

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES PASSIVAS PARA EDIFICAÇÃO
RESIDENCIAL FAMILIAR EM PORTO ALEGRE: TELHADO VERDE, PAREDES
VERDES E PELÍCULA DE VIDRO

por

Diogo Marramon da Silveira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020
DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

da Silveira, Diogo Marramon

Análise térmica e energética de soluções passivas para edificação familiar em Porto Alegre: telhado verde, paredes verdes e película de vidro / Diogo Marramon da Silveira. -- 2020.

28 f.

Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Casa passiva. 2. Telhado verde. 3. Eficiência energética. 4. soluções passivas. 5. EnergyPlus. I. Rodrigues, Leticia Jenisch, orient. II. Título.

Diogo Marramon da Silveira

ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES PASSIVAS PARA EDIFICAÇÃO
RESIDENCIAL FAMILIAR EM PORTO ALEGRE: TELHADO VERDE, PAREDES
VERDES E PELÍCULA DE VIDRO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Áreas de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Profa. Dra. Leticia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2020

DEDICATÓRIA

À minha família, sem os quais este não seria possível. À UFRGS, instituição que proporcionou essa trajetória.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES PASSIVAS PARA
EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL FAMILIAR EM PORTO ALEGRE:
TELHADO VERDE, PAREDES VERDES E PELÍCULA DE VIDRO

da Silveira, Diogo Marramon

diogomarramon@gmail.com

Resumo. Este estudo avalia o comportamento térmico e energético de uma edificação passiva unifamiliar aplicada ao clima da região de Porto Alegre mediante a utilização de três soluções passivas: telhado verde, paredes verdes e película de vidro. Através do software EnergyPlus, o comportamento para o período de um ano é simulado para as soluções de forma isoladas e combinadas. O índice de folhagem aparece como fator chave para a aplicação do telhado verde. Nos cenários de baixa e média folhagem, os três tipos de telhado verde apresentam aumento nos gastos de resfriamento e diminuição nos gastos com aquecimento. Para os cenários de alta folhagem a relação passa a ser de diminuição nos gastos com resfriamento e de aumento nos gastos com aquecimento. A redução no gasto total ocorre para os cenários de alta folhagem, sendo de 8,5% para o tipo intensivo, 8% para o semi-intensivo e 7,2% para o extensivo. A aplicação das paredes verdes e da película de vidro representam uma redução no gasto total anual de 5% e 16,9%, respectivamente. Quando combinadas, as soluções aparecem como amortecedores para altas temperaturas externas, seus efeitos são complementares, apresentando redução de 29% no gasto total anual.

Palavras-chave: Casa passiva, EnergyPlus, telhado verde, soluções passivas, eficiência energética.

THERMAL AND ENERGY ANALYSIS OF PASSIVE SOLUTIONS FOR FAMILY RESIDENTIAL BUILDING IN PORTO ALEGRE: GREEN ROOF, GREEN WALLS AND GLASS FILM.

Abstract. This study evaluates the thermal and energy behavior of a passive single-family building applied to the climate of the Porto Alegre region using three passive solutions: green roof, green walls and glass film. Through the EnergyPlus software, the behavior for the period of one year is simulated for the solutions in an isolated and combined way. The foliage index appears as a key factor for the application of the green roof. In low and medium foliage scenarios, the three types of green roof show an increase in cooling costs and a decrease in heating costs. For high-foliage scenarios, the ratio changes to a decrease on cooling costs and an increase heating costs. The reduction in total spending occurs for the high foliage scenarios, being 8.5% for the intensive type, 8% for the semi-intensive and 7.2% for the extensive type. The application of green walls and glass film represents a reduction in total annual expenditure of 5% and 16.9%, respectively. When combined, the solutions appear as buffers for high external temperatures, their effects are complementary, presenting a 29% reduction in total annual expenditure.

Keywords: Passve house, EnergyPlus, Green Roof, passive solutions, energy efficiency.

NOMENCLATURA

Símbolos

| | | |
|-------------------------------------|--|------------------------|
| A | Área | [m ²] |
| C _p | Calor específico | [J/kgK] |
| \dot{Q} | Carga térmica | [W] |
| h | Coefficiente de transferência de calor por convecção | [W/m ² K] |
| q'' | Fluxo de calor | [W/m ²] |
| L | Fluxo de calor latente | [W/(m ² K)] |
| F _f | Fluxo de calor para a camada de folhagem | [W/m ²] |
| $K \frac{\partial T_g}{\partial z}$ | Fluxo de calor para o substratos do solo | [W/(m ² K)] |
| H | Fluxo de calor sensível | [W/(m ² K)] |
| N _{surface} | Número de superfícies | Adimensional |
| N _{sl} | Número de superfícies de cargas inetrnas convectivas | Adimensional |
| N _{zones} | Número de zonas térmicas | Adimensional |
| I | Radiação | [W/m ²] |
| $C_z \frac{dT_z}{dt}$ | Taxa de energia armazenada na zona térmica | [W] |
| T | Temperatura | [K] |
| \dot{m} | Vazão mássica | [kg/s] |

Símbolos gregos

| | | |
|---------------|--|--------------------------------------|
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 10 ⁻⁸) | [W/(m ² K ⁴)] |
| σ_f | Cobertura fracionada de vegetação | Adimensional |
| ε | Emissividade | Adimensional |
| ρ | Refletividade | Adimensional |
| τ | Transmitância | Adimensional |

Abreviaturas e acrômimos

| | |
|--------|--|
| ANEEL | Agência nacional de energia elétrica |
| EPE | Empresa de pesquisa energética |
| INMET | Instituto Nacional de Metereologia |
| PROCEL | Centro Brasileiro de informação de eficiência energética |

1. INTRODUÇÃO

Construções residenciais que utilizam estratégias passivas para o conforto térmico estão tendo maior significância por seu caráter sustentável. Embora sejam ainda pouco exploradas no Brasil, já são utilizadas de maneira expressiva em países desenvolvidos.

A casa passiva é uma edificação que tem um padrão de performance. Segundo *International Passive House Institute*, documento de 2018, uma casa passiva pode ser aplicada para os diferentes tipos de clima e proporciona uma solução realística e eficaz em termos de custos para uma edificação, oferecendo um alto nível de conforto com baixo consumo energético para necessidades de aquecimento e de resfriamento. Ainda, o documento diferencia uma casa passiva através de cinco características: níveis significativos de isolamento, quadros e vidros de janelas com bom nível de isolamento, construção livre de pontes térmicas, envelope construtivo hermético e ventilação eficiente.

Telhados verdes e paredes verdes aparecem como uma solução para trazer mais natureza para as cidades. Na literatura, elas se mostram como uma estratégia de isolamento térmico. Wilkinson, 2016, estudou a performance de paredes verdes e telhados em uma construção com blocos aplicada no Rio de Janeiro, Brasil e em uma construção com madeira emoldurada aplicada em Sydney, Austrália. Através de experimento de campo, foi avaliado o comportamento da temperatura interna de edificações que apresentavam um sistema de telhado verde e de paredes verdes versus edificações idênticas sem a aplicação. Em ambas localizações, a aplicação apresentou um papel relevante implicando em uma atenuação da temperatura máxima. Santos, 2018, avaliou a performance e a viabilidade de telhados verdes na região de Pernambuco, Brasil. O estudo realizou a comparação das temperaturas externas e internas de edificações unifamiliares que utilizavam telhados verdes e telhados convencionais. Os resultados indicam redução da temperatura interna e da amplitude térmica diária quando utilizado telhado verde e a viabilidade de utilização para o clima semiárido.

Hernández, 2020, comparou utilização de telhados verdes e convencionais em oito diferentes cidades no México através de simulações no software EnergyPlus e dados de validação da simulação por experimentos em campo com caixas de teste. Os resultados das simulações mostram que nas localizações de clima quente o telhado verde reduziu a temperatura interna em até 4,7 °C, já nas localizações de clima temperados sua aplicação reduziu a demanda de energia para resfriamento em 99% e aumentou a demanda de energia para aquecimento em 25%. Ainda, a implementação é viável com um *payback* no período de 8,8 anos.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a classe residencial no Brasil consumiu 138 TWh no ano de 2018, sendo a região sul correspondente a 16%, e a médias das projeções apontam o consumo de 275 TWh até o ano de 2030. Em estudo realizado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), 2005, sobre o Mercado de Eficiência Energética no Brasil, o condicionamento ambiental corresponde a 20% dos gastos residenciais, o que dimensiona o possível impacto de soluções passivas.

