



Carlos Eduardo Ezequiel Pacheco

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Estudo de Ventilação Natural com Chaminé Térmica Solar

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde

Vogal(ais): Prof. Doutora Diana Filipa da Conceição Vieira

Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2017

Carlos Eduardo Ezequiel Pacheco

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo de Ventilação Natural com
Chaminé Térmica Solar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor(a) [Nome Completo]

Arguente(s): Prof. Doutor(a) [Nome Completo]

Vogal(ais): Prof. Doutor(a) [Nome Completo]

Estudo de Ventilação Natural com Chaminé Térmica Solar

Copyright © Carlos Eduardo Ezequiel Pacheco, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao professor José Fernando de Almeida Dias, por toda a disponibilidade concebida, orientação e partilha de conhecimentos ao longo da realização deste estudo.

Aos meus colegas de faculdade, em especial àqueles que me acompanharam na fase final na realização deste trabalho, Eduardo Camilo e Duarte Simões, que foram uma ajuda imprescindível em conhecimentos científicos e apoio moral.

À minha namorada e família, deixando um agradecimento especial à minha mãe por todo o apoio e motivação que me deu ao longo da minha vida.

Resumo

Na presente dissertação, usando um programa de cálculo numérico regido pelas equações da dinâmica de fluidos e termodinâmica, analisam-se as potencialidades de climatizar um edifício de habitação com ventilação natural. Aproveitando a inércia térmica de uma parede, a qual recebe a sua energia através da radiação solar, aquecendo o ar em contacto com esta. O ar aquecido pela parede, entra em contacto com o ar exterior através de uma chaminé, e com o ar interior através de aberturas interiores do edifício.

Inicialmente e partindo de estudos anteriormente realizados, onde já havia sido utilizado o programa de ventilação natural em edifícios, procurou-se fazer a validação do programa, saber quais as influências que determinados elementos podem ter na ventilação de um edifício.

Por último, recorrendo aos elementos anteriormente analisados na validação do programa, efetuaram-se vários testes para diferentes velocidades e direção do vento, e diferentes localizações de aberturas de ventilação procurando diferentes soluções, usando o calor acumulado na chaminé térmica solar de maneira a aquecer o edifício no Inverno, e retirar o calor do edifício no Verão. Garantindo a qualidade do ar interior, efetuando as renovações de ar necessárias.

Posteriormente, fez-se uma comparação de resultados onde é usado a ventilação mecânica para renovar o ar no interior do edifício, garantindo a qualidade deste. Concluindo-se que a ventilação natural é suficiente para garantir a climatização do edifício não tendo gastos de energia.

Abstract

The present dissertation, using a program based on numerical solution of the thermal and dynamic governing equations, was analyse the potentialities of using natural ventilation to climate a house-building. Using the thermal inertia of a wall, which receives his energy through solar radiation, heating the air in contact with the wall. The heated air communicates with the outside air through a chimney and with the inside air through internal openings in the house-building.

At first, based on earlier studies, which had used the program for calculating natural ventilation on buildings, we start by validating the program and to know what were the influences of certain elements in ventilation may have on the house-building.

At last, based on previous elements that were analysed to validate the program, was tested with several wind velocities and directions, and different ventilation opening locations for knowing the best solution that can heat the house-building in the winter using the heated air of the solar chimney and to remove the heated air inside the house-building in the summer. Performing the necessary air changes, to ensure the inside air quality.

Later, a comparison was made where mechanical ventilation was used to perform air changes, guarantee the inside air quality. Where is conclude that the natural ventilation is enough without energy costs.

Índice

Agradecimentos.....	V
Resumo.....	VII
Abstract	IX
Índice.....	XI
Índice Figuras.....	XIII
Índice de Tabelas.....	XIX
Nomenclatura	XXI
1. Introdução	- 1 -
1.1. Motivação e Objetivos	- 1 -
1.2. Ventilação.....	- 1 -
1.3. Chaminé Térmica Solar.....	- 3 -
2. Modelo físico para ventilação natural	- 9 -
2.1. Equações do Modelo Simplificado.....	- 10 -
3. Verificação de Resultados para a Ventilação Natural	- 15 -
3.1. Ventilação Natural de um espaço com duas aberturas a cotas diferentes	- 15 -
3.2. Ventilação Natural de um espaço com uma abertura de quatro elementos.	- 20 -
3.3. Espaço com uma segunda abertura ligada a uma chaminé, com coeficiente de pressão uniforme na abertura vertical	- 34 -
4. Chaminé Térmica Solar.....	- 41 -
4.1. Sem chaminé e sem aberturas de ventilação	- 44 -
4.2. Chaminé fechada e duas aberturas de ventilação para o exterior	- 47 -
4.3. Chaminé aberta e uma abertura de ventilação para o exterior.....	- 57 -
4.4. Ventilação mecânica	- 68 -
5. Conclusão.....	- 77 -
Bibliografia	- 79 -
Anexos.....	- 81 -

Índice Figuras

Figura 1.1 – Chaminé Térmica Solar	3 -
Figura 1.2 - Parede de inércia térmica.....	4 -
Figura 1.3 - Exemplos de diferentes paredes de inércia térmica: a) Em betão (Isabel et al., 2015); b) Em adobe (Isabel et al., 2015); c) Em pedra (“CAD – Companhia de Arquitectura e Design,” n.d.);	5 -
Figura 3.1 - Geometria do edifício	15 -
Figura 3.2 – Direção do vento normal a abertura na fachada considerando $U_o(+)$ e $U_o(-)$	16 -
Figura 3.3 - Velocidade do vento nas aberturas em função da velocidade do vento exterior sem geração de calor.....	17 -
Figura 3.4 – Número de renovações em função da velocidade do vento exterior sem geração de calor.....	17 -
Figura 3.5 - Geometria do edifício com fonte de calor	18 -
Figura 3.6 - Velocidade do vento nas aberturas em função da velocidade do vento exterior com geração de calor.....	18 -
Figura 3.7 – Número de renovações em função da velocidade do vento exterior com geração de calor.....	19 -
Figura 3.8 - Variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento exterior com geração de calor.	19 -
Figura 3.9 - Geometria do edifício com geração de calor no interior	20 -
Figura 3.10 - Coeficiente de pressão constante.....	21 -
Figura 3.11 – Velocidade na abertura vertical em função da potência dissipada no interior do edifício.....	22 -
Figura 3.12 – Número de renovações em função do calor gerado.	23 -
Figura 3.13 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado. ...	24 -
Figura 3.14 - Gradiente do coeficiente de pressão decrescente em altura.....	24 -
Figura 3.15 - Velocidade nos elementos de abertura em função da velocidade do vento $U_0 = 0,001; 5; 10 \text{ m/s}$ com geração de calor.....	25 -
Figura 3.16 – Número de renovações função da velocidade do vento com geração de calor. -	25 -

Figura 3.17 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado. ...	26 -
Figura 3.18 - Gradiente do coeficiente de pressão crescente em altura.	26 -
Figura 3.19 - Velocidade nos elementos de abertura em função da velocidade do vento $U0 = 0,001; 3,5; 4; 7; 10 \text{ m/s}$ com geração de calor.	27 -
Figura 3.20 – Número de renovações em função da velocidade do vento com geração de calor. .	28 -
Figura 3.21 - Variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento com geração de calor.	28 -
Figura 3.22 - Velocidade na abertura vertical em função do calor gerado $Qi = 250; 2500; 5000; 7500; 10000 \text{ W}$	29 -
Figura 3.23 – Número de renovações em função do calor gerado.	30 -
Figura 3.24 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado. ...	31 -
Figura 3.25 – Número de renovações em função do calor gerado.	32 -
Figura 3.26 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado. ...	33 -
Figura 3.27 - Geometria do edifício com chaminé.	34 -
Figura 3.28 – Esquema do campo de velocidades dos elementos de abertura e chaminé.	36 -
Figura 3.29- Esquema do campo de velocidades dos elementos de abertura e chaminé com $H_{cham} = 5 \text{ m}$	38 -
Figura 3.30 - Esquema do campo de velocidades dos elementos de abertura e chaminé com $H_{cham} = 15 \text{ m}$	38 -
Figura 3.31 – Número de renovações em função da velocidade do vento com $H_{cham} = 5; 10; 15 \text{ m}$	39 -
Figura 3.32 - Variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento com $H_{cham} = 5; 10; 15 \text{ m}$	39 -
Figura 4.1 - Parede de inércia térmica.	41 -
Figura 4.2- Geometria de edifício em estudo	41 -
Figura 4.3 – Possíveis aberturas de ventilação consideradas para a geometria do edifício.	42 -
Figura 4.4 – Potência transmitida ao ar no mês de Janeiro em função da hora solar.	43 -
Figura 4.5 - – Potência transmitida ao ar no mês de Julho em função da hora solar.	43 -
Figura 4.6 – Geometria do edifício, sem aberturas de ventilação.	44 -

Figura 4.7 – Variação de temperatura no interior do edifício em função da hora solar no mês de Janeiro em função da hora solar.....	- 45 -
Figura 4.8 - Taxa de circulação de ar no mês de Janeiro em função da hora solar.....	- 45 -
Figura 4.9 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho em função da hora solar.....	- 46 -
Figura 4.10 - Taxa de circulação de ar no mês Julho em função da hora solar.....	- 46 -
Figura 4.11 – Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado direito.....	- 47 -
Figura 4.12 - Criculação de ar no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito.....	- 48 -
Figura 4.13 – Taxa de circulação de ar no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 48 -
Figura 4.14 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 49 -
Figura 4.15 - Número de renovações no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 49 -
Figura 4.16 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Janeiro com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 50 -
Figura 4.17 - Número de renovações no mês de Janeiro com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 50 -
Figura 4.18 - Taxa de circulação de ar no mês de Janeiro com, $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 51 -
Figura 4.19 - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado esquerdo.....	- 51 -
Figura 4.20 – Variação de temperatura no interior do edificio no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.....	- 52 -
Figura 4.21 – Número de renovações no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.....	- 52 -
Figura 4.22 - Taxa de circulação de ar no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.....	- 52 -

Figura 4.23 -Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Janeiro quando este está habitado em função da hora solar.....	- 53 -
Figura 4.24 – Número de renovações no mês de Janeiro quando o edifício está habitado em função da hora solar.	- 54 -
Figura 4.25 – Taxa de circulação de ar no mês de Janeiro quando o edifício está habitado em função da hora solar.	- 54 -
Figura 4.26 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 55 -
Figura 4.27 – Número de renovações no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 56 -
Figura 4.28 – Taxa de circulação de ar no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 56 -
Figura 4.29 - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado direito.	- 57 -
Figura 4.30 - Criculação de ar no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito.	- 58 -
Figura 4.31 - Número de renovações no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 58 -
Figura 4.32 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.....	- 59 -
Figura 4.33 - Número de renovações no mês de Julho com, $U0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.	- 59 -
Figura 4.34 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.	- 60 -
Figura 4.35 - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado esquerdo.	- 60 -
Figura 4.36 -- Número de renovações no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.....	- 61 -
Figura 4.37 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.....	- 61 -
Figura 4.38 - Número de renovações no mês de Julho com $U0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.	- 62 -

Figura 4.39 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.	62 -
Figura 4.40 - - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão.	63 -
Figura 4.41 – Número de renovações no mês de Julho com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada frontal em função da hora solar.	63 -
Figura 4.42 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada frontal em função da hora solar.	64 -
Figura 4.43 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Julho com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada frontal em função da hora solar.	64 -
Figura 4.44 - Número de renovações no mês de Julho com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada frontal em função da hora solar.	65 -
Figura 4.45 - Criculação de ar no mês de Julho com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada frontal. .	65 -
Figura 4.46 – Variação de Temperatura no interior do edifício no mês de Julho quando o este está habitado em função da hora solar.	66 -
Figura 4.47- Número de renovações no mês de Julho quando o edifício está habitado em função da hora solar.	66 -
Figura 4.48 - Número de renovações no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.	67 -
Figura 4.49 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.	68 -
Figura 4.50 - Geometria de edifício com Ventilador.	68 -
Figura 4.51- Curva (P-V) do ventilador.	69 -
Figura 4.52 – Geometria do edifício com ventilador e coeficiente de pressão das aberturas com vento incidente na fachada do lado direito e esquerdo.	70 -
Figura 4.53 - Curva (P-Qv), Ventilador.	70 -
Figura 4.54 - RPM em função da velocidade do vento realizando 1,5 Renovações/Hora.	71 -
Figura 4.55 - Potência consumida pelo ventilador em função da velocidade do vento.	71 -
Figura 4.56 - Número de renovações em função da velocidade do vento com ventilador e ventilação natural.	72 -
Figura 4.57 - Curva (P-Qv), Ventilador.	73 -

Figura 4.58 - RPM em função da velocidade do vento realizando 4 Renovações/Hora.	- 73 -
Figura 4.59 - Potência consumida pelo ventilador em função da velocidade do vento.	- 74 -
Figura 4.60 - Número de renovações em função da velocidade do vento com ventilador e ventilação natural.	- 74 -
Figura 4.61 -Potência anual consumida para realizar 1,5 renovações/Hora.....	- 75 -
Figura 4.62 - Potência consumida anualmente para realizar 1,5 renovações/hora com vento incidente na fachada do lado esquerdo e lado direito do edifício.....	- 76 -

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Velocidades nos elementos de abertura em função do calor gerado, Caso A.	21 -
Tabela 2 – Velocidade nos elementos de abertura, Caso D.	30 -
Tabela 3 – Número de renovações e variação de temperatura, para diferentes coeficientes de transmissão de calor.	32 -
Tabela 4 – Velocidade nos elementos de abertura em função da potência, para diferentes alturas da chaminé.	35 -
Tabela 5 – Velocidade nos elementos de abertura em função da velocidade do vento, para diferentes alturas da chaminé.	37 -

Nomenclatura

P_k – Pressão exercida pela velocidade do vento no exterior da abertura k que comunica com o ambiente.

ΔP_k – Variação de pressão entre o exterior e o interior do edifício.

ΔP_i – Variação de pressão entre dois espaços interiores do edifício.

C_{pk} – Coeficiente de pressão exercido pelo vento exterior na abertura k.

C_{p0} – Calor específico do ar

ρ_0 – Densidade do ar no exterior

$\Delta \rho_i$ – Variação de densidade entre o ar exterior e o ar interior.

U_0 – Velocidade do vento exterior.

U_k – Velocidade do vento na abertura k.

B_k – Força de impulsão de origem térmica na abertura k.

H_k – Diferença de altura média da abertura k relativamente à abertura mais baixa no espaço i.

g – Aceleração gravítica

ε_k – Coeficiente de perda de carga na abertura k.

