas na estação de arrefecimento.
- Temperatura superficial interior da viga sob a lajeta ($T_{si, viga sob lajeta}$).
- Temperatura superficial interior da viga sob a cobertura verde ($T_{si, viga sob cob. verde}$).
- Fluxo de calor na superfície interior da viga sob a cobertura verde ($F_{si, viga sob cob. verde}$).
- Fluxo de calor na superfície interior da laje sob a lajeta ($F_{si, laje sob lajeta}$) – apenas na estação de arrefecimento.
- Fluxo de calor na superfície interior da laje sob a cobertura verde ($F_{si, laje sob cob.verde}$) – apenas na estação de arrefecimento.
- Temperatura superficial exterior da lajeta ($T_{se, lajeta}$).
- Temperatura superficial exterior do solo ($T_{se, solo}$).

Os parâmetros relativos à laje, na estação de aquecimento, não foram considerados devido à existência do teto falso que não possibilita o *output* dos parâmetros da laje (betão armado). De salientar que os resultados estão em conformidade com as considerações de validação descritas no capítulo 4.1.3.1.

Refira-se ainda que no período de 5 a 11 de julho (estação de arrefecimento), a sala de ensaios encontrava-se em obras no âmbito da remodelação do grande auditório da Fundação Calouste Gulbenkian. Deste modo a sala de ensaios continha o sistema de climatização desativo, algumas janelas constantemente abertas e o teto falso retirado. Foi então necessário recorrer a uma simulação com algumas alterações neste período:

- Ventilação com um caudal superior, que se considerou de $10 \text{ m}^3/(\text{hora.m}^2)$.
- Sistema de climatização desativado.
- Sem o teto falso.

Na Figura 4.5 e na Tabela 4.3 apresentam-se a comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultantes da simulação de 21 a 30 de janeiro (estação de aquecimento) e de 5 a 11 de julho (estação de arrefecimento) no ano de 2013.

Estação de aquecimento – 21 a 30 de janeiro de 2013

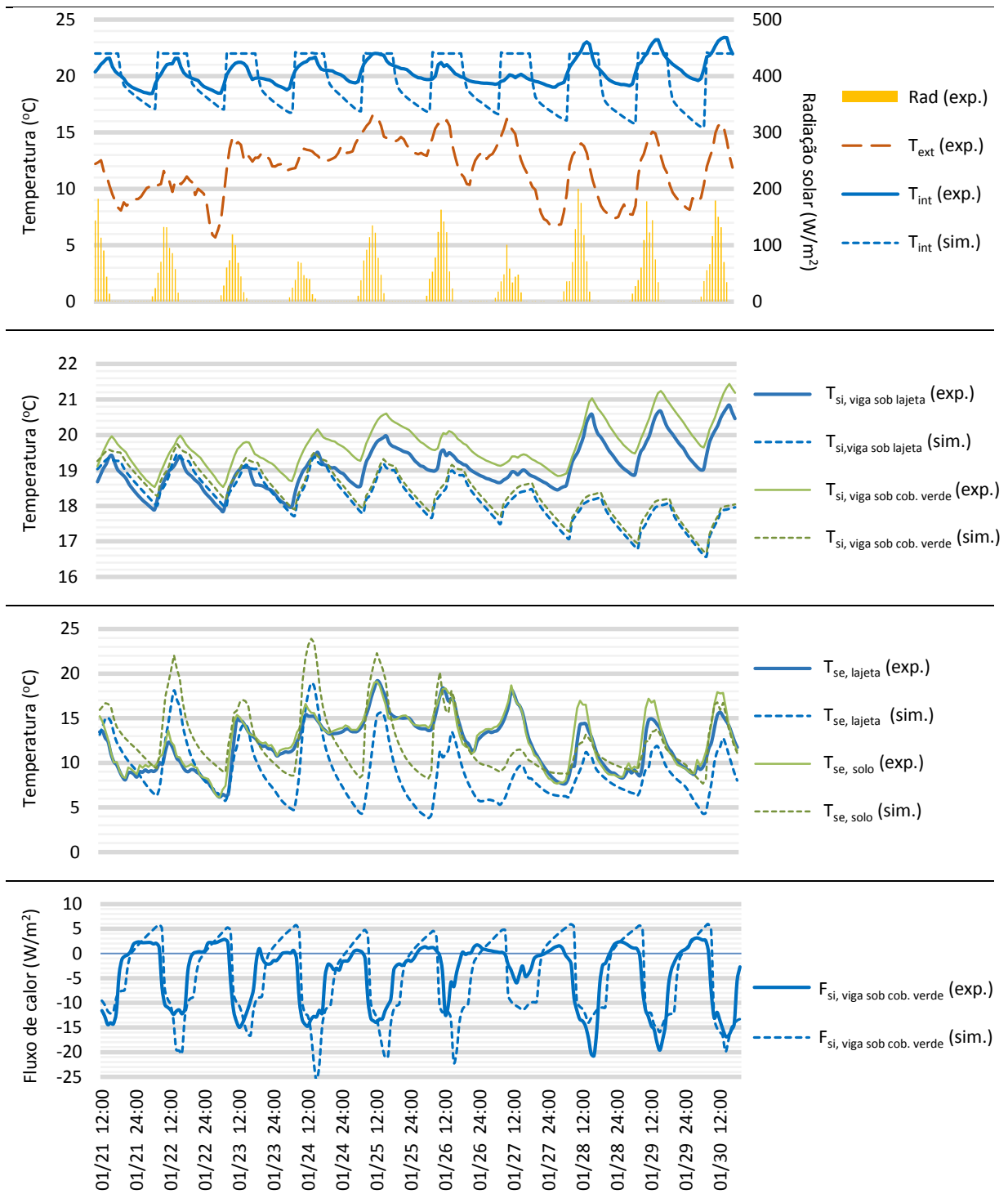


Figura 4.13 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de ensaios para o período de 21 a 30 de janeiro de 2013

Estação de arrefecimento – 5 a 11 de julho de 2013

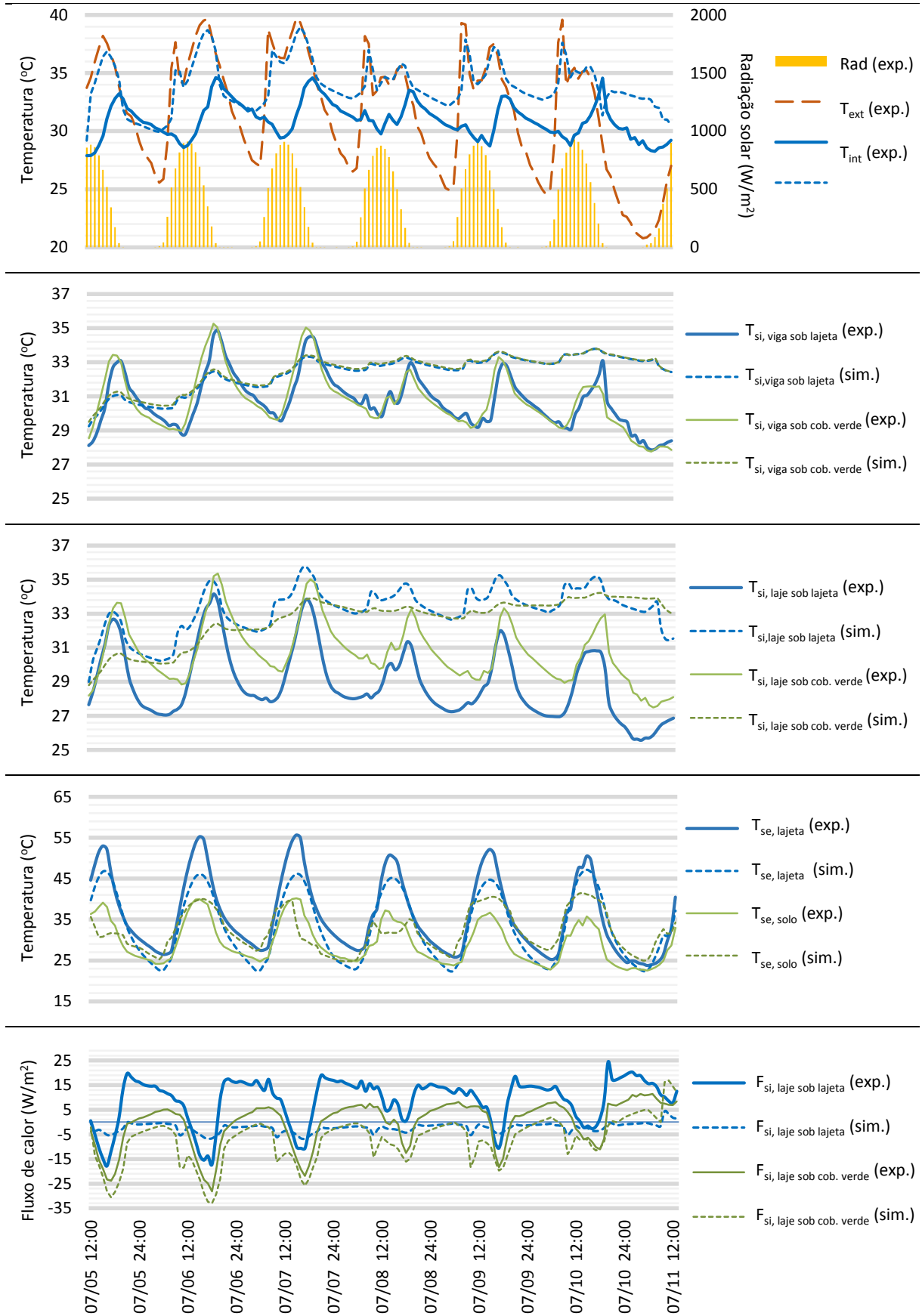


Figura 4.14 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de ensaios para o período de 5 a 11 de julho de 2013

Tabela 4.7 - MBE e RMSE dos parâmetros da sala de ensaios entre os resultados da simulação e os medidos experimentalmente

| Parâmetros | 21 a 30 de janeiro | | 5 a 11 de julho | |
|--|--------------------|------|-----------------|-------|
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| T_{int} (°C) | -0,63 | 1,85 | 1,84 | 3,09 |
| T_{si} , laje sob lajeta (°C) | - | - | 2,79 | 1,23 |
| T_{si} , laje sob cob. verde (°C) | - | - | 1,23 | 2,31 |
| T_{si} , viga sob lajeta (°C) | -0,87 | 1,27 | 1,07 | 1,92 |
| T_{si} , viga sob cob. verde (°C) | -1,29 | 1,59 | 1,13 | 2,03 |
| F_{si} , viga sob cob. verde (W/m ²) | -0,63 | 4,42 | - | - |
| F_{si} , laje sob lajeta (W/m ²) | - | - | -7,2 | 11,15 |
| F_{si} , laje sob cob. verde (W/m ²) | - | - | -4,59 | 6,88 |
| T_{se} , lajeta (°C) | -3,11 | 4,67 | -1,83 | 3,19 |
| T_{se} , solo (°C) | -0,13 | 3,28 | 1,79 | 3,79 |

Relativamente à estação de aquecimento, verifica-se que as temperaturas do ambiente interior da simulação seguem a mesma evolução que as registadas experimentalmente, existindo uma maior diferença nas noites mais frias, que pode ser explicado pela inércia térmica que não representa a realidade, devido à existência de várias móveis e instrumentos musicais que não foram contabilizados. Pela mesma razão, as temperaturas superficiais interiores apresentam a mesma evolução.

As temperaturas superficiais interiores da viga na estação de aquecimento são superiores sob a cobertura verde comparativamente à lajeta, que são explicados pelas temperaturas superficiais exteriores do solo também sempre superiores à da lajeta, tanto nos resultados da simulação como experimentais. A evolução dos resultados da simulação e experimentais, de um modo geral também são similares.

Quanto à estação de arrefecimento, as temperaturas e fluxos de calor superficiais interiores e as temperaturas do ambiente interior, da simulação e experimentais estão relativamente incoerentes devido à situação em que foram colocados os equipamentos de medição (em obras). As temperaturas exteriores por outro lado, sendo pouco influenciadas pela situação do compartimento em obras, apresentam valores coerentes e com a mesma evolução. Verifica-se ainda que, ao contrário da estação de aquecimento, as temperaturas do solo são sempre inferiores às temperaturas da lajeta, tanto nos valores simulados como experimentais.

Relativamente aos parâmetros que avaliam o erro do modelo, MBE e RMSE, considera-se que apresentam valores relativamente reduzidos (exceto os valores correspondentes aos parâmetros interiores na estação de arrefecimento, pela razão já enunciada), e que o modelo simula corretamente o comportamento energético do compartimento em análise.

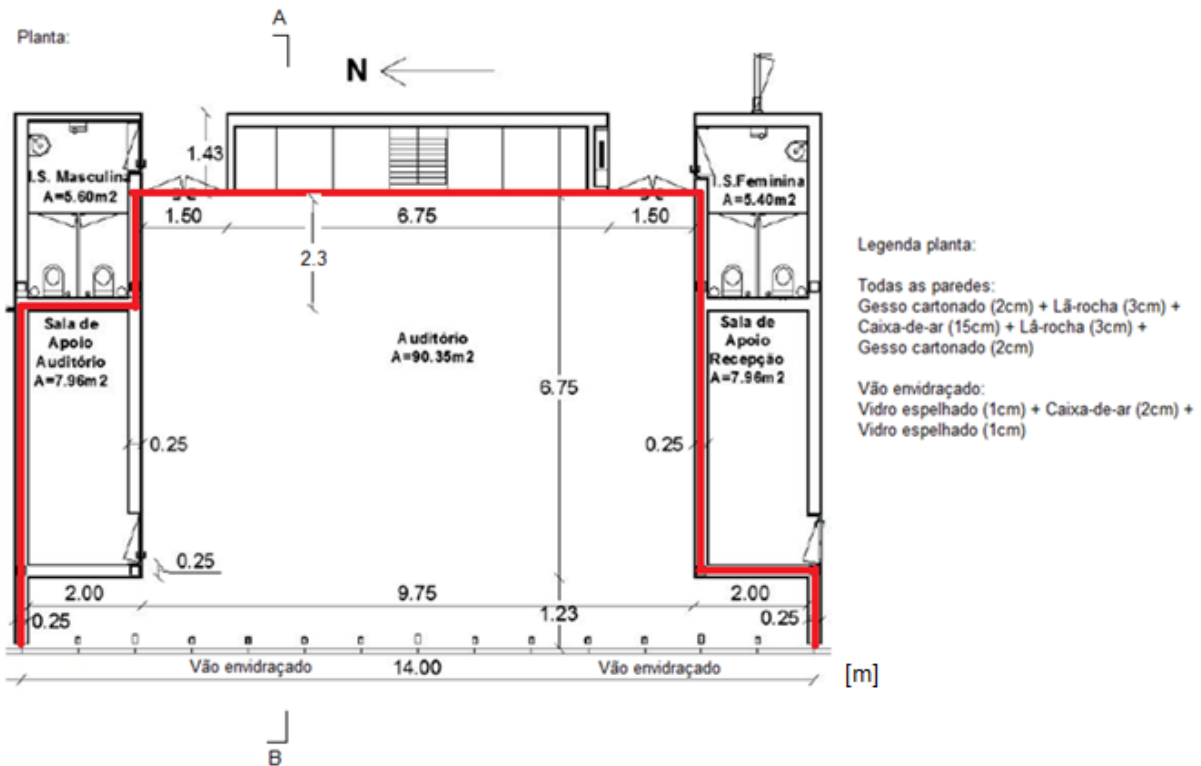


Figura 4.17 - Planta da sala de reuniões da ETAR de Alcântara

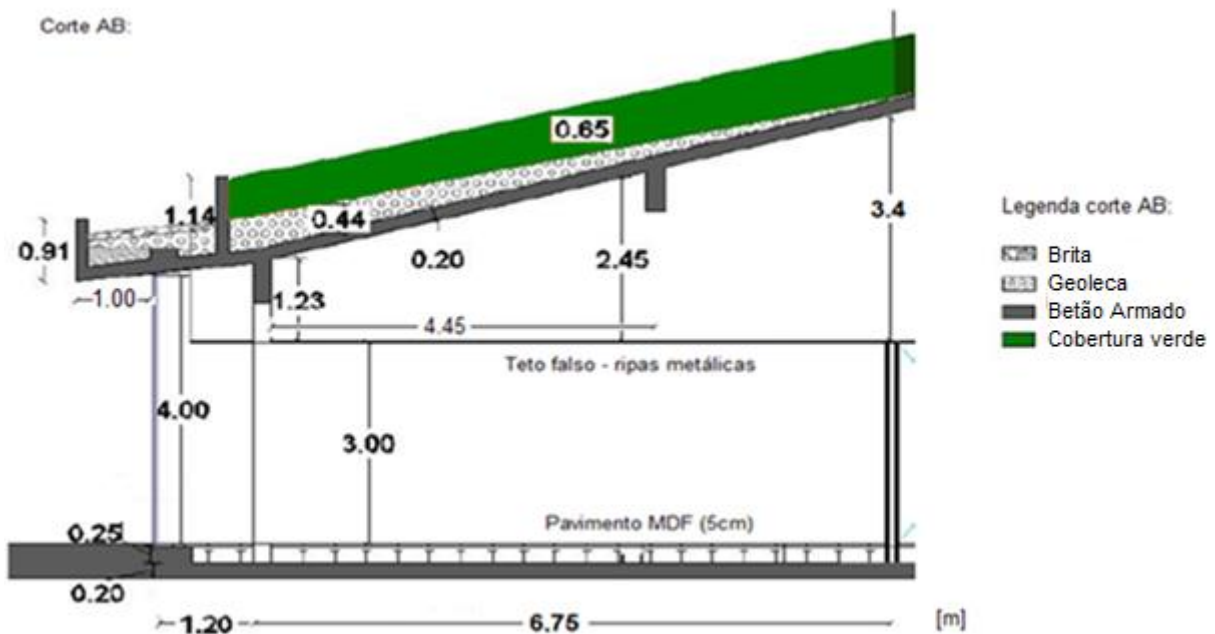


Figura 4.18 - Corte AB da sala de reuniões da ETAR de Alcântara

4.3.2. Modelo da sala de reuniões no EnergyPlus

O modelo geométrico da sala de reuniões realizado no Google SketchUp, apresenta-se na Figura 4.4.

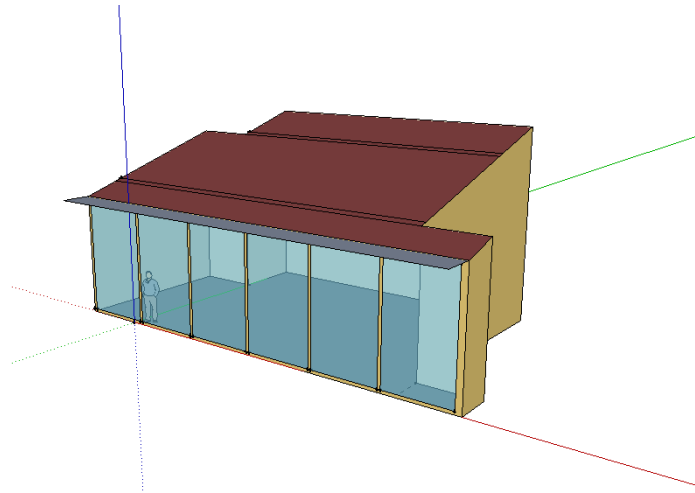


Figura 4.19 - Modelo da sala de reuniões da ETAR de Alcântara

A realização do modelo consiste numa “caixa”, com uma área total de 93,2 m², com a cobertura dividida em 4 partes correspondentes a zonas da laje com viga e sem viga e aos três diferentes revestimentos da cobertura: brita; geoleca + solo + vegetação; e solo + vegetação. Quanto à espessura da geoleca considerou-se constante de 0,3m e apenas entre as duas vigas que a cobertura apresenta.

As portas exteriores foram considerada sempre fechadas, e como o material é o mesmo das paredes da envolvente, não existiu a necessidade de modelar estes elementos. Todos os elementos da envolvente da sala de ensaios são adiabáticos, já que dão para o interior do edifício climatizado exceto a cobertura e o vão envidraçado que dão para o exterior. A única massa acrescentada à sala de reuniões corresponde à parede que divide a sala de reuniões da sala de apoio. De referir ainda a pala de sombreamento de 1 m de largura que protege os envidraçados.