Estudos acadêmicos relacionados a aplicação de paredes verdes e telhados verdes são recentes. Esse trabalho se propõe a avaliar o comportamento de uma casa passiva para o clima de Porto Alegre mediante aplicação de telhado verde, paredes verdes e película de vidro: quais os efeitos de aquecimento e de resfriamento da edificação, que fatores devem ser levados em conta para escolha dessas soluções dentro do clima da região de Porto Alegre, quais os efeitos de aumento e de redução em termos de gastos energéticos totais anuais.

2. FUNDAMENTAÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS

Para os objetivos do trabalho foi utilizada modelagem e simulação através do software EnergyPlus, distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Este é um programa computacional de simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. É um software *open-source* e com funcionalidades oferecidas gratuitamente voltadas a engenheiros, arquitetos e pesquisadores.

O EnergyPlus utiliza o conceito de zona térmica. Cada zona térmica configura um ambiente com cargas térmicas internas e condições de contorno. O programa atua como um simulador integrado. Cada *step* da simulação inicia com o balanço de energia da zona térmica. As informações desse atualizam as condições da zona térmica e determinam as cargas térmicas de aquecimento/resfriamento. Essa informação alimenta a simulação do sistema de ar – ventilação e infiltração - de forma a determinar seu comportamento.

2.1. Balanço de energia nas zonas térmicas

A integração da zona térmica e do sistema de ar estabelece os balanços de energia e de massa para o ar da zona térmica. As equações ordinárias resultantes são solucionadas a partir do método de predição-correção, assim o balanço de energia da zona térmica é dado por

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_Z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

na qual $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é o somatório das cargas internas convectivas, em W; $\sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_Z)$ é a taxa de transferência de calor por convecção pelas superfícies da zona térmica, em W; T_Z é a temperatura externa, em K; $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z)$ é a taxa de transferência de calor devido à infiltração do ar exterior, em W; $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_Z)$ é a taxa transferência de calor devido ao contato entre zonas térmicas, W; \dot{Q}_{sys} é a taxa de calor com o sistema de climatização, em W; $C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada na zona térmica, em W; O subíndice “i” indica a *i-ésima* superfície ou a *i-ésima* zona térmica. Além disso, N_{sl} indica o número de superfícies de cargas internas convectivas, adimensional; $N_{surface}$ indica o número de superfícies da zona térmica, adimensional; N_{zones} indica o número de zonas térmicas, adimensional.

2.2. Balanço de energia nas superfícies

Para o cálculo do fluxo de calor das superfícies são consideradas as trocas convectivas, condutivas e radiativas. Para as paredes externas,

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (2)$$

na qual $q''_{\alpha sol}$ é o fluxo de calor radiativo absorvido da radiação solar total, em W/m²; q''_{LWR} é o fluxo líquido entre a radiação de ondas de alto comprimento de onda com os arredores, em W/m²; q''_{conv} é o fluxo de calor convectivo, em W/m²; e q''_{ko} é o fluxo de calor condutivo no interior da parede, em W/m².

Para as paredes internas,

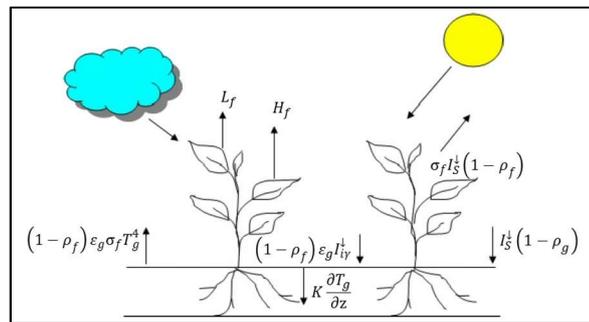
$$q''_{LWX} + q''_{ki} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{sol} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3)$$

na qual q''_{LWX} é o fluxo líquido de calor radiativo de longo comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas, em W/m^2 ; q''_{ki} é o fluxo condutivo através da parede, em W/m^2 ; q''_{SW} é o fluxo líquido de calor radiativo de curto comprimento de onda entre superfícies de zonas térmicas, em W/m^2 ; q''_{LWS} é o fluxo radiativo de comprimento de onda longo emitidos equipamentos da zona térmica, em W/m^2 ; e q''_{sol} é o fluxo de calor de radiação solar absorvido pela superfície, em W/m^2 .

2.3. Balanço de energia telhado verde

O modelo de telhado verde do software leva em consideração a radiação e a convecção junto ao dossel da planta, a evapotranspiração das plantas e a evapotranspiração e condução do solo. A Figura 1 ilustra o balanço de energia utilizado no modelo. Para fins de simplificação o balanço foi dividido em duas partes, uma referente à folhagem, Seção 2.3.1, e outra em função do solo, Seção 2.3.2, nas quais são apresentados os respectivos balanços.

Figura 1 – Balanço de energia do telhado verde para simulação (Adaptado de ENERGYPLUS, U. S. D. of E. Engineering Reference, 2015)



2.3.1. Balanço de energia para a folhagem

O fluxo de calor para a camada de folhagem, F_f , é dado por

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

na qual I_s^\downarrow é a radiação total incidente para comprimento de ondas curtas, em W/m^2 ; ρ_f é a refletividade da planta para comprimentos de ondas curtas, adimensional; ε_f é a emissividade do dossel, adimensional; I_{γ}^\downarrow é a radiação total incidente para comprimento de ondas longas, em W/m^2 ; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$); T_f é a temperatura da superfície da folhagem, em K; ε_g emissividade da superfície do solo, adimensional; ε_1 é a relação entre emissividades dado pela Equação 5; H_f é o fluxo de calor sensível da camada de folhagem, em W/m^2 ; L_f é o fluxo de calor latente da camada de folhagem, em W/m^2 ; σ_f é a cobertura fracionada de vegetação, adimensional, dada pela Equação 6.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g \quad (5)$$

$$\sigma_f = 0,9 - 0,7 \exp(-0,75 LAI) \quad (6)$$

na qual LAI (*leaf area index*) é razão adimensional entre a área total da folhagem e a área do solo.

2.3.2. Balanço de energia para o solo

O fluxo de calor para camada do solo (F_g) ocorre conforme Frankenstein and Koenig

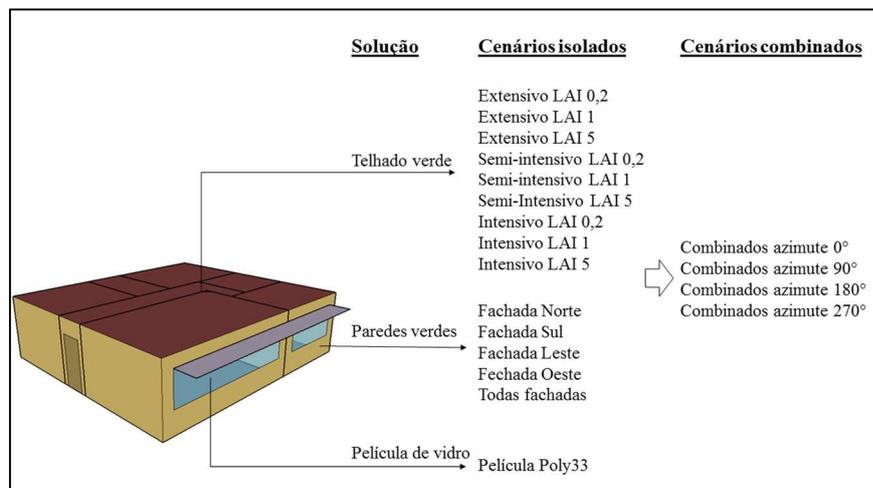
$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_S^\downarrow (1 - \rho_f) + \varepsilon_f I_{iV}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (7)$$

na qual H_g é o fluxo de calor sensível da camada do solo, em W/m^2 ; L_g é o fluxo de calor latente da camada do solo, em W/m^2 ; $K \frac{\partial T_g}{\partial z}$ o fluxo de calor por condução para o substrato do solo, em W/m^2 .