A_k – Área da abertura k.

A_p – Área da parede.

T_i – Temperatura no espaço i.

T_0 – Temperatura de referência do exterior.

U_p – Coeficiente global de transmissão de calor da parede p.

Q_i – Calor gerado no espaço i.

$NESP$ – Número de espaços internos.

NA – Número de aberturas no espaço i.

g – Fator solar do vidro.

α – Transmissibilidade do vidro.

H_{cham} – Altura da chaminé.

1. Introdução

1.1. Motivação e Objetivos

Os edifícios têm sido definidos como um dos principais responsáveis pelos problemas ambientais do planeta, quer durante a sua fase de construção, com também durante a sua fase de operação. Várias pesquisas têm vindo a intensificar o projeto de edifícios verdes, através do uso de tecnologias alternativas de construção sustentável e abordagens de operação no sentido de reduzir o uso de energia e, ao mesmo tempo maximizar a utilidade dos recursos naturais (Guerreiro Modesto, 2015).

O projeto adequado de edifícios sustentáveis requer o balanço de três aspetos. Do desempenho térmico da envolvente do edifício e a seleção de técnicas de aquecimento e arrefecimento. Da qualidade do ambiente interior, de eficácia da ventilação e da eficiência energética do edifício.

A preocupação com o aquecimento global resultou no ressurgimento do interesse em edifícios naturalmente ventilados. A ventilação natural está a ser cada vez mais usada em edifícios públicos e modernos de modo a minimizar o consumo de energia. No entanto, atualmente a maioria dos edifícios continua extremamente dependente de meios artificiais de ventilação (ventiladores mecânicos, ar condicionado) para as suas operações diárias (Moghaddam, Amindeldar, & Besharatizadeh, 2011).

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é a análise das potencialidades da ventilação natural de um edifício com uma chaminé térmica solar. Promovendo as forças de circulação do ar, onde se pretende aquecer o espaço interior na época de aquecimento (Inverno), e retirar o calor na época de arrefecimento (Verão).

1.2. Ventilação

O objetivo da ventilação é garantir a qualidade do ar dentro de um determinado espaço, especialmente quando este se destina à ocupação humana, tornando-se essencial para que este se possa considerar apto à sua utilização. A ventilação é o que garante a qualidade do ar, não só em termos da sua viciação resultante do ar respirado, como também uma forma de evitar a propagação de mau cheiros. Pode ainda servir para regular as condições térmicas no interior dos espaços habitados.

A ventilação consiste, na remoção do ar interior viciado através da introdução de ar exterior fresco. Este processo é conseguido pondo os espaços interiores em contacto com o exterior através de aberturas de ventilação por onde se faz a infiltração do ar exterior novo e a remoção do ar interior viciado

O ar viciado é aquele que foi poluído pelas atividades humanas. Das atividades humanas, aquelas que geralmente produzem poluentes são:

- Confeção de alimentos;
- Lavagem e secagem de roupa e de loiça;
- Utilização das instalações sanitárias;
- Utilização de produtos de limpeza;
- Combustão de aparelhos a gás;
- Consumo de tabaco, entre outros.

Mas não só a atividade humana tem vindo a ter influência na degradação do ar interior, como também os materiais de construção utilizados, podendo produzir e libertar substâncias contaminantes para o interior.

Para este efeito, renovar o ar interior, existem três tipos de ventilação, a ventilação natural, a ventilação forçada e a ventilação mista. A ventilação do ar interior dos edifícios pode ser promovida por efeitos naturais (ventilação natural), através das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior do edifício e as diferenças de pressão entre fachadas, promovidas pela ação do vento. Por ventiladores mecânicos (ventilação forçada), forçando o ar a entrar ou a sair do espaço a ventilar. A ventilação mista, usa os conceitos da ventilação natural e da ventilação forçada, recorrendo ao uso de ventiladores mecânicos quando não é suficiente usar apenas a ventilação natural.

O tema da ventilação, é importante e tem sido largamente tratado por diferentes autores, como por exemplo, (Lopes Teixeira, 2009), (Macedo Martins, 2016), (Sequeira, 2010).

No funcionamento da ventilação natural, todos os edifícios estão sujeitos a uma carga térmica interna, sendo esta a libertação de calor que se vai acumulando proveniente de máquinas presentes, como eletrodomésticos, equipamentos de iluminação e pelas pessoas no interior do edifício. A própria construção do edifício, vidros e paredes, bem como o sol, influenciam a carga térmica. Esse calor acumulado no interior do edifício aquece o ar interior, o ar quente sobe formando uma camada térmica abaixo do telhado, até que a temperatura atinja o equilíbrio térmico distribuindo-se por todo o edifício.

A ventilação natural num edifício pode funcionar com base em diferentes princípios. Em função da arquitetura do edifício, das cargas térmicas internas, como já referido, e da localização das aberturas de ventilação. Isso é conseguido com o mínimo de consumo de energia e com custos baixos. As aberturas no ponto mais alto, permitem eliminar o calor com maior eficácia. As aberturas em níveis mais baixos, permitem a entrada de ar fresco. Onde o movimento de uma massa de ar é introduzido por uma diferença de pressão entre os dois lados de qualquer abertura

que promove o fluxo de ar. Esta diferença de pressões ocorre devido á diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício, e devido à pressão estática sobre a envolvente do edifício.

1.3. Chaminé Térmica Solar

O desempenho dos sistemas solares passivos, como é o caso da chaminé térmica, é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelas características dos seus constituintes, como também pela sua localização, orientação e forma do edifício, e ainda pela área de envidraçados por fachada. As chaminés térmicas são mais eficientes em locais com fortes amplitudes térmicas diárias. No hemisfério Norte, estes sistemas devem estar preferencialmente virados para Sul, pois, é nesta direção que se consegue captar maior quantidade de radiação solar, e também, por esta orientação favorecer a baixa altitude solar durante o inverno, sem alcançar ganhos excessivos durante o verão. Com isto, é promovida a circulação do ar de forma a que este, aqueça o espaço interior na época de inverno, e consiga retirar o calor do espaço na época de verão.

Na Figura 1.1, a título de exemplo, está representado a chaminé térmica solar.

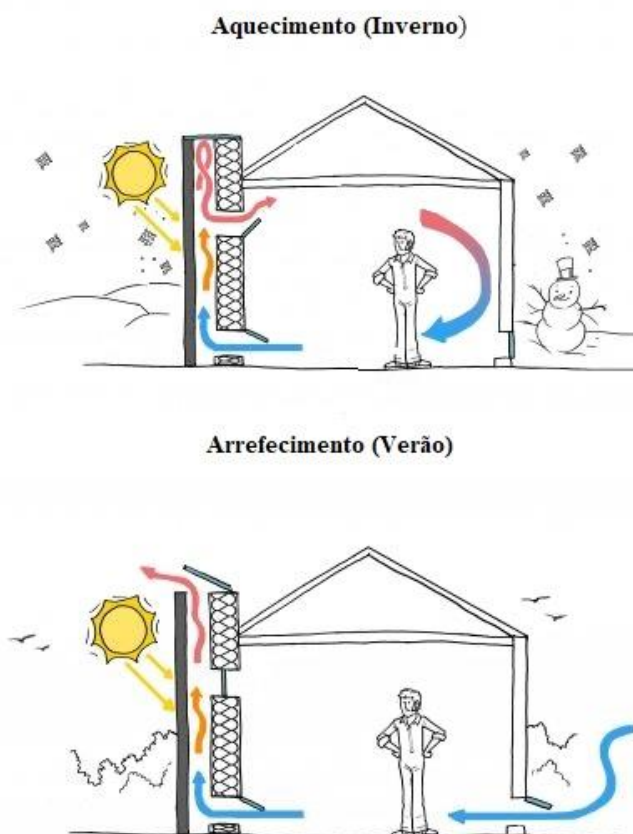


Figura 1.1 – Chaminé Térmica Solar

Para além da chaminé e das aberturas de ventilação, que poderão funcionar ou não, os elementos fundamentais deste edifício são, o vidro, a coluna de ar, a massa de inércia térmica e o isolamento térmico, tal como representado na Figura 1.2.

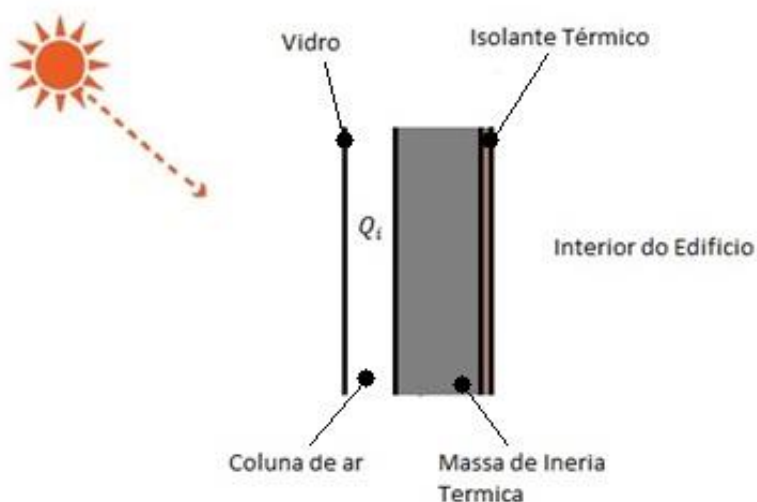


Figura 1.2 - Parede inércia térmica.

A chaminé térmica, é um sistema solar passivo de aquecimento por ganho indireto, e é constituído essencialmente por um envidraçado que corresponde à exposição solar que permite obter maior radiação, e por uma parede maciça cuja espessura pode variar consoante as necessidades pretendidas onde podem ser introduzidas aberturas de ventilação para a circulação de ar entre os espaços (coluna de ar e o interior do edifício). A coluna de ar encontra-se entre o envidraçado e a massa de inércia térmica.

1.3.1. Parede de inércia térmica

Uma parede maciça, consiste numa parede de armazenamento térmico, geralmente constituída por materiais de elevada densidade, com grande capacidade de armazenamento de calor, permitindo que o calor seja transferido e armazenado no interior do material.

A característica mais importante no desempenho da parede é a inércia térmica que diz respeito à capacidade de armazenamento térmico e de transmissão de calor, podendo ser usado no sentido de reduzir as necessidades de aquecimento e de arrefecimento ao longo do dia. Em dias quentes quando a radiação solar incide na parede esta aquece e absorve o calor, quando o ambiente se encontra a uma temperatura mais baixa que a massa de inércia térmica, esta irradia o calor armazenado para o espaço em contacto com esta.

Assim a seleção do material para a construção da parede deve ter em conta as suas características térmicas sendo estas em função da densidade da parede da condutibilidade térmica do material do

calor específico e capacidade calorífica do material. A espessura, que influencia as oscilações de temperatura, pode variar em função das propriedades do material e do atraso térmico que se pretende, sendo um fator decisivo para se alcançar a devolução noturna do calor do edifício.

Por outro lado, existem outras características que influenciam a capacidade de absorção de calor da massa térmica de um material como a cor e a textura. Uma superfície cujo material tenha uma cor escura é capaz de absorver mais calor, resultando num aumento de temperatura do espaço que se pretende aquecer.

Alguns exemplos do tipo de parede de inércia térmica são mostrados na Figura 1.3.

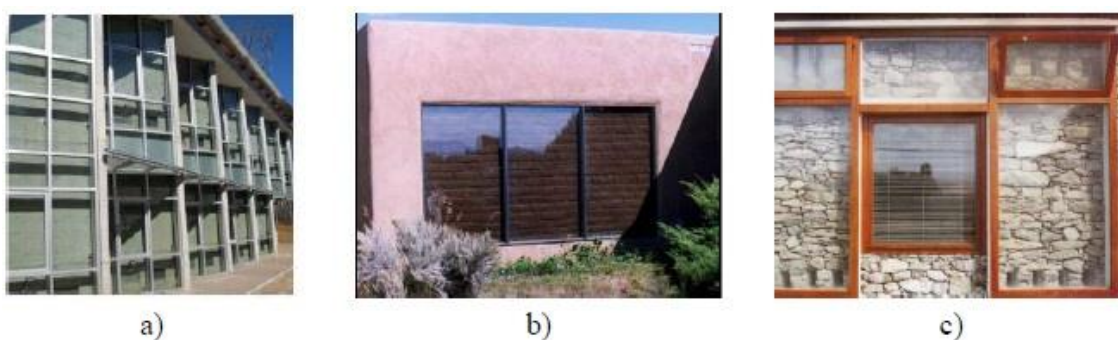


Figura 1.3 - Exemplos de diferentes paredes de inércia térmica: a) Em betão (Isabel et al., 2015); b) Em adobe (Isabel et al., 2015); c) Em pedra (“CAD – Companhia de Arquitectura e Design,” n.d.);

1.3.2. Envidraçado

O vidro é o elemento construtivo que fica no exterior da chaminé térmica. É através dele que a radiação solar incide e fica retida no interior, por efeito de estufa na parede de inércia térmica, sendo posteriormente transmitido à coluna de ar pela parede. Este elemento também tem como função impedir que o calor acumulado pela parede de inércia térmica se difunda facilmente para o exterior. Desta forma, é fundamental ter em consideração as características do vidro, nomeadamente a espessura e o tipo de vidro.

Os envidraçados podem ser os elementos responsáveis pela maior quantidade de ganhos ou de perdas de calor. O desempenho térmico destes elementos é em função de algumas características, em função do coeficiente global de transmissão de calor, U_{vidro} , do fator solar, g , e da transmissibilidade, α . O coeficiente de transmissão de calor, traduz a capacidade que o material tem em conduzir o calor, e engloba a transferência de calor por condução, convecção e radiação. A emissividade, é a propriedade que traduz o comportamento do vidro relativamente à energia solar, uma vez que representa a capacidade do vidro em absorver ou emitir energia a baixa

temperatura. O fator solar do vidro representa a relação entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente. Quanto menor for o fator solar do vidro, menores serão os ganhos solares obtidos. E por fim, a transmissibilidade representa a fração de luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria

1.3.3. Coluna de ar

A coluna de ar encontra-se entre o envidraçado e a parede de inércia térmica, sendo esta que recebe o calor armazenado na parede, proveniente da radiação solar, criando impulsão térmica e movimento do ar. Este elemento deve ser projetado de forma a que permita aumentar a quantidade de calor que pode ser acumulado nesse espaço. Os fatores mais influentes nos seus efeitos são a espessura, e a altura da caixa-de-ar. A espessura influencia a transmissão de calor para o interior do espaço adjacente, quer por condução através da parede de inércia térmica, quer por convecção através de aberturas de ventilação. Neste trabalho, foi apenas considerado transmissão de calor por convecção entre a caixa-de-ar e o espaço interior.