Quanto ao pé direito, definiu-se até à laje (variável), considerando que o teto falso não apresenta qualquer resistência térmica devido ao espaçamento entre as ripas metálicas permitir a renovação de ar, e devido ao próprio material muito condutor térmico. Segundo o ITE-50 (2006), referido por REH (2013), a relação entre a área total de orifícios de ventilação e a área total da cobertura (s/A) é superior a 1500 mm²/m² sendo assim considerado um espaço de ar fortemente ventilado, cuja resistência térmica é nula. Também pela análise dos resultados de Valadas (2014) concluiu-se que a diferença entre a temperatura interior do teto falso e do interior da cabine de som é residual, reforçando esta ideia.

O modo como o modelo foi desenhado no Google SketchUp remete para um ângulo de 90° (no sentido dos ponteiros do relógio, desde o verdadeiro norte) para ficar na posição correta.

4.3.2.1. Características dos materiais

As características de todos os materiais constituintes dos elementos da envolvente da sala de reuniões estão definidas na Tabela 4.1 e na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Características dos materiais da sala de reuniões

| Material | Geoleca 30cm | Gesso cartonado 2cm |
|-------------------------------------|--------------|---------------------|
| Rugosidade | Rugoso | Liso |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 0,060 | 0,25 |
| Massa volúmica (kg/m ³) | 100 | 875 |
| Calor específico (J/(kg.°C)) | 840 | 1210 |
| Absorptância térmica | 0,9 | 0,9 |
| Absorptância solar | 0,5 | 0,4 |
| Absorptância visível | 0,5 | 0,4 |

A condutibilidade e a massa volúmica foram consultadas no ITE-50 (2006), em que as designações correspondem a placas de gesso cartonado e grânulos leves ou fibras soltas. O calor específico foi consultado no documento Propriedades de Materiais (2014), com as seguintes correspondências: Geoleca – *Lightweight aggregates*; Gesso cartonado: *Wood (plywood) siding lapped*. A absorptância solar foi retirada do REH (2013) a partir das cores dos materiais, a absorptância do espectro visível foi considerada igual à solar e a absorptância térmica igual a 0,9 para todos os materiais.

As janelas são constituídas por vidros duplos espelhados de 10 mm de espessura e separados por uma caixa-de-ar com 20 mm. A proteção das janelas está ativa quando a temperatura exterior ultrapassa os 25°C, sendo composta por estores de rolo de cor branca do lado interior do compartimento (Figura 4.16). Na Tabela 4.9 apresenta-se as características do vão envidraçado sem qualquer tipo de proteção e na Tabela 4.10 as características dos estores de rolo.

Tabela 4.9 – Características do vidro da sala de reuniões

| Material | Vidro espelhado (grey) 1 cm |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Transmitância de radiação solar | 0,217 |
| Refletância solar | 0,044 |
| Transmitância de radiação visível | 0,187 |
| Refletância da radiação visível | 0,045 |
| Transmitância de infravermelhos | 0 |
| Refletância de infravermelhos | 0,84 |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 0,9 |

Tabela 4.10 – Características da proteção solar da sala de reuniões

| Material | Estores de rolo (shade) |
|--|-------------------------|
| Transmitância | 0,4 |
| Refletância | 0,4 |
| Espessura | 0,005 |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 0,1 |
| Distância entre a proteção e o vidro (m) | 0,05 |


Estas características podem ser encontradas no conjunto *Data Set* incluído no programa EnergyPlus. A transmitância e refletância foram consideradas iguais para todos os espectros de radiação.

Quanto à resistência térmica do ar entre o revestimento do pavimento e a laje do mesmo foi considerada igual a um espaço não ventilado que toma o valor de 0,16 (m².°C)/W para fluxos verticais ascendentes e a resistência térmica do ar entre os dois panos nas paredes é de 0,15 (m².°C)/W. Ambos os valores de acordo com o ITE-50 (2006), citado por REH (2013).

4.3.2.2. Cobertura verde de referência

A cobertura verde sobre a sala de ensaios é do tipo semi-intensiva, sendo composta por diferentes tipos de vegetação, como se verifica na figura da Tabela 4.11. Como referido no ponto 3.3, só existe a possibilidade de definir um tipo de cobertura verde por simulação, o que levou a utilizar valores que se adaptassem aos vários tipos de planta que se encontram na cobertura. As características da planta e do solo estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Características da cobertura verde de referência da sala de reuniões

| Cobertura verde de Referência – Sala de reuniões | | | |
|--|--|--------|---|
| Planta | Altura das Plantas (m) | 0,40 |  <p>Cobertura ajardinada sobre a sala de reuniões</p> |
| | LAI (Índice de área de folhas) | 4 | |
| | Refletividade da folha | 0,25 | |
| | Emissividade da folha | 0,95 | |
| | Mínima Resistência Estomática (s/m) | 180 | |
| Solo | Rugosidade | Rugoso | |
| | Espessura (m) | 0,65 | |
| | Condutibilidade do solo seco (w/(m.°C)) | 1,0 | |
| | Massa volúmica do solo seco (kg/m ³) | 1500 | |
| | Calor específico do solo seco (J/(kg.°C)) | 1900 | |
| | Absorptância térmica | 0,9 | |
| | Absorptância Solar | 0,8 | |
| | Absorptância Visível | 0,8 | |
| | Teor de humidade de saturação | 0,3 | |
| | Teor de humidade residual | 0,01 | |
| Teor de humidade inicial | 0,1 | | |
| Método de cálculo da difusão da humidade | Avançado | | |

A altura das plantas foi medida no local, o parâmetro LAI adaptado do estudo de Ascione et al. (2013), que modelou plantas similares, e a espessura do solo medido no local. Quanto às restantes características foram definidas do mesmo modo que no capítulo 4.1.2.1.

4.3.2.3. Calendários

Os calendários a definir são a rega, o ar-condicionado e o horário de ocupação. O horário de ocupação da ETAR foi considerado o mesmo horário de funcionamento do ar-condicionado, estando aberto de 2^ofeira a 6^ofeira das 7:00 às 19:00 e fechado no fim-de-semana. As temperaturas de *set point* são 21°C e 23°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Quanto à rega apenas se obteve informações relativas ao horário de funcionamento, todos os dias do ano em dois períodos de meia hora, com início às 11 e às 15 horas. Não foi possível obter a informação relativamente ao caudal tendo-se utilizado um caudal de rega de plantas recomendado por Cudell (2000), de 6mm/dia na zona de Lisboa, adotando-se 3 mm por cada período de rega. Devido a esta incerteza, utilizou-se ainda o valor sugerido por Sailor (2008) que indica que a rega apenas é ativada quando a humidade do solo é inferior a 40%.

4.3.2.4. Ganhos Internos e ventilação

Os ganhos internos e a ventilação na sala de reuniões da ETAR foi considerado igual ao referido na cabine de som no ponto 4.2.2.4.

4.3.3. Validação do modelo

Na validação do modelo da sala de reuniões serão analisados e comparados, na estação de aquecimento e de arrefecimento, os seguintes parâmetros medidos experimentalmente (exp.) por Valadas (2014) (zona com vegetação) com os resultados da simulação (sim.):

- Temperatura do ambiente interior (T_{int}).
- Temperatura superficial interior da laje ($T_{si, laje}$).
- Fluxo de calor na superfície interior da laje ($F_{si, laje}$).
- Temperatura superficial exterior do solo ($T_{se, solo}$).

Salienta-se que os resultados estão em conformidade com as considerações de validação descritas no capítulo 4.1.3.1. Na Figura 4.20, Figura 4.21 e na Tabela 4.12 apresenta-se a comparação dos resultados do modelo e medidas experimentalmente de 26 de fevereiro a 18 de março (estação de aquecimento) e de 8 de junho a 2 de julho (estação de arrefecimento) no ano de 2013.

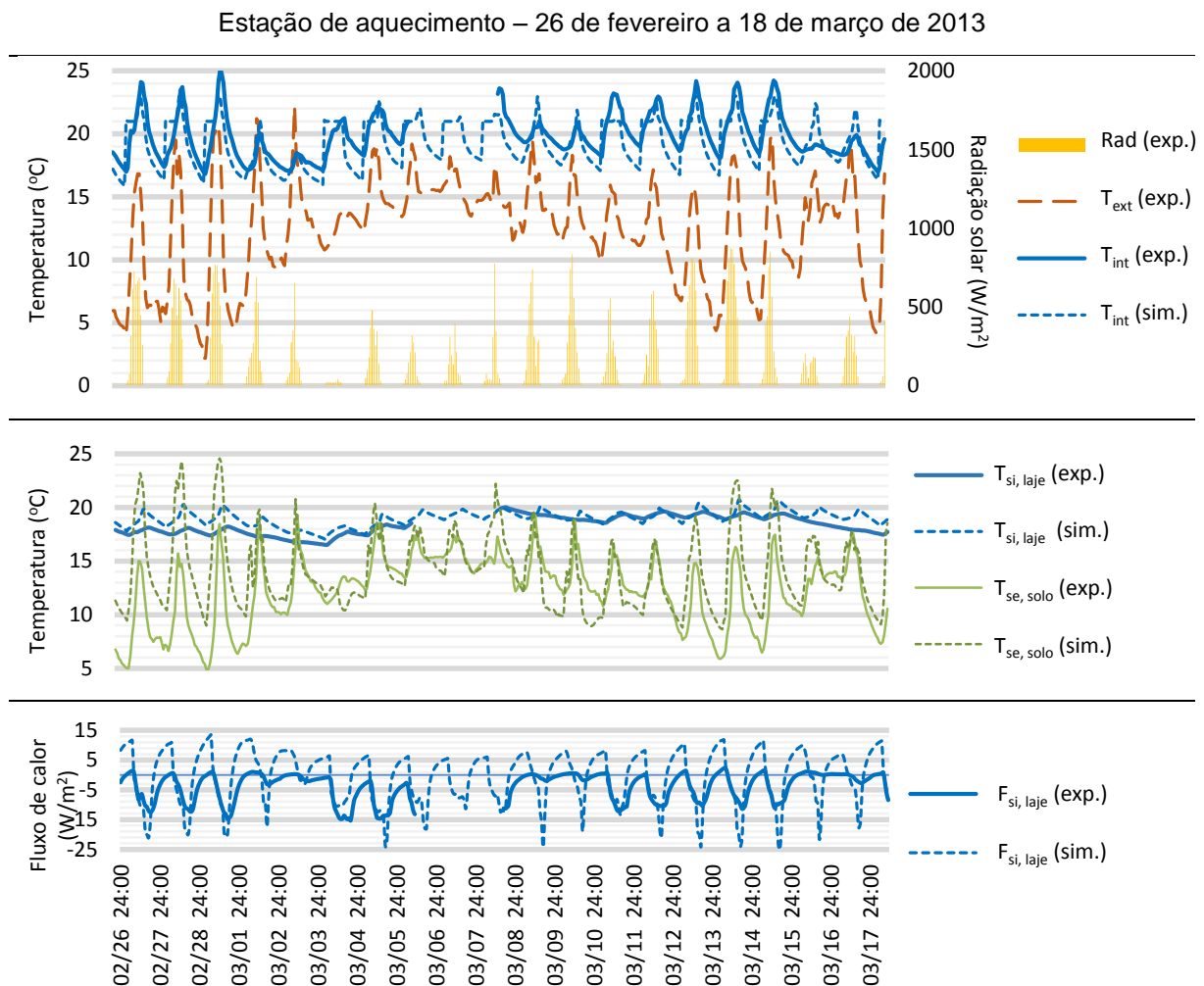


Figura 4.20 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de reuniões para o período de 26 de fevereiro a 18 de março de 2013

Estação de arrefecimento – 06 de agosto a 01 de julho de 2013

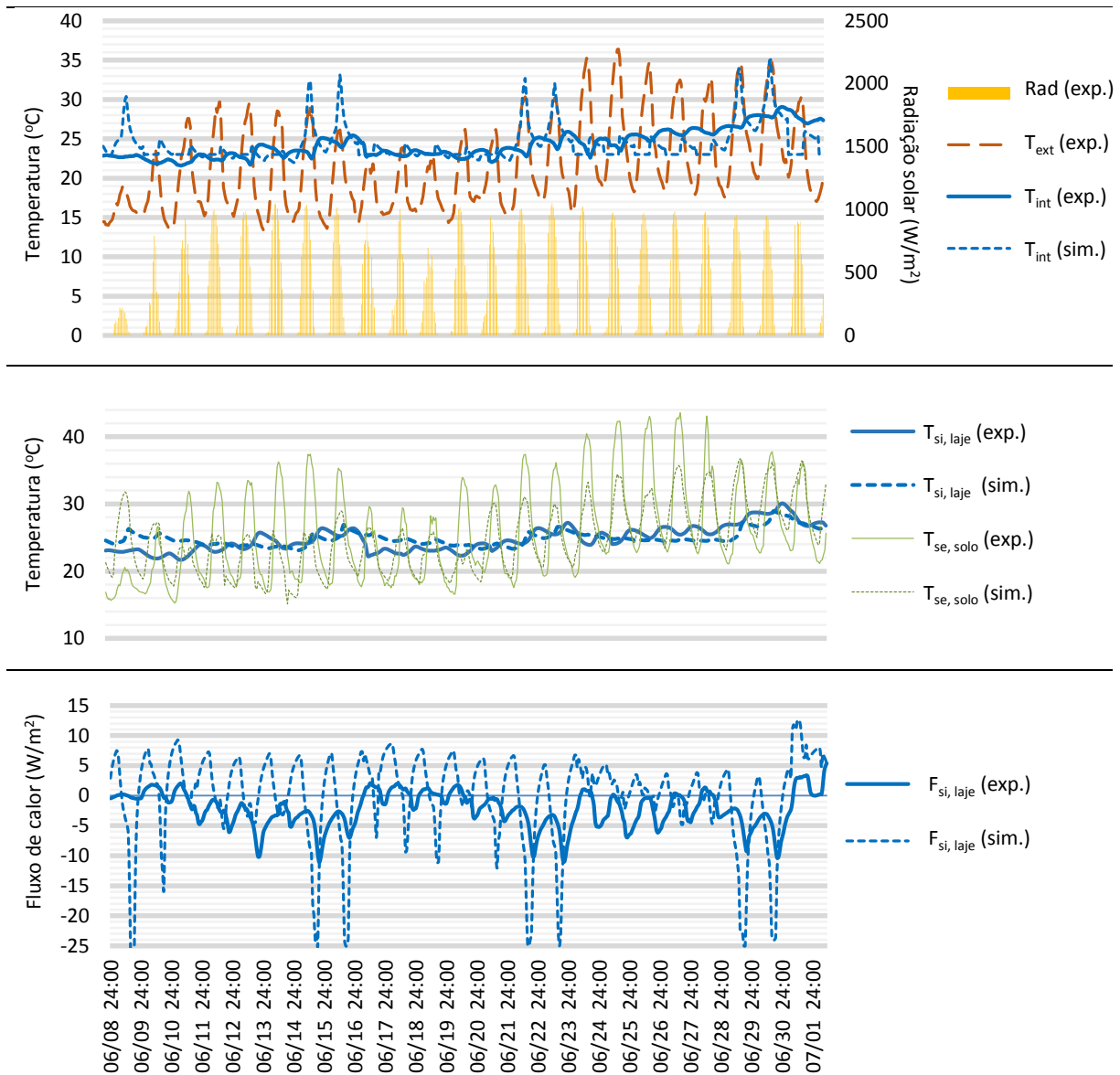


Figura 4.21 - Comparação entre os parâmetros medidos experimentalmente e os resultados da simulação da sala de reuniões para o período de 8 de junho a 2 de julho de 2013

Tabela 4.12 - MBE e RMSE dos parâmetros da sala de reuniões entre os resultados da simulação e dos medidos experimentalmente

| Parâmetros | 26 de fevereiro a 18 de janeiro | | 8 de junho a 2 de julho | |
|------------------------------------|---------------------------------|------|-------------------------|------|
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| T_{int} (°C) | -0,54 | 1,41 | 0,08 | 2,32 |
| $T_{si, laje}$ (°C) | 0,54 | 0,80 | 0,12 | 1,42 |
| $T_{se, solo}$ (°C) | 1,76 | 3,45 | -0,59 | 4,74 |
| $F_{si, laje}$ (W/m ²) | 3,10 | 7,17 | 1,97 | 7,43 |

Relativamente à estação de aquecimento e de arrefecimento, verifica-se que as temperaturas do ambiente interior e as temperaturas superficiais interiores da simulação seguem a mesma evolução que as registadas experimentalmente. As temperaturas superficiais do solo também são similares existindo uma maior discrepância na estação de arrefecimento contudo com a mesma evolução, que

poderá ser explicado pela representação da cobertura verde com altos valores de LAI que sensibiliza mais as temperaturas do solo com as altas radiações. De referir ainda, que as plantas apresentavam diferentes características nos dois períodos medidos, devido ao crescimento das mesmas, cuja diferença não foi considerada.

Quanto aos fluxos de calor apresentam a mesma evolução, tanto na estação de aquecimento como de arrefecimento, com valores de pico díspares, que poderá estar relacionado com o elevado valor de LAI que poderá não representar exatamente a realidade em todos os pontos da cobertura. Na estação de arrefecimento são notórios os dias em que o sistema de climatização não está ativo (fins de semanas), existindo maiores picos de calor para o exterior.

Relativamente aos parâmetros de qualidade do modelo, MBE e RMSE, consideram-se relativamente reduzidos, exceto os fluxos de calor nas duas estações que são sensíveis ao sistema de climatização e que poderá não ser totalmente verdade devido a alguns equipamentos e sistemas de ventilação que poderão estar sempre a funcionar durante o fim-de-semana. De notar ainda, que existem valores medidos experimentalmente que não se encontram definidos em alguns períodos de tempo, e não foram contabilizados para o cálculo dos parâmetros MBE e RMSE.

4.4. Considerações finais da validação

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

- Erros possíveis de medição por parte dos equipamentos ou humanos.
- Considerações de modelação - são exemplos o nível de ganhos internos e ventilação e também as características definidas para cada material, que podem não representar exatamente a realidade.
- Características da cobertura verde com muitos graus de liberdade, e nem todos são possíveis de serem quantificados, como é o caso do parâmetro LAI, que tem uma grande influência no modelo.
- Caudal de rega incerto, tendo implicações na evapotranspiração, conseqüentemente no calor consumido pela cobertura verde e no desempenho energético.
- Não consideração da variação da condutibilidade térmica do solo com a humidade (modelo de Sailor (2008)).
- Modelo unidimensional, funcionando apenas na direção perpendicular à superfície respetiva, não tendo em conta pontes térmicas lineares, ou as faces laterais das vigas em contacto com o ambiente interior.
- Não consideração de outras medições como a velocidade do vento ou pressão atmosférica.

Apesar dos fatores enunciados que podem causar discrepâncias, considera-se que no geral, os parâmetros comparados nos três casos de estudo apresentam diferenças relativamente reduzidas e que os modelos representam corretamente os compartimentos. Na Tabela 4.13 apresentam-se os valores de MBE e RMSE relativo à temperatura da superfície do solo dos compartimentos estudados e dos valores obtidos pelos autores referidos no capítulo 2.5, que efetuaram a mesma análise.

Tabela 4.13 - Comparação dos valores de MBE e RMSE da temp. superficial do solo com outros autores

| Parâmetro | Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014) | | Sailor (2008) | | Cabine de som | | Sala de ensaios | | Sala de reuniões | |
|----------------------------|---|------|---------------|------|---------------|------|-----------------|------|------------------|------|
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| T _{se, solo} (°C) | 1 | - | 2,9 | 4,1 | - | - | 0,66 | 3,49 | 0,51 | 4,1 |

Conclui-se que os resultados obtidos nas simulações dos casos estudados são coerentes com os resultados de Ouldboukhitine, Belarbi e Sailor (2014) e Sailor (2014) e apresentam valores de MBE inferiores aos destes autores e valores de RMSE na mesma ordem de grandeza.

5. Desempenho energético de coberturas verdes

O desempenho energético das coberturas verdes é estudado através da análise do modelo de Sailor (2008) e da comparação com várias soluções de coberturas. De modo a ser possível uma comparação entre os casos de estudo, neste capítulo as temperaturas de *set point* do sistema de climatização serão consideradas de 20 e 25°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, como indica o RECS (2013a), considerando o método simplificado.