3. METODOLOGIA

Toma-se como ponto de partida o estudo realizado por Graça, 2012, onde foi proposta uma casa passiva dimensionada para o clima ameno sul europeu e avaliada, térmica e energeticamente, através de simulações no programa EnergyPlus®. No presente trabalho, a mesma casa foi aplicada ao clima da região de Porto Alegre. Com a utilização do mesmo software, foram analisados os desempenhos das seguintes soluções passivas de caráter envoltório pós-constructivos: telhado verde, paredes verdes e película de vidro. As soluções, também denominadas cenários, foram avaliadas de forma isolada e combinada, uma vez que suas aplicações são concomitantes. A Figura 2 abaixo ilustra os cenários avaliados.

Figura 2 – Fluxo esquemático da análise



Foi considerado para avaliação dos resultados a temperatura operacional média da casa ponderada pela área da zona térmica e o gasto energético anual de resfriamento e aquecimento mediante aplicação de um sistema de condicionamento de ar. Ao final do estudo, realizou-se a aplicação e a análise de um sistema fotovoltaico considerando a demanda energética implicada pelo sistema de condicionamento de ar em conjunto com os demais equipamentos internos.

3.1. Condição ambiental – arquivo climático

Para simulação foi utilizado o arquivo climático desenvolvido pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, a partir da tomada de dados em uma estação climática localizada no Aeroporto Salgado Filho, cidade de Porto Alegre. Os dados do arquivo representam o comportamento climático da região ao longo do período de um ano, a incidência de radiação

solar, a temperatura ambiente, a umidade e as demais informações meteorológicas. Como hipótese simplificadora, a temperatura de solo foi assumida como sendo igual à temperatura média mensal exterior.

3.2. Edificação inicial

A edificação inicial foi proposta por Graça, 2012 e contém um andar e dois quartos, 110m² de área total e 23m³ de área de fachada ocupada por janelas. Está dividida em sete zonas térmicas, uma para cada peça. A disposição dos cômodos da edificação pode ser observada na Figura 3. As áreas de cada cômodo estão presentes na Tabela 1. O sistema de construção está de acordo com padrão utilizado em Portugal com características de uma casa passiva: estrutura de concreto, paredes de tijolo duplas com isolamento entre painéis, telhado com isolamento e vidros duplos de baixa emissividade. As composições das construções e respectivos coeficientes de transferência térmica global resultantes podem ser observados na Tabela A.1, Apêndice A.

Figura 3 – Esquema da planta baixa e orientação da edificação.



3.2.1. Edificação inicial – Sombreamento e trocas de ar

A edificação contém um brise fixo em toda a fachada Norte. *Blinds* externos de média refletividade para as janelas principais – sala e quartos – são ativados uma vez que a incidência de radiação solar na janela atinge 150 W/m². Suas propriedades podem ser observadas na Tabela A.1, Anexo A.

Todas as peças contêm uma configuração de ventilação natural de 4 ACH (*air change per hour* - trocas de ar por hora) para quando a temperatura interna atinge o valor de 25 °C. A infiltração foi assumida constante com o valor de 0,8 ACH.

3.2.2. Edificação inicial – Cargas térmicas internas

Para demanda de iluminação tomou-se como referência o gasto de 500 kWh/ano, posto por Graça e o método de dimensionamento a partir da área da edificação da ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013). A potência utilizada em cada cômodo pode ser visualizada na Tabela 1. Não há a utilização de *plenum*, a fração radiante das lâmpadas é de 8% e a fração visível de 71%. O perfil de funcionamento da iluminação pode ser visualizado na Tabela B.1, Anexo B.

Tabela 1 – Potência de iluminação por zona térmica.

| Zona Térmica | Área de janela (m ²) | Área de piso (m ²) | Potência Iluminação (W) |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Sala | 9,0 | 31,5 | 90 |
| Quarto 2 | 4,5 | 20,0 | 60 |
| Quarto 1 | 4,5 | 16,0 | 60 |
| Corredor | 0,0 | 13,5 | 30 |
| Cozinha | 4,5 | 12,0 | 60 |
| Banheiro 2 | 0,5 | 9,0 | 60 |
| Banheiro 1 | 0,3 | 8,0 | 60 |
| Total | 23,3 | 110,0 | 420 |

Os equipamentos internos foram configurados de acordo com o perfil horário de ocupação da casa e com os gastos totais anuais, postos por Graça, 2012. O somatório dos equipamentos representa gastos de 2.482 kWh/ano, com fração radiante equivalente a 50%. O presente trabalho não considera gasto para aquecimento de água utilizada nos banheiros. Informações dos gastos anuais por equipamento podem ser observadas na Tabela C.1, Anexo C. A casa tem uma ocupação de 4 pessoas. O calor dissipado pelo corpo varia com o nível da atividade realizada. As taxas de metabolismo das atividades foram configuradas conforme a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). A fração radiante é de 30%. O perfil de ocupação pode ser observado na Tabela B.1 e Tabela B.2 do Apêndice B.

3.3. Telhado verde

A simulação da aplicação de telhados verde considerou três diferentes tipos telhados, classificação segundo FLL *Green Roofing Guideline*, 2008: Extensivo, Semi-Intensivo e Intensivo. Sua diferenciação ocorre pela espessura do solo e altura das plantas, valores assumidos na simulação conforme Tabela 2. Para fins de discussão nesse trabalho, considerou-se o termo amplitude como a distância entre a laje e a camada de folhagem, sendo o tipo extensivo como baixa amplitude, o tipo semi-intensivo como média amplitude e o intensivo como alta amplitude.

Tabela 2 – Tipos de telhado verde e suas respectivas características.

| Tipo de telhado | Altura da planta (m) | Espessura do solo (m) | Amplitude |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------|
| Extensivo | 0,1 | 0,08 | Baixa |
| Semi-Intensivo | 0,2 | 0,15 | Média |
| Intensivo | 0,4 | 0,30 | Alta |

Dado que um telhado verde pode conter diferentes espécies de plantas e ornamentos, outro fator de análise no trabalho é a área da folhagem (LAI - *leaf area index*). Para cada tipo de telhado foi avaliado o comportamento em três diferentes cenários: baixo índice de folhagem, LAI = 0,2; área de folhagem igual a área do telhado, LAI = 1; e alto índice de folhagem LAI = 5. As demais propriedades com respeito a planta – resistência estomática, refletividade, emissividade – e da camada de solo estão presentes na Tabela A.2 Anexo A.

Para a irrigação de telhados verdes, o EnergyPlus[®] não considera os valores de precipitação do arquivo climático. Para a simulação foi criada uma configuração de irrigação diária a partir da média histórica de precipitação pluviométrica da cidade de Porto Alegre. A irrigação ocorre diariamente e tem seu maior valor durante o mês de setembro com 4,65 mm diários e menor

em abril com 2,87 mm diários. Valores da irrigação diária mensal podem ser observados na Tabela C.1, Apêndice C.

3.4. Paredes verdes

A modelagem da simulação das paredes verdes seguiu o modelo proposto por Silvana, 2014. O programa EnergyPlus[®], diferente da simulação do telhado verde, não apresenta objetos específicos de modelagem para paredes verdes. Silvana, 2014, propõem a utilização de uma configuração de propriedades e de fatores de forma que na simulação tenham efeito similar ao comportamento térmico da parede verde. Considera-se ela como um objeto de sombreamento com as propriedades equivalentes a encontradas em plantas, apresentadas na Tabela 3.

Para fins de simplificação, neste trabalho foi desconsiderada a alteração da velocidade do vento na parede da edificação. Vale destacar que o conceito de paredes verdes abrange uma série de diferentes configurações, estruturas e ornamentos. O modelo aqui utilizado representa uma camada de folhagem sob a parede externa.

Tabela 3 – Propriedades da parede verde

| Propriedade | Valor |
|---------------------|-------|
| Transmitância | 0,20 |
| Refletância solar | 0,30 |
| Refletância visível | 0,09 |

3.5. Película de vidro

A aplicação de película de vidro foi eleita como terceira solução passiva do estudo visto que o telhado verde e a parede verde não atuam na incidência solar das janelas. Seguindo Caus, 2019, a película que apresenta a maior economia de energia para a mesma configuração de edificação unifamiliar para o clima de Porto Alegre é a Poly33. As propriedades da película estão na Tabela A.3 do Anexo A. As películas foram aplicadas para as janelas dos quartos e da sala.

3.6. Sistema de condicionamento de ar

O sistema de condicionamento de ar utiliza aparelhos de ar condicionado de parede de uso residencial. É modelado como uma bomba de calor ar-ar de expansão direta com uma bobina de aquecimento suplementar elétrica. Os sistemas são aplicados nas zonas térmicas de maior ocupação, sala e quartos. A programação do termostato para resfriamento e aquecimento varia com os horários de ocupação da casa, configuração conforme Graça, 2012, a carga horária e *setpoints* constam na Tabela B.2 no Anexo B.