1.3.4. Isolamento térmico

O isolante térmico, colocado na parede de inércia térmica no lado interior do edifício, tem como função servir de fronteira para impedir que o calor passe por condução para o espaço interior do edifício. O calor acumulado pela parede, apenas entra em contacto com o ar interior por convecção, promovida pela coluna de ar, quando é pretendido.

1.3.5. Modelo utilizado para o cálculo da fonte de calor

Na chaminé térmica, uma grande porção do calor instantâneo radiado pelo sol, não é fornecido instantaneamente à coluna de ar. Isto porque, a radiação incide na superfície da parede de inércia onde é absorvido e armazenado, e posteriormente fornecido à coluna de ar.

Quando o calor radiado incide numa superfície sólida (parede, teto, chão, etc.) este é absorvido, elevando a temperatura da superfície do material e do ar adjacente à sua superfície. Esta diferença de temperatura é a causa da transmissão de calor entre o interior do material até à sua superfície (por condução) e entre a superfície do material e o ar (por convecção). O calor transmitido por condução do material é armazenado neste, e o calor transmitido por convecção é considerado como carga térmica da coluna de ar. A maioria dos materiais de construção tem um coeficiente de transmissão de calor maior que o ar. Desta forma, a maior parte do calor radiado no material é armazenado neste. No entanto, à medida que o calor é armazenado no material, este vai perdendo a sua capacidade de reter mais calor no seu interior.

Numa parede de construção leve, esta tem menor capacidade de armazenar calor nas horas de pico. Enquanto que, numa parede de construção pesada, esta consegue armazenar mais calor nas horas de pico por ser mais sólida. Ou seja, quando mais leve a construção, menor a sua capacidade de armazenar calor.

A potência instantânea fornecida à coluna de ar da chaminé térmica, é em função da latitude, da orientação da parede, do tipo de vidro, do tipo de materiais da parede, da inércia térmica da parede e dos fenômenos de convecção, da hora solar, e da temperatura interior da coluna de ar.

Para o cálculo desta carga instantânea (média horária), foi utilizado um método proposto pela Carrier (Carrier Air Conditioning Company, 1999).

Este método baseia-se numa série de estudos realizados em edifícios já existentes, medindo a carga real de refrigeração devido aos ganhos de calor solar quando a temperatura do espaço interior é constante. Nesse estudo, foram considerados vários tipos de construção da parede para diferentes orientações, como o mês e a latitude.

O método de cálculo proposto e utilizado para a determinação da potência de inércia térmica instantânea encontra-se descrito no Anexo 1.

2. Modelo Físico para Ventilação Natural

Em ventilação natural os efeitos combinados da impulsão térmica e da ação do vento, são acontecimentos importantes para estabelecer as condições de ventilação no interior de um edifício, como já referido. As velocidades e direções do vento, e as temperaturas aleatórias são condições não desprezáveis, mas não são impedimento de se conseguir modelar um problema de cálculo, assumindo que se comporta como estacionário usando equações da dinâmica de fluidos e da termodinâmica. É feita uma aproximação racional para calcular os rácios de ventilação, pressão interna e variação de temperatura no interior do edifício, usando coeficientes de pressão e valores de perda de carga obtidos experimentalmente quando o vento circula através de aberturas de ventilação das paredes.

A realização deste trabalho poderia ser feita com o auxílio de um programa de simulação numérica dos escoamentos de ventilação interior dos espaços, um programa CFD recorrendo às soluções das equações Navier-Stokes através de métodos de discretização, como são os casos dos métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos. Este seria um processo muito pesado e demorado, requerendo uma maior quantidade de tempo e de memória do computador para a simulação de um único caso particular. No entanto, serviram de apoio ao longo deste estudo alguns exemplos de trabalhos que optaram por esta via, tais como “Contribuições para o estudo da ventilação natural de edifícios” (Delgado, 1989) e “Ventilação natural: Estudo de um caso particular de ventilação natural” (Sequeira, 2010).

Assim, de modo a poder analisar diversas situações num curto espaço de tempo, optou-se pela utilização de um modelo simplificado. Este modelo utiliza as equações da continuidade, quantidade de movimento e da energia, bem como o conhecimento empírico dos coeficientes de perda de carga das aberturas e dos coeficientes de pressão devido à ação do vento sobre o edifício para, através de um modelo numérico, obter os parâmetros de ventilação mais relevantes. Este modelo simplificado permite a obtenção rápida de algumas variáveis que são suficientes para descrever o comportamento do escoamento numa determinada situação, tais como as velocidades das aberturas, e conseqüentemente as renovações de ar no espaço interno, e as propriedades médias em cada espaço, como a pressão, massa volúmica e temperatura. A vantagem da utilização deste modelo é que rapidamente se podem fazer alterações da geometria do edifício, das componentes de ventilação e das condições exteriores, obtendo-se rapidamente as respetivas soluções para cada caso, tornando possível, fazer uma análise comparativa para as diversas situações escolhidas. Apesar deste modelo simplificado desprezar uma série de fatores, é suficiente para obter uma boa aproximação daquilo que acontece no edifício em relação a casos

de ventilação. Alguns exemplos de estudos anteriores que recorreram a este modelo, e nos quais se encontra o modelo numérico em que se baseou este trabalho são “Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada” (Teixeira, 2009) e “Aproveitamento energético da ventilação natural” (Guerreiro, 2015).

Foi apresentado um conjunto de situações para se testar um programa de cálculo com o modelo simplificado escrito em linguagem MATLAB que foi traduzido do programa VENTIL.FOR (J. F. A. Dias Delgado, A.R. Janeiro Borges, 1985) em linguagem FORTRAN, como será demonstrado na secção 3.

2.1. Equações do Modelo Simplificado

Este programa tem por base um ficheiro de dados em que o utilizador insere valores de: geometria do edifício; condições exteriores e interiores ao edifício; dissipação e absorção térmica do edifício. Com estes dados o modelo analítico do programa cria N incógnitas, $N = \sum_{I=1}^{NESP} (NA(I) + 3) \times NESP$, em que $NESP$ é o número de espaços, $NA(I)$ o número de aberturas por cada espaço interno I , e o número três corresponde às variáveis de pressão, densidade e temperatura de cada espaço interno I . Após construir e resolver os sistemas de equações, com base no sistema de geração de incógnitas, o programa emite um ficheiro de resultados com informações relativas às taxas de renovação, às variações de pressão e temperatura no interior de cada um dos espaços internos do edifício relativamente ao exterior.

As equações utilizadas que regem este modelo analítico são as seguintes:

Considerando que o edifício pode ser constituído por vários espaços com várias aberturas interiores e exteriores, a pressão exercida pela velocidade do vento no exterior da abertura que comunica com o ambiente é obtida através da seguinte equação

$$P_k = C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 \quad (2.1)$$

Onde C_{pk} é o coeficiente de pressão exercido na abertura k , ρ_0 representa a densidade do ar no exterior e U_0 a velocidade do vento no exterior.

No caso de existir variação de temperatura no interior do edifício, a força de impulsão de origem térmica na abertura é dada por

$$B_k = -\Delta\rho_0 H_k g \quad (2.2)$$

Onde H_k representa a diferença de altura média relativamente à abertura mais baixa e g a gravidade.

Considerando que os únicos elementos dissipativos são as aberturas na parede, a variação de pressão entre o exterior e o interior do edifício é obtido através da seguinte expressão

$$\Delta P_k = \varepsilon_k \frac{1}{2} \rho_0 U_k |U_k| \quad (2.3)$$

Onde ε_k indica o coeficiente de perda de carga para a abertura k .

Assumindo que, em cada espaço interno do edifício, a variação de pressão é hidrostática, a temperatura é constante e a variação de densidade é desprezável, exceto nos casos onde existam forças de impulsão de origem térmica, o modelo é regido pelas seguintes equações:

Equação de continuidade para cada espaço interno I

$$\sum_{k=1}^{m_i} U_k \times A_k = 0 \quad (2.4)$$

Onde U_k é a velocidade média da abertura k e A_k a sua respetiva área. Em que a velocidade negativa significa a saída de ar do interior do edifício e as velocidades positivas a entrada de ar para o interior do edifício.

Equação de quantidade de movimento

A equação utilizada relativamente à velocidade do vento nas aberturas é a equação de Bernoulli, adaptada a cada tipo de abertura.

Para aberturas internas simples:

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) - \frac{1}{2}\varepsilon_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (2.5)$$

Onde $(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g$ corresponde à impulsão térmica, $(P_i^* - P_i)$ corresponde às diferenças de pressão e $\frac{1}{2}\varepsilon_k \rho_0 U_k |U_k|$ corresponde às perdas de carga nas aberturas. O índice (*) indica os valores das variáveis em comunicação com o espaço i, através da abertura k.

Para a situação em que a abertura k comunica com o exterior, temos:

$$(\Delta\rho_i H_k)g + \left(\frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 C_{pk} - \Delta P_i\right) - \frac{1}{2}\varepsilon_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (2.6)$$

Para a chaminé cilíndrica:

As equações para este tipo de abertura foram obtidas experimentalmente (Delgado, Borges, & Conde, 1996), tendo em conta o seu funcionamento, tanto como exaustor quer como insuflador, e podem ser expressas pelas seguintes relações:

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 - (1 - \varepsilon_{in}) \frac{1}{2}\rho_0 U_i^2 = 0 \quad (2.7)$$

Quando o vento entra na chaminé, funcionando como insuflador $\left(\frac{U_i}{U_0} < 0\right)$

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 - F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) \frac{1}{2}\rho_0 U_i^2 = 0 \quad (2.8)$$

Com

$$F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) = -1,25 \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_i}{0,8U_0}\right) \quad \text{se} \quad -0,8 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \quad (2.9)$$

$$F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) = -1,25 \quad \text{se} \quad -1 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq -0,8 \quad (2.10)$$

Quando o vento é aspirado pela chaminé devido às ações do vento, funcionando como exaustor $\left(-1 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0\right)$

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i - (1 - \varepsilon_{out}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0 \quad (2.11)$$

Onde estas expressões ficam com um coeficiente de pressão $C_{pk} = -1,15$ quando por alguma razão $U_i = 0$, ficando a chaminé com uma perda de carga $\varepsilon_{in} = 0,8$ e $\varepsilon_{out} = 1,1$ quando o vento entra ou sai da chaminé, respetivamente.

Equação de energia para o espaço interno i

A equação seguinte é utilizada para os casos em que existe uma fonte interna de geração de calor no espaço i.

$$Q_i + \sum_{n=1}^{m_i} (\rho_0 C p_0 A_k T^+) + \sum_{n=1}^{m_i} U_p A_p (T_i - T_i^{**}) = 0 \quad (2.12)$$

Onde o coeficiente (***) corresponde ao espaço em comunicação com o espaço i através da parede p. Q_i é o calor gerado no espaço i, $C p_0$ é o calor específico do ar, o valor de T^+ é igual a T_i se a velocidade média na abertura for negativa ou, igual a T_i^{**} caso seja positiva. A_p é a área das paredes do espaço i e U_p o seu coeficiente global de transmissão de calor.

Equação de estado dos gases perfeitos

Assumindo que o ar se comporta como um gás ideal:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} + \frac{T_i - T_0}{T_0} = 0 \quad (2.13)$$

3. Verificação de Resultados para a Ventilação Natural

A fim de testar a nova versão do programa VENTIL.for (J. F. A. Dias Delgado,, A.R. Janeiro Borges, 1985) em linguagem Matlab, foram analisadas várias situações simples de ventilação natural.

3.1. Ventilação Natural de um espaço com duas aberturas a cotas diferentes

3.1.1. Caso A – Isotérmico

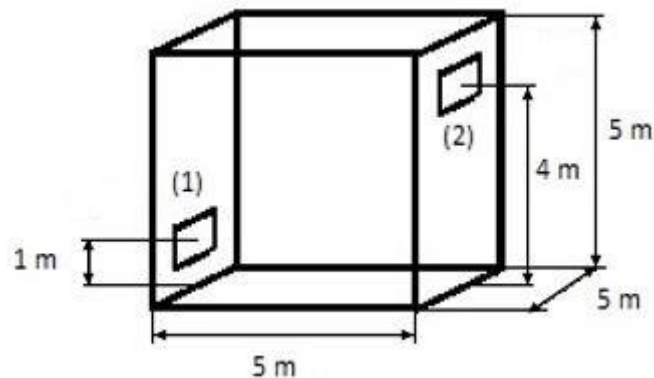


Figura 3.1 - Geometria do edifício

Na Figura 3.1 esta representado um esquema da primeira geometria de edifício testado com o programa de VENTIL. Trata-se de um único espaço cúbico de dimensão $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ Comprimento \times Largura \times Altura, respetivamente. As paredes do edifício foram consideradas adiabáticas, com duas aberturas de ventilação exterior com $1 \times 1 \text{ m}^2$ de área em fachadas opostas, colocadas no plano de simetria. O ponto médio da abertura na fachada do lado esquerdo do edifício está a 1 m de distância do chão e o ponto médio da abertura do lado direito está a 4 m de distância do chão. Admitiu-se um coeficiente de perda de carga de, $\varepsilon_k = 2,5$ para ambas as aberturas.

Para melhor compreensão dos resultados dos gráficos mostrados no seguimento deste trabalho, os valores das abcissas correspondem à velocidade do vento exterior U_0 . Considerou-se que, quando o vento incide normal á fachada do lado direito do edifício, a abertura (2), que fica a barlavento, fica com um coeficiente de pressão positivo $C_p = 1$. Na fachada contrária, fachada

do lado esquerdo, a abertura (1) a sotavento, fica com um coeficiente de pressão negativo $C_p = -1$, corresponde aos valores negativos da velocidade do vento $U_0(-)$.

A situação contrária, que corresponde aos valores positivos da velocidade do vento $U_0(+)$, foi considerado vento normal à fachada do lado esquerdo do edifício, ficando a abertura (1) a barlavento com um coeficiente de pressão positivo $C_p = 1$. Na fachada do lado direito a abertura (2) fica a sotavento com um coeficiente de pressão negativo $C_p = -1$, como se pode ver na Figura 3.2.