5.1. Análise das condições climáticas de Lisboa

Sendo um fator importante no desempenho energético dos edifícios e das soluções construtivas, descreve-se as condições climáticas típicas de Lisboa, local onde se situam todos os casos de estudo.

Portugal situa-se no extremo Oeste da Península Ibérica, na Europa, entre os 40 e os 42 graus de latitude e os 6 e os 10 graus de longitude. Lisboa situa-se praticamente no centro do país, e sendo uma cidade relativamente próxima do mar, aliado à forte influência da corrente do golfo (corrente marítima quente do oceano Atlântico, que torna os países do oeste da Europa, como é o caso de Portugal, mais quentes do que seriam sem esta corrente) é uma das capitais mais amenas da Europa. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia), onde são considerados a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação, Lisboa encontra-se no clima mediterrâneo (Csa) (IPMA, 2014). Este clima é caracterizado por quatro estações bem definidas, com verões secos e quentes e invernos instáveis, húmidos e chuvosos. Neste ponto, ir-se-á analisar as temperaturas e radiação solar no ano tipo considerado no ficheiro climático de Lisboa associado ao EnergyPlus e a precipitação no ano de 2013 disponível no sítio da internet Precipitação Lisboa (2014).

5.1.1. Temperatura

As temperaturas do ambiente exterior ao longo do ano são variáveis e influenciam os fluxos de calor na cobertura e o comportamento das plantas. Na Figura 5.1 apresentam-se os valores de temperatura máxima, mínima e média, com o objetivo de apresentar as amplitudes térmicas durante o ano. Estas temperaturas são retiradas do ficheiro climático de Lisboa do EnergyPlus.

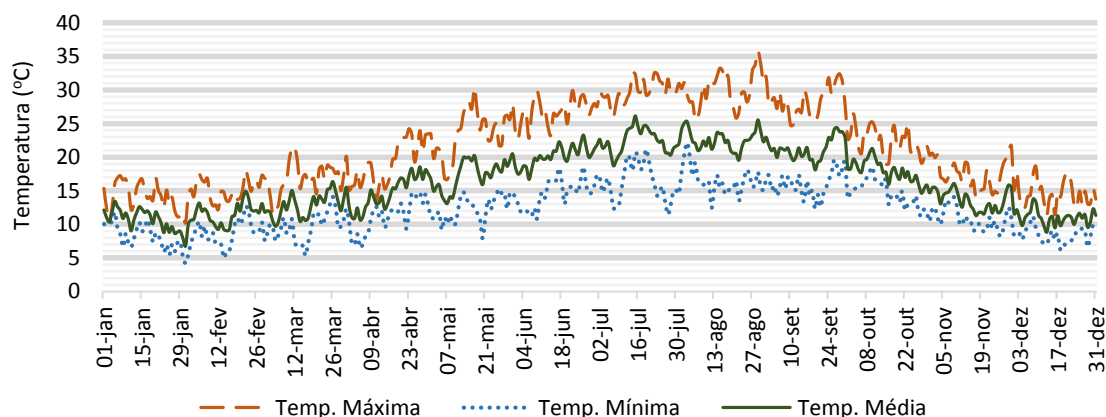


Figura 5.1 - Temperatura do ambiente exterior máxima, mínima e média em Lisboa

Em geral, o verão apresenta temperaturas entre 16°C e 35°C, o outono temperaturas entre 12°C e 27°C, o inverno entre 4°C e 17°C e a primavera entre 8°C e 26°C. De um modo geral, verifica-se que as necessidades de arrefecimento são sobretudo entre junho e setembro (Verão) e as necessidades

de aquecimento entre dezembro e março (Inverno), e nos restantes períodos (Outono e Primavera), as necessidades de climatização são inferiores.

5.1.2. Radiação solar

A radiação solar tem um importante efeito nas coberturas, nomeadamente nas coberturas verdes, como visto no modelo de Sailor (2008), representando uma grande fonte de energia para o processo de evapotranspiração e fotossíntese das plantas. Na Figura 5.2 apresenta-se a radiação global média e máxima diária durante um ano em Lisboa. Estes valores são retirados do ficheiro climático de Lisboa do EnergyPlus.

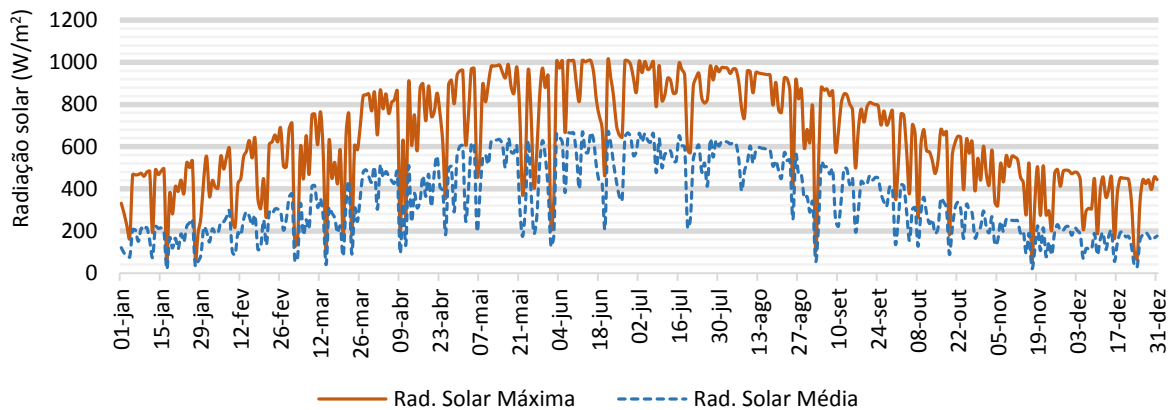


Figura 5.2 - Radiação Solar máxima e média diária em Lisboa

Verifica-se que a intensidade de radiação solar é maior entre abril e setembro, atingindo valores médios de 650 Wh/m^2 e máximos de 1000 Wh/m^2 . No resto do ano, a radiação solar incidente atinge valores médios de 200 Wh/m^2 . De notar que a radiação média apenas tem em conta o horário de sol.

5.1.3. Precipitação

O ficheiro climático do EnergyPlus, não possui informação relativa à precipitação. Como tal, e dada a importância da quantidade de água no solo no comportamento das plantas e consequentemente no consumo de energia do edifício, foi recolhida esta informação através do sítio da Internet Precipitação Lisboa (2014) e colocada no EnergyPlus através da calendarização. Estes valores correspondem a medições horárias na estação meteorológica da Guia, em Cascais. Na Figura 5.3 apresenta-se a precipitação diária em Lisboa ao longo do ano de 2013 com uma precipitação total acumulada anual de $653,5 \text{ mm}$.

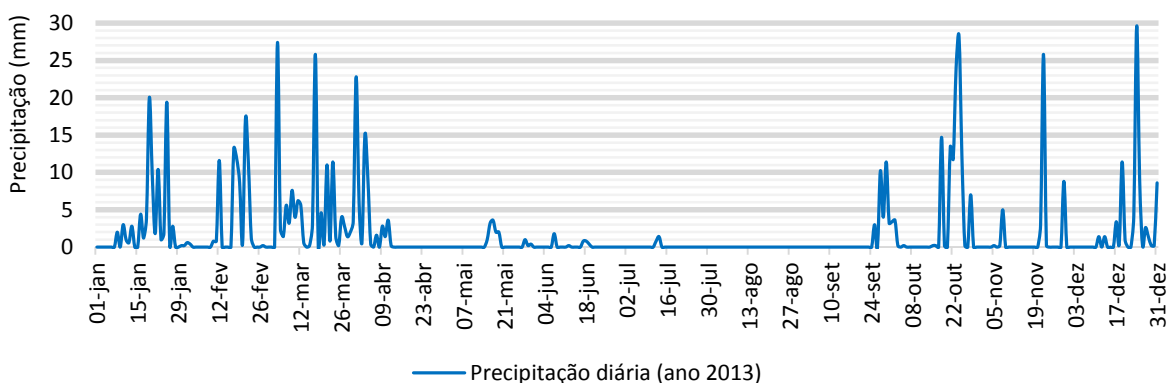


Figura 5.3 - Precipitação anual em Lisboa (ano 2013) (Precipitação Lisboa, 2014)

5.2. Análise do desempenho energético da cobertura verde sem utilizar o modelo de Sailor (2008)

Neste subcapítulo será realizado um estudo inicial que compara a utilização do modelo de Sailor (2008) com um modelo simples que apenas utiliza o material denominado “Terra”, tentando simular a cobertura verde sem utilizar o modelo de coberturas verdes disponível. Esta avaliação é importante para averiguar a relevância de efeitos como a evapotranspiração, as trocas de radiação entre a folhagem e o substrato, e o sombreamento, que o modelo de Sailor (2008) inclui, que influenciam o desempenho térmico destas soluções de cobertura. Também será estudado a cobertura simulada com o material “Terra” com vários níveis de XPS (isolamento térmico) de modo a verificar se o aumento do isolamento térmico poderá traduzir os efeitos do conjunto solo-planta. Na Tabela 5.1 apresenta-se o material “Terra” que substituirá o modelo de Sailor (2008) e o material de isolamento XPS.

Tabela 5.1 - Características do material "Terra"

| Material | Terra – Espessura igual à cobertura verde de referência | XPS (espessura variável) |
|-------------------------------------|---|--------------------------|
| Rugosidade | Rugoso | Moderadamente liso |
| Condutibilidade (W/(m.°C)) | 1,0 | 0,037 |
| Massa volúmica (kg/m ³) | 1500 | 33 |
| Calor Específico (J/(kg.°C)) | 1900 | 1200 |
| Absorptância Térmica | 0,9 | 0,9 |
| Absorptância Solar | 0,8 | 0,5 |
| Absorptância Visível | 0,8 | 0,5 |

A condutibilidade térmica, a massa volúmica e o calor específico do solo foram retirados do documento Propriedade de Materiais (2014) para *Dry Soil*. Para o material XPS, a condutibilidade térmica e a massa volúmica foi retirada do documento ITE-50 (2006) e o calor específico do documento Propriedade de Materiais (2014) para *EPS molded beads*. A absorptância solar tomou os valores indicados no RECS (2013), de acordo com as suas cores, e considerou-se que a absorptância visível é igual à solar e a absorptância térmica é a por defeito do EnergyPlus.

De notar que as características do solo no modelo de Sailor (2008), e do material “Terra” são iguais, onde o albedo também apresenta um valor muito similar ao conjunto solo-planta do modelo de Sailor (2008), dado que o albedo do solo é de 0,2 e o albedo das plantas de 0,25, comparativamente com o albedo do material “Terra” de 0,2.

Na Tabela 5.2, na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4 apresentam-se os consumos energéticos dos compartimentos estudados para a cobertura com o material “Terra” e para a cobertura verde de referência do modelo de Sailor (2008). Também se apresentam, as temperaturas superficiais exteriores do solo e do material “Terra” para o dia mais frio (31 de janeiro) e para o dia mais quente (15 de julho) do ficheiro climático de Lisboa. Os consumos energéticos apresentam-se por unidade de área de pavimento de modo a reduzir em um grau de liberdade na comparação dos casos de estudo.

Tabela 5.2 – Consumo energético com e sem o modelo de Sailor (2008) para a cabine de som e temperaturas da superfície exterior do solo e do material “Terra” com 0 cm de XPS

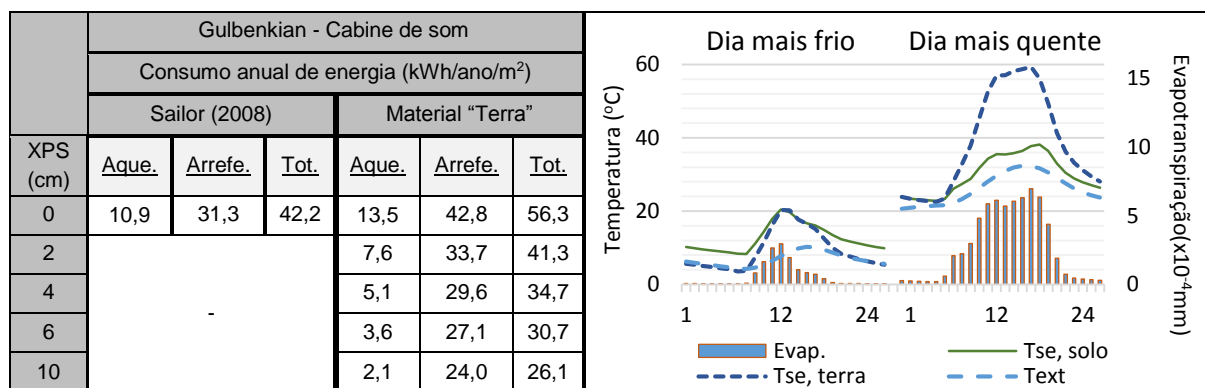


Tabela 5.3 - Consumo energético com e sem o modelo de Sailor (2008) para a sala de ensaios e temperaturas da superfície exterior do solo e do material “Terra” com 0 cm de XPS

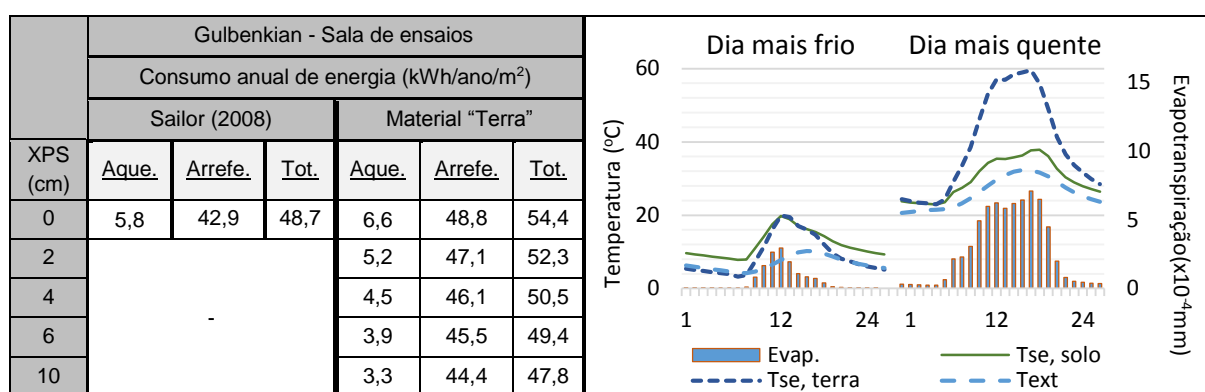
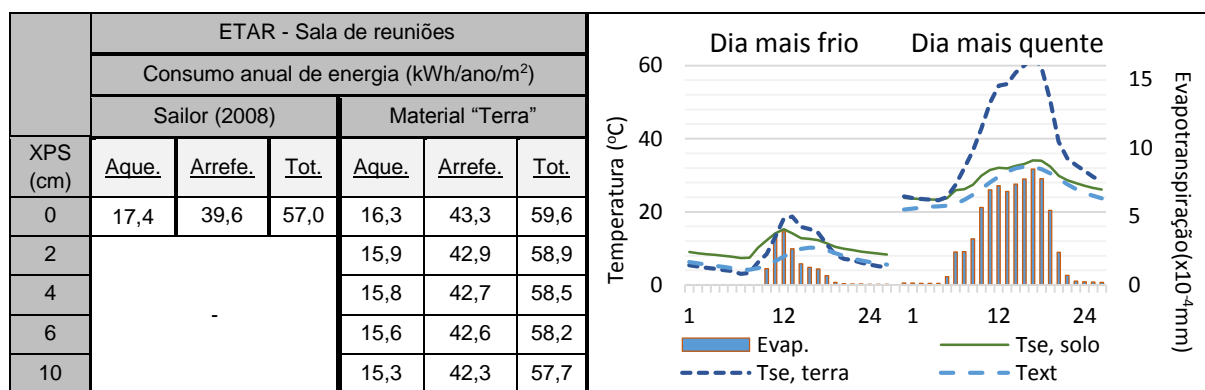


Tabela 5.4 - Consumo energético com e sem o modelo de Sailor (2008) para a sala de reuniões e temperaturas da superfície exterior do solo e do material “Terra” com 0 cm XPS



Pela análise dos consumos de energia na estação de aquecimento, verifica-se que na cabine de som (compartimento com todos os elementos adiabáticos exceto a cobertura), o consumo de energia na estação de aquecimento da cobertura verde consegue ser equivalente para um nível de isolamento térmico reduzido para o material “Terra” (cerca de 1 cm de XPS). Na sala de ensaios, apesar de apresentar um consumo energético bastante inferior, relativamente à cabine de som (devido aos ganhos térmicos do grande envidraçado), a mesma conclusão pode ser retirada por possuir uma cobertura verde de referência igual à cobertura da cabine de som.

Salienta-se o fato de a cobertura verde ter a capacidade de estabilizar as temperaturas da superfície exterior do solo, que justifica o melhor desempenho energético na estação de aquecimento, relativamente ao material “Terra” sem isolamento térmico (0 cm de XPS). Esta estabilização das temperaturas pode ser observada nos gráficos da Tabela 5.2 e da Tabela 5.3 para o dia mais frio.

Pelo contrário, na sala de reuniões (ETAR) este padrão (1 cm de XPS igualar o consumo de energia das duas soluções na estação de aquecimento) já não se verifica, justificado pela cobertura verde de referência ser diferente. Esta possui uma grande densidade de vegetação (LAI = 4), que protege e arrefece a superfície exterior do solo de forma mais considerável, resultando num aumento do consumo de energia. Como se pode observar pelo gráfico da Tabela 5.4, o nível de evapotranspiração (que arrefece o solo) é superior ao nível de evapotranspiração das duas salas da Gulbenkian, e a temperatura superficial exterior do solo inferior. Assim, o material “Terra” apresenta consumos de energia inferiores para qualquer nível de isolamento térmico, na estação de aquecimento.

Na estação de arrefecimento apenas para o caso de estudo da cabine de som o material “Terra”, atinge um valor similar ao da cobertura verde de referência, por ser um compartimento totalmente adiabático e ser mais notório o nível de XPS. Para os outros casos de estudo, os consumos de energia apresentam poucas alterações com o aumento do nível de XPS, nunca atingindo valores similares ao da cobertura verde de referência. É possível ainda, observar-se a estabilização das temperaturas na superfície do solo para as coberturas verdes, e temperaturas inferiores para o caso da sala de reuniões por apresentar uma cobertura verde de referência mais densa e assim um maior nível de evapotranspiração (arrefecimento passivo).

Em termos totais, na cabine de som o consumo de energia da cobertura verde é equivalente ao material “Terra” para um nível de isolamento térmico na ordem dos 2 cm de XPS, contudo para os restantes casos de estudo esta equivalência apenas ocorre para níveis significativamente elevados de isolamento térmico. De um modo geral, concluiu-se que o modelo de Sailor (2008) apresenta características e fenómenos que não podem ser representados pelo aumento do isolamento térmico da cobertura.

5.3. Análise de sensibilidade do modelo de Sailor (2008) – Cabine de som

O consumo de energia varia com as características do solo e da vegetação, estando estas fortemente relacionadas com o desempenho energético na estação de aquecimento e de arrefecimento. Em primeiro lugar, serão analisados a influência das principais características da vegetação e do solo, mantendo as restantes características iguais à cobertura de referência da cabine de som, e de seguida serão estudados as três principais tipologias de coberturas verdes: extensiva, semi-intensiva e intensiva. A cabine de som foi selecionada para esta análise devido às características da sua envolvente térmica, totalmente adiabática exceto a cobertura em estudo.

5.3.1. Parâmetros da cobertura verde: vegetação e solo

O reino vegetal é um dos maiores grupos de seres vivos na Terra, com cerca de 400.000 espécies conhecidas. Como tal, as características das plantas são imensas e muito variáveis de local para local, sendo muito difícil variar todas as características que abrangem todas estas espécies. Serão então, avaliados três parâmetros: altura das plantas, LAI e rega, e serão analisados a partir de várias combinações, onde as restantes características mantêm-se as da cobertura verde de referência da cabine de som, descrito no capítulo 4. A espessura do solo também é analisada para as várias combinações de vegetação.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os resultados da variação dos parâmetros da vegetação e do solo para a cobertura verde da cabine de som. De notar que existem combinações que não têm sentido físico contudo demonstram os valores extremos dos parâmetros analisados. O valor da rega corresponde a um valor diário, dividido em dois períodos (10 e 15 horas), e ativa em todos os dias do ano.