3.7. Sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico é composto por um gerador FV (módulos), inversor e a rede elétrica local. É considerada a conexão em uma rede trifásica, cujo custo de disponibilidade é de 100 kWh/mês. Inicialmente foi identificada a potência necessária do gerador a partir da demanda total da edificação e do custo de disponibilidade. Para irradiação foi considerada a inclinação e o azimute do módulo para cidade de Porto Alegre, valor médio anual diário de 4,83 kWh/m². O módulo eleito para o estudo é monocristalino de 170 Wp, dimensões de 790 mm por 1593 mm com disposição de 72 células, modelo BP Solar 5170.

Em sequência, os módulos foram instalados junto à edificação na própria simulação. Localizados acima do telhado, os efeitos de sombreamento causados pelos módulos são considerados. Para o inversor considera-se uma eficiência de 90%.

4. RESULTADOS

4.1. Edificação proposta

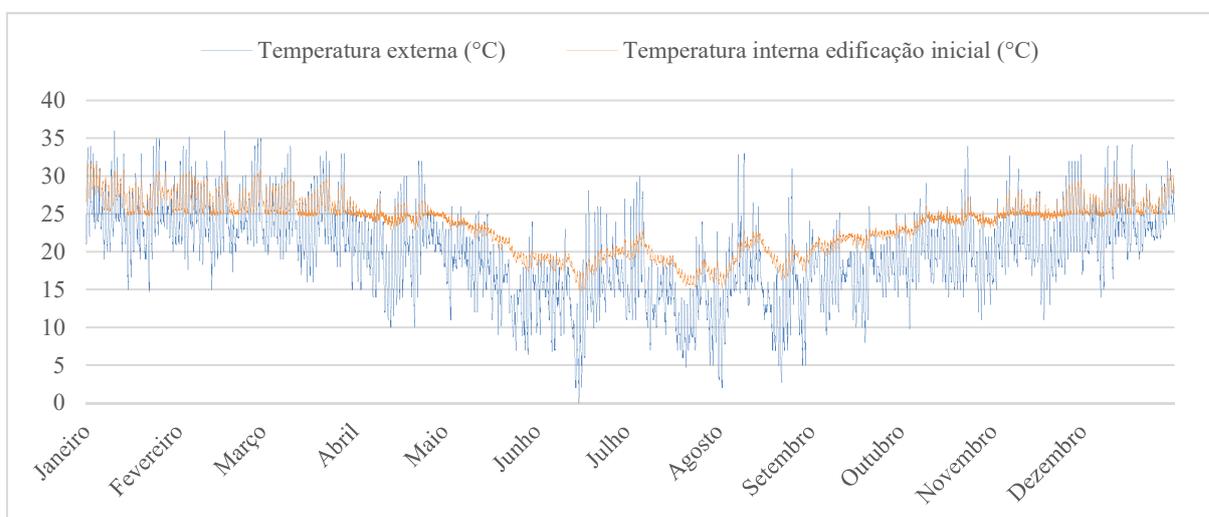
A avaliação da edificação inicial foi realizada primeiramente sem a aplicação do sistema de condicionamento de ar (*free running mode*). A Tabela 4 apresenta a média de horas diárias para determinados intervalos de temperatura para a edificação e para as zonas térmicas de longa permanência. Para edificação como um todo, “Total”, assume-se a média ponderada pelas áreas.

Tabela 4 – Média de horas diárias fora do intervalo de temperatura de conforto para edificação inicial

| Zonas Térmicas | < 17°C (horas/dia) | < 20°C (horas/dia) | > 25°C (horas/dia) | > 28°C (horas/dia) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Sala | 0,92 | 4,87 | 9,24 | 2,22 |
| Quarto 1 | 1,30 | 5,88 | 9,08 | 1,81 |
| Quarto 2 | 1,45 | 6,17 | 9,35 | 2,47 |
| Total | 1,09 | 5,21 | 9,50 | 2,18 |

Considera-se os intervalos de temperatura abaixo de 17 °C e abaixo de 20 °C como intervalos de desconforto térmico para o frio e os intervalos de temperatura acima de 25 °C e acima de 28 °C como intervalos de desconforto térmico para o calor. Visualiza-se na Figura 4 o comportamento da temperatura interna da edificação ao longo do ano. A edificação inicial apresenta maior quantidade de horas dentro dos intervalos de desconforto para o calor, eles ocorrem principalmente entre os meses de novembro a abril. Já o intervalo de desconforto para o frio ocorre entre os meses de junho a setembro.

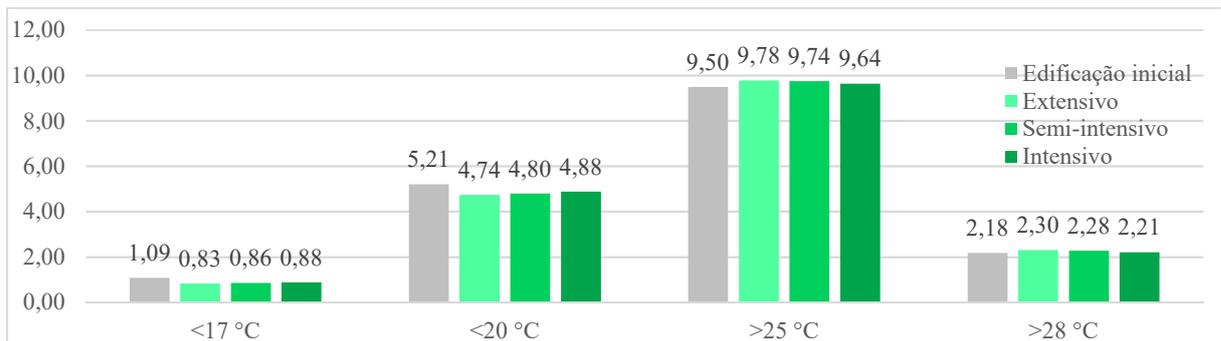
Figura 4– Comportamento da temperatura interna da edificação inicial.



4.2. Aplicação de telhado verde

Seguindo a análise em *free running mode* dos intervalos de horas de desconforto para a aplicação dos diferentes tipos de telhados verdes, Figura 5, observa-se que para os intervalos de temperaturas de desconforto para o frio, todos telhados verdes apresentaram melhor comportamento que a edificação inicial. Para os intervalos de desconforto para o calor, todos telhados verdes apresentaram pior comportamento. Assume-se a área da folhagem igual à área do telhado nesse momento.

Figura 5 - Média de horas diárias fora do intervalo de temperatura de conforto com a aplicação dos telhados verdes com LAI = 1

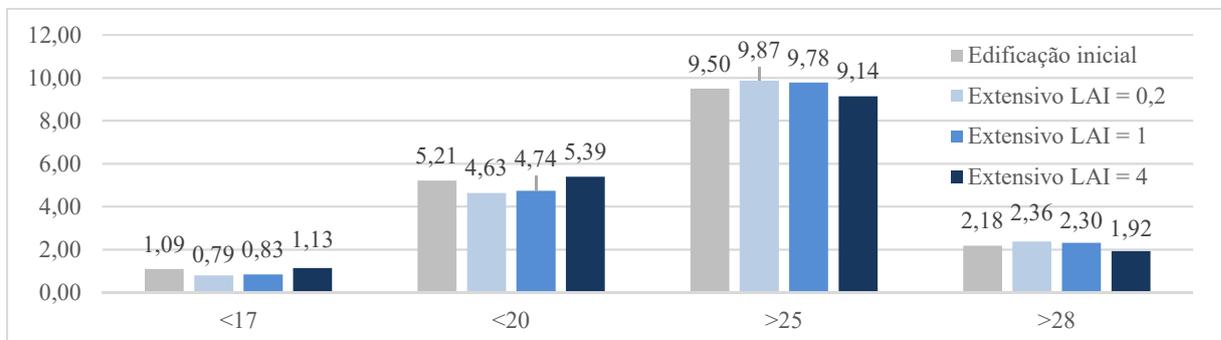


Para os intervalos de desconforto para o frio, a alteração mais significativa ocorre para o tipo extensivo, onde o intervalo de temperatura abaixo de 17 °C passou de 1,09 h da edificação inicial para 0,83 h com a aplicação do telhado, i.e., redução relativa de 23,1%. Para o mesmo intervalo, o tipo semi-intensivo apresentou redução de 21,1% e o intensivo uma redução de 19,1%.