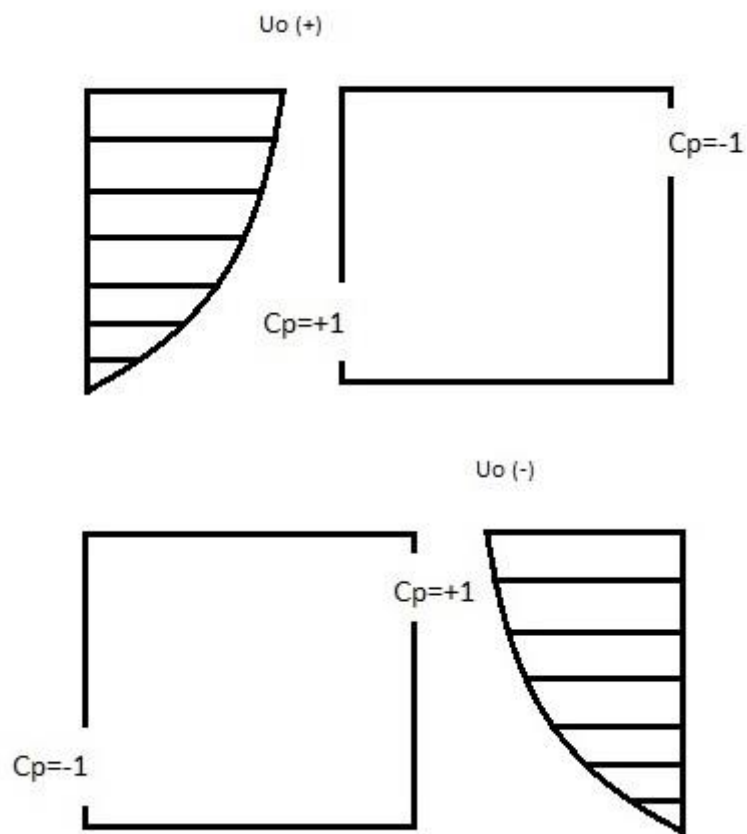


Figura 3.2 – Direção do vento normal a abertura na fachada considerando $U_0(+)$ e $U_0(-)$

Na Figura 3.3, está representado a velocidade nas aberturas (1) e (2) para as duas direções do vento com intensidade de 0 m/s a 10 m/s, isto é para U_0 entre -10 e +10 m/s e sem geração de calor no interior do edifício.

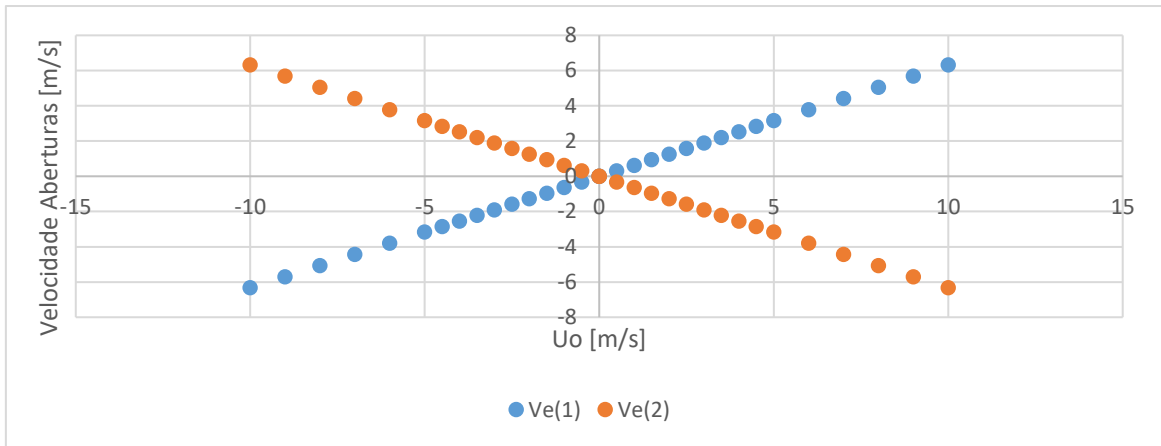


Figura 3.3 - Velocidade do vento nas aberturas em função da velocidade do vento exterior sem geração de calor.

Como era esperado os valores de (1) e (2) são simétricos, isto porque a geometria do edifício funciona como um volume de controle, onde há conservação de massa. É considerado o vento que entra no edifício como positivo e o vento que sai como negativo.

De seguida, na Figura 3.4 está representado o número de renovações de ar por hora, isto é, o número de vezes que o volume de ar desse ambiente é trocado na unidade de tempo.

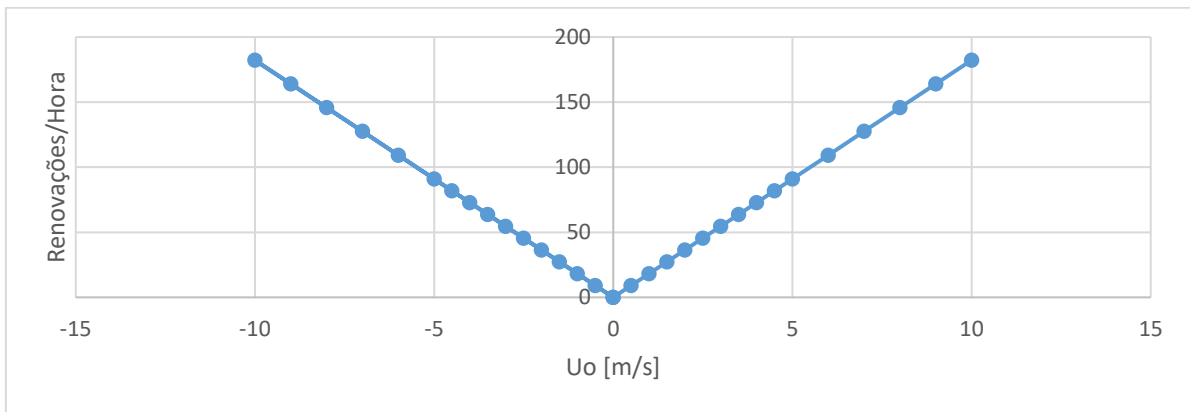


Figura 3.4 – Número de renovações em função da velocidade do vento exterior sem geração de calor.

3.1.2. Caso B – Com fonte de calor interior

Foi de seguida considerado para a mesma geometria do edifício e paredes adiabáticas, uma fonte de calor no interior do edifício com potência $Q_i = 2500$ W, como mostra a Figura 3.5. Manteve-se a área das aberturas, a sua localização e o valor de perda de carga nas aberturas bem como dos coeficientes de pressão para as diferentes direções do vento.

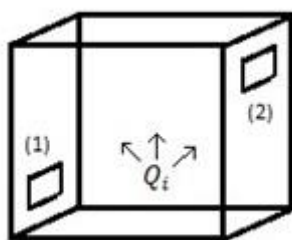


Figura 3.5 - Geometria do edifício com fonte de calor

Na Figura 3.6, está representado a velocidade nas aberturas (1) e (2) em função da velocidade do vento, U_0 .

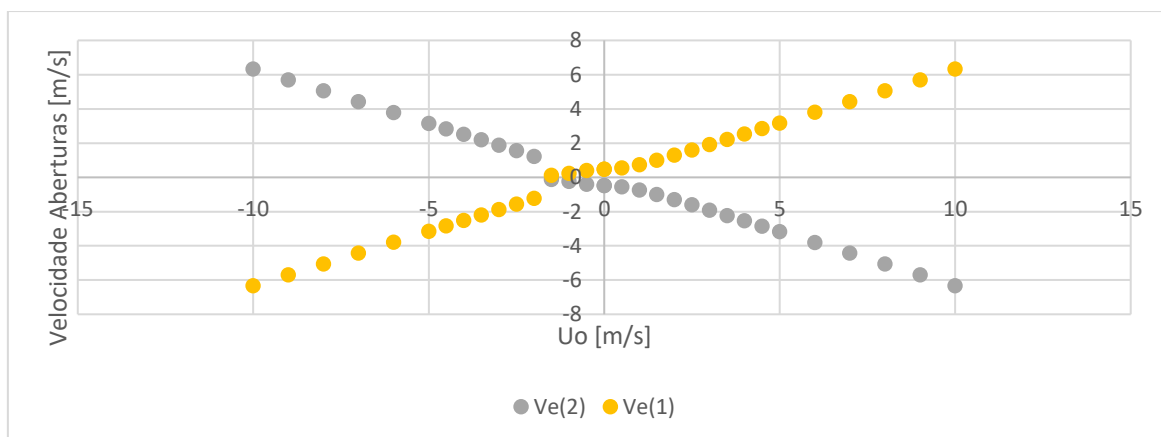


Figura 3.6 - Velocidade do vento nas aberturas em função da velocidade do vento exterior com geração de calor.

Foram representados os valores de velocidade do vento nas duas aberturas para verificação de resultados.

Considerando a evolução da velocidade nas aberturas representado na Figura 3.6, verificamos que o efeito da impulsão térmica se faz sentir para valores de U_0 entre -1,5 m/s e 1,5 m/s. Quando o

vento incide sobre a fachada do lado direito $U_0(-)$, o seu efeito é contrário ao da impulsão térmica, e verifica-se que a velocidade nas aberturas se anula para $U_0 = -1,5$ m/s.

O gráfico da Figura 3.7, demonstra o número de renovações em função da velocidade do vento, U_0 , verificando-se que o número de renovações é nulo para $U_0 = -1,5$ m/s, como já referido.

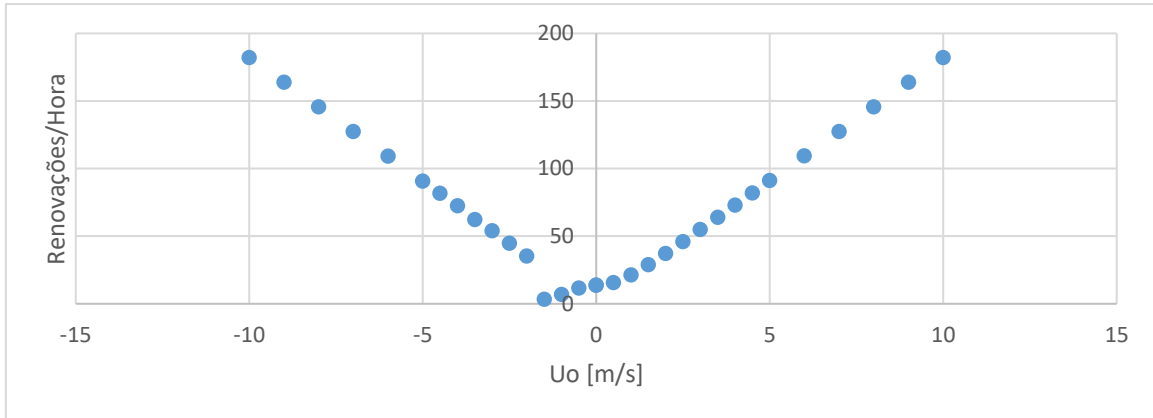


Figura 3.7 – Número de renovações em função da velocidade do vento exterior com geração de calor.

Desta forma, tem-se uma situação em que não há renovações de ar onde a temperatura é máxima, como podemos verificar na Figura 3.8, representativa da variação de temperatura em função da velocidade do vento U_0 .

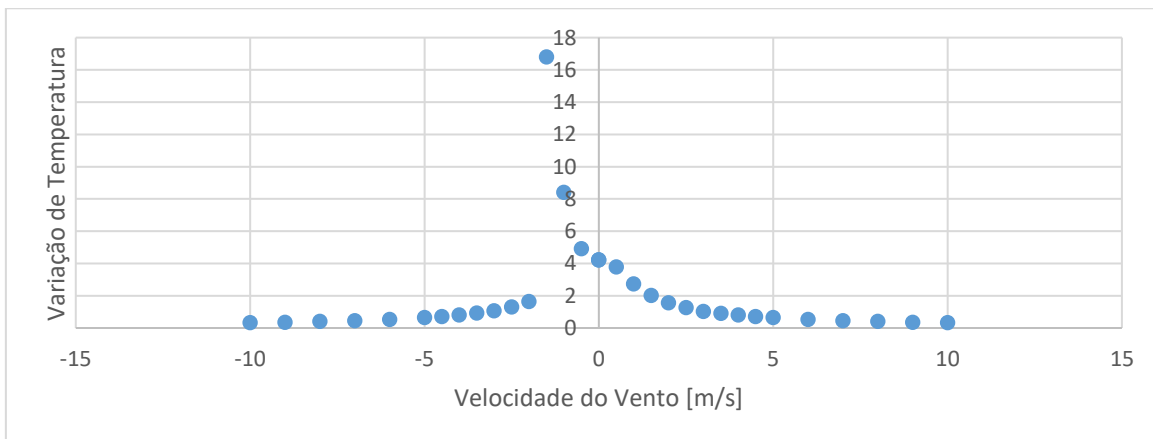


Figura 3.8 - Variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento exterior com geração de calor.

3.2. Ventilação Natural de um espaço com uma abertura de quatro elementos.

3.2.1. Caso A – Coeficiente de pressão uniforme, $C_p = 1$.

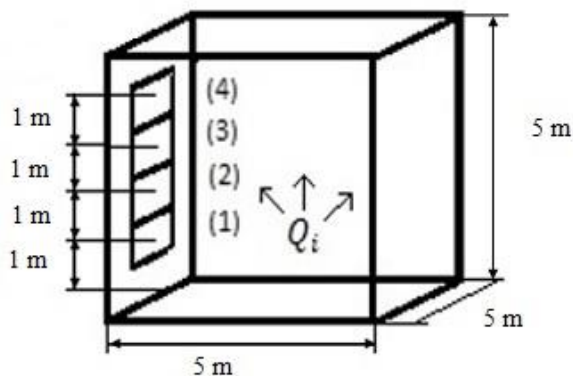


Figura 3.9 - Geometria do edifício com geração de calor no interior

Considerou-se de seguida a mesma geometria de edifício de volume de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ com paredes adiabáticas. Para este caso, tem-se uma abertura vertical com $4 \times 1 \text{ m}^2$ localizada na fachada do lado esquerdo do edifício, e nenhuma abertura do lado direito, como se pode ver na Figura 3.9. A abertura foi modelada com quatro elementos de abertura com $1 \times 1 \text{ m}^2$.

O elemento de abertura (1), tem o seu ponto médio de abertura a 1 m de distância do chão, o elemento de abertura (2) a 2 m de distância, o elemento de abertura (3) a 3 m de distância e o elemento de abertura (4) a 4 m de distância do chão.

Foi admitido que, todos os elementos de abertura possuem uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$, e uma distribuição de pressão uniforme com coeficiente de pressão positivo $C_p = 1$, como se pode ver na Figura 3.10. Foi inserida uma fonte de calor no interior do edifício para analisar o efeito da impulsão térmica.