Tabela 5.5 – Consumo de energia para várias combinações dos parâmetros do solo e da vegetação da cobertura verde da cabine de som

| Espessura do solo = 0,1 m | | | | | | | Espessura do solo = 0,7 m | | | | | | |
|---------------------------|-----|---------------|------------------------|------------------------------------|---------|--------|---------------------------|-----|---------------|------------------------|------------------------------------|---------|-------|
| Caso | LAI | Rega (mm/dia) | Altura das plantas (m) | Consumo anual de energia (kWh/ano) | | | Caso | LAI | Rega (mm/dia) | Altura das plantas (m) | Consumo anual de energia (kWh/ano) | | |
| | | | | Aque. | Arrefe. | Total | | | | | Aque. | Arrefe. | Total |
| 1 | 1 | 0 | 0,05 | 299,6 | 1061,8 | 1361,4 | 13 | 1 | 0 | 0,05 | 131,3 | 658,3 | 789,6 |
| 2 | | | 1,0 | 435,3 | 717,5 | 1152,8 | 14 | | | 1,0 | 240,2 | 450,5 | 690,7 |
| 3 | | 6 | 0,05 | 440,3 | 301,2 | 741,4 | 15 | | 6 | 0,05 | 199,2 | 229,8 | 429,1 |
| 4 | | | 1,0 | 813,4 | 246,2 | 1059,6 | 16 | | | 1,0 | 351,1 | 213,8 | 564,9 |
| 5 | | 12 | 0,05 | 438,0 | 308,6 | 746,6 | 17 | | 12 | 0,05 | 200,4 | 231,4 | 431,7 |
| 6 | | | 1,0 | 818,4 | 112,9 | 931,3 | 18 | | | 1,0 | 361,7 | 116,8 | 478,6 |
| 7 | 5 | 0 | 0,05 | 486,7 | 130,7 | 617,4 | 19 | 5 | 0 | 0,05 | 228,9 | 168,2 | 397,1 |
| 8 | | | 1,0 | 723,0 | 85,5 | 808,5 | 20 | | | 1,0 | 295,7 | 303,6 | 599,3 |
| 9 | | 6 | 0,05 | 507,2 | 75,6 | 582,8 | 21 | | 6 | 0,05 | 257,7 | 83,1 | 340,7 |
| 10 | | | 1,0 | 872,1 | 23,4 | 895,5 | 22 | | | 1,0 | 399,2 | 46,0 | 445,2 |
| 11 | | 12 | 0,05 | 506,5 | 75,5 | 582,4 | 23 | | 12 | 0,05 | 257,5 | 81,0 | 338,5 |
| 12 | | | 1,0 | 866,3 | 23,4 | 890,7 | 24 | | | 1,0 | 398,1 | 23,4 | 421,5 |

Pela análise da Tabela 5.5 verifica-se que a rega é um fator determinante nos consumos de energia. A diferença entre a situação sem rega (0 mm/dia) relativamente à situação com 6 mm/dia de rega é notória enquanto a diferença entre a rega de 6 mm/dia em relação à rega de 12 mm/dia, apesar do dobro do caudal, apresentam valores muito similares, com exceção das combinações de LAI = 1 e de altura das plantas = 1,0 m. Esta combinação por ter pouco significado físico, foi considerado que os consumos de energia convergem para uma rega de 6 mm/dia. Este valor coincide com o valor sugerido por Cudell (2000), para manter as condições hídricas das plantas em Lisboa em períodos de ponta, ou seja, na época de maior exigência hídrica que ocorre no mês de Julho e por vezes em Agosto.

Como é possível observar-se na Tabela 5.5, na estação de arrefecimento a rega é favorável à redução do consumo de energia enquanto na estação de aquecimento é desfavorável. Assim, com o intuito de otimizar os consumos de energia do sistema de climatização consideraram-se os valores com rega na estação de arrefecimento e sem rega na estação de aquecimento, considerando que as necessidades hídricas das plantas na estação de aquecimento estão garantidas pela água proveniente da precipitação. Na Tabela 5.6 e na Figura 5.4 apresentam-se os consumos de energia para as combinações selecionadas (marcadas a cor escura na Tabela 5.5).

Tabela 5.6 – Consumo de energia para diferentes combinações com rega ativa de 6mm/dia na estação de arrefecimento e com rega desativa na estação de aquecimento para a cobertura verde da cabine de som

| Espessura do solo = 0,1 m | | | | | | Espessura do solo = 0,7 m | | | | | |
|---------------------------|-----|------------------------|------------------------------------|---------|-------|---------------------------|-----|------------------------|------------------------------------|---------|-------|
| Caso | LAI | Altura das plantas (m) | Consumo anual de energia (kWh/ano) | | | Caso | LAI | Altura das plantas (m) | Consumo anual de energia (kWh/ano) | | |
| | | | Aque. | Arrefe. | Total | | | | Aque. | Arrefe. | Total |
| 25 | 1 | 0,05 | 299,6 | 301,2 | 600,8 | 29 | 1 | 0,05 | 131,3 | 229,8 | 361,1 |
| 26 | | 1,0 | 435,3 | 246,2 | 699,5 | 30 | | 1,0 | 240,2 | 213,8 | 454,0 |
| 27 | 5 | 0,05 | 486,7 | 75,6 | 562,3 | 31 | 5 | 0,05 | 228,9 | 83,1 | 312,0 |
| 28 | | 1,0 | 723,0 | 23,4 | 746,4 | 32 | | 1,0 | 295,7 | 46,0 | 341,7 |

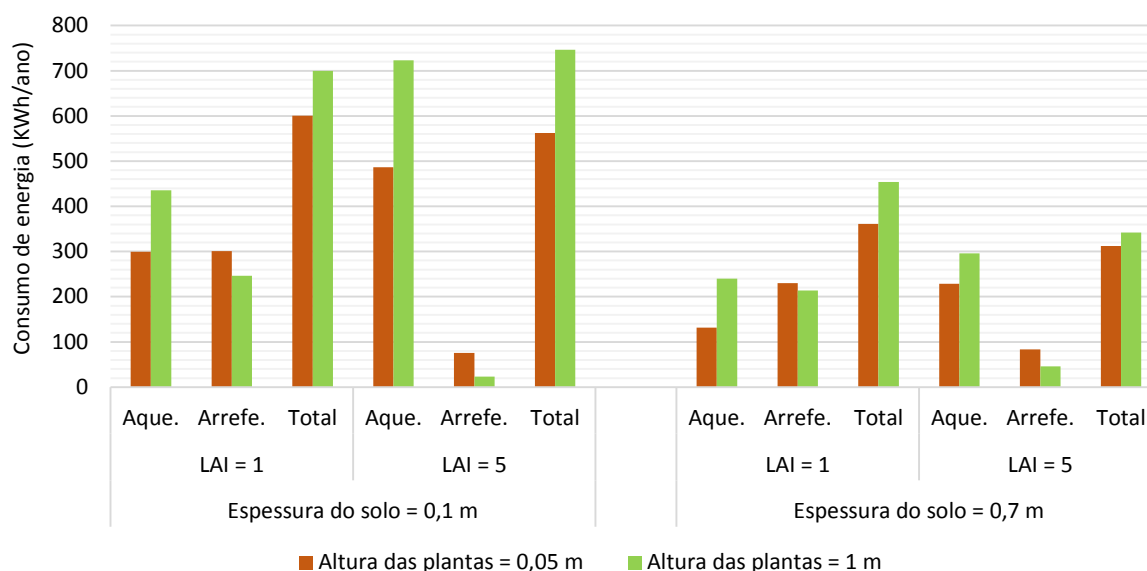


Figura 5.4 - Consumo de energia para as combinações de LAI, altura de plantas e espessura do solo para uma rega de 6 mm/dia ativa apenas na estação de arrefecimento

Relativamente à espessura do solo, verifica-se, de um modo geral, que os consumos são significativamente mais reduzidos para espessuras de solo superiores. O solo funciona como um isolante térmico, que quanto mais espesso mais isola o edifício do ambiente exterior, e uma vez que o algoritmo utilizado no EnergyPlus (capítulo 3.3) não considera a variação da condutibilidade térmica com o teor de humidade do solo, a sua resistência térmica aumenta linearmente com a espessura. Assim, uma espessura elevada é sempre favorável nos consumos de energia exceto na estação de arrefecimento para valores de LAI = 5. Este pode ser explicado pelo elevado nível de isolamento que a espessura do solo proporciona, dificultando o efeito de arrefecimento passivo resultante da evapotranspiração do conjunto solo-planta. Verifica-se também, para uma espessura de solo superior, que a redução no consumo de energia é mais significativa para a estação de aquecimento pois nesta estação, a maior preocupação é manter o calor dentro do edifício, contrariamente à estação de arrefecimento, onde as principais necessidades, além de manter a temperatura interior, também passam pela proteção da radiação solar e das altas temperaturas, sendo assim menos sentida.

O parâmetro LAI, é um parâmetro que influencia significativamente todo o modelo de Sailor (2008), estando principalmente associado ao aumento do fluxo de calor latente da folhagem (transpiração da folhagem) e à fração de cobertura com vegetação, resultando num maior sombreamento e em níveis mais elevados de evapotranspiração. Este é favorável na estação de arrefecimento e desfavorável na estação de aquecimento em todas as combinações. Na estação de arrefecimento a sua maior proteção da superfície do solo e o processo de evapotranspiração elevado reduzem as temperaturas na vizinhança do solo (consumindo o calor), reduzindo as trocas de calor por este elemento. Pelo contrário, na estação de aquecimento, a proteção e o processo de evapotranspiração funcionam desfavoravelmente, não beneficiando da radiação solar e de temperaturas mais altas no solo, aumentando o consumo energético.

Quanto à altura das plantas, no modelo de Sailor (2008), apenas influencia a velocidade do vento na zona da folhagem que por sua vez afeta a resistência aerodinâmica. No modelo de Frankenstein e Koenig (2004), base do modelo de Sailor (2008), a altura das plantas é utilizada no cálculo do parâmetro σ_f (fração de cobertura com vegetação) em conjunto com o parâmetro LAI, contudo de modo a simplificar o modelo, Sailor (2008) apenas teve em conta o último parâmetro para o cálculo desta fração.

Deste modo, com o aumento da altura das plantas a velocidade do vento na zona da folhagem aumenta, e a resistência aerodinâmica diminui, aumentando o fluxo de calor absorvido pela folhagem, evitando o fluxo de calor excessivo absorvido pelo solo. Assim, para uma altura de plantas elevada, o

consumo de energia aumenta na estação de aquecimento e diminui na estação de arrefecimento, como se pode verificar em todas as combinações.

Atualmente, uma solução recorrente em edifícios antigos, que não estão estruturalmente preparados para suportar novas cargas, consiste na utilização de solos leves de reduzida espessura (substratos técnicos) e de vegetações pouco densas e baixas como espécies de relva, ou seja de coberturas do tipo extensivas. Na Tabela 5.7 apresenta-se o consumo de energia relativo a uma cobertura verde com rega de 6 e 0 mm/dia ativa todos os dias do ano, espessura do solo de 0,1 m e massa volúmica do solo de 300 kg/m³ para a combinação com vegetação menos densa e mais baixa (LAI de 1 e altura de plantas de 0,05 m).

Tabela 5.7 - Consumo de energia para uma cobertura verde com massa volúmica do solo reduzida

| Massa volúmica = 300 kg/m ³ | | | | | | | |
|--|-----|------------------------|-----------------------|---------------|------------------------------------|---------|--------|
| Caso | LAI | Altura das plantas (m) | Espessura do solo (m) | Rega (mm/dia) | Consumo anual de energia (kWh/ano) | | |
| | | | | | Aque. | Arrefe. | Total |
| 33 | 1 | 0,05 | 0,1 | 6 | 441,6 | 302,9 | 744,5 |
| 34 | | | | 0 | 300,5 | 1057,5 | 1357,9 |

Na Figura 5.5 apresenta-se a diferença do consumo de energia relacionada com a utilização do substrato técnico (300 kg/m³) relativamente ao solo definido na cobertura verde de referência da cabine de som (1500 kg/m³), para diferentes caudais de rega (caso 1 e 3), diferindo apenas na massa volúmica do solo.

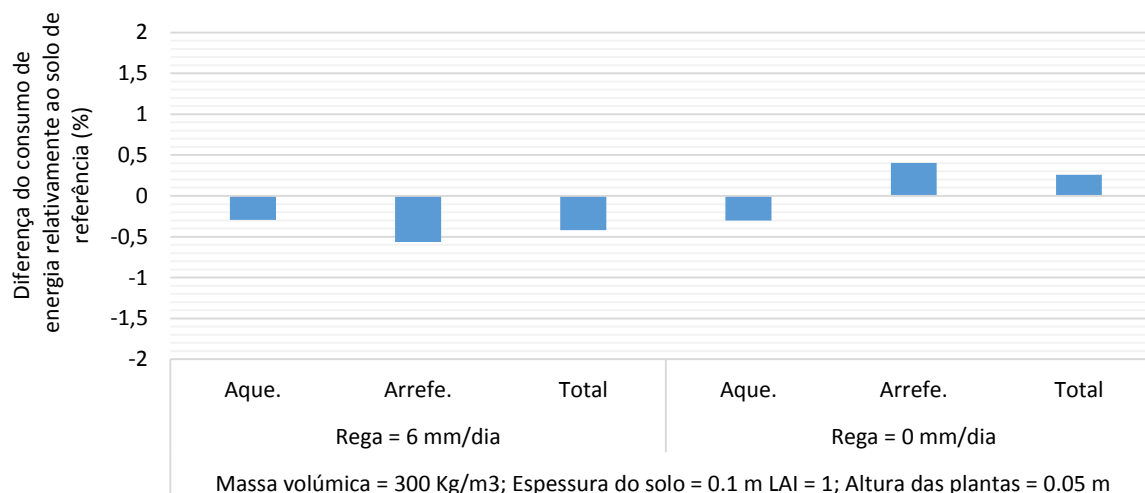


Figura 5.5 - Poupança energética de um solo com massa volúmica de 300 kg/m³ relativamente ao solo da cobertura de referência de 1500 kg/m³, com as restantes características iguais para dois caudais de rega

A massa volúmica influencia a massa que estabiliza a temperatura, contudo tem uma influência insignificante como se pode observar pela Figura 5.5, sugerindo que é uma boa opção para ser utilizada em edifícios antigos sem perda dos benefícios energéticos que as coberturas verdes proporcionam. De referir ainda, que a variação dos parâmetros de LAI e da espessura do solo estão em conformidade com os estudos efetuados no capítulo 2.5.

5.3.2. Tipologias de coberturas verdes

Pela análise do subcapítulo anterior, e numa ótica de otimização dos consumos energéticos, conclui-se que na estação de aquecimento, os parâmetros a serem aperfeiçoados são a espessura do solo, enquanto na estação de arrefecimento os parâmetros mais importantes são os da vegetação, que oferecem uma proteção e uma diminuição das temperaturas na cobertura.

Na Tabela 5.8 apresentam-se três coberturas que pretendem representar as três principais tipologias de coberturas verdes: extensiva, intensiva e semi-intensiva. Estas tipologias estão de acordo com o enunciado no capítulo 2 e apresentam valores extremos e intermédios disponíveis no modelo de Sailor (2008). As restantes características são iguais à cobertura verde de referência, que são iguais em todos os casos de estudo. A massa volúmica por apresentar pouca influência foi desprezada e considerada também igual à da cobertura de referência.

Relativamente à rega, também no subcapítulo anterior foi concluído que o valor de 6 mm/dia ativa todos os dias apenas na estação de arrefecimento, é favorável à redução do consumo de energia. Não sendo necessariamente verdade a inexistência de rega na estação de aquecimento e necessário um valor de rega tão elevado todos os dias da estação de arrefecimento (já que o valor sugerido por Cudell (2000) de 6 mm/dia é para períodos de ponta), considerou-se a rega calendarizada todos os dias do ano com um caudal de 6 mm/dia sendo apenas ativa quando o teor de humidade do solo é inferior a 40% da humidade de saturação do solo (valor sugerido por Sailor (2008)). Deste modo, dependendo das necessidades da planta para transpirar, a rega adapta-se de modo a manter sempre um mínimo de humidade no solo, sendo, de acordo com Cudell (2000), uma solução para evitar consumos supérfluos de água, mantendo as condições hídricas necessárias.

Esta consideração tem o objetivo de refletir uma rega mais próxima da realidade e de garantir durante todo o ano as condições hídricas necessárias das plantas. Como consequência os consumos de energia para as três tipologias são mais elevados relativamente aos consumos energéticos totalmente otimizados apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.8 – Características das três tipologias de coberturas verdes definidas

| Tipologia | Parâmetros específicos | | Parâmetros gerais | | | |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|--|------------|---|------|
| Cobertura verde extensiva | Vegetação | Altura das Plantas (m) | 0,05 | Planta | Refletividade da folha | 0,25 |
| | | LAI | 1 | | Emissividade da folha | 0,95 |
| | Solo | Espessura (m) | 0,1 | | Mínima Resistência Estomática (s/m) | 180 |
| | | | | Rugosidade | Rugoso | |
| Cobertura verde semi-intensiva | Vegetação | Altura das Plantas (m) | 0,5 | Solo | Condutibilidade do solo seco (w/(m.°C)) | 1,0 |
| | | LAI | 2,5 | | Massa volúmica do solo seco (kg/m ³) | 1500 |
| | Solo | Espessura (m) | 0,35 | | Calor específico do solo seco (J/(kg.°C)) | 1900 |
| | | | | | Absorptância térmica | 0,9 |
| Absorptância Solar | | | | | 0,8 | |
| | | | Absorptância Visível | | 0,8 | |
| | | | Teor de humidade de saturação | | 0,3 | |
| | | | Teor de humidade residual | | 0,01 | |
| | | | Teor de humidade inicial | | 0,1 | |
| | | | Método de cálculo da difusão da humidade | | Avançado | |
| Cobertura verde intensiva | Vegetação | Altura das Plantas (m) | 1,0 | Rega | 6 mm/dia (ativa todo o ano quando a humidade de saturação do solo <= 40%) | |
| | | LAI | 5 | | | |
| | Solo | Espessura (m) | 0,7 | | | |

Os consumos de energia para as três tipologias de coberturas verdes definidas na Tabela 5.8 apresentam-se na Tabela 5.9 e na Figura 5.6 apresenta-se a quantidade de água libertada pelo processo de evapotranspiração (mm) para o caso da cabine de som.

Tabela 5.9 - Consumo de energia para as três tipologias de coberturas verdes para a cabine de som

| Caso | Tipologia de cobertura verde | Consumo anual de energia (kWh/ano) | | |
|------|------------------------------|------------------------------------|---------|--------|
| | | Aque. | Arrefe. | Total |
| 35 | Extensiva | 301,5 | 950,4 | 1251,9 |
| 36 | Semi-intensiva | 333,2 | 339,6 | 672,8 |
| 37 | Intensiva | 298,2 | 162,2 | 460,4 |

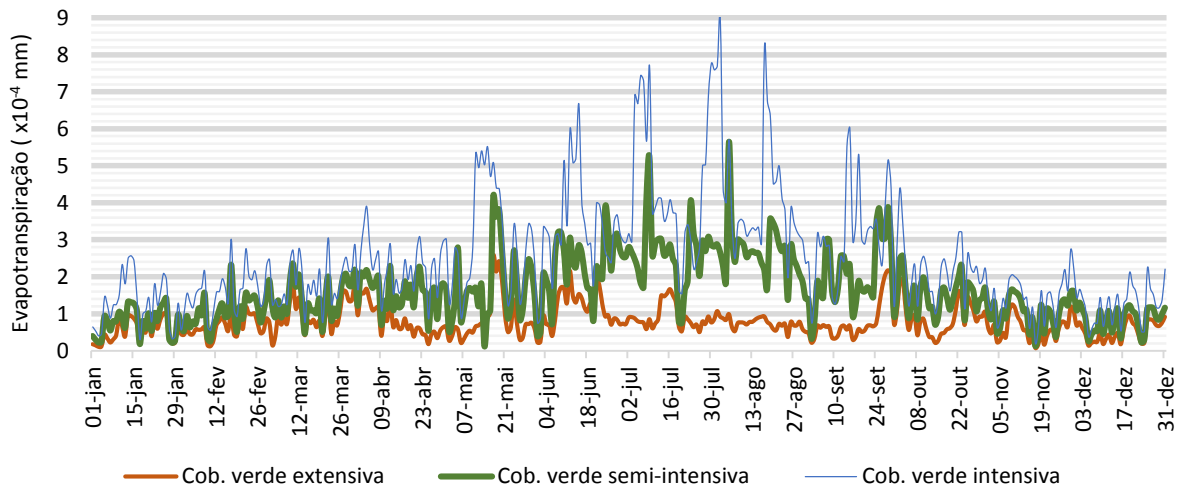


Figura 5.6 - Quantidade de água média diária libertada por evapotranspiração das três tipologias de coberturas verdes

A evapotranspiração, como já referido no presente trabalho, está totalmente dependente da radiação solar, da água existente no solo e da densidade e altura da vegetação como se pode verificar pela Figura 5.6. De notar que existem vários dias com precipitação mais acentuada do que a rega definida para as coberturas, o que mostra a dependência da radiação solar no efeito da evapotranspiração, principalmente para as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva, como se pode observar pela comparação da Figura 5.2, da Figura 5.3 e da Figura 5.6.