Para os intervalos de desconforto para o calor, todas aplicações apresentaram aumento na quantidade de horas em relação à edificação inicial. Para o intervalo acima de 28°C, o extensivo apresentou um aumento relativo de 5,7%, o semi-intensivo 4,7% e o intensivo 1,3%.

Tendo em vista o fator da área de folhagem na análise, a Figura 6 relaciona os três cenários para o tipo Extensivo.

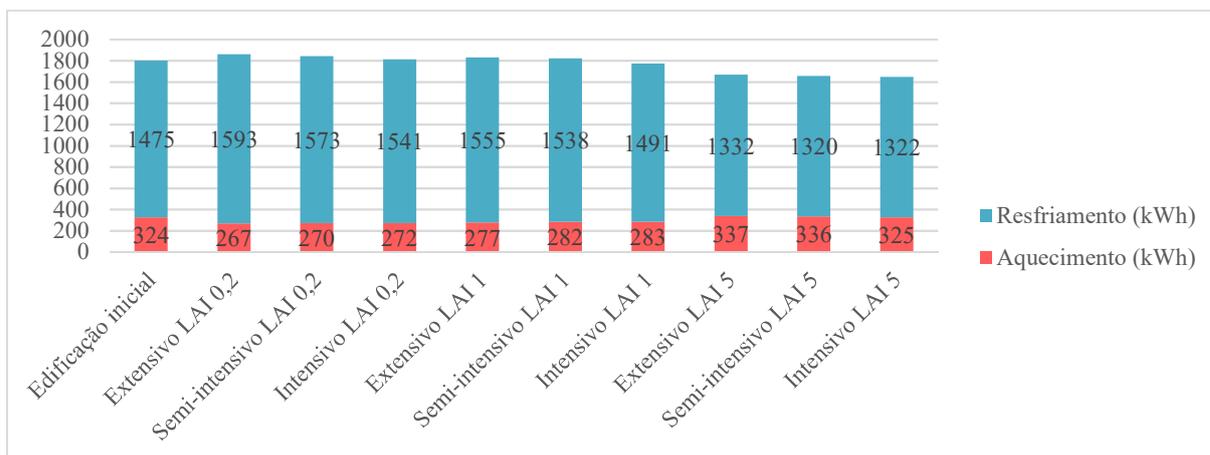
Figura 6 - Média de horas diárias fora do intervalo de temperatura de conforto com a aplicação de telhado verde tipo extensivo com diferentes índices de área de folhagem.



A área de folhagem aparece como fator chave na aplicação do telhado verde. Ao passo que o aumento do índice de folhagem representa um aumento na quantidade de horas de desconforto para o frio, ele também representa uma diminuição na quantidade horas de desconforto para o calor. Esse efeito é observado da mesma forma para os três tipos de telhado.

Considerando a aplicação do sistema de condicionamento de ar para análise, a Figura 6 apresenta os gastos energéticos para os três tipos de telhado nos diferentes cenários de folhagem.

Figura 6 – Gastos energéticos com aquecimento e com resfriamento com a aplicação do sistema de condicionamento de ar em diferentes configurações de telhado.



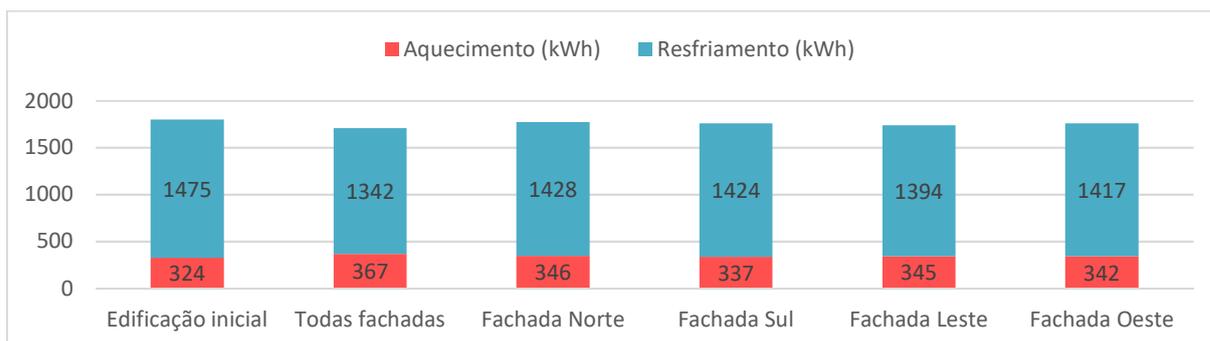
O tipo intensivo apresenta-se como o que gera a maior redução do gasto total anual independente do cenário de folhagem. O tipo intensivo com LAI = 5 aparece como a melhor situação, quando há uma redução de 8,5% no gasto total anual, sendo para o aquecimento alteração não significativa e para o resfriamento redução de 10,4%.

A aplicação do tipo extensivo com baixo índice de folhagem gera a maior economia no gasto de aquecimento. Porém, considerando o gasto anual, apresenta-se como a pior situação. O gasto energético total tem um aumento de 3,4% em relação a edificação inicial.

4.3. Aplicação de parede verde

A parede verde tem o proveito de sua aplicação ser passível de eleição em função da fachada. As análises foram realizadas para as fachadas individualmente e para a aplicação em todas as paredes externas, a Figura 7. A redução dos gastos totais anuais ocorre para a aplicação em qualquer uma das fachadas e seus efeitos são similares à aplicação de telhados verdes com alto índice de folhagem, i.e., aumento no gasto com aquecimento e redução no gasto com resfriamento. A maior economia, por conseguinte, ocorre quando a aplicação está para todas as paredes externas. Para essa condição ocorre um aumento de 13,3% no gasto para aquecimento e redução de 9% para resfriamento. Considerando o gasto total anual, há uma redução de 5%.

Figura 7 - Gastos energéticos para a aplicação da parede verde em diferentes fachadas.

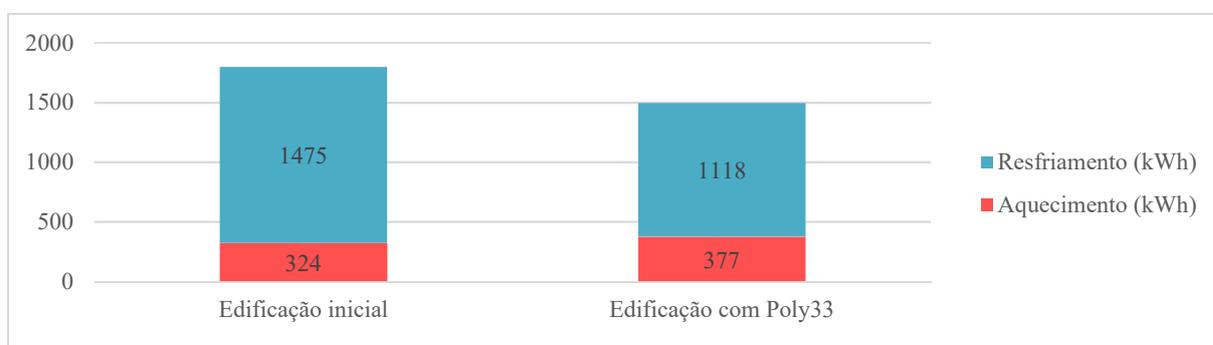


Silvana, 2014 ressalta que são assumidos valores médios constantes para as propriedades, quando de fato na natureza se observa variações ao longo do ano em função da maior densidade das folhas no verão e menor densidade no inverno. Isso sugere que os efeitos de resfriamento são mais significativos e os de aquecimento mais amenos, o que geraria uma economia ainda mais significativa.

4.4. Aplicação de película

Os resultados para a aplicação da película se assemelham aos resultados das paredes verdes, porém com maior contraste entre as épocas do ano. A Figura 8 apresenta o gasto anual da edificação com o emprego da película. Ocorre um aumento de 16,4% no gasto com aquecimento e redução de 24,2% com resfriamento, resultando numa redução de 16,9% para os gastos totais.