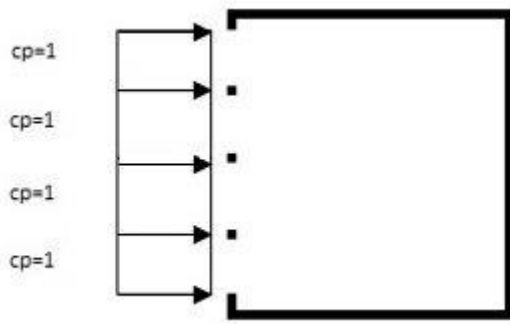


Figura 3.10 - Coeficiente de pressão constante.

Na Figura 3.12, está representado a evolução da velocidade dos quatro elementos de abertura vertical em função do calor gerado no seu interior, $Q_i = 250; 2500; 5000; 7500; 10000$ W. Foi mantida constante a velocidade do vento com o valor de, $U_0 = 1$ m/s.

Na Tabela 1, estão representados os valores da velocidade dos elementos de abertura em função do calor gerado.

Tabela 1 - Velocidades nos elementos de abertura em função do calor gerado, Caso A.

Potência [W]	Elementos de Abertura [m]			
	(1)	(2)	(3)	(4)
10000	0,5932	0,3425	-0,3425	-0,5932
7500	0,5389	0,3112	-0,3112	-0,5389
5000	0,4708	0,2718	-0,2718	-0,4708
2500	0,3737	0,2157	-0,2157	-0,3737
250	0,1735	0,1001	-0,1001	-0,1735

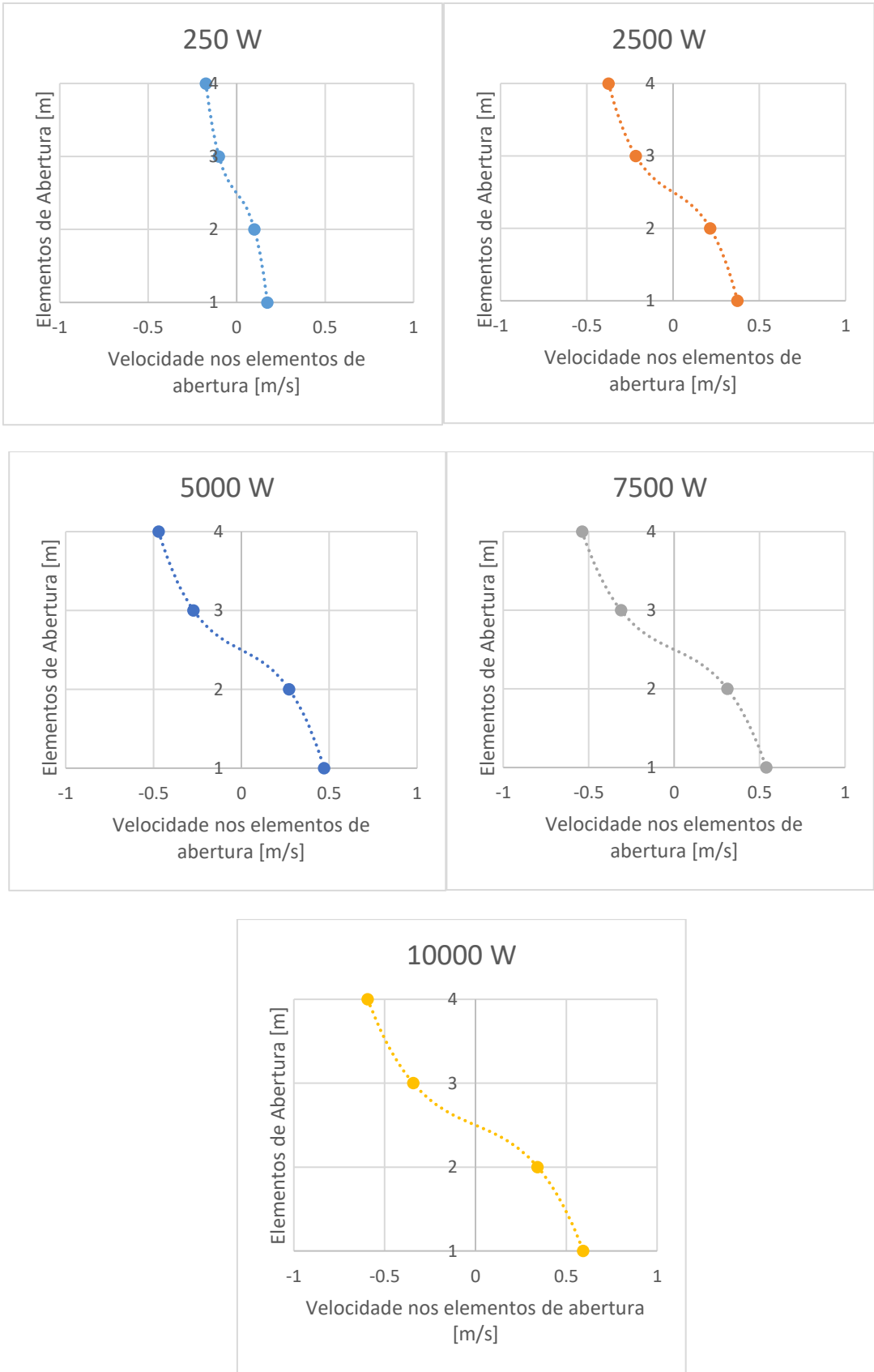


Figura 3.11 – Velocidade na abertura vertical em função da potência dissipada no interior do edifício.

Observando a Figura 3.12, verifica-se que o ar novo entra pelos elementos de abertura inferiores e o ar viciado sai pelos elementos superiores, tal como esperado. Este fenómeno acontece, devido à impulsão térmica resultante da variação de densidade do ar aquecido no interior do edifício.

É de referir que, à medida que se aumenta o calor gerado no interior do edifício aumenta a velocidade em cada um dos elementos de abertura. Ao aumentar o calor no interior do edifício, resulta uma diminuição de densidade do ar aquecido no seu interior, como já referido, o que resulta num aumento de diferenças de pressão dentro e fora do edifício. Desta forma, como o ar frio é mais denso que o ar quente, o ar frio vai ao encontro do ar quente de maneira a compensar essa diferença de densidade e de pressão, criando correntes de ar convectivas. Consequentemente é promovida a ventilação natural do edifício, aumentando o número de renovações, como podemos ver na Figura 3.12, onde está representado o número de renovações em função do calor gerado.

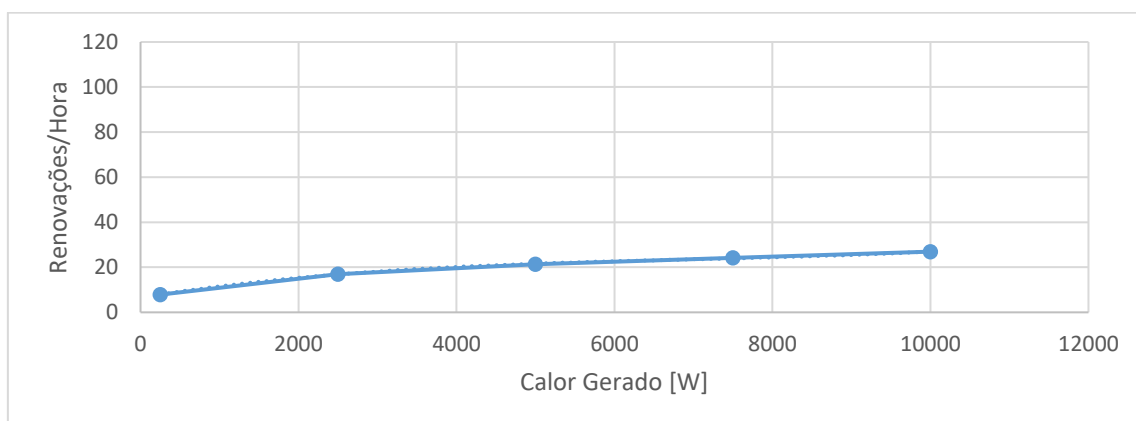


Figura 3.12 – Número de renovações em função do calor gerado.

Na Figura 3.13, está representado a variação de temperatura em função do calor gerado no interior do edifício.

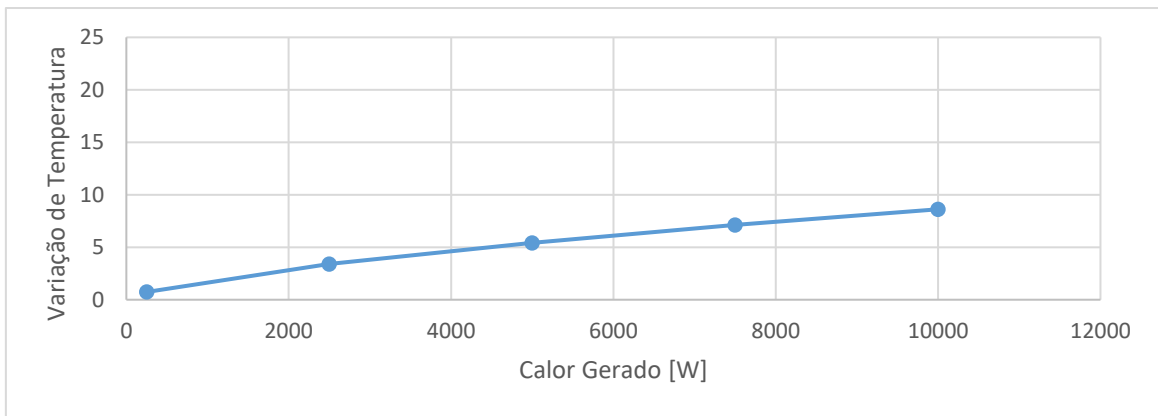


Figura 3.13 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado.

Os resultados obtidos são os esperados, à medida que aumenta o calor gerado no interior do edifício, aumenta a temperatura no seu interior.

3.2.2. Caso B – Coeficiente de pressão decrescente em altura.

De seguida, considerando a mesma geometria do edifício com vento incidente na fachada do lado esquerdo, manteve-se os mesmos valores de perda de carga dos elementos de abertura e as paredes adiabáticas. Implementou-se um gradiente de pressão decrescente em altura para os quatro elementos de abertura, como se mostra na Figura 3.14.

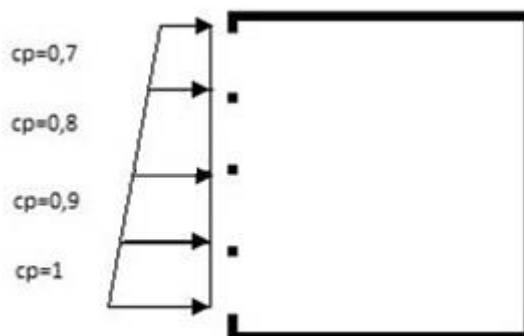


Figura 3.14 - Gradiente do coeficiente de pressão decrescente em altura.

Foi simulada uma potência térmica constante $Q_i=10000W$, variando-se a velocidade do vento U_0 , tendo-se verificado que, o gradiente de pressão admitido não altera o sentido do vento nos elementos de abertura, tal como esperado. Ocorre a saída do ar viciado pelos elementos de abertura superiores e o ar novo entra pelos elementos de abertura inferiores, como se pode ver na

Figura 3.15, onde está representado a evolução da velocidade dos elementos de abertura em função de três velocidades do vento exterior, para $U_0 = 0,001; 5; 10 \text{ m/s}$.

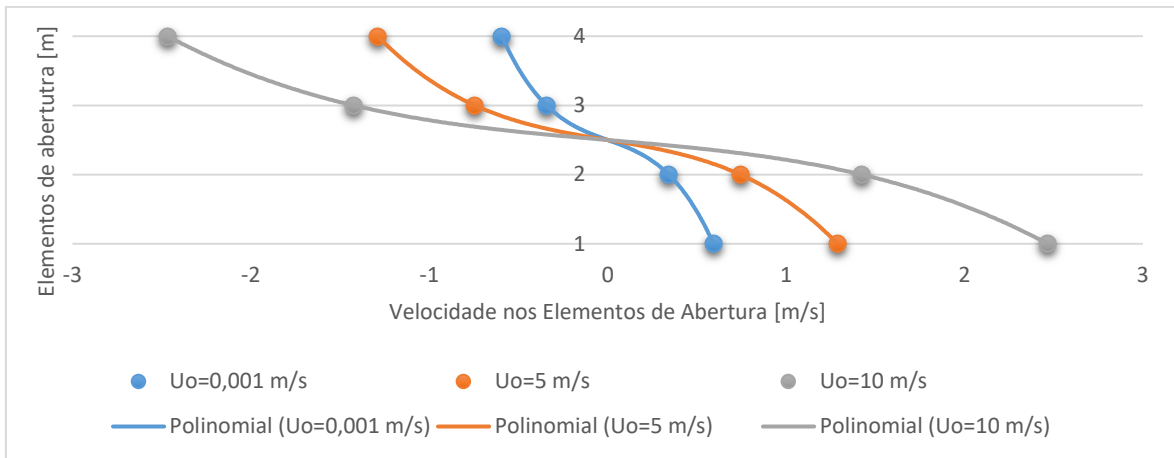


Figura 3.15 - Velocidade nos elementos de abertura em função da velocidade do vento $U_0 = 0,001; 5; 10 \text{ m/s}$ com geração de calor.

Como era esperado verifica-se que, com um gradiente de pressão decrescente em altura, a velocidade nos elementos de abertura aumenta proporcionalmente com a velocidade do vento U_0 . Este fenómeno favorece a ventilação natural, ocorrendo consequentemente um aumento no número de renovações, como se pode ver na Figura 3.16, onde está representado o número de renovações em função da velocidade do vento.

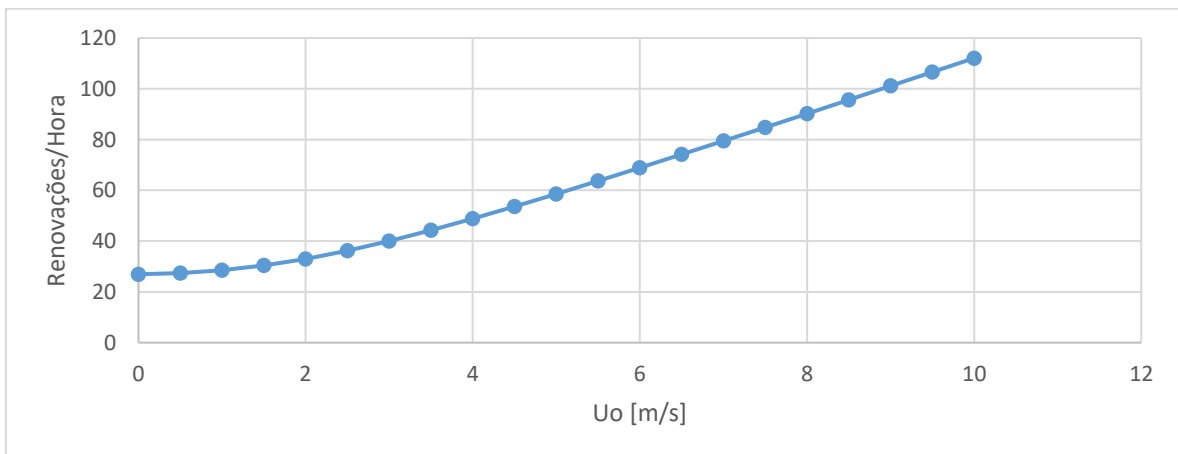


Figura 3.16 – Número de renovações função da velocidade do vento com geração de calor.