Relativamente aos consumos de energia na estação de aquecimento, todas as três tipologias apresentam um desempenho energético similar, mas por razões diferentes. A cobertura extensiva por ter reduzida densidade de plantas (pouca proteção à radiação solar), e a cobertura semi-intensiva e intensiva por apresentarem valores de espessura do solo elevados (isolamento térmico superior), que apesar dos elevados valores de LAI e de altura das plantas (maiores níveis de evapotranspiração e sombreamento, logo mais arrefecimento passivo), equilibram as trocas de calor resultando em consumos de energia idênticos. Esta conclusão pode ser observada comparando os casos 29 e 30 com os casos 31 e 32 da Tabela 5.6, onde um aumento do parâmetro LAI de 1 para 5 resulta num aumento do consumo de energia.

Na estação de arrefecimento são notadas as diferenças entre os tipos de vegetação definidos para cada tipologia de cobertura verde. Quanto mais densa (maior LAI) e maior altura das plantas, menor é o consumo energético, onde o principal motivo é o efeito da evapotranspiração que consome o calor e estabiliza a temperatura na zona da folhagem, e pelo sombreamento, funcionando como um sistema de arrefecimento passivo. Como se verifica pela Figura 5.6 a evapotranspiração é significativamente diferente entre a cobertura extensiva e as coberturas semi-intensiva e intensiva, pelo contrário, o nível de evapotranspiração entre a cobertura semi-intensiva e a cobertura intensiva são similares, sendo a cobertura intensiva sempre superior, principalmente nos dias de maior radiação solar (Figura 5.2). Deste modo os consumos de energia na estação de arrefecimento entre estas últimas são mais próximos relativamente à cobertura verde extensiva. Quanto à cobertura intensiva, salienta-se ainda que o incremento da evapotranspiração prevalece relativamente ao incremento da espessura do solo (que dificulta o efeito de arrefecimento passivo) resultando num consumo energético inferior comparativamente com a cobertura semi-intensiva.

Em termos totais, a cobertura semi-intensiva e intensiva apresentam valores significativamente mais reduzidos enquanto a cobertura extensiva apresenta cerca do dobro da energia necessária para climatizar o espaço. A melhor solução é a cobertura verde intensiva com 460,8 kW/ano.

De salientar ainda que estas diferenças acentuadas nos consumos energéticos da cabine de som, devem-se ao fato de este estudo incidir sobre um compartimento totalmente adiabático com trocas de calor apenas pela cobertura, sendo assim mais notória qualquer alteração neste elemento.

5.4. Análise do desempenho energético de diferentes soluções de coberturas – Cabine de som

Em Portugal, as coberturas dos edifícios são maioritariamente não acessíveis e finalizadas com membranas de impermeabilização impregnadas. Deste modo torna-se imprescindível estudar e comparar as três coberturas verdes definidas (extensiva, semi-intensiva e intensiva) com coberturas convencionais. Estas apresentam uma composição igual à cobertura da cabine de som, com a substituição do substrato e da vegetação, ou seja do modelo de cobertura verde, por uma membrana betuminosa de cor escura ou de cor clara. É verdade que o sistema construtivo de coberturas ajardinadas é diferente de coberturas convencionais contudo este assunto ultrapassa o âmbito do presente trabalho, sendo o principal objetivo a análise de diferentes proteções da cobertura.

Estas duas soluções (membrana betuminosa escura e clara) representam coberturas com uma refletância baixa (cor escura, conhecida por *black roof*, em inglês) e elevada (cor clara, conhecida por *white roof* ou *cool roof* em inglês). Neste contexto serão denominadas por cobertura escura e cobertura clara, respetivamente. Este estudo foi influenciado pela análise bibliográfica que revelou maiores poupanças energéticas para coberturas com albedo elevados (coberturas claras), como referido no ponto 2.5, e por em Portugal ser comum coberturas revestidas com materiais de cores escuras.

Na Tabela 5.10 apresentam-se as características das duas membranas de impermeabilização, diferindo apenas na absorptância.

Tabela 5.10 - Características das membranas de impermeabilização clara e escura

| Material | Membrana betuminosa escura (5mm) | Membrana betuminosa clara (5mm) |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Rugosidade | Moderadamente liso | Moderadamente liso |
| Condutibilidade térmica (W/(m.°C)) | 0,23 | 0,23 |
| Massa volúmica (kg/m ³) | 1050 | 1050 |
| Calor Especifico (J/(kg.°C)) | 1510 | 1510 |
| Absorptância Térmica | 0,9 | 0,9 |
| Absorptância Solar | 0,8 | 0,4 |
| Absorptância Visível | 0,8 | 0,4 |

Os valores da condutibilidade térmica e massa volúmica estão de acordo com o ITE-50 (2006) e o calor específico foi retirado do documento Propriedade de Materiais (2014) para *Asphalt roll roofing*. A absorptância solar tomou os valores indicados no RECS (2013), pela sua cor e considerou-se que a absorptância visível é igual à solar e a absorptância térmica é a por defeito do EnergyPlus.

Na Figura 5.7 apresenta-se os diferentes consumos de energia para as três coberturas verdes e para as duas coberturas convencionais para a cabine de som.

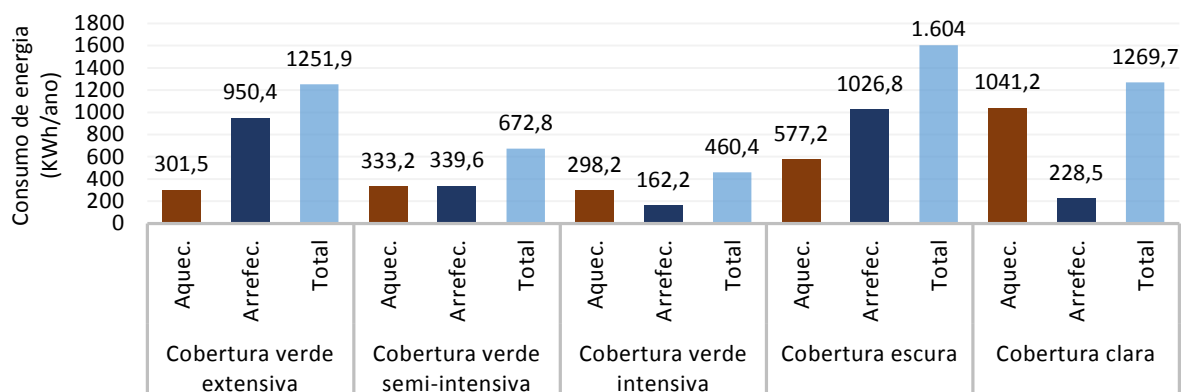


Figura 5.7 – Consumo de energia para as diferentes soluções de coberturas para a cabine de som

As coberturas convencionais apresentam gastos energéticos significativos quando comparados com as soluções de coberturas verdes intensiva e semi-intensiva e similares à cobertura extensiva. Na estação de aquecimento a cobertura escura é mais vantajosa relativamente à cobertura clara, devido ao seu reduzido albedo que absorve grande parte da radiação solar, transmitindo calor para dentro do edifício. Pelo contrário, na estação de arrefecimento esta característica da cobertura escura é desfavorável.

Pelo mesmo raciocínio, na estação de arrefecimento a cobertura clara apresenta um valor de consumo de energia inferior à cobertura escura, devido à sua alta refletância. Na estação de aquecimento esta é prejudicial pois reflete grande parte da radiação. Salienta-se que os consumos das coberturas convencionais são elevados devido, em parte, ao reduzido nível de isolamento térmico da cobertura sem o substrato e vegetação, e ao fato da cobertura da cabine de som, ser o único elemento onde ocorrem transferências de calor, sendo bastante sensível.

De modo a compreender-se melhor os efeitos das diferentes soluções de coberturas, na Figura 5.8 apresentam-se as temperaturas superficiais exteriores (T_{se}) do solo/membrana betuminosa, as temperaturas do ambiente interior (T_{int}) e os fluxos de calor na superfície da laje ($F_{si, laje}$ – sinal negativo representa perda de calor do compartimento) para a cabine de som sem o sistema de climatização ativo, em três dias-tipo (do ano tipo do ficheiro climático de Lisboa), representando dias de condições climáticas extremas:

- Dias mais frio – 31 de janeiro
- Dia frio com radiação solar elevada – 5 de abril
- Dia mais quente – 15 de julho

As condições extremas foram obtidas através dos valores médios diários de temperatura exterior e de radiação solar global e na Tabela 5.11 apresentam-se estes valores médios diários para cada dia-tipo.

Tabela 5.11 - Características dos dias-tipo do ficheiro climático de Lisboa

| Dia-tipo | Temperatura média diária (°C) | Radiação solar global média diária (W/m ²) |
|-------------------------------------|-------------------------------|--|
| Dia mais frio | 6,8 | 196,1 |
| Dia frio com radiação solar elevada | 10,6 | 481,5 |
| Dias mais quente | 26,1 | 531,1 |

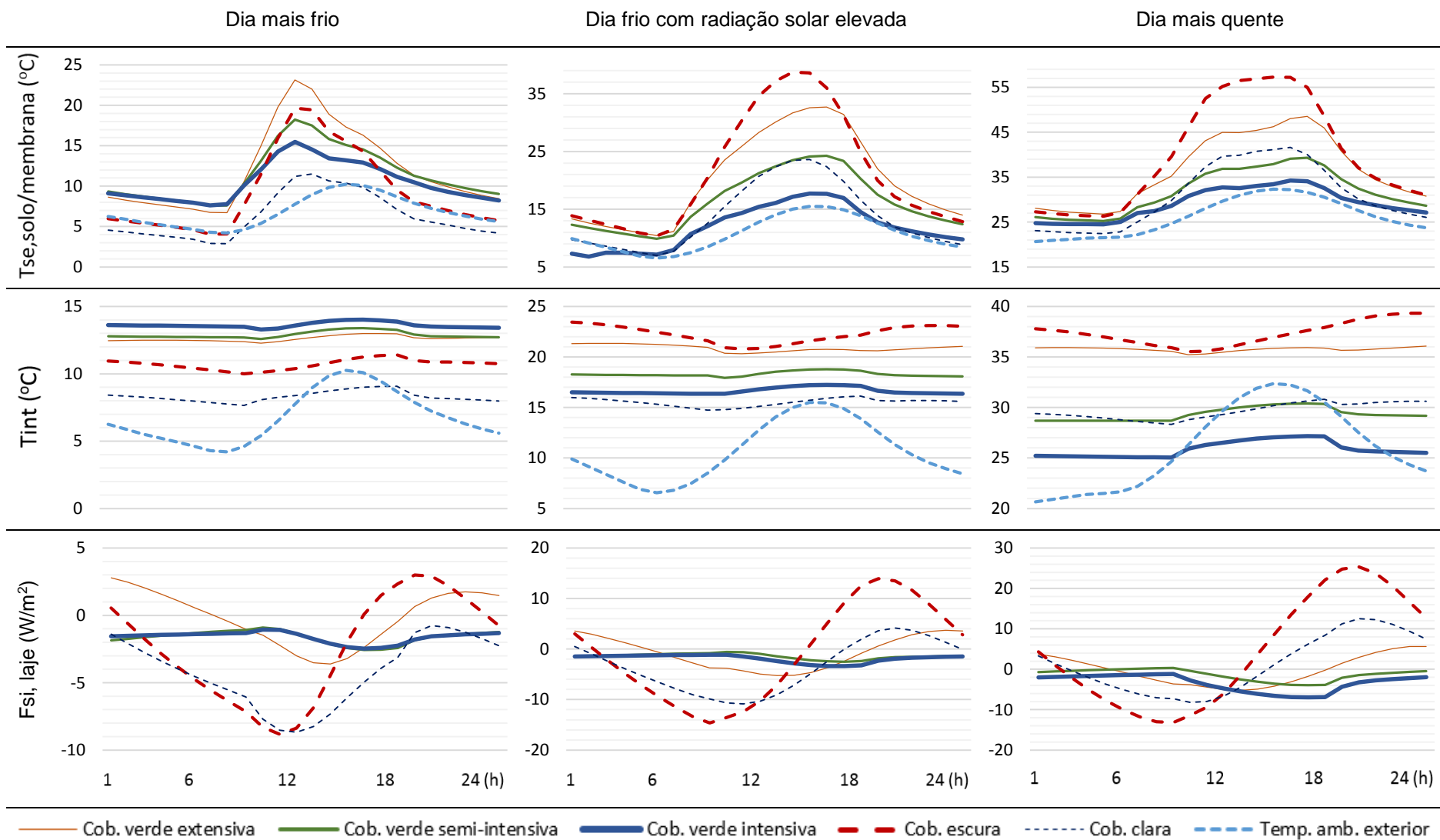


Figura 5.8 - Temperatura superficial exterior do solo /membrana ($T_{se, solo/membrana}$), temperatura interior (T_{int}) e fluxo de calor superficial interior na laje ($F_{si, laje}$) para as várias soluções de coberturas na cabine de som, para três dias tipo e sem sistema de climatização ativo

Temperatura superficial exterior (Tse) do solo/membrana:

Pela análise das temperaturas superficiais do solo no dia mais frio, a cobertura extensiva, por ser a menos protegida por vegetação, é a que equilibra melhor o sombreamento e a capacidade de manter a temperatura entre a folhagem e o solo, apresentando temperaturas mais altas do que a cobertura com o albedo mais elevado (escura). A cobertura semi-intensiva e intensiva apresentam valores de temperaturas superficiais do solo inferiores relativamente à extensiva, pois ambos contêm um nível considerável de vegetação, e por isso um sombreamento e evapotranspiração elevados. Dentro das coberturas convencionais, a cobertura escura é a que apresenta maiores temperaturas superficiais da membrana, devido à alta absorvância desta, contudo como não apresenta nenhum sistema que estabiliza esta temperatura, a cobertura extensiva apresenta temperaturas mais elevadas. A cobertura clara, devido à sua alta refletância é que apresenta temperatura superficial da membrana mais reduzida, sendo a que se comporta pior neste dia-tipo.

No dia frio com radiação solar elevada, a cobertura convencional escura é a que apresenta maior temperatura superficial exterior devido à sua alta absorvância, seguido da cobertura verde extensiva com valores ligeiramente inferiores. A cobertura intensiva é a solução com o pior desempenho pois apesar da temperatura média do ambiente exterior ser cerca de 5°C superior relativo ao dia mais frio, apresenta temperaturas do solo muito similares ao dia mais frio, e em determinados pontos chega a atingir temperaturas inferiores. A razão para a reduzida temperatura superficial do solo reside no elevado nível de densidade de vegetação (LAI=5), que para além de proteger o solo, consome o calor através da evapotranspiração que a elevada radiação solar facilita. A cobertura convencional clara e a cobertura verde semi-intensiva apresentam valores de temperaturas superficiais similares.

No dia mais quente, a cobertura mais desfavorável é a cobertura escura pelas razões já enunciadas. A cobertura extensiva apesar da baixa densidade de vegetação (reduzido sombreamento e evapotranspiração) apresenta temperaturas superficiais intermédios entre a cobertura clara e a escura. A cobertura que tem um melhor desempenho é a cobertura intensiva com temperaturas máximas de 34°C. As baixas temperaturas que todas as coberturas verdes apresentam entre as 12 e as 16 horas devem-se ao elevado nível de evapotranspiração que ocorre quando a temperatura exterior é a mais elevada, coincidente com a existência de rega.

Salienta-se que todas as coberturas verdes apresentam um albedo entre 0,2 (solo) e 0,25 (vegetação), dependendo do valor de LAI que indica a fração de cobertura com vegetação. Deste modo apresenta um albedo muito similar ao da cobertura escura (0,2), o que não significa um desempenho energético similar como se tem vindo a verificar. Apesar do albedo similar a radiação absorvida pela vegetação impede ser absorvida diretamente pelo solo, proporcionando o sombreamento. Outro fator é o ar entre a folhagem e o solo que além de estar protegido ainda é absorvido calor através da evaporação de água do solo e da transpiração da vegetação, quando as condições são favoráveis (radiação solar e humidade no solo), reduzindo a temperatura do ar na vizinhança do solo.

Assim, a evapotranspiração e o sombreamento são favoráveis na estação de arrefecimento enquanto na estação de aquecimento são efeitos indesejáveis. Contudo, com um nível baixo de LAI, e na estação de aquecimento, onde as condições climáticas não proporcionam a evapotranspiração em grandes quantidades, a cobertura tem a capacidade de estabilização da temperatura entre a folhagem e o solo, o que explica as temperaturas superficiais ligeiramente superiores da cobertura verde extensiva relativamente à cobertura escura na estação de aquecimento.

No modelo de Sailor (2008), a estabilização das temperaturas é representada principalmente pelas trocas de radiação entre o solo e as plantas e pelo fluxo de calor sensível (convecção) que ocorre entre a temperatura do solo/folhagem e a temperatura na zona da folhagem (T_{af}) ao invés da temperatura ambiente. A temperatura na zona da folhagem está dependente das temperaturas superficiais do solo e da folhagem, e da temperatura do ambiente exterior, explicando a estabilização da temperatura (equação A.5).

Também é possível verificar que a ordem de temperaturas superficiais mais elevadas do solo nas coberturas verdes apresenta sempre a mesma ordem para os dias-tipo: extensiva, semi-intensiva e intensiva.

Temperatura do ambiente interior:

As temperaturas do ambiente interior da cabine de som estão dependentes da temperatura superficial exterior e do nível de isolamento das diferentes soluções de cobertura por ser o único elemento por onde existem trocas de calor.

Na estação de aquecimento uma temperatura interior mais quente é mais favorável, sugerindo um menor gasto de energia no aquecimento. Na estação de arrefecimento, o contrário verifica-se. De um modo geral as coberturas verdes com vegetações mais densas e com espessura de solo maiores, apresentam um melhor desempenho para dias com temperaturas extremas, enquanto para dias com radiação elevada e para temperaturas baixas, a cobertura escura ou a cobertura verde extensiva são as que melhor se comportam.

A razão para as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva comportarem-se de modo menos favorável no dia frio com alto nível de radiação é devido ao processo de evapotranspiração ser facilitado consumindo o calor na superfície exterior da cobertura, que apesar das espessuras significativas de solo não equilibram o arrefecimento da superfície exterior. Assim, para o dia mais frio e com radiação solar menos significativa estas coberturas comportam-se melhor. Salienta-se que no dia mais quente as temperaturas interiores das diferentes soluções é mais variável, justificando os consumos de energia observados na estação de arrefecimento.

Fluxo de calor superficial interior da laje:

Os fluxos de calor da cobertura escura, clara e verde extensiva apresentam uma evolução similar durante os dias-tipo. Pelo contrário as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva apresentam fluxos de calor com uma evolução contrária ao das restantes soluções nos dias-tipo.

Em relação à cobertura escura, clara e verde extensiva, o fluxo de calor é reduzido no início do dia-tipo e quando existe o pico de calor, o fluxo tende a aumentar, de forma maior ou menor dependendo das condições climáticas. Nas coberturas verdes com vegetação significativa (intensiva e semi-intensiva), o fluxo de calor tende a diminuir no horário de maior calor devido ao consumo de calor que se encontra dentro do edifício através da evapotranspiração, que vários autores, estudados no ponto 2.5, se referem como o arrefecimento passivo.