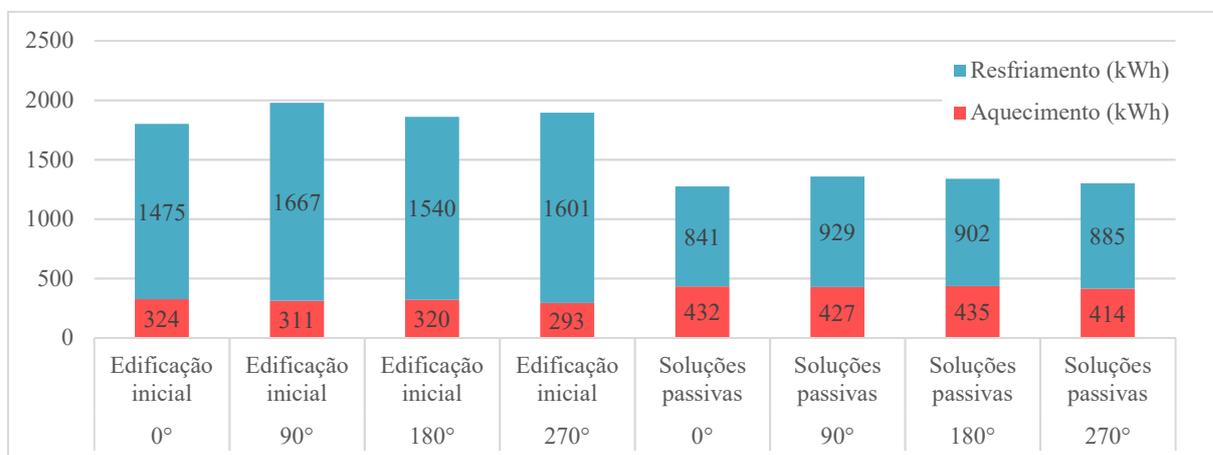
Figura 8 - Gastos energéticos para aplicação da película Poly33 nas janelas principais.



4.5. Efeitos combinados

A avaliação das soluções combinadas levou em conta a orientação solar da edificação. Foi elegido o tipo de telhado verde com maior redução de gastos totais no ano e simuladas as orientações para os quatro azimutes principais. A Figura 9 demonstra o gasto energético anual em diferentes azimutes.

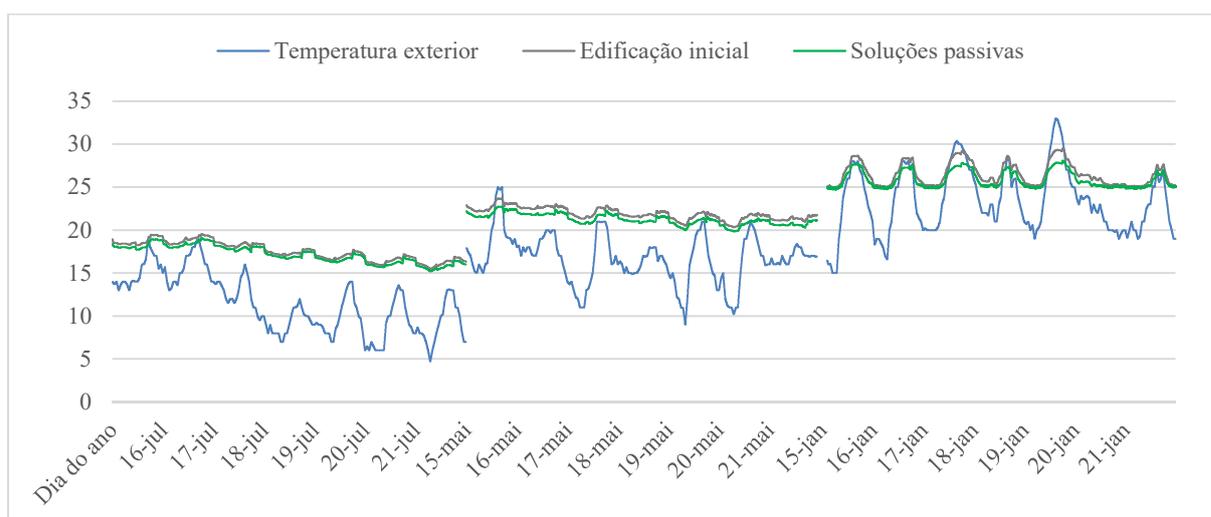
Figura 9 - Gastos energéticos para aplicação das soluções passivas combinadas em cada orientação solar.



A aplicação das soluções passivas combinadas resultou numa redução de cerca de 30% nos gastos totais para todas as orientações, quando comparada com a edificação inicial na mesma posição. A edificação com o menor gasto tem a fachada da sala e cozinha voltada para norte geográfico, azimute 0°, e apresenta o gasto anual de 1273 kWh *versus* 1800 kWh da edificação inicial. O gasto com aquecimento teve aumento de 33% e o gasto com resfriamento redução de 43%.

Em *free running mode* o comportamento da temperatura interna da edificação de azimute 0° mostra que as soluções passivas agem como amortecedores dos picos de temperatura durante os meses de temperaturas externas mais quentes, de dezembro a março, chegando à diferença de -1,5 °C para determinados horários em relação a edificação inicial. Para os demais meses, a edificação com as soluções passivas apresenta de forma constante a temperatura interna menor em relação a temperatura interna da edificação inicial. Essa diferença é mais significativa nos meses de maio e outubro do que nos meses de temperaturas externas mais frias, junho a setembro. A Figura 10 mostra as variações de temperatura em relação a temperatura externa para uma típica semana de julho, maio e janeiro.

Figura 10 - Comportamento da temperatura interna da edificação soluções passivas em comparação com a edificação inicial para uma semana de julho, maio e janeiro.



4.6. Sistema fotovoltaico

Para a aplicação do sistema fotovoltaico considera-se a demanda da edificação como o gasto total de energia da casa, equipamentos internos, iluminação e sistema de condicionamento de ar, menos o custo de disponibilidade. Tendo em vista a maior demanda para os meses quentes, os módulos foram posicionados com uma inclinação de 20° voltado ao Norte geográfico. O dimensionamento identificou a necessidade de um arranjo com 14 módulos para casa com as soluções passivas, resultado que difere da edificação inicial, quando seriam necessários 16 módulos para suprir a demanda. A Tabela 5 apresenta a produção anual de energia para as duas edificações com arranjo dos módulos em duas *strings* de 7 e de 8 módulos, respectivamente.

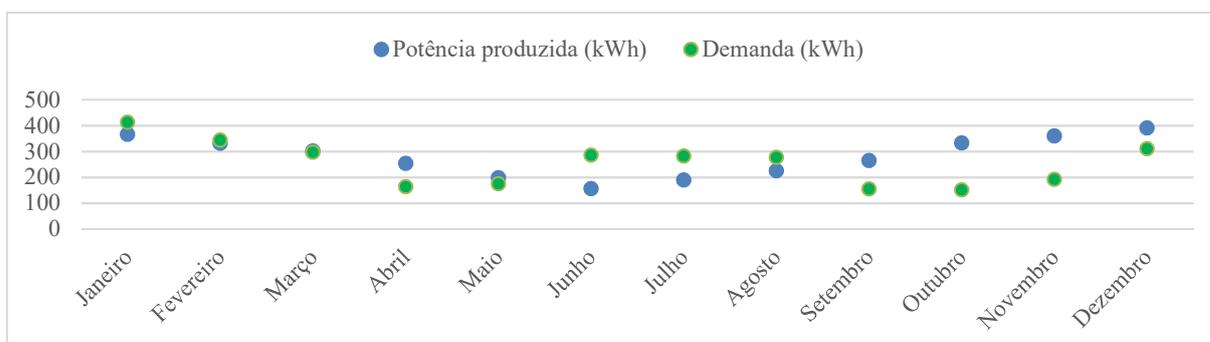
Tabela 5 – Produção anual de energia das edificações mediante aplicação do sistema fotovoltaico.

| Modelo | Quant. de módulos | Energia produzida (kWh) |
|--------------------|-------------------|-------------------------|
| Soluções passivas | 14 | 3.373,2 |
| Edificação inicial | 16 | 3.855,1 |

Para edificação com as soluções passivas, a maior demanda de energia ocorre no mês de janeiro com 413,1 kWh. Para o mesmo mês a edificação inicial tem a demanda de 560 kWh.