Observando o gráfico (Figura 3.16), verifica-se um aumento do número de renovações proporcional à velocidade do vento, como já referido. Desta forma, considerando a fonte de calor

no interior do edifício constante, é esperado uma diminuição da temperatura no interior do edifício com o aumento da velocidade do vento.

Na Figura 3.17, está representado a variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento.

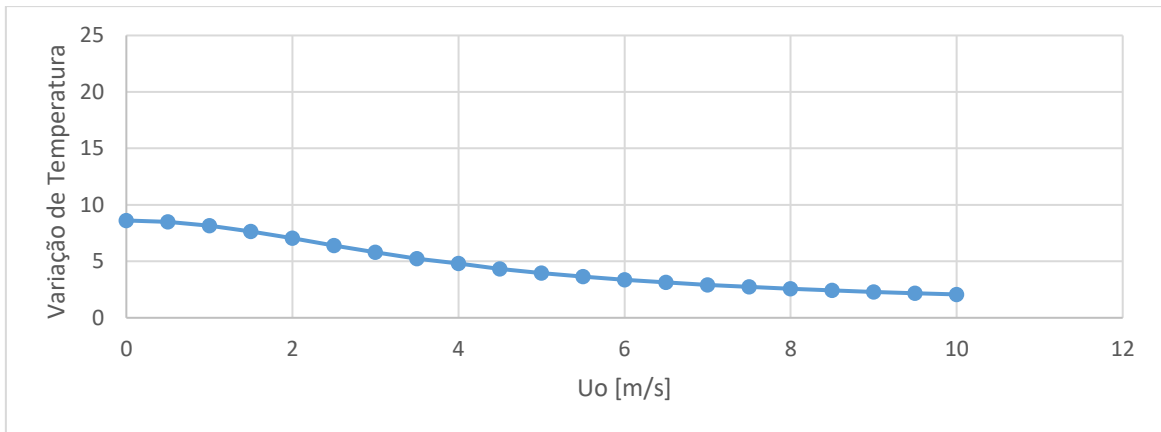


Figura 3.17 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado.

3.2.3. Caso C – Coeficiente de pressão crescente em altura.

No próximo caso de estudo inverteu-se o gradiente de pressão, ficando este crescente em altura, como mostra a Figura 3.18. Foi considerada a mesma geometria do edifício, com vento incidente na fachada do lado esquerdo, onde foram mantidos os mesmos valores de perda de carga dos elementos de abertura e as paredes adiabáticas. Considerou-se geração de calor no interior do edifício de $Q_i = 10000 W$.

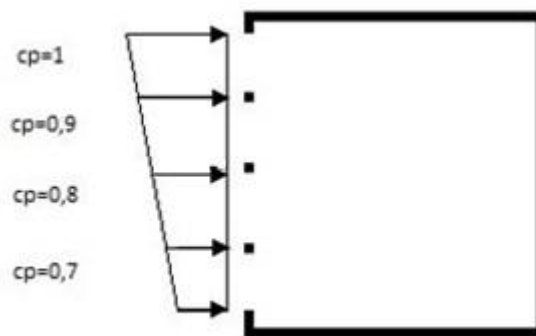


Figura 3.18 - Gradiente do coeficiente de pressão crescente em altura.

Na Figura 3.19, estão representados os resultados obtidos para as velocidades nos quatro elementos de abertura em função da velocidade do vento. Foi simulado para uma potência térmica constante $Q_i=10000\text{W}$ variando a velocidade do vento com os seguintes valores, $U_0 = 0,001; 3,5; 4; 7; 10 \text{ m/s}$. Verificou-se que, o efeito da impulsão térmica se faz sentir para valores de velocidade do vento entre $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ e $U_0 = 3,5 \text{ m/s}$ saindo o ar viciado e aquecido no interior do edifício pelos elementos de aberturas superiores, e entrando o ar novo frio pelos elementos de abertura inferiores, como é esperado na ventilação natural, algo que foi verificado no caso anterior (3.2.1). Para velocidades do vento iguais ou superiores a 4 m/s , a pressão exercida pelo vento do lado exterior dos elementos de abertura, é superior e de sinal contrário à pressão exercida no lado interior da abertura pela impulsão térmica. Desta forma, há uma inversão de sentido da velocidade dos elementos de abertura, entrando o ar novo frio pelos elementos de abertura superiores e saindo o ar viciado e aquecido no interior do edifício pelos elementos de abertura inferiores. Contrariando a convecção térmica, a ventilação natural.

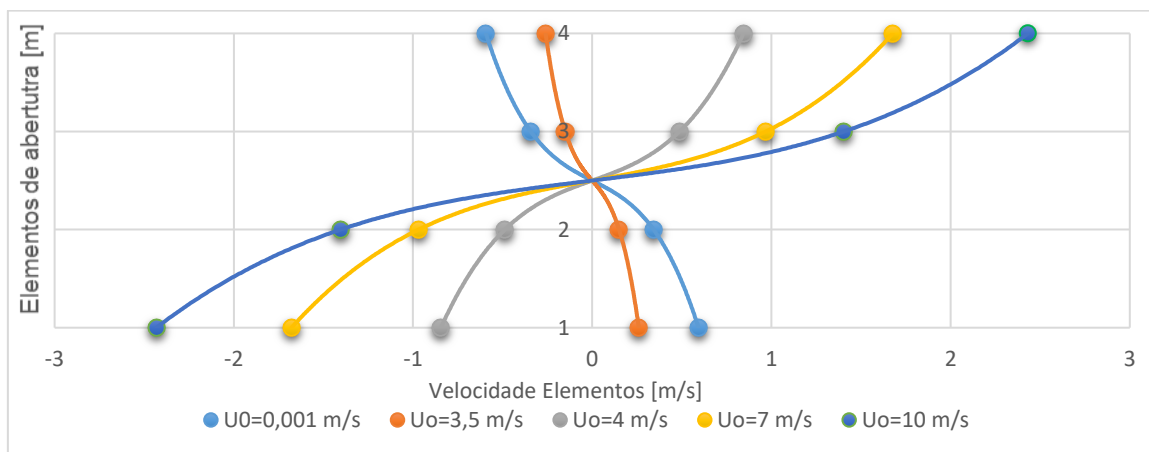


Figura 3.19 - Velocidade nos elementos de abertura em função da velocidade do vento $U_0 = 0,001; 3,5; 4; 7; 10 \text{ m/s}$ com geração de calor.

É de referir que, há um momento entre as velocidades do vento $U_0 = 3,5 \text{ m/s}$ e $U_0 = 4 \text{ m/s}$ em que a pressão exercida no lado exterior da abertura pelo vento, e a pressão exercida na parte interior da abertura pela impulsão térmica são iguais, mas de sentido contrário, anulando-se uma à outra. Por conseguinte, o número de renovações é nulo e a variação de temperatura é máxima.

Na Figura 3.20, estão representadas as renovações de ar em função da velocidade do vento.

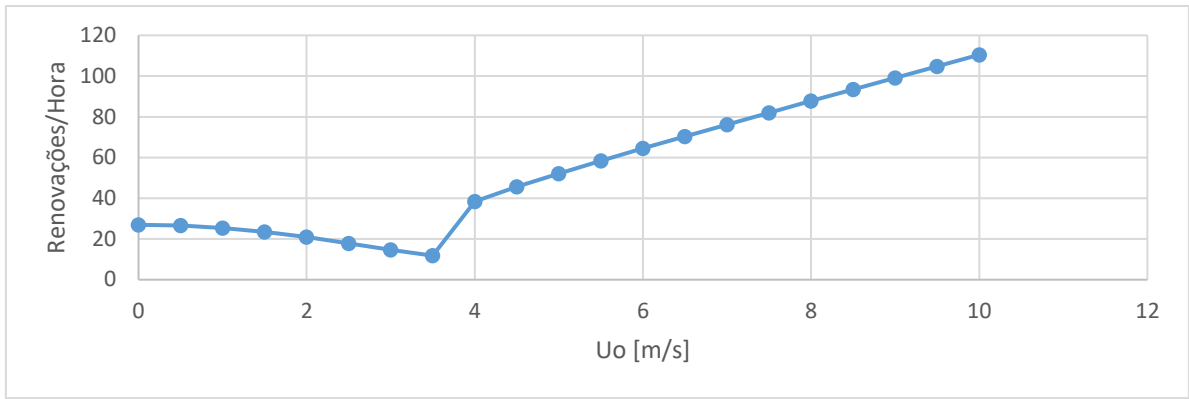


Figura 3.20 – Número de renovações em função da velocidade do vento com geração de calor.

Observando o gráfico (Figura 3.20), verifica-se uma descontinuidade na evolução do número de renovações entre $U_0=3,5$ m/s e $U_0=4$ m/s devido ao efeito da impulsão térmica como já referido. Aumentando a velocidade do vento aumenta a pressão que esta exerce no exterior da abertura, diminuindo o caudal de ar viciado que sai do edifício e conseqüentemente o ar novo que entra, o que resulta numa diminuição do número de renovações. Para valores superiores a $U_0=4$ m/s o número de renovações aumenta proporcionalmente com a velocidade do vento.

Desta forma, a variação de temperatura aumenta até $U_0=3,5$ m/s e diminui a partir de $U_0=4$ m/s com a velocidade do vento, como se pode ver na Figura 3.21 onde está representado a variação de temperatura em função da velocidade do vento.

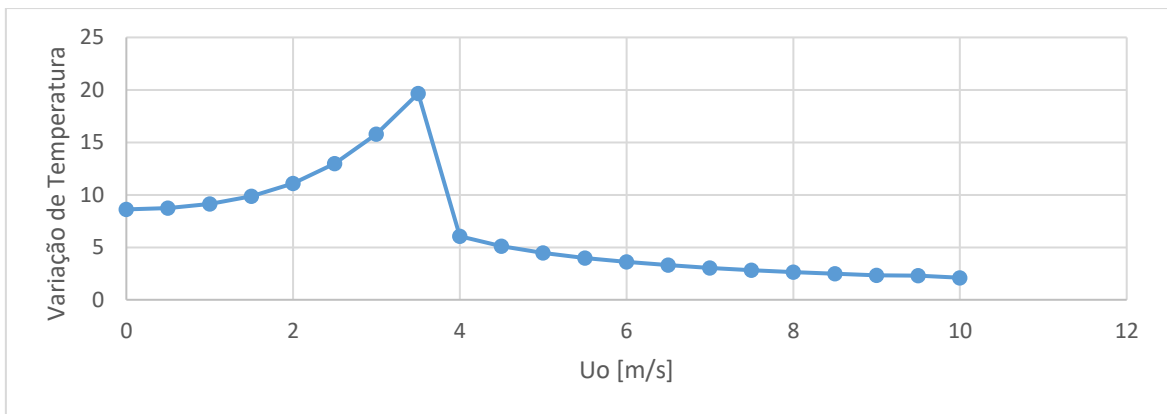


Figura 3.21 - Variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento com geração de calor.

3.2.4. Caso D – Coeficiente de pressão uniforme, $C_p = 1$ com paredes não adiabáticas.

Mantendo a mesma geometria do edifício, com vento incidente na fachada do lado esquerdo onde os elementos de abertura têm um coeficiente de pressão constante $C_p = 1$, considerou-se as paredes do edifício não adiabáticas, ou seja, as paredes e o teto do edifício têm um coeficiente global de transmissão de calor U , com $U_{parede} = 0,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{teto} = 0,79 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Pina dos Santos & Matias, 2006). O chão foi considerado adiabático.

Na Figura 3.22, está representado a velocidade dos quatro elementos de abertura vertical em função do calor gerado no seu interior, $Q_i = 250; 2500; 5000; 7500; 10000 \text{ W}$. Onde a velocidade do vento foi mantida constante com o valor de, $U_0 = 1 \text{ m/s}$.

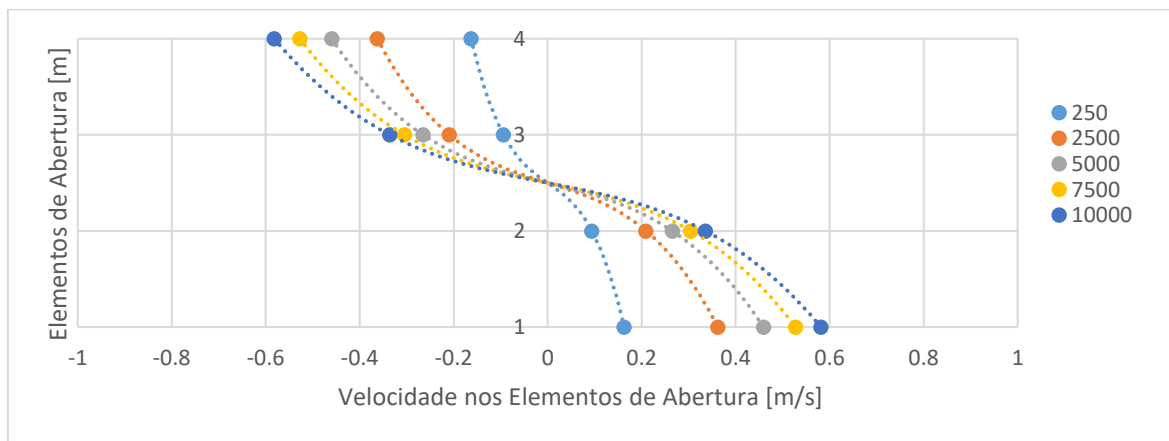


Figura 3.22 - Velocidade na abertura vertical em função do calor gerado $Q_i = 250; 2500; 5000; 7500; 10000 \text{ W}$.

Observando o gráfico (Figura 3.22), verifica-se que a linha de tendência da velocidade dos elementos de abertura, é semelhante para as respectivas potências, quando comparado com as linhas de tendência dos gráficos da Figura 3.11. Ou seja, o ar viciado sai pelos elementos de abertura superiores e o ar novo entra pelos elementos de abertura inferiores.