Apesar dos fluxos de calor da cobertura verde intensiva e semi-intensiva serem idênticos, exceto no dia mais quente onde a evapotranspiração é mais elevada, as diferentes temperaturas interiores são explicadas pelas temperaturas superficiais exteriores do solo e pelas diferentes espessuras do solo da cobertura respetiva.

Na Tabela 5.12 apresenta-se uma avaliação do benefício das soluções de coberturas descritas no presente documento, utilizando uma escala qualitativa, sendo “+++” muito favorável.

Tabela 5.12 - Benefício das diferentes soluções de coberturas

| Estação | Cobertura verde extensiva | Cobertura verde semi-intensiva | Cobertura verde intensiva | Cobertura escura | Cobertura clara |
|---------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| Aquecimento | +++ | +++ | +++ | ++ | + |
| Arrefecimento | + | ++ | +++ | + | +++ |

5.5. Análise do consumo energético de diferentes soluções de coberturas para os três casos de estudo

O objetivo deste subcapítulo é analisar o consumo energético e as poupanças de energia relacionadas com a utilização de soluções de coberturas verdes ao invés de coberturas convencionais claras ou escuras, nos três casos de estudo apresentados no capítulo 4 e localizados em Lisboa. À semelhança do definido no início do capítulo 5, e de modo a ser possível uma comparação entre os casos de estudo, serão consideradas iguais os seguintes aspetos:

- Temperaturas de *set point* de 20 e 25°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, como indica o RECS (2013a), considerando o método simplificado.
- Consumos de energia apresentados por unidade de área de pavimento de modo a ser possível uma comparação entre os casos estudados.

Deste modo, além da geometria, envolvente e orientação, a única diferença entre os casos de estudo é o período de funcionamento do sistema de climatização e de ocupação. Na Gulbenkian está ativa todos os dias do ano, enquanto na ETAR apenas funciona durante a semana.

As soluções de cobertura analisadas para os três caso de estudo são:

- Duas soluções de coberturas convencionais (proteção clara e escura – definidos no capítulo 5.4)
- Quatro soluções de coberturas verdes (referência - definida no capítulo 4; extensiva, semi-intensiva e intensiva - definidas no capítulo 5.3.2).

Outro aspeto que será analisado é a variação da espessura do isolamento térmico, de modo a ter em conta edifícios mais antigos, representado pelo material XPS e colocado sob as membranas de impermeabilização ou sob o substrato da cobertura verde, de modo a não influenciar a refletividade. As comparações realizadas serão sempre em relação ao mesmo nível de isolamento térmico, sendo que o objetivo é analisar a diferença da proteção da cobertura com a mesma qualidade térmica.

De seguida apresenta-se os consumos e as poupanças de energia para os três casos estudados com as diferentes soluções de coberturas.

Tabela 5.13 - Cabine de som

| XPS (cm) | Consumo Anual de Energia (kWh/ano/m ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--|---------|-------|---------------------------|---------|-------|--------------------------------|---------|-------|---------------------------|---------|-------|-------------------------------|---------|-------|------------------------------|---------|-------|
| | Cobertura verde de Referência | | | Cobertura verde Extensiva | | | Cobertura verde Semi-Intensiva | | | Cobertura verde Intensiva | | | Cobertura escura (Albedo=0,2) | | | Cobertura clara (Albedo=0,6) | | |
| | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total |
| 0 | 10.9 | 31.3 | 42.2 | 17.5 | 55.2 | 72.7 | 19.4 | 19.7 | 39.1 | 17.3 | 9.4 | 26.7 | 33.5 | 59.6 | 93.1 | 60.5 | 13.3 | 73.7 |
| 2 | 5.8 | 26.3 | 32.1 | 8.7 | 42.9 | 51.6 | 11.9 | 17.7 | 29.6 | 11.6 | 10.0 | 21.6 | 18.0 | 34.1 | 52.1 | 30.3 | 10.8 | 41.0 |
| 4 | 3.6 | 23.4 | 27.0 | 5.6 | 34.7 | 40.3 | 8.4 | 16.2 | 24.6 | 8.5 | 10.5 | 19.1 | 12.0 | 27.6 | 39.6 | 19.8 | 10.9 | 30.7 |
| 8 | 1.8 | 20.8 | 22.6 | 3.1 | 27.3 | 30.4 | 4.8 | 15.4 | 20.2 | 5.2 | 11.1 | 16.3 | 6.6 | 22.2 | 28.9 | 11.3 | 11.3 | 22.6 |

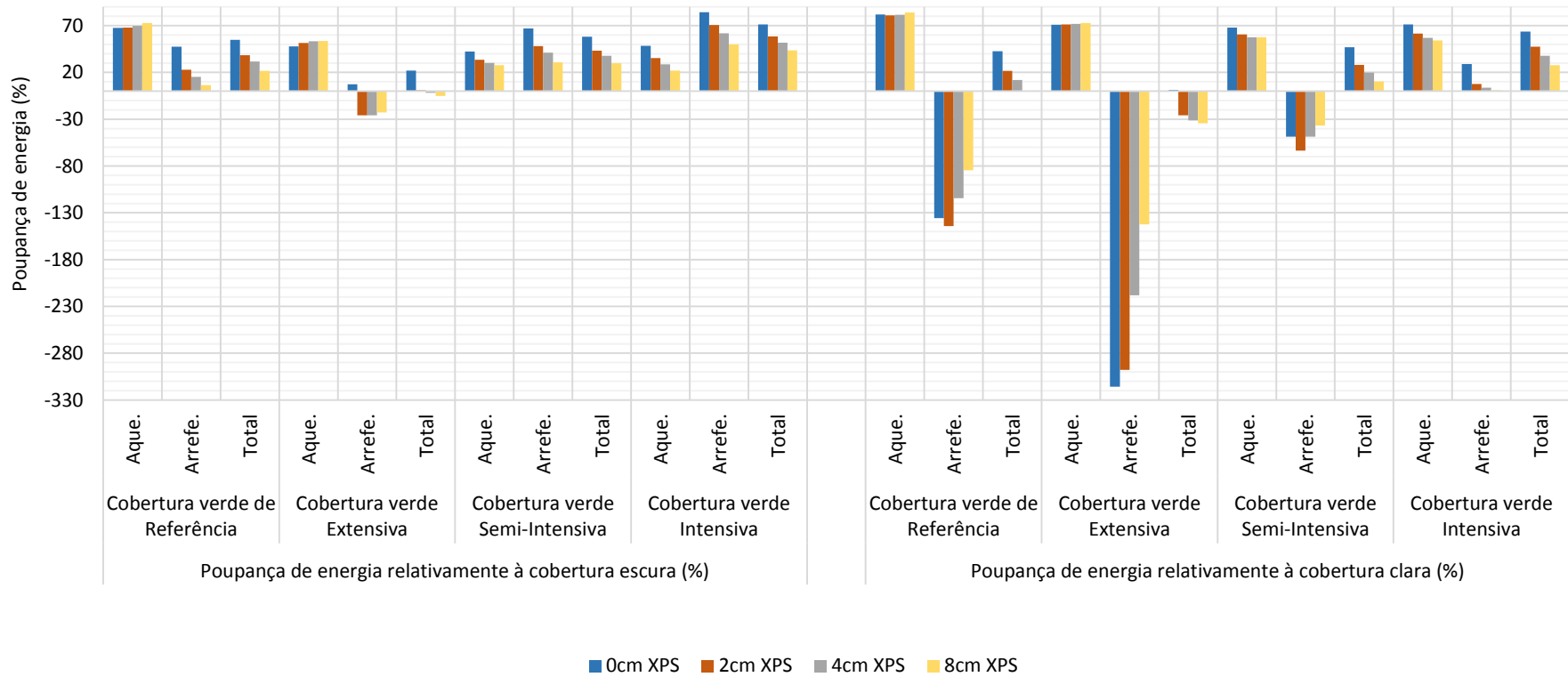


Figura 5.9 - Poupanças de energia das soluções de coberturas verdes relativamente à cobertura escura e clara na cabine de som

Tabela 5.14 – Sala de ensaios

| XPS (cm) | Consumo Anual de Energia (kWh/ano/m ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--|---------|-------|---------------------------|---------|-------|--------------------------------|---------|-------|---------------------------|---------|-------|-------------------------------|---------|-------|------------------------------|---------|-------|
| | Cobertura verde de Referência | | | Cobertura verde Extensiva | | | Cobertura verde semi-intensiva | | | Cobertura verde intensiva | | | Cobertura escura (Albedo=0,2) | | | Cobertura clara (Albedo=0,6) | | |
| | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total |
| 0 | 5.8 | 42.9 | 48.7 | 5.8 | 54.3 | 60.1 | 6.4 | 40.3 | 46.7 | 6.1 | 35.4 | 41.5 | 9.3 | 51.4 | 60.7 | 13.4 | 34.1 | 47.6 |
| 2 | 4.5 | 42.6 | 47.2 | 4.3 | 51.0 | 55.4 | 4.9 | 40.5 | 45.4 | 4.9 | 36.6 | 41.5 | 6.8 | 47.0 | 53.8 | 9.2 | 35.2 | 44.4 |
| 4 | 3.9 | 42.2 | 46.1 | 3.7 | 49.1 | 52.7 | 4.2 | 40.5 | 44.7 | 4.3 | 37.3 | 41.6 | 5.4 | 45.6 | 51.0 | 7.1 | 36.2 | 43.3 |
| 8 | 3.2 | 42.0 | 45.2 | 3.0 | 46.8 | 49.8 | 3.3 | 40.8 | 44.1 | 3.5 | 38.5 | 41.9 | 4.1 | 44.2 | 48.3 | 5.1 | 37.6 | 42.7 |

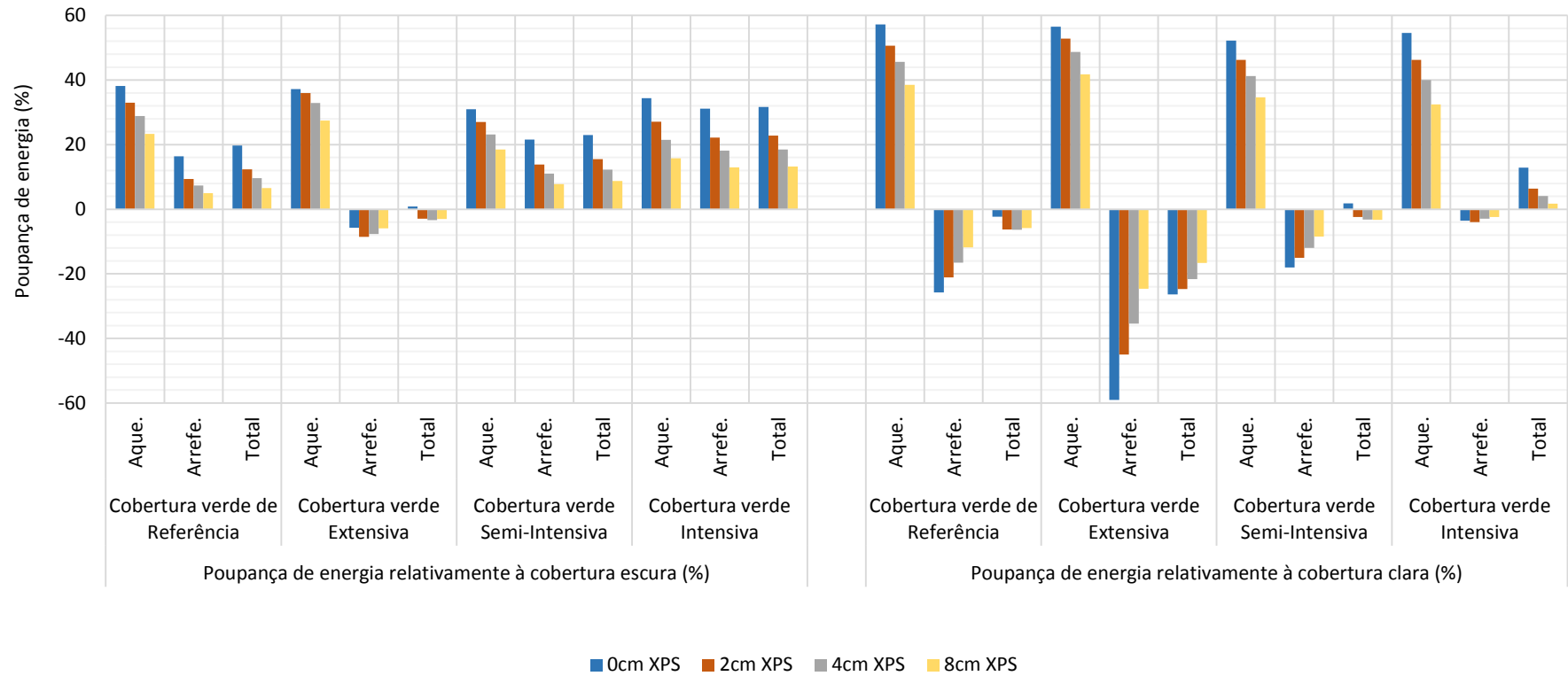


Figura 5.10 - Poupanças de energia das soluções de coberturas verdes relativamente à cobertura escura e clara na sala de ensaios

Tabela 5.15 – Sala de reuniões

| XPS (cm) | Consumo Anual de Energia (kWh/ano/m ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--|---------|-------|---------------------------|---------|-------|--------------------------------|---------|-------|---------------------------|---------|-------|-------------------------------|---------|-------|------------------------------|---------|-------|
| | Cobertura verde de referência | | | Cobertura verde extensiva | | | Cobertura verde semi-intensiva | | | Cobertura verde intensiva | | | Cobertura escura (Albedo=0,2) | | | Cobertura clara (Albedo=0,6) | | |
| | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total | Aque. | Arrefe. | Total |
| 0 | 17.4 | 39.6 | 57.0 | 17.7 | 51.8 | 69.5 | 18.1 | 41.6 | 59.7 | 17.6 | 39.0 | 56.6 | 22.3 | 48.1 | 70.4 | 27.0 | 36.9 | 63.9 |
| 2 | 16.6 | 40.1 | 56.7 | 15.9 | 46.6 | 62.4 | 16.7 | 41.4 | 58.1 | 16.8 | 39.7 | 56.4 | 18.3 | 43.5 | 61.8 | 20.4 | 38.5 | 58.8 |
| 4 | 16.1 | 40.3 | 56.4 | 15.4 | 45.1 | 60.5 | 16.2 | 41.3 | 57.5 | 16.2 | 39.9 | 56.2 | 17.1 | 43.0 | 60.1 | 18.5 | 39.3 | 57.8 |
| 8 | 15.6 | 40.6 | 56.2 | 15.1 | 43.9 | 59.0 | 15.7 | 41.3 | 57.0 | 15.8 | 40.2 | 56.0 | 16.3 | 42.4 | 58.7 | 17.2 | 39.9 | 57.1 |

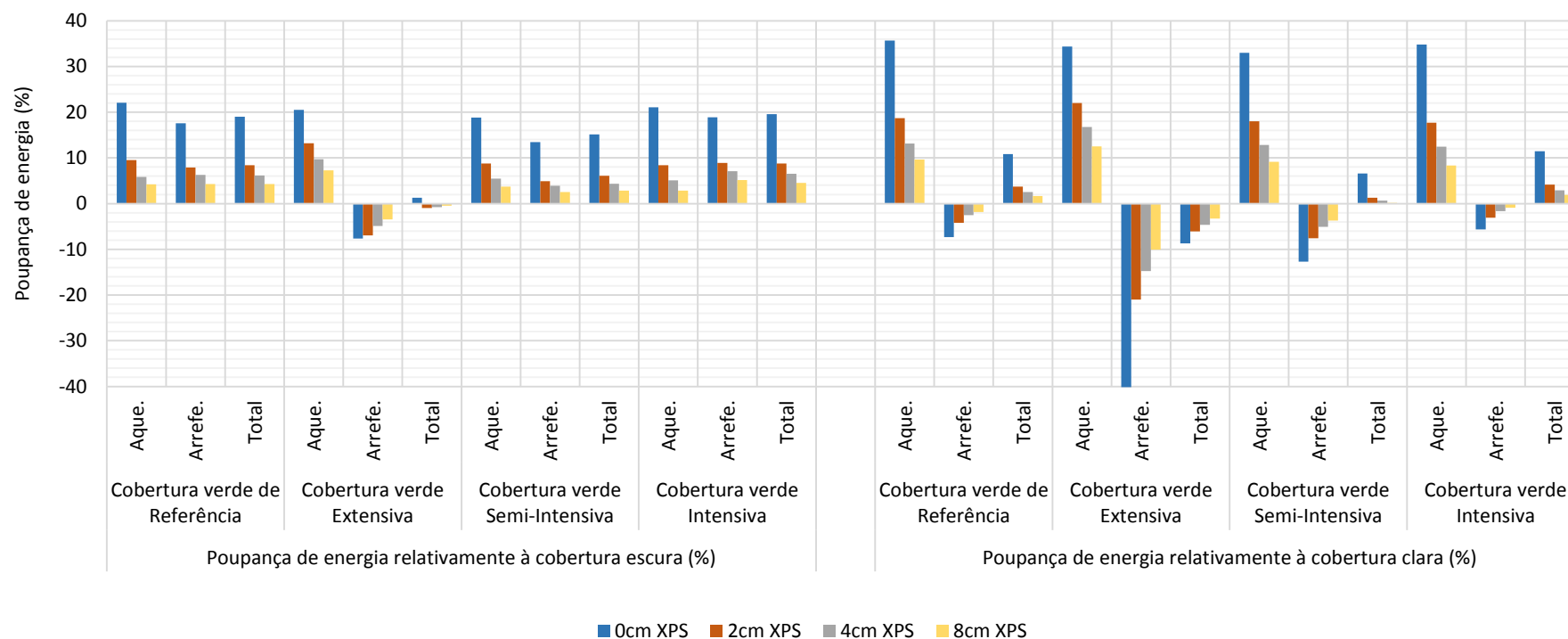


Figura 5.11 - Poupanças de energia das soluções de coberturas verdes relativamente à cobertura escura e clara na sala de reuniões

Pela análise dos três casos estudados, verifica-se que o nível de isolamento térmico da cobertura reduz significativamente as poupanças de energia das soluções de coberturas verdes pois aumentando a qualidade térmica da cobertura, o tipo de proteção de cobertura tem menos influência. Na estação de aquecimento um aumento do nível de isolamento diminui os consumos em todas as soluções de coberturas enquanto na estação de arrefecimento, para coberturas com níveis de vegetação elevados, os consumos de energia aumentam com o aumento do isolamento. Isto deve-se ao alto nível de evapotranspiração que estas coberturas apresentam e que arrefecem a superfície exterior da cobertura, contudo com o aumento do isolamento este arrefecimento tem menos importância e não toma partido deste efeito na totalidade. Além de não tirar partido deste arrefecimento passivo, o aumento do isolamento térmico na cobertura também dificulta as perdas de calor, como se pode observar nas coberturas claras. Esta conclusão está de acordo com as conclusões do capítulo 2.5 (Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012), Kotsiris et al. (2012) e Ascione et al. (2013)).

Na estação de aquecimento, relativamente às duas coberturas convencionais, e para as coberturas verdes com reduzido nível de vegetação na cabine de som, verifica-se um aumento da poupança de energia com o aumento do isolamento térmico devido ao fator de estabilização de temperatura da cobertura verde. Nos outros casos de estudo já não se verifica pois existem outros elementos com trocas de calor onde esta estabilização de temperatura não é notada. De referir que existe sempre poupanças de energia nesta estação para todas as soluções e para todos os casos de estudo.

Na estação de arrefecimento e relativamente à cobertura escura existem sempre poupanças de energia exceto para a solução de cobertura verde extensiva devido aos níveis reduzidos de vegetação. Relativamente à cobertura clara, nunca existe poupança de energia nesta estação exceto para a cobertura verde intensiva na cabine de som por não existir outros elementos com trocas de energia.

Conclui-se portanto que na estação de arrefecimento, apesar de existir um consumo de calor pelo efeito de evapotranspiração e uma proteção das plantas da cobertura verde, uma cobertura com refletância solar elevada apresenta sempre melhores desempenhos energéticos, como referido no capítulo 2.5 (Saiz et al. (2006) e Zinzi e Agnoli (2012)). Pelo contrário, na estação de aquecimento, a cobertura verde é uma solução eficaz, relativamente às duas coberturas convencionais, pois além de isolar mais o edifício (espessura do solo) também estabiliza as temperaturas superficiais exteriores.