A Figura 11 apresenta para edificação com as soluções passivas a potência produzida *versus* a demanda ao longo dos meses. Para os meses frios, junho julho e agosto, a demanda torna-se significativamente superior a produção, período em que há considerável demanda de aquecimento da edificação e baixa produção pelas condições climáticas e pela disposição dos módulos. Avaliando o balanço anual de energia, são produzidos 322,8 kWh.

Figura 11 – Edificação com estratégias passivas combinadas: Energia produzida *versus* demanda.



4.6. Discussão

4.6.1 Efeitos telhados verdes

Considera-se para discussão que o fluxo de calor no solo do telhado verde, que está em contato com a laje da edificação, possui três principais fatores de influência: o ambiente do dossel, a radiação incidente do ambiente externo e a radiação incidente da camada de folhagem. Entende-se por ambiente do dossel, a camada de ar entre o solo e a folhagem. Os tipos de telhado extensivo, semi-intensivo e intensivo, apresentam diferentes condições de ambiente do dossel, uma vez que a altura das plantas altera o posicionamento da camada de folhagem e espessura do solo altera a transmissão de calor sensível e latente do solo.

A aplicação para as configurações de LAI = 0,2 e LAI = 1 com qualquer tipo de telhado representa uma diminuição no gasto energético de aquecimento e um aumento no gasto de resfriamento. Entende-se, então, que o efeito do telhado verde para essas configurações é de aquecimento da edificação para todos os meses, sendo um comportamento desejável nos meses frios. O aumento da amplitude do telhado gera uma amenização desses efeitos: o tipo de telhado com maior amplitude, intensivo, tem maior gasto de aquecimento e menor de resfriamento em relação aos telhados com menores amplitudes com mesmo LAI. Essa relação de amenização pode ser explicada pela alteração do ambiente do dossel.

Todas configurações de LAI = 5 apresentam menores gastos totais que a edificação inicial, tornando-se assim uma variável crítica para uma decisão de aplicação ou não do telhado, tendo em vista economia de gastos. A relação de gastos com aquecimento e resfriamento em relação

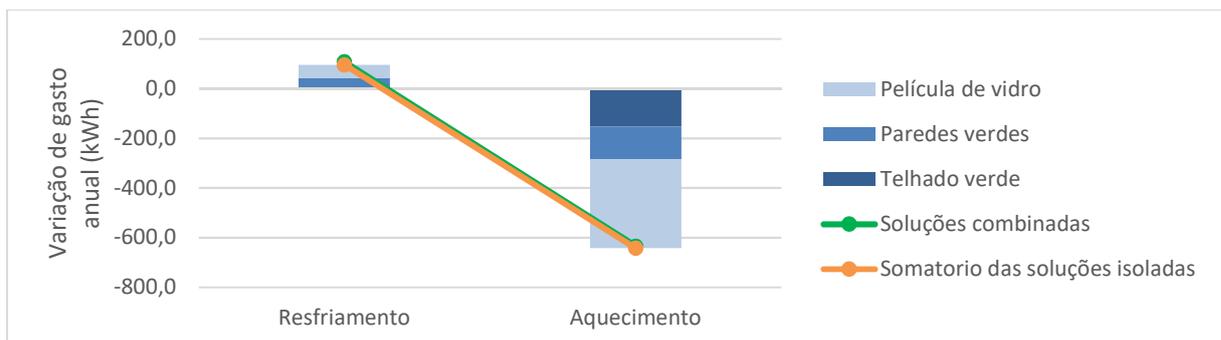
a edificação inicial se inverte nessas configurações: há maior gasto de aquecimento e menor gasto de resfriamento. Esse efeito pode ser explicado pela mudança dos fatores de influência. O índice de folhagem diminui a radiação incidente do ambiente externo, uma vez que a folhagem tem efeito de sombreamento. Ele impacta na radiação incidente da camada de folhagem e no ambiente do dossel, visto que ele tem efeitos na folhagem com relação a sua temperatura, na velocidade do ar do ambiente, nos fluxos de calor sensível e latente tanto da folhagem quanto do solo.

4.6.2 Efeitos das soluções passivas combinadas

As paredes verdes e a película de vidro têm efeito na radiação incidente nas paredes externas e nos vidros respectivamente. A influência de ambos será similar ao sombreamento da folhagem no telhado verde: diminuição da radiação externa que chega à edificação. Os resultados seguem o mesmo padrão do encontrado nos telhados com alto índice de folhagem: aumento nos gastos de aquecimento e diminuição nos gastos de resfriamento. Dentre as três soluções, a película aparece com a maior alteração relativa entre os gastos de aquecimento e resfriamento, o que indica a relevância do fluxo de calor transmitido através das janelas na edificação.

Verificando a variação dos gastos energéticos causada pelas soluções isoladas em relação à edificação inicial com a variação causada quando combinadas, pode-se dizer que as soluções são complementares e com baixa dependência. Para aquecimento, o somatório das variações das soluções isoladas em relação à edificação inicial é 95,4 kWh. Já as soluções combinadas apresentam 107,7 kWh: maior gasto anual quando combinadas. Para resfriamento, o somatório das variações das soluções isoladas em relação à edificação inicial é 642,9 kWh. Já as soluções combinadas apresentam 634,3 kWh: menor economia quando combinadas. A Figura 11 apresenta a comparação entre o somatório das soluções isoladas e as soluções combinadas.

Figura 11 – Variações de gasto anual de aquecimento e resfriamento das soluções isoladas em relação à edificação inicial *versus* Variação das soluções combinadas em relação a edificação inicial.



Uma vez que a atuação de cada solução ocorre em elementos diferentes da edificação - telhado, parede e vidro - a dependência entre elas ocorre por seus efeitos no balanço de energia da casa. A análise dos efeitos combinados deve ter em consideração que a edificação inicial apresenta um alto contraste entre os gastos de aquecimento e resfriamento, sendo esse último mais significativo. Dessa forma, há um potencial maior de economia para todas as soluções passivas estudadas, visto que elas reduziram significativamente o gasto de resfriamento.

4.6.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

A utilização das soluções passivas combinadas irá refletir no dimensionamento do sistema fotovoltaico. Representaram a possibilidade de diminuição de dois módulos em relação a quantidade 16 inicial. Tanto a edificação inicial, que já parte de um conceito de edificação passiva, quanto a edificação com a aplicação do telhado verde, paredes verdes e película de vidro representam uma viabilidade de atingir um balanço anual de energia positivo. A aplicação do sistema de energia fotovoltaica é viável para suprir a demanda total de energia, levando em consideração a disponibilidade espacial e a aplicação de módulos de desempenho e configuração acessíveis à aplicação doméstica.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de tecnologias que permitam a construção e a utilização de métodos passivos de climatização em edificações pode ser amplamente utilizado no território brasileiro, principalmente na região sul (FOSSATI et al., 2016). Este presente trabalho propôs-se a avaliar a aplicação de três soluções passivas em Porto Alegre: telhado verde, paredes verdes e película de vidro.

A edificação inicial aparece com alto potencial para melhoria da performance em meses quentes. O estudo do telhado verde identificou que deve ser tomado como fator chave o índice de folhagem. O telhado tipo intensivo com LAI = 5 atingiu a maior economia em relação à edificação inicial, sendo a redução mais significativa nos gastos com resfriamento. Cenários com baixo índice de folhagem apresentam diminuição nos gastos com aquecimento e aumento nos gastos com resfriamento. As aplicações das paredes verdes e película de vidro apresentam um aumento nos gastos com aquecimento e uma redução nos com resfriamento, sendo as alterações mais significativas para a película de vidro.

Quando as três soluções são combinadas, os efeitos aparecem como complementares: ocorre uma redução no gasto total próxima ao somatório das soluções isoladas. Ao final, a aplicação do sistema fotovoltaico possibilitou a produção de energia necessária para suprir a demanda anual da edificação, sendo a produção menor que a demanda durante meses mais frios.

As três soluções, isoladas ou combinadas, aparecem como positivas quando o objetivo é de reduzir o gasto total anual. Trabalhos futuros podem se aprofundar na relação dos fatores de influência durante aplicação do telhado verde. Isso possibilitaria uma configuração otimizada de acordo com a demanda da aplicação. Paredes verdes são encontradas em diferentes configurações. Configurações com presença de substrato não foram avaliadas neste estudo e podem apresentar comportamentos e resultados distintos. As alterações na estrutura da edificação de aplicação das soluções (diferentes modelos) e análise de viabilidade econômica são caminhos a serem explorados a fim de analisar edificações passivas aplicadas aos diferentes climas do Brasil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standart 90.1-2013**: Energy Standart for Buildings Except Low-Rise Residential Building. I-P ed. Atlanta: ASHRAE, 2013.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standart 55-2017**: Thermal Environmental Conditions for human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2017.