Na Tabela 2, está representado os resultados da velocidade dos elementos de abertura para as respectivas potências. Verificou-se que os resultados para as respectivas velocidades são inferiores aos resultados obtidos anteriormente (Tabela 1), isto porque, parte da energia é dissipada pelas paredes do edifício o que resulta na diminuição da velocidade dos elementos de abertura.

Tabela 2 – Velocidade nos elementos de abertura, Caso D.

	Elementos de Abertura [m]			
Potência [W]	(1)	(2)	(3)	(4)
10000	0,5819	0,3359	-0,3359	-0,5819
7500	0,5276	0,3046	-0,3046	-0,5276
5000	0,4595	0,2653	-0,2653	-0,4595
2500	0,3625	0,2093	-0,2093	-0,3625
250	0,1627	0,0939	-0,0939	-0,1627

Verifica-se que ocorre uma diminuição do número de renovações e um aumento na variação de temperatura, comparando com o caso A (3.2.1), como se pode observar na Figura 3.23, onde está representado o número de renovações em função do calor gerado.

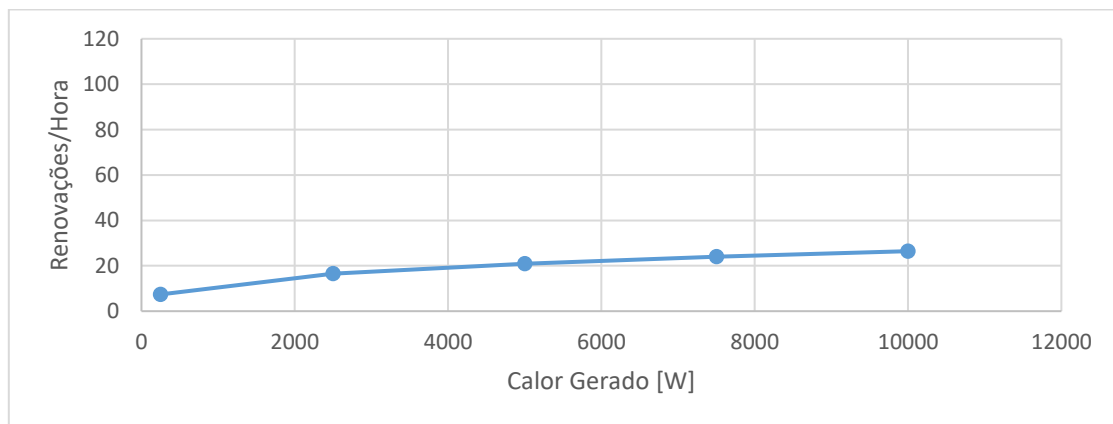


Figura 3.23 – Número de renovações em função do calor gerado.

Na Figura 3.24, está representado a variação de temperatura em função do calor gerado.

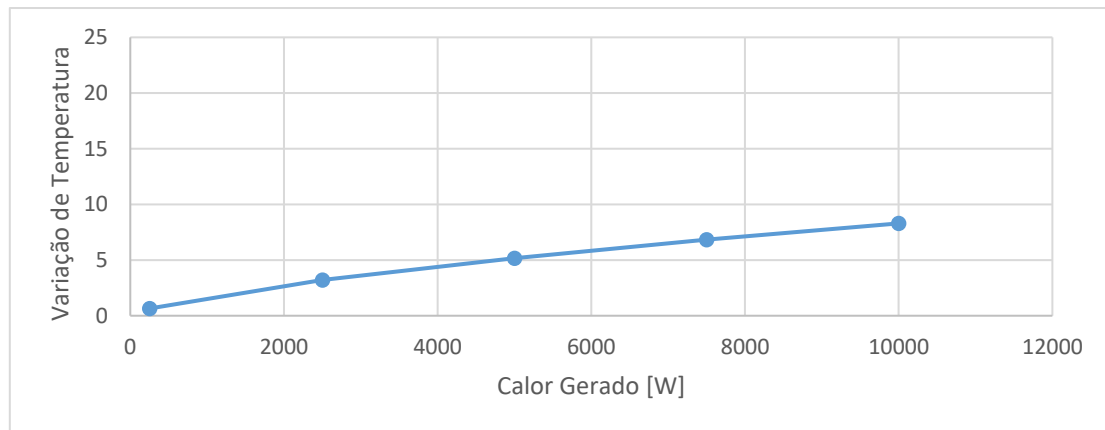


Figura 3.24 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado.

Com o propósito de perceber a influência do coeficiente global de transmissão de calor, foi verificado o comportamento do edifício para diferentes coeficientes. Desta forma, foram considerados os seguintes coeficientes de transmissão de calor.

U_{forte} :

- $U_{parede} = 0,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $U_{teto} = 0,79 \text{ W/m}^2\text{°C}$

$U_{médio}$:

- $U_{parede} = 0,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $U_{teto} = 0,158 \text{ W/m}^2\text{°C}$

U_{fraco} :

- $U_{parede} = 0,05 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $U_{teto} = 0,079 \text{ W/m}^2\text{°C}$

$U_{Adiabatico}$:

- $U_{parede} = 0,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $U_{teto} = 0,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Na Tabela 3, está representado o número de renovações e a variação de temperatura quando o edifício é sujeito a uma carga térmica de $Q_i = 10000 \text{ W}$, quando o vento tem uma velocidade $U_0 = 1 \text{ m/s}$.

Tabela 3 – Número de renovações e variação de temperatura, para diferentes coeficientes de transmissão de calor.

$Q_i = 10000 \text{ W}$ $U_0 = 1 \text{ m/s}$	Renovações/Hora	Variação de Temperatura
U_{forte}	26,4328	8,2915
U_{medio}	26,8427	8,5506
U_{fraco}	26,8947	8,5835
$U_{Adiabatico}$	26,9471	8,6173

Verifica-se que a diferença de resultados devido ao coeficiente de transmissão de calor não é significativa. Desta forma, em consequência do elevado número de renovações, o coeficiente global de transmissão de calor de origem convectiva tem maior influência que o coeficiente de transmissão de calor por condução.

Na Figura 3.25, está representado o valor das renovações de ar em função do calor gerado para os vários valores do coeficiente global de transmissão de calor, U_x . Verifica-se que a diferença de resultados entre os vários coeficientes não é perceptível no gráfico.

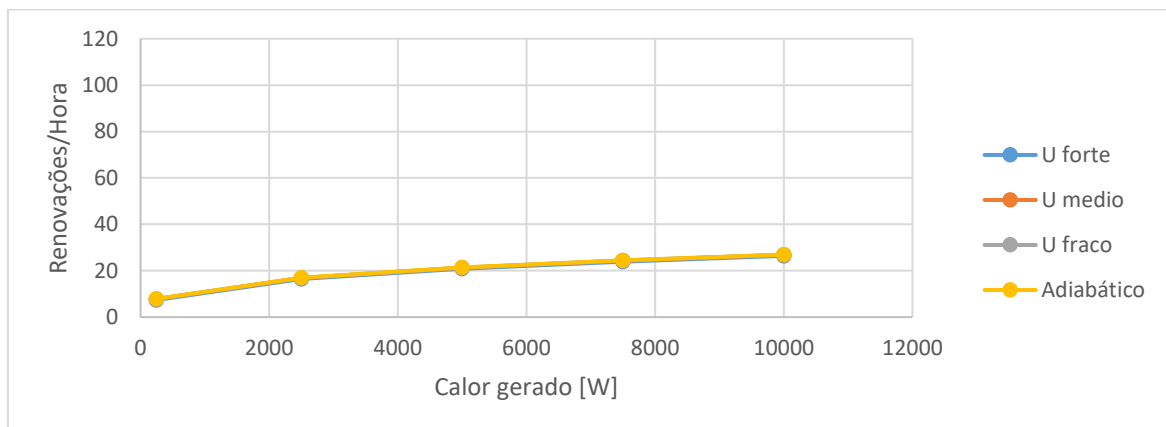


Figura 3.25 – Número de renovações em função do calor gerado.

Na Figura 3.26, está representado a variação de temperatura em função do calor gerado para os vários valores do coeficiente global de transmissão de calor, U_x . Ficando X como, forte, médio, fraco e adiabático.

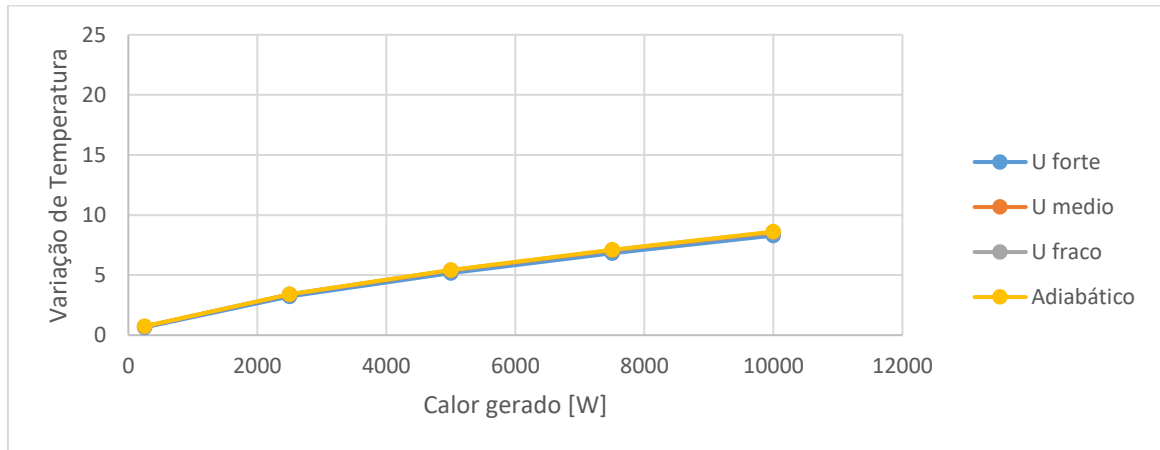


Figura 3.26 - Variação de temperatura no interior do edifício em função do calor gerado.

Observando os gráficos representados anteriormente (Figura 3.25 e Figura 3.26), onde se apresenta o número de renovações e a variação de temperatura, respectivamente, verifica-se que, quanto maior a potência maior a diferença de resultados entre os diferentes coeficientes de transmissão de calor. Havendo mais calor no interior do edifício, maior a diferença de resultados entre os vários coeficientes considerados.

3.3. Espaço com uma segunda abertura ligada a uma chaminé, com coeficiente de pressão uniforme na abertura vertical

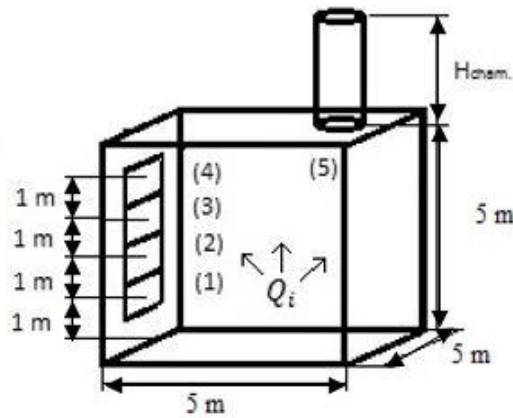


Figura 3.27 - Geometria do edifício com chaminé.

Na Figura 3.27, está representada a geometria do edifício considerada para este caso de estudo. Manteve-se a mesma geometria e a localização das aberturas do edifício, onde se introduziu mais uma abertura de ventilação, uma chaminé cilíndrica, representado por (5), no topo do edifício com acesso ao exterior. A chaminé de altura, H_{cham} , tem uma área de secção transversal de $0,785 m^2$ e uma perda de carga $\epsilon_k = 0,5$ (Holman & Lloyd, 2010). Os elementos de abertura na fachada esquerda do edifício possuem uma perda de carga $\epsilon_k=2,5$, onde foi considerado vento incidente normal à abertura vertical, ficando os elementos de abertura com um coeficiente de pressão contante $C_p = 1$.

Admitindo que as paredes do edifício são adiabáticas, foi simulado o comportamento deste quando é sujeito a diferentes fontes de calor no seu interior a diferentes alturas da chaminé, quando o vento sopra a uma velocidade constante $U_0 = 0,001 m/s$. Na Tabela 4, está representado a velocidade do vento nos elementos de abertura e da chaminé com diferentes alturas da chaminé, $H_{cham} = 5; 10; 15 m$, considerando a potência dissipada, $Q_i = 250; 10000 W$.

Tabela 4 – Velocidade nos elementos de abertura em função da potência dissipada, para diferentes alturas da chaminé.

$U_0 = 0,001 \text{ m/s}$		Velocidade nas Aberturas [m/s]				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$H_{cham} = 5 \text{ m}$	$Q_i = 10000 \text{ W}$	0,6488	0,5284	0,3707	-0,0662	-1,8876
	$Q_i = 250 \text{ W}$	0,1897	0,1545	0,1084	-0,0193	-0,5520
$H_{cham} = 10 \text{ m}$	$Q_i = 10000 \text{ W}$	0,6417	0,5393	0,4124	0,2211	-2,3111
	$Q_i = 250 \text{ W}$	0,1876	0,1577	0,1205	0,0646	-0,6758
$H_{cham} = 15 \text{ m}$	$Q_i = 10000 \text{ W}$	0,6598	0,5723	0,4688	0,3345	-2,5929
	$Q_i = 250 \text{ W}$	0,1929	0,1673	0,1370	0,0978	-0,7582

Observando a Tabela 4, lembrando que, velocidades negativas do vento significam que o ar está a sair para o exterior do edifício e velocidades positiva do vento que o ar está a entrar no interior do edifício. Verifica-se que, no caso em que a chaminé tem uma altura de 5 m, há uma porção de ar viciado que sai para o exterior através do elemento de abertura (4), sendo este o elemento da abertura vertical onde a impulsão térmica exerce a pressão mais elevada do lado interior da abertura vertical. Ao aumentar a altura da chaminé, todo ar viciado no interior do edifício é aspirado para o exterior através da chaminé, entrando ar novo pelos quatro elementos da abertura vertical.

Verificou-se que, a altura da chaminé influencia o caudal de ventilação do edifício. Desta forma, ao aumentar a altura da chaminé e conseqüentemente o seu volume, o caudal que é aspirado por esta também aumenta, resultando num número de renovações mais elevado do edifício em questão.

Na Figura 3.28, está representado o campo de velocidades das respectivas aberturas quando a chaminé tem uma altura de 5 m, 10 m e 15 m, respectivamente, considerando a potência $Q_i = 10000 W$. Os espaços preenchidos a azul representam o ar novo que entra no edifício e os espaços preenchidos a vermelho, representam o ar quente viciado que sai para o exterior do edifício.