Relativamente à cobertura escura, as coberturas verdes são uma solução de poupança de energia do sistema de climatização total anual, variando entre - 26 e 84% de poupança dependendo do caso de estudo e do nível de XPS. A cobertura verde extensiva é a única cobertura verde que apresenta poupanças muito reduzidas, chegando a não existir poupanças para níveis elevados de XPS.

Quanto à cobertura clara e a consumos totais anuais, as coberturas verdes apresentam níveis de poupança menos significativos, existindo soluções em que não existem quaisquer poupanças, variando entre -315 a 84%. A cobertura extensiva é a cobertura que apresenta maiores consumos relativamente à cobertura clara. Para a sala de ensaios, apenas a cobertura verde intensiva apresenta poupanças de energia face à cobertura clara.

Relativamente à cobertura de referência da cabine de som e da sala de ensaios, da Gulbenkian, é possível concluir que um aumento de 0,05 m da altura das plantas, de um LAI = 1 para um LAI = 2 e de 0,15 m de solo, é possível obter-se um desempenho energético consideravelmente melhor, quando comparado com a cobertura extensiva. A cobertura de referência da sala de reuniões da ETAR, apresenta características intermédias da cobertura verde semi-intensiva e intensiva, e por isso consumos energéticos intermédios.

Conclui-se que, em termos totais, as coberturas semi-intensivas e intensivas podem ser uma solução para otimizar os consumos de energia de um edifício e em particular para edifícios com baixos níveis de isolamento, como se pode observar na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Poupança de energia total anual para os casos de estudo das três tipologias de coberturas verdes (CS – cabine de som; SE – Sala de ensaios; SR – sala de reuniões)

| Tipologia de cobertura verde | Poupança de energia total relativo à cob. escura (%) | | | | | | Poupança de energia total relativo à cob. clara (%) | | | | | |
|------------------------------|--|----|----|---------|----|----|---|-----|----|---------|-----|----|
| | 0cm XPS | | | 2cm XPS | | | 0cm XPS | | | 2cm XPS | | |
| | CS | SE | SR | CS | SE | SR | CS | SE | SR | CS | SE | SR |
| Extensiva | 22 | 1 | 1 | 1 | -3 | -1 | 1 | -26 | -9 | -26 | -25 | -6 |
| Semi-intensiva | 58 | 23 | 15 | 43 | 16 | 6 | 47 | 2 | 7 | 28 | -2 | 1 |
| Intensiva | 71 | 32 | 20 | 59 | 23 | 9 | 64 | 13 | 11 | 48 | 6 | 4 |

Quanto a edifícios mais antigos (reduzido nível de isolamento térmico), sem capacidade estrutural para novas cargas na cobertura, e com coberturas protegidas por materiais de alta absorvância, uma cobertura extensiva com um substrato técnico (de reduzida massa volúmica), poderá ser uma solução na redução dos consumos de energia do edifício em cerca de 1%, considerando os casos de estudo com outros elementos com trocas de calor com o exterior, para além da cobertura (sala de ensaios e sala de reuniões).

É possível ainda concluir, assim como foi concluído no capítulo 2.5, que as coberturas verdes são uma mais-valia principalmente para a estação de aquecimento, sugerindo ser uma solução para climas mais frios como referido por Castleton et al. (2010), Zinzi e Agnoli (2012), Sailor (2008) e Ascione et al. (2013).

6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1. Conclusões

No presente estudo propôs-se estudar a influência dos consumos de energia do sistema de climatização com a utilização de coberturas ajardinadas em edifícios em Portugal.

Numa primeira fase as coberturas verdes foram caracterizadas em termos do sistema construtivo, tipologias e o impacto ambiental, económico, estético e de utilização. Compreendeu-se que esta solução construtiva apresentam inúmeras vantagens que tem resultado num crescente aumento da sua utilização em vários países. Particularmente, em Portugal, a utilização desta solução construtiva é ainda reduzida, que poderá dever-se aos limitados estudos realizados neste país.

Numa segunda fase investigou-se uma das vantagens económicas da utilização de coberturas verdes: poupança de energia nos sistemas de climatização. Esta foi estudada para três compartimentos localizados em edifícios em Lisboa com coberturas ajardinadas: cabine de som (Gulbenkian), sala de ensaios (Gulbenkian) e sala de reuniões (ETAR de Alcântara).

De modo a estudar os consumos de energia foi necessário recorrer ao programa computacional EnergyPlus, sugerido por vários autores que investigaram este tema. O EnergyPlus compreende uma estrutura modular que permite a introdução de novos modelos, assim como o modelo de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008). Este modelo aliado à qualidade do EnergyPlus para simular edifícios com esta solução construtiva conduziu a uma análise próxima da realidade como se concluiu na comparação dos resultados simulados com os resultados medidos experimentalmente por Valadas (2014).

A primeira etapa do estudo dos consumos energéticos com a utilização de coberturas verdes consistiu numa análise de sensibilidade do modelo de Sailor (2008). Para além da variação dos parâmetros da cobertura verde traduzirem de um modo realista o desempenho energético, retirou-se as seguintes conclusões:

- Na estação de aquecimento, espessuras de solo superiores e vegetações menos densas e menos altas (menor proteção) são favoráveis à redução do consumo de energia. Contudo, a existência de alguma vegetação é também benéfica, de modo a estabilizar as temperaturas da envolvente do solo. Quanto à rega, níveis reduzidos de irrigação conduzem a um limitado efeito de evapotranspiração, reduzindo o consumo de calor por este efeito, sendo assim favorável para a redução do consumo de energia.
- Na estação de arrefecimento, espessuras de solo inferiores e vegetações altas e densas são favoráveis à redução do consumo de energia. A espessura do solo é desfavorável pois não é aproveitado a totalidade do consumo de calor que resulta do efeito de evapotranspiração. A evapotranspiração é significativamente favorável à redução dos consumos energéticos sendo incrementada principalmente pelo nível de humidade do solo e pela radiação solar.

A segunda etapa consistiu no estudo das poupanças energéticas comparando três tipos de coberturas verdes (extensiva, semi-intensiva e intensiva) com dois tipos de coberturas convencionais (escura e clara) para vários níveis de isolamento térmico da cobertura. Concluiu-se que as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva são vantajosas quando comparadas com coberturas de alta absorvância (escuras) para todos os níveis de isolamento térmico. As coberturas extensivas apenas apresentam poupanças de energia para níveis de isolamento térmico reduzidos relativamente a coberturas escuras, sugerindo uma alternativa para edifícios antigos (sem isolamento térmico).

Relativamente a coberturas com alta refletância (claras), as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva são uma alternativa para reduzir os consumos de energia totais apenas para níveis de isolamento térmico reduzidos. A cobertura extensiva não se apresenta como uma solução para reduzir os consumos de energia totais para nenhum nível de isolamento.

Concluiu-se também que as coberturas verdes apresentam uma redução significativa nos consumos de energia na estação de aquecimento para qualquer tipologia e nível de isolamento térmico quando comparadas com uma cobertura escura ou clara. Pelo contrário, na estação de arrefecimento verificou-se uma redução nos consumos de energia apenas quando comparados à cobertura escura e para as tipologias semi-intensiva e intensiva. Estes resultados sugerem que o desempenho energético das coberturas verdes em climas mais frios serão mais vantajosas.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Os resultados apresentados nesta dissertação provam que existe poupanças de energias no sistema de climatização com a utilização de coberturas verdes em Portugal. Para além de provar a qualidade térmica das coberturas ajardinadas, nesta dissertação apresentam-se bases para futuros estudos deste tema. Desta forma, justifica-se plenamente que continue a ser dedicada atenção ao desenvolvimento de estudos com incidência nesta solução construtiva. Para um futuro próximo sugerem-se os seguintes desenvolvimentos:

- Realizar uma análise económica englobando os custos de investimento e manutenção (rega, equipamentos, etc.) das coberturas verdes e das coberturas convencionais. Estudar o período de retorno da instalação das várias tipologias de coberturas verdes em Portugal.
- Avaliar as necessidades hídricas de diferentes vegetações de modo a selecionar aquelas com necessidades inferiores e limitar a rega de modo a reduzir o desperdício e custo, sem colocar em causa o efeito da evapotranspiração que arrefece as coberturas.
- Interligar os parâmetros das coberturas verdes com tipos de vegetações com diferentes características de albedo, LAI e resistência estomática, existentes na região.
- Interligar o substrato das coberturas verdes com substratos existentes no mercado com soluções de materiais de condutibilidades térmicas inferiores, como a perlite.
- Criar uma base de modelos de coberturas verdes possíveis de serem implementados em edifícios, tendo em conta as características e biodiversidade da região.
- Implementar no código do EnergyPlus a variação da condutibilidade térmica do solo com a humidade do solo através da manipulação deste.
- Estudar o desempenho energético das coberturas verdes para climas mais frios, como a zona Norte de Portugal.
- Estudar o desempenho energético das coberturas verdes em edifícios de habitação.

Referências Bibliográficas

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

Ascione, Fabrizio; Bianco, Nicola; Rossi, Filippo de'; Turni, Gianluca; Vanoli, Giuseppe Peter (2013) – Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?, Applied Energy, Vol. 104, p. 845-859.

Auxiliary EnergyPlus Programs (2013) – Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, US Department of Energy, EUA.

Caldas, Luísa (2010) – Manual de boas práticas, Gestão energética e de água dos edifícios dos palácios da justiça, Faculdade de Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Castleton, H.F.; Stovin, V.; Beck, S.B.M.; Davison, J.B. (2010) – Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, Energy and Buildings, Vol. 42, p. 1582-1591.

Chan, A.L.S.; Chow, T.T. (2013) – Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong, Energy and Buildings, Vol. 64, p. 182-198.

Costa, Luís Miguel Loureiro (2010) – Espaços Verdes Sobre Cobertura, Uma Abordagem Estética e Ética, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Cudell, Gustavo (2000) – Manual de Instalação de rega, Manual de formação de espaços verdes, Gustavo Cudell, Lisboa.

Design for London (2008) – Living Roofs and Walls-Technical Report: Supporting London Plan Policy, Design for London, Greater London Authority and London Climate Change Partnership, Londres, Reino Unido.

EnergyPlus Engineering Reference (2013) – Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, US Department of Energy, EUA.

EnergyPlus Input Output Reference (2013) – Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, US Department of Energy, EUA.

Frankestein, Susan; Koenig, George (2004) – FASST (Fast All-season Soil STrength) Vegetation Models, US Army Corps of Engineers: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, EUA.

Getting Started with EnergyPlus (2012) – Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, US Department of Energy, EUA.

Heneine, Maria Cristina Almeida de Souza (2008) – cobertura verde, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

Jaffal, Issa; Ouldboukhite, Salah-Eddine; Belarbi, Rafik (2012) – A comprehensive study of the impact of green roofs on buildings energy performance, Renewable Energy, Vol. 43, p.157-164.

Kasera, Shailendra; Nayyar, Ashish; Sharma, Dr. Dilip (2012) – The Energy Consumption Performance of Roof Garden, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol.3, Nº 7.

Kotsiris, G.; Androutsopoulos, A.; Polychroni, E.; Nektarios, P.A. (2012) – Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs, Energy and Buildings, Vol.45, p. 240-249.

- Lazzarin, Renato M.; Castellotti, Francesco; Busato, Filippo (2005) – Experimental measurements and numerical modelling of a green roof, *Energy and Buildings*, Vol. 37, p. 1260-1267.
- Moody, Seth S.; Sailor, David J. (2013) – Development and application of a building energy performance metric for green roof systems, *Energy and Buildings*, Vol. 60, p. 262-269.
- Niachou, A.; Papakonstantinou, k.; Santamouris, M.; Tsangrassoulis, A.; Mihalakakou, G. (2001) – Analysis of green roof and thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy and Buildings*, Vol. 33, p. 719-729.
- Nunes, Pedro; Gomes, Maria da Glória; Silva, Cristina Matos (2012) – Interacção entre os programas Google SketchUp8 e EnergyPlus 6.0., Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ouldboukhitine, Salah-Eddine; Belarbi, Rafik; Jaffal, Issa; Trabelsi, Abdelkrim (2011) – Assessment of green roof thermal behaviour: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, Vol. 46, p. 2624-2631.
- Ouldboukhitine, Salah-Eddine; Belarbi, Rafik; Sailor, J. David (2014) – Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, Vol. 114, p. 273-282.
- Peck, Steven W.; Callaghan, Chris; Kuhn, Monica E. (1999) - *Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada*, Canada Mortgage and Housing Corporation, Canada.
- Sailor, D.J. (2008) – A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings*, Vol. 40, p. 1466-1478.
- Sailor, D.J.; Hutchinson, D.; Bokovoy, L. (2008) – Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S., *Energy and Buildings*, Vol. 40, p. 1246-1251.
- Saiz, Susana; Kennedy, Christopher; Bass, Brad; Pressnail, and Kim (2006) – Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 40, p. 4312-4316.
- Stater, David (2008) – *Green Roofs: Sustainability from the top down*, University of California, California, EUA.
- Theodosiou, Theodore G. (2003) – Summer period analysis of the performance of planted roof as a passive cooling technique, *Energy and Buildings*, Vol.35, p. 909-917.
- Tips & Tricks for Using EnergyPlus (2013) – Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, US Department of Energy, EUA.
- Valadas, Ana Sofia Santa Bárbara Teixeira (2014) – Avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Wong, N.H.; Cheong, D.K.W.; Yan, H.; Soh, J.; Ong, C.L.; Sia, A. (2003) – The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings*, Vol. 35, p. 353-364.
- Zinzi, M.; Agnoli, S. (2012) – Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat Island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, *Energy and Buildings*, Vol. 55, p. 66-76.

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

IPCC (2013) – Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2013, Summary for Policymakers.

ITE-50 (2006) – Santos, Carlos A. Pina; Matiais, Luís – Coeficientes de Transmissão Térmica de elementos da envolvente dos edifícios, LNEC, Lisboa.

Plano Portugal (2013) – Legislação Portuguesa, Decreto-Lei nº70/2013 de 10 de abril, Diário da Republica 1º série, Portugal.

RCCTE (2006) – Legislação Portuguesa, Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril, Regulamento das Características do comportamento Térmico dos Edifícios, Diário da Republica I – Serie A, Portugal.

RECS (2013a) – Portaria n.º 349-D/2013. D.R. nº. 233, 2º Suplemento, Série I de 2013-12-02

RECS (2013b) – Portaria n.º 355-A/2013. D.R. nº. 235, Suplemento, Série I de 2013-12-04

REH (2013) – Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. Nº 234, 3º Suplemento, Série II de 2013-12-03.

Sítios da Internet:

Arq e Tec (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.arq-e-tec.com/2010/07/coberturas-vegetais-cidades-cada-vez-mais-sustentaveis/>>, [Consult. 2 Jan. 2014].

Brown Roofs (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.brownroofs.co.uk/>>, [Consult. 20 Jan. 2014].

Coberturas verdes (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://coberturasverdes.com/>>, [Consult. 8 Jan. 2014].

EFB (2014) – Disponível em WWW: <URL:<http://www.efb-greenroof.eu/verband/wir/aboutus.html>>, [Consult. 17 Jan. 2014].

EnergyPlus Version 8.1.0. (2013) – US Department of Energy, EnergyPlus software, Disponível em WWW.:<URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm>, [Consult. 2 Nov. 2013].

Estação da Trindade (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1036257&page=113>>, [Consult. 15 Jan. 2014].

FLL–Guidelines (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.greenrooftechnology.com/fll-green-roof-guideline>>, [Consult. 12 Jan. 2014].

Fordham University (2014) – Disponível em WWW: <URL: http://www.fordham.edu/campus_resources/enewsroom/inside_fordham/february_6_2012/news/more_green_more_bird_81623.asp>, [Consult. 18 Jan. 2014].

Green Roofs Projects (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=523>>, [Consult. 5 Jan. 2014].

Green Roofs Blocks (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://greenroofblocks.com/products/green-paks/>>, [Consult. 5 Jan. 2014].

Google SkecthUp Version 13 (2013) – Google, Google SketchUp software, Disponível em WWW.:<URL: <http://www.sketchup.com/pt-BR/products/sketchup-make>>, [Consult. 2 Nov. 2013].

Google Maps (2014) – Disponível em WWW: <URL: <https://maps.google.pt/maps?hl=pt-PT>>, [Consult. 5 Jan. 2014].

Hotel Fairmont (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.fairmont.com/waterfront-vancouver/dining/herbgardenhoneybees/>>, [Consult. 12 Jan. 2014].

IGRA (2014) – Disponível em WWW: <URL: http://www.igra-world.com/guidelines_and_standards/index.php>, [Consult. 8 Jan. 2014].

IPMA (2014) – Disponível em WWW: <URL: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>>, [Consult. 25 Jan. 2014].

Jardins Suspensos da Babilónia (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.imagens-historicas.com.br/jardins-suspensos-babilonia/>>, [Consult. 3 Jan. 2014].

LiderA - Disponível em WWW: <URL: http://www.lidera.info/resources/18CongressoLiderA2010_LiderarSustentabilidadeEdificiosZeroEnergia.pdf>, [Consult. 15 Fev. 2014].

Living Roofs (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://livingroofs.org/>>, [Consult. 18 Jan. 2014].

Neoturf (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.neoturf.pt/pt/>>, [Consult. 17 Jan. 2014].

Open House Chicago (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://chicago.curbed.com/archives/2012/10/15/open-house-2012-mda-chicago-apartments.php>>, [Consult. 16 Jan. 2014].

OpenStudio Version 1.2.0 (2013) – US Department of Energy, OpenStudio software, Disponível em WWW: <URL: <http://openstudio.nrel.gov/downloads> >, [Consult. 2 Nov. 2013].

Precipitação Lisboa (2014) – Disponível em WWW: <URL: http://www.mohid.com/tejo-op/atm_data.asp?EST_ID=1>, [Consult. 19 Jan. 2014].

Propriedades de Materiais (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://cecs.wright.edu/people/faculty/sthomas/htappendix01.pdf>>, [Consult. 25 Jan. 2014].

Propriedades do ar (2014) – Disponível em WWW: <URL: http://ltodi.est.ips.pt/cgouveia/New%20Folder/Sebenta_FQA_C3.pdf>, [Consult. 09 Abr. 2014].

Thermal Village (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.ddarcart.com/2013/05/hundertwasser-thermal-village-blumau.html>>, [Consult. 19 Jan. 2014].

The solutions journal (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.thesolutionsjournal.com/node/981>>, [Consult. 7 Jan. 2014].

Treehugger (2014) – Disponível em WWW: <URL: <http://www.treehugger.com/corporate-responsibility/chinas-learning-to-love-green-roofs.html>>, [Consult. 5 Jan. 2014].

Weather Files EnergyPlus (2014) – Disponível em WWW: <URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm>, [Consult. 23 Jan. 2014].

ANEXO A – Descrição do modelo de Sailor (2008)

A descrição do modelo de Sailor (2008) é dividida no balanço de energia na folhagem e no balanço de energia no solo, no qual, serão discriminados o fluxo de calor latente e sensível por se revelarem mais complexos. É assumido o sinal positivo para a absorção de energia por parte do elemento (da folhagem ou do solo). De referir, que existem equações e definições muito complexas que não estão, na totalidade, descritas neste documento, sugerindo-se a consulta de Frankenstein e Koeing (2004) para uma descrição mais detalhada.

A.1 – Balanço de energia na folhagem

A equação (A.1) representa o fluxo de calor total na folhagem, que inclui, a absorção de radiação de comprimento de onda curta (solar) e de onda longa (calor e infravermelhos), emissão de radiação de onda longa e ainda o fluxo de calor sensível e latente.

$$F_f = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (A.1)$$

em que:

F_f – Fluxo de calor na folhagem (W/m^2).

σ_f – Fração de cobertura com vegetação – é estimada a partir do valor LAI (*Leaf Area Index*, projeção da área de folhas por unidade de área do solo), como mostra a equação (A.2). A fração de vegetação na cobertura (σ_f) difere do LAI, pois este apenas representa a simples percentagem de cobertura que está coberta por vegetação.

$$\sigma_f = 1 - \exp(-0,75 \times LAI) \quad (A.2)$$

I_s – Radiação total de comprimento de onda curta incidente (W/m^2).

α_f – Albedo da folhagem (refletância de radiação de onda curta).

ε_f – Emissividade da folhagem.

I_{ir} – Radiação total de comprimento de onda longa incidente (W/m^2).

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$).

T_f – Temperatura da folhagem (Kelvin).