ÁVILA HERNÁNDEZ, A; SIMÁ, E; XAMÁN, J; HERNÁNDEZ PÉREZ; TÉLLEZ VELÁZQUEZ; CHAGOLLA ARANDA, M. A. Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 209, n. 109709, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778819325745>>

CARRILHO DA GRAÇA, G.; AUGUSTO, A.; LERER, M. M. Solar powered net zero energy houses for southern Europe: Feasibility study. **Solar Energy**, [s. l.], v. 86, n. 1, p. 634–646, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X1100418X>>

CAUS, ALÉXIA BARBIERI. **Estudo de adaptação de uma casa modelo para residência unifamiliar em Porto Alegre**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/206396>>

ENERGYPLUS, U. S. D. of E. **Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations**. [s. l.], p. 87, 2015. Disponível em: <https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf>

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>>. Acesso em: 25 set. 2020.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>>. Acesso em: 25 set. 2020.

FLL. LANDSCAPE DEVELOPMENT AND LANDSCAPING RESEARCH SOCIETY. **Green Roof Guidelines. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs**. Bonn: Landscape Development Landscaping Research Society, 2018.

FOSSATI, M. et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 65, p. 1216–1231, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116302805>>

INTERNATIONAL PASSIVE HOUSE ASSOCIATION. **Passive House: Active for more confort**. 2018. Disponível em: <www.passivehouse-international.org>. Acesso em: 10 set. 2020.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil**. 2005. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B99EBBA5C-2EA1-4AEC-8AF2-5A751586DAF9%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>. Acesso em: 25 set. 2020

SANTOS. S.M.; SILVA, J.F.F.; SANTOS, G.C.; MACEDO, P.M.T.; GAVAZZA, S. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 219, p. 634–646, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619300794>>

SILVANA. F.L.; CELINA, F.; GRAZIELA L.; Thermal simulation of a double skin façade with plants. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 57, p. 1763–1772, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021401532X>>

WILKINSON, S.; FEITOSA, R.C.; KAGA, I.T; FRANCESCHI, I. H. Evaluating the Thermal Performance of Retrofitted Lightweight Green Roofs and Walls in Sydney and Rio de Janeiro. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 180, p. 231–240, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817316892>>

ANEXO

ANEXO A – PROPRIEDADES DOS OBJETOS DA SIMULAÇÃO

Tabela A.1 – Propriedades dos *blinds* externo

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Orientação da ripa | Horizontal |
| Largura da ripa | 25,0 mm |
| Espaço de separação das ripas | 18,8 mm |
| Espessura da ripa | 1,0 mm |
| Ângulo de inclinação das ripas | 45 ° |
| Condutividade da ripa | 0,9 W/m ² K |

Tabela A.2 – Propriedades do telhado verde

| | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Emissividade da folhagem | 0,95 |
| Refletividade da folhagem | 0,2 |
| Resistência estomática mínima | 180 s/m |
| Condutividade do solo seco | 0,4 W/mK |
| Densidade do solo seco | 641 kg/m ³ |
| Absortância solar do solo | 0,8 |
| Absortância do solo para luz visível | 0,7 |

Tabela A.3 – Propriedades da película Poly33

| Material | Poly33 |
|---------------------|---------|
| e | 0,00051 |
| $\tau_{solar,+}$ | 0,178 |
| $\rho_{fsolar,+}$ | 0,739 |
| $\rho_{fsolar,+}$ | 0,738 |
| $\tau_{visível}$ | 0,330 |
| $\rho_{fvisível,+}$ | 0,566 |
| $\rho_{bvisível,+}$ | 0,591 |
| k | 0,140 |
| ε_f | 0,035 |
| ε_b | 0,720 |

ANEXO B – PERFIS HORÁRIOS

Tabela B. 1 – Perfil de funcionamento da iluminação

| Período | Quartos | Demais zonas térmicas |
|---------------|---------|-----------------------|
| 00:00 – 06:00 | 0% | 0% |
| 06:00 – 07:00 | 66% | 29% |
| 07:00 – 08:00 | 23% | 59% |
| 08:00 – 19:00 | 0% | 0% |
| 19:00 – 21:00 | 31% | 63% |
| 21:00 – 22:00 | 47% | 47% |
| 22:00 – 00:00 | 63% | 31% |

Tabela B.2 – *Setpoints* do sistema de condicionamento de ar

| Período | <i>Setpoint</i> de resfriamento (°C) | | <i>Setpoint</i> de aquecimento (°C) | |
|---------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | Dias da semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias |
| 00:00 – 07:00 | 25 | 25 | 18 | 18 |
| 07:00 – 09:00 | 25 | 25 | 20 | 18 |
| 09:00 – 10:00 | 25 | 25 | 20 | 20 |
| 10:00 – 11:00 | 28 | 25 | 16 | 20 |
| 11:00 – 17:00 | 28 | 28 | 16 | 20 |
| 17:00 – 18:00 | 28 | 28 | 18 | 20 |
| 18:00 – 00:00 | 25 | 25 | 20 | 20 |

ANEXO C – EQUIPAMENTO INTERNOS

Tabela C.1 – Gasto energético anual dos equipamentos internos da edificação

| Equipamento | Gasto (kWh/ano) |
|------------------------|-----------------|
| <i>Fridge</i> | 380 |
| <i>Freezer</i> | 625 |
| <i>Dishwasher</i> | 396 |
| <i>Laundry</i> | 240 |
| <i>Cooking</i> | 306 |
| <i>PCs</i> | 200 |
| <i>Audivisual (ST)</i> | 335 |
| Total | 2482 |

APÊNDICE

APÊNDICE A – Composição construtiva da edificação inicial

Tabela A.1 – Composição da construção da edificação modelo

| Elemento | Piso | Parede externa | Parede interna | Telhado | Janelas | Porta externa |
|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| U (W/m ² K) | 0,41 | 0,32 | 6,42 | 0,22 | 0,32 | 1,06 |
| Layer externo | Cascalho 200,0 mm | Gesso 10,0 mm | Gesso 10,0 mm | Poliestireno 150,0 mm | Vidro 3,0 mm | Madeira 12,9 mm |
| Layer 2 | Poliestireno 80,0 mm | Tijolo furado 110,0 mm | Tijolo furado 110,0 mm | Concreto 200,0 mm | Ar 13 mm | |
| Layer 3 | Concreto 150,0 mm | Poliestireno 100,0 mm | Gesso 10,0 mm | Gesso 10,0 mm | Vidro 3,0 mm | |
| Layer 4 | | Tijolo furado 150,0 mm | | | | |
| Layer 5 | | Gesso 10,0 mm | | | | |

APÊNDICE B – PERFIS HORÁRIOS

Tabela B.1 – Perfil de ocupação das zonas térmicas para os períodos de 01/01 – 14/05 e de 01/11 – 31/12

| Período | Sala | | Quartos | | Cozinha | | Banheiros | |
|---------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | Dias de semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias |
| 00:00 – 10:00 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10:00 – 11:00 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:00 – 17:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17:00 – 18:00 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00 – 19:00 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| 19:00 – 20:00 | 0,5 | 0,5 | 0 | 5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 |
| 20:00 – 24:00 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela B.2 – Perfil de ocupação das zonas térmicas durante o período de 15/04 – 31/10

| Período | Sala | | Quartos | | Cozinha | | Banheiros | |
|---------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | Dias de semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias | Dias da semana | Demais dias |
| 00:00 – 10:00 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10:00 – 18:00 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00 – 19:00 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| 19:00 – 20:00 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 |
| 20:00 – 00:00 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

APÊNDICE C – VALORES DE IRRIGAÇÃO PARA O TELHADO VERDE

Tabela C.1 – Irrigação diária para o telhado verde de acordo com mês do ano

| Mês | Irrigação diária (mm) |
|-----------|-----------------------|
| Janeiro | 3,23 |
| Fevereiro | 3,88 |
| Março | 3,37 |
| Abril | 2,87 |
| Mai | 3,05 |
| Junho | 4,42 |
| Julho | 3,93 |
| Agosto | 4,52 |
| Setembro | 4,65 |
| Outubro | 3,69 |
| Novembro | 3,47 |
| Dezembro | 3,26 |