ε_g – Emissividade da superfície do solo.

ε_1 – Relação entre a emissividade do solo e da folhagem ($\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$)

T_g – Temperatura da superfície do solo (Kelvin).

H_f – Fluxo de calor sensível da folhagem (W/m^2).

L_f – Fluxo de calor latente da folhagem (W/m^2).

O primeiro termo da equação (A.1), $\sigma_f [I_s(1 - \alpha_f)]$, refere-se à absorção de radiação de onda curta pela folhagem. O segundo termo da equação (A.1), $\sigma_f [\varepsilon_f I_{ir}]$, representa a absorção de radiação de onda longa já que se assume que a emissividade da folhagem (ε_f) é igual à absorptância da folhagem desta radiação. O terceiro termo da equação (A.1) $\sigma_f [-\varepsilon_f \sigma T_f^4]$ refere-se à emissividade de radiação de onda longa, estando de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann ($R = \sigma T^4$). O termo seguinte,

$\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$, traduz as trocas de radiação entre o solo e a folhagem, incluindo as reflexões entre os mesmos. Os dois últimos termos equação (A.1) referem-se ao fluxo de calor sensível (H_f) e latente (L_f) que são descritos com mais detalhe.

Da equação (A.1) verifica-se que para uma intensidade de radiação superior, o fluxo de calor associado aumentará. Também se verifica que dependendo da diferença de temperatura entre a folhagem e o solo, a parcela referente às trocas de radiação de onda longa entre os mesmos poderá ser positiva ou negativa.

Fluxo de calor sensível na folhagem (H_f):

O fluxo de calor sensível na folhagem (H_f), dado pela equação (A.3), ocorre entre a superfície das folhas e o ar que se encontra na zona da folhagem (convecção), e é influenciado pela diferença de temperatura destes, da velocidade do vento, e do parâmetro LAI.

$$H_f = (1,1 \times LAI \rho_{af} C_{p,a} C_f W_{af}) \times (T_{af} - T_f) \quad (A.3)$$

em que:

LAI – índice de área de folhas (Leaf área Index) (m^2/m^2).

ρ_{af} – Densidade do ar à temperatura da folhagem (kg/m^3) – resulta da média entre a massa volúmica do ar (ρ_a) e a massa volúmica do ar à temperatura das folhas (ρ_f), como se verifica na equação (A.4). As densidades são calculadas segundo a lei dos gases ideais ($P_a = \rho RT$, onde P_a é a pressão atmosférica e R a constante dos gases ideais – $8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), com a temperatura respetiva. Na primeira iteração é assumido que $T_f = 0,9T_a$ (T_a - Temperatura do ar).

$$\rho_{af} = \frac{(\rho_a + \rho_f)}{2} \quad (A.4)$$

$C_{p,a}$ – Calor específico do ar a pressão constante ($1005,6 \text{ J/(kgK)}$) – representa a quantidade de calor que é necessário fornecer a uma unidade ar para elevar a sua temperatura um grau.

T_{af} – Temperatura do ar na zona da folhagem (Kelvin) – resulta da ponderação das temperaturas da envolvente da folhagem, ou seja, do ar (T_a), da folhagem (T_f) e do solo (T_g), segundo a equação (A.5).

$$T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0,3T_a + 0,6T_f + 0,1T_g) \quad (A.5)$$

C_f – Coeficiente de transferência de calor na folhagem – equação (A.6).

$$C_f = 0,01 \times \left(1 + \frac{0,3}{W_{af}} \right) \quad (A.6)$$

onde:

W_{af} – Velocidade do vento na zona da folhagem (m/s) – equação (A.7).

$$W_{af} = 0,83\sigma_f W \sqrt{C_{hm_f}} + (1 - \sigma_f)W \quad (A.7)$$

com:

W – Velocidade do vento do ficheiro climático (m/s) – existe um limite mínimo de 2,0 m/s, caso a velocidade do vento medida seja inferior a esta.

C_{hnf} – Coeficiente de transferência de calor na folhagem em condições atmosféricas quase neutras (Condições em que os movimentos de massas de ar estão limitados) – equação (A.8).

$$C_{hnf} = K_v^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_{0,f}} \right) \right)^{-2} \quad (\text{A.8})$$

em que:

K_v – Constante de von Karmen (0,4) – constante adimensional que descreve a velocidade de um fluido turbulento.

Z_a – Altura do instrumento de medição do vento (m).

Z_d – Deslocamento do plano zero (m) – escalar empírico para compensar o deslocamento vertical devido aos obstáculos da superfície, sendo definido pela equação (A.9), onde Z_f representa a altura da vegetação (m).

$$Z_d = 0,701 Z_f^{0,979} \quad (\text{A.9})$$

$Z_{0,f}$ – Comprimento da rugosidade da folhagem (m) – Altura acima do solo onde a velocidade do vento é zero, sendo definida pela equação (A.10).

$$Z_{0,f} = 0,131 Z_f^{0,997} \quad (\text{A.10})$$

Da equação (A.3), verifica-se que para valores altos de LAI e velocidade do vento (W) (uma vez que a velocidade do vento na zona da folhagem (W_{af}) depende do W) e para uma vegetação mais alta, o fluxo de energia na vegetação aumenta. De notar ainda, a constante 1,1 no início da equação, que tem a função de majorar em 10% o valor do calor sensível de modo a ter em conta os ramos e tronco da planta. Salienta-se que a parcela referente à convecção da folhagem é negativa ou positiva dependendo da diferença de temperaturas da folhagem e do ar na zona da folhagem.

Fluxo de calor latente da folhagem (L_f):

O fluxo de calor latente entre as folhas e a atmosfera vizinha (L_i), é traduzido pela equação (A.11) e depende da velocidade do vento, da facilidade de transferências gasosas da folha, da quantidade de folhas existente (LAI), da temperatura da folhagem e do teor de humidade do ar.

$$L_f = l_f \times LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' \times (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (\text{A.11})$$

em que:

LAI, ρ_{af} (equação (A.4)), C_f (equação (A.6)) e W_{af} (equação (A.7)) definidos anteriormente.

l_f – Calor latente de evaporação à temperatura da folhagem (J/kg) – representa a energia necessária para converter uma unidade de massa de água em vapor. É definido pela equação (A.12), sendo T_f a temperatura na folhagem.

$$l_f = 1,91846 \times 10^6 \left[\frac{T_f}{T_f - 33,91} \right]^2 \quad (\text{A.12})$$

r'' – Teor de humidade na superfície das folhas – é dependente da resistência aerodinâmica e da resistência estomática, sendo definido pela equação (A.13).

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad (\text{A.13})$$

onde:

r_a – Resistência aerodinâmica para a difusão do vapor de água (s/m) – é sobretudo função da velocidade do vento na zona da folhagem, sendo dado pela equação (A.14). Os parâmetros C_f (equação (A.6)) e W_{af} (equação (A.7)) foram definidos anteriormente. Quando a resistência aerodinâmica é pequena, a humidade nas folhas é quase zero, ou seja, a superfície das folhas ficam secas pois a humidade evapora. Por outro lado, quando a resistência aerodinâmica é significativa, a humidade relativa aumenta até um máximo de 1, isto é, a humidade viaja pela superfície das folhas e apresenta maiores dificuldade para evaporar.

$$r_a = \frac{1}{C_f \cdot W_{af}} \quad (\text{A.14})$$

r_s – Resistência estomática das folhas (s/m) – o processo de perda de água pela planta é conhecida como transpiração. Esta transpiração ocorre em todas as partes da planta, mas principalmente nas folhas, pois é nas folhas que existe a maior parte dos estômatos. Os estômatos são as estruturas responsáveis pelas trocas gasosas da planta através da abertura e fecho destes. A resistência da abertura destes estômatos é denominada de resistência estomática e é traduzida pela equação (A.15). Esta resistência depende de vários fatores como da radiação solar, da humidade do solo e da diferença de pressão entre o estômato e a atmosfera.

$$r_s = \frac{r_{s,min}}{LAI} f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (\text{A.15})$$

em que:

$r_{s,min}$ – Resistência estomática mínima da folha (s/m).

f_1 – Fator multiplicativo para o efeito da radiação solar na resistência estomática – equação (A.16), com a variável I_s definida anteriormente.

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[1; \frac{0,004 \times I_s + 0,005}{0,81 \times (0,004 \times I_s + 1)} \right] \quad (\text{A.16})$$

f_2 – Fator multiplicativo para o efeito da humidade do solo na resistência estomática – Equação (A.17).

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0 & \text{quando } \theta_r > \bar{\theta} \\ \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r} & \text{quando } \theta_r \leq \bar{\theta} \leq \theta_{max} \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

onde:

$\bar{\theta}$ – Teor de humidade média do solo (m^3/m^3).

θ_r – Teor de humidade residual (humidade relativa do solo quando a planta começa a murchar) (m^3/m^3) – tipicamente tem um valor bastante baixo, na ordem dos $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

θ_{max} – Nível de humidade máximo do solo (m^3/m^3) – tipicamente $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

f_3 – Fator multiplicativo adicional para a resistência estomática – equação (A.18).

$$\frac{1}{f_3} = \exp[-g_d(e_{f,sat} - e_a)] \quad (\text{A.18})$$

onde:

g_a – Característica específica da planta relacionada com a resistência estomática – apenas tem valor considerável para alturas de planta significativas (árvores), tipicamente é sempre zero.

$e_{f,sat}$ – Pressão do vapor de ar saturado à temperatura da folha (Pa), calculado pela equação (A.19) com humidade relativa (HR) igual a 1 e mudando o índice “a” por “f”.

e_a – Pressão do vapor de ar (Pa), estimado pela equação (A.19), sendo $e_a^0 = 610,78$ Pa (Pressão do vapor de ar saturado a 0°C).

$$e_a = e_a^0 \times HR \times \exp[17,269(T_a - 273,16)/(T_a - 35,86)] \quad (A.19)$$

q_{af} – Razão de mistura do ar na zona da folhagem – número abstrato que representa a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco (Propriedades do ar, 2013), definida pela equação (A.20).

$$q_{af} = \left[\frac{(1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0,3q_a + 0,6q_{f,sat}r'' + 0,1q_{g,sat}M_g)}{1 - \sigma_f[0,6(1 - r'') + 0,1(1 - M_g)]} \right] \quad (A.20)$$

onde:

M_g – Índice de saturação de humidade do solo (variando entre 0 e 1) – Se estiver a chover toma o valor de 1, caso contrário, é igual ao índice de humidade do solo.

$q_{f,sat}$ – Razão de mistura saturada à temperatura da folhagem, calculado pela equação (A.21) com HR = 1 e mudando o índice “a” por “f”.

$q_{g,sat}$ – Razão de mistura saturada à temperatura da superfície do solo, calculado pela equação (A.21) com HR = 1 mudando o índice “a” por “g”.

q_a – Razão de mistura do ar, avaliada pela equação (A.21), onde P_a corresponde à pressão atmosférica medida (no ponto Z_a), com e_a definido pela equação (A.19).

$$q_a = \frac{0,622 \times e_a}{P_a - e_a} \quad (A.21)$$

Da equação (A.11), conclui-se que quanto maior for a temperatura da folhagem (maior valor de t_f), maior o valor de LAI, mais alta for a vegetação e maior a velocidade do vento (W), maior é o fluxo absorvido pela folhagem. Também se verifica que quanto menor a resistência estomática relativamente à resistência aerodinâmica, maior é a humidade presente na folhagem e maior o fluxo na folhagem. A resistência estomática diminui com o aumento da radiação solar e com o aumento da humidade no solo (para valores muito baixos de humidade no solo, o fator f_2 tende para infinito, logo o fluxo de calor latente tende para zero).

A.2 – Balanço de energia no solo

O fluxo de energia à superfície do solo é maioritariamente influenciado pelas propriedades térmicas do solo e pela percentagem de solo não coberto por vegetação ($1 - \sigma_i$). Este balanço de energia é dado pela equação (A.22). O calor envolvido nas mudanças do estado físico da água presente no solo e o fluxo de calor devido ao transporte vertical da água dentro do solo não são consideradas.

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s(1 - a_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \times \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (A.22)$$

em que:

F_g – Fluxo de calor na superfície do solo (W/m^2).

a_g – Albedo da superfície do solo (reflectância de radiação de onda curto).

H_g – Fluxo de calor sensível do solo (W/m^2).

L_g – Fluxo de calor latente do solo (W/m^2).

K – Condutibilidade térmica do solo ($W/(m.K)$)

z – Profundidade do solo (m).

À semelhança do balanço de energia na folhagem (equação (A.1)), a equação (A.22) representa o fluxo de calor, da radiação de onda curta e longa absorvida pelo solo e da emissão de radiação de comprimento de onda longa. O parâmetro H_g representa o fluxo de calor sensível (convecção) do solo, L_g o fluxo de calor latente (evaporação) do solo e a última parcela refere-se à condução de calor para o interior do substrato.

Fluxo de calor sensível:

O fluxo de calor sensível ocorre entre a superfície do solo e o ar na zona da folhagem. Depende sobretudo da diferença de temperatura entre estes e da velocidade do vento na zona da folhagem, sendo traduzido pela equação (A.23).

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_{hg} W_{af} (T_{af} - T_g) \quad (A.23)$$

em que:

$C_{p,a}$, W_{af} (equação (A.7)), T_{af} (equação (A.5)) e T_g foram definidos anteriormente.

ρ_{ag} – Densidade do ar à temperatura da superfície do solo (kg/m^3) – estimada pela equação (A.24), à semelhança da densidade do ar à temperatura da folhagem.

$$\rho_{ag} = \frac{(\rho_a + \rho_g)}{2} \quad (A.24)$$

C_{hg} – Coeficiente de transferência de calor no solo – é dado pela combinação linear entre o coeficiente de transferência de calor do solo (C_{hng}) e na folhagem (C_{hnf}), em condições quase neutras e multiplicado por um fator de correção de estabilidade atmosférica (Γ_h). Traduz-se pela equação (A.25).

$$C_{hg} = \Gamma_h [(1 - \sigma_f) C_{hng} + \sigma_f C_{hnf}] \quad (A.25)$$

em que:

σ_f e C_{hnf} (equação (A.8)) já foram definidos.

Γ_h – Fator de estabilidade atmosférica – é definido pela equação (A.26).

$$\Gamma_h = \begin{cases} \frac{1,0}{(1,0 - 16,0R_{ib})^{0,5}} & \text{para } R_{ib} < 0 \\ \frac{1,0}{1,0 - 5,0R_{ib}} & \text{para } R_{ib} > 0 \end{cases} \quad (\text{A.26})$$

onde:

R_{ib} – Número de Richardson – define se a atmosfera é estável ou instável. Quando há ausência de movimentos convectivos ascendentes (subida de ar) que poderão provocar temperaturas desordenadas e níveis de precipitação exagerados. A condição da atmosfera é considerada estável ou instável dependendo do sinal positivo ou negativo deste número. É dado pela equação (A.27).

$$R_{ib} = \frac{2gZ_a(T_{af} - T_g)}{(T_{af} + T_g)W_{af}^2} \quad (\text{A.27})$$

com:

Z_a , W_{af} (equação (A.7)), T_{af} (equação (A.5)) e T_g definidos anteriormente.

g – aceleração da gravidade (9,8m/s²)

C_{hng} – Coeficiente de transferência no solo em condições atmosféricas quase neutras – Equação (A.28).

$$C_{hng} = r_{ch}^{-1} \left[\frac{K_v}{\ln \left(\frac{Z_a}{Z_{0,g}} \right)} \right]^2 \quad (\text{A.28})$$

onde:

K_v e Z_a definidos anteriormente.

r_{ch} – Número de turbulência de Schmidt (0,63 para todos os tipos de solo) – usado para caracterizar fluxos de fluido.

$Z_{0,g}$ – Comprimento de rugosidade do solo (considerado 0,001m para todos os tipos de solo)

Da equação (A.23), conclui-se que para uma maior temperatura do solo, comparativamente com o ar acima deste, existe uma redução na absorção de calor por parte do mesmo. Para velocidades de vento superiores, o fluxo irá aumentar.

Fluxo de calor latente:

A saída do vapor de água da camada de solo é dependente da diferença entre a razão de humidade da superfície do solo e do ar na zona da folhagem, e também da velocidade do vento na zona da folhagem. A equação (A.29) traduz o fluxo de calor latente no solo.

$$L_g = C_h^g l_g W_{af} \rho_{ag} (q_{af} - q_g) \quad (\text{A.29})$$

em que:

C_{hg} (equação (A.25)), W_{af} (equação (A.7)), ρ_{ag} (equação (A.24)) e q_{af} (equação (A.20)) foram definidos anteriormente.

l_g – Calor latente de vaporização à temperatura da superfície do solo definido pela equação (A.30), onde T_g representa a temperatura do solo.

$$l_g = 1,91846 \times 10^6 \left[\frac{T_g}{T_g - 33,91} \right]^2 \quad (\text{A.30})$$

q_g – Razão de mistura à temperatura da superfície do solo dado pela equação (A.31), com M_g , $q_{g,sat}$ e q_{af} (equação (A.20)) definidos anteriormente.

$$q_g = M_g q_{g,sat} + (1 - M_g) q_{af} \quad (\text{A.31})$$

Da equação (A.29) conclui-se que quanto maior a razão de humidade do solo, comparativamente com o ar na zona da folhagem, menor será o fluxo de calor absorvido por este pois existe evaporação da água.

A.3 – Equações finais do solo e da folhagem

Até este ponto todas as incógnitas aqui descritas já foram definidas e interligadas, exceto as temperaturas da folhagem (T_f) e do solo (T_g). Estas temperaturas são determinadas igualando os fluxos de calor respetivos a zero, ou seja, existe um equilíbrio de fluxo de energia, como mostra a equação (A.32) e a equação (A.33), para a folhagem e para o solo, respetivamente.

$$F_f(T_f) = 0 = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (\text{A.32})$$

$$F_g(T_g) = 0 = (1 - \sigma_f) [I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K_v \times \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (\text{A.33})$$

O EnergyPlus funciona por passos de tempo e necessita de dados anteriores para chegar a resultados fiáveis no espaço de tempo que se pretende (*Warm up*). As equações finais deste modelo são bastante complexas e não se irão descrever aqui, contudo, são geradas a partir das equações definidas para os dois fluxos de calor.

Anexo B - Metodologia para a substituição de dados no ficheiro climático do EnergyPlus

1. Através do programa “Weather Statistics and conversions”, implementando no pacote do programa do EnergyPlus, converter o ficheiro climático em formato EPW para CSV, de modo a ser possível abrir no MS. O. Excel;
2. Abrir o Excel, e a partir do comando Data – From Text, abrir o ficheiro convertido CSV e seleccionar Delimitado por vírgulas (pois é como os diferentes valores estão separados). O resultado deverá ser os vários valores separados por colunas;
3. Com esta separação a mudança dos valores necessários é bastante fácil. Contudo, devido ao separador decimal do ficheiro EPW ser “.”, sugere-se a mudança do separador “,” para “.” antes da passagem para o ficheiro climático. Para uma correta mudança deverá ser desativado os separadores decimais e de milhares do sistema e colocar por exemplo “>” e “<” de forma ao Excel não criar conflitos. Este processo é feito no comando Opções – Avançadas;
4. De seguida substituir o separador decimal escolhido (“<”) por “.”, através do comando Procurar e Substituir. Não se deverá gravar o Excel com a mudança dos separadores decimais e de milhares, apenas utilizando para esta etapa.
5. Importar os valores para o ficheiro climático aberto em Excel e modificar a data manualmente para o formato “Ano, Mês, Dia”, sem colocar “0” no mês ou dia 1 a 9 (p.exemplo – 2005,2,16), sendo este o passo o mais trabalhoso. Ainda no Excel modificar a coluna “Present Weather Codes” para o mesmo valor indicado retirando o “ ” (999999999, para toda a coluna);
6. Por fim basta copiar o total de linhas e colunas referentes aos valores que se pretende mudar e colar no ficheiro EPW (sem estar convertido) num bloco de notas. No bloco de notas ainda é necessário substituir os seguintes parâmetros: “:00:00” – “,60” , “:00” – “,60” e copiar o espaço referente à separação dos valores e colar no campo substituir. Substituir este espaço por “,”.
7. A gravação deverá ser efetuada sempre por cima do ficheiro EPW inicial de modo a não ser gravado em Documento de texto e não ser possível a leitura por parte do EnergyPlus.