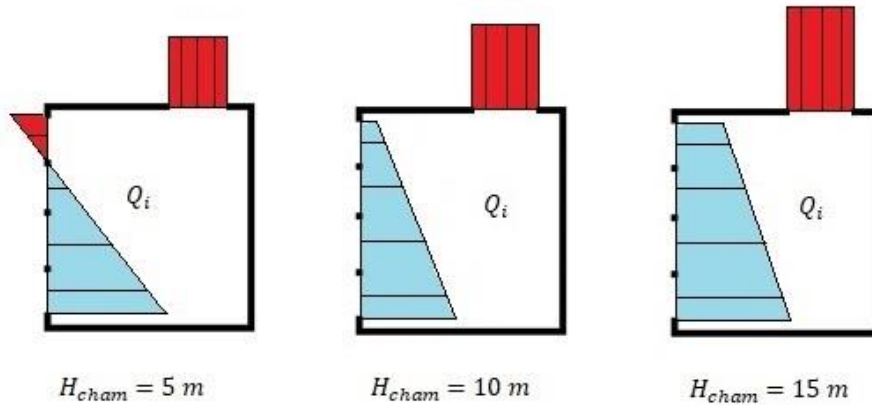


Figura 3.28 – Esquema do campo de velocidades dos elementos de abertura e chaminé.

De seguida, manteve-se a fonte de calor constante, $Q_i = 10000 W$ e variou-se a velocidade do vento exterior.

Na Tabela 5, está representada a velocidade do vento nos elementos de abertura e da chaminé, para as diferentes alturas consideradas, $H_{cham} = 5; 10; 15 m$. Quando o edifício é sujeito a uma velocidade do vento $U_0 = 10 m/s$ e quando este incide normal à fachada do lado esquerdo do edifício, ficando os elementos de abertura com um coeficiente de pressão constante $C_p = 1$, $U_0(+)$. E quando vento incidente na fachada do lado direito do edifício, ficando os elementos de abertura com um coeficiente de pressão constante $C_p = -1$, $U_0(-)$.

Tabela 5 – Velocidade nos elementos de abertura em função da velocidade do vento, para diferentes alturas da chaminé.

$Q_i = 10000 W$		Velocidade nas Aberturas [m/s]				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$H_{cham} = 5 m$	$U_0(+)$ $= 10 m/s$	2,3644	2,3595	2,3545	2,3496	-12,0102
	$U_0(-)$ $= 10m/s$	0,6351	0,4480	-0,0442	-0,4523	-0,7473
$H_{cham} = 10 m$	$U_0(+)$ $= 10 m/s$	2,3678	2,3629	2,3580	2,3530	-12,0276
	$U_0(-)$ $= 10m/s$	0,6306	0,4464	0,0292	-0,4445	-0,8430
$H_{cham} = 15 m$	$U_0(+)$ $= 10 m/s$	2,3712	2,3663	2,3613	2,3564	-12,0448
	$U_0(-)$ $= 10m/s$	0,6227	0,4446	0,0875	-0,4271	-0,9270

Observando os resultados obtidos (Tabela 5), verifica-se que quando o vento incide normal à abertura vertical, a diferença entre alturas da chaminé não é significativa. A direção do vento favorece o sentido da ventilação natural do edifício.

Por outro lado, quando o vento incide na fachada do lado direito do edifício, verifica-se que a altura da chaminé influencia o comportamento da ventilação natural do edifício, como já referido. Quando a chaminé tem uma altura de 5 m, o ar viciado sai para o exterior através desta, e dos elementos de abertura (3) e (4). Para alturas superiores da chaminé, $H_{cham} = 10 m$ e $H_{cham} = 15 m$, verifica-se que ar viciado sai através desta e do elemento de abertura (4).

Na Figura 3.29, está representado o campo de velocidades das aberturas para as duas direções do vento, quando a chaminé tem uma altura de 5 m.

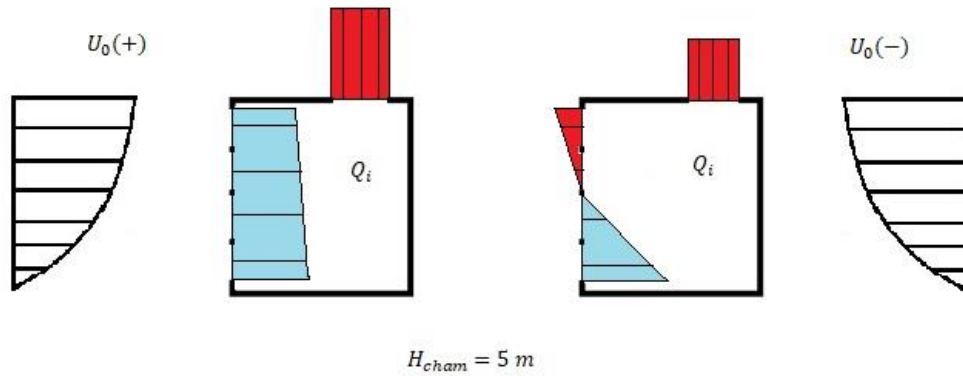


Figura 3.29- Esquema do campo de velocidades dos elementos de abertura e chaminé com $H_{cham} = 5 m$.

Na Figura 3.30, está representado o campo de velocidades das aberturas, para as duas direções do vento quando a chaminé tem uma altura de 15 m. Sendo que, para a chaminé com altura de 10 m o edifício comporta-se da mesma forma, ou seja, o ar novo e o ar viciado entra e sai do edifício através dos mesmos elementos de abertura.

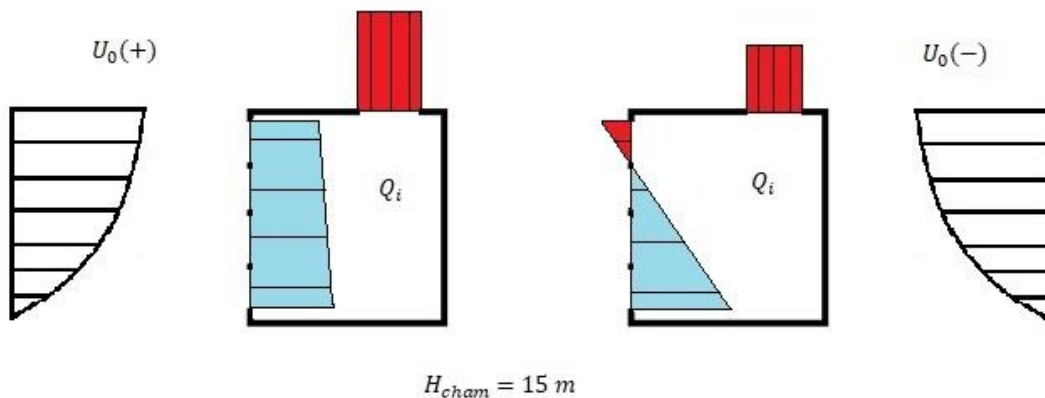


Figura 3.30 - Esquema do campo de velocidades dos elementos de abertura e chaminé com $H_{cham} = 15 m$.

Desta forma, foi estudado o comportamento do edifício quando este é sujeito a velocidades do vento, no sentido considerado positivo $U_0(+)$ e negativo $U_0(-)$, entre 0 m/s e 10 m/s.

Na Figura 3.31, está representado o número de renovações para as diferentes alturas da chaminé consideradas em função da velocidade do vento.

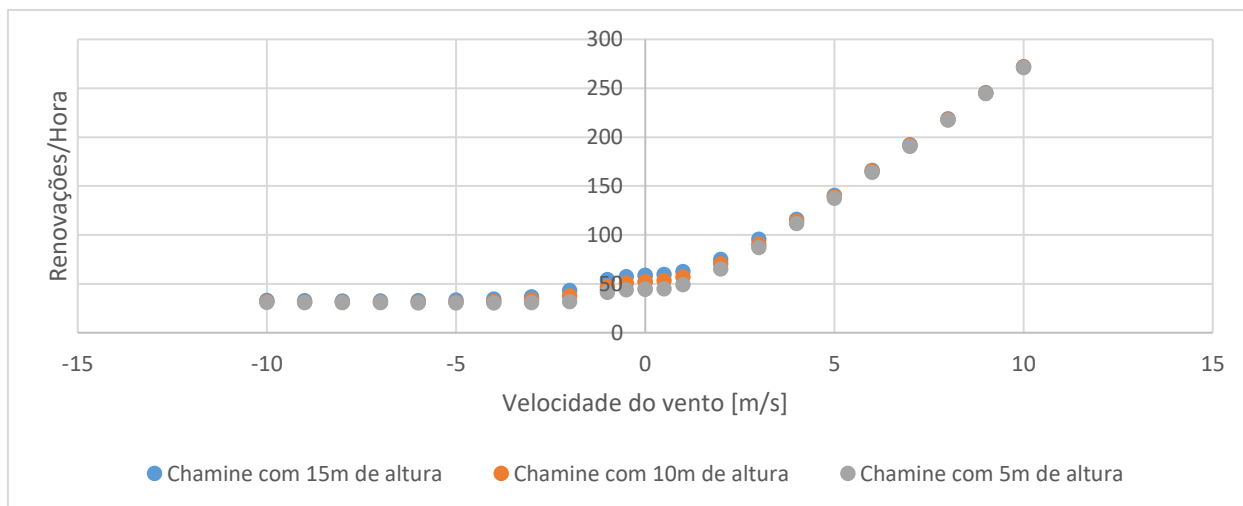


Figura 3.31 – Número de renovações em função da velocidade do vento com $H_{cham} = 5; 10; 15\text{ m}$

Observando a Figura 3.31, verifica-se que para elevadas velocidades do vento exterior não é significativa a diferença de resultados, como já referido anteriormente. Conseguindo o edifício efetuar mais renovações de ar quando o vento incide normal à abertura vertical, tal como esperado. Para velocidades do vento entre -2 m/s e 3 m/s, observa-se uma diferença no número de renovações, sendo este o intervalo de velocidades onde a altura da chaminé tem mais influência. É esperada uma variação de temperatura mais elevada quando o vento incide na fachada do lado direito do edifício, ou seja, para valores negativos da velocidade do vento, como se pode ver na Figura 3.32, onde está representado a variação de temperatura para as diferentes alturas da chaminé em função da velocidade do vento.

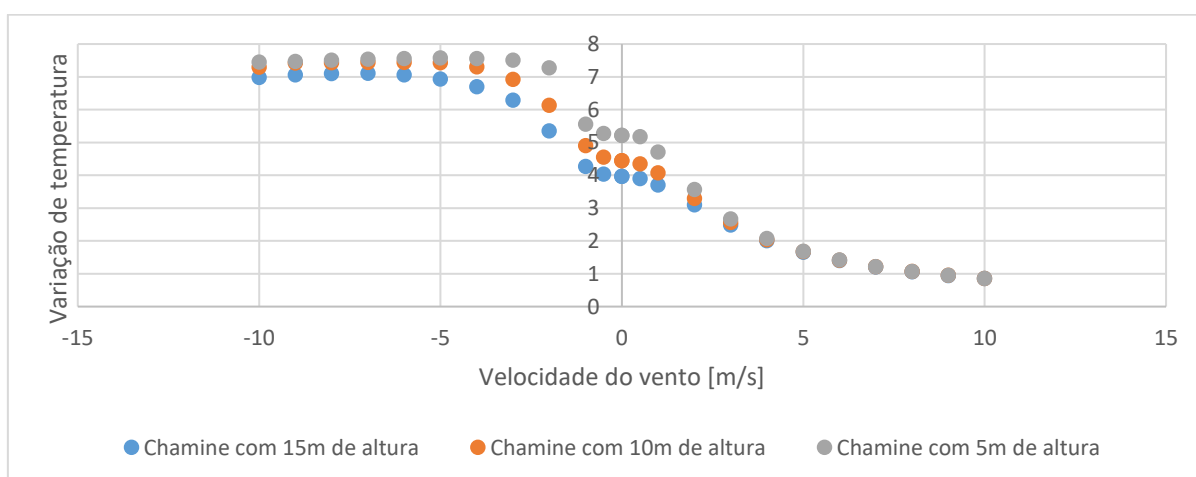


Figura 3.32 - Variação de temperatura no interior do edifício em função da velocidade do vento com $H_{cham} = 5; 10; 15\text{ m}$

Observando a Figura 3.32, verifica-se que com a evolução da velocidade do vento, quando este incide normal à abertura vertical, os resultados convergem para o mesmo valor de temperatura interior, tal como esperado.

Quando o vento incide normal à fachada do lado direito do edifício, verifica-se uma variação de temperatura entre as diferentes alturas da chaminé consideradas, isto porque, para esta direção do vento o edifício efetua menos renovações de ar, como já referido.

4. Chaminé Térmica Solar

Depois de concluídos os casos de teste (secção 3), foi feito um estudo de uma chaminé térmica solar com o objetivo de ventilar, e dentro do possível, climatizar um edifício destinado a habitação. Pretende-se, com esta chaminé térmica promover a circulação do ar no interior do edifício de forma a que este aqueça o espaço interior na época de inverno, e consiga retirar o calor do espaço na época de verão.

A chaminé térmica é um sistema de paredes exteriores que surgiu no âmbito da arquitetura solar passiva. É tido em conta o clima onde está localizado o edifício, de forma a adaptar a construção deste através de meios naturais.

Na Figura 4.1, está representado o esquema da chaminé térmica considerado neste trabalho.

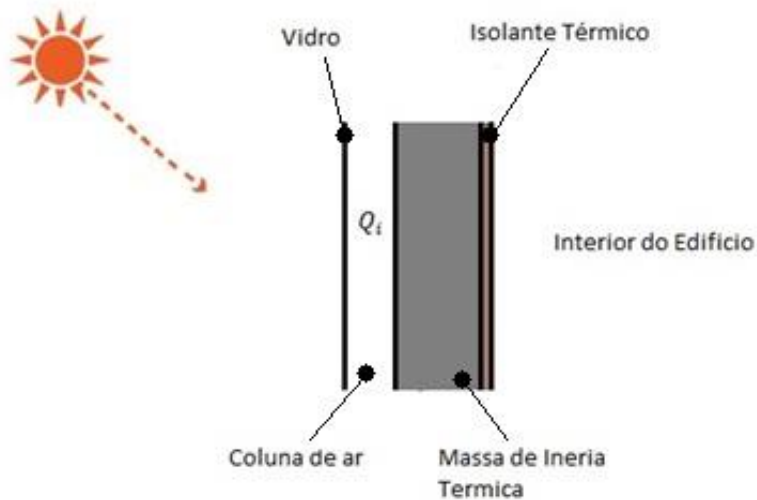


Figura 4.1 - Parede inércia térmica.

Na Figura 4.2, está representado o esquema da geometria do edifício considerado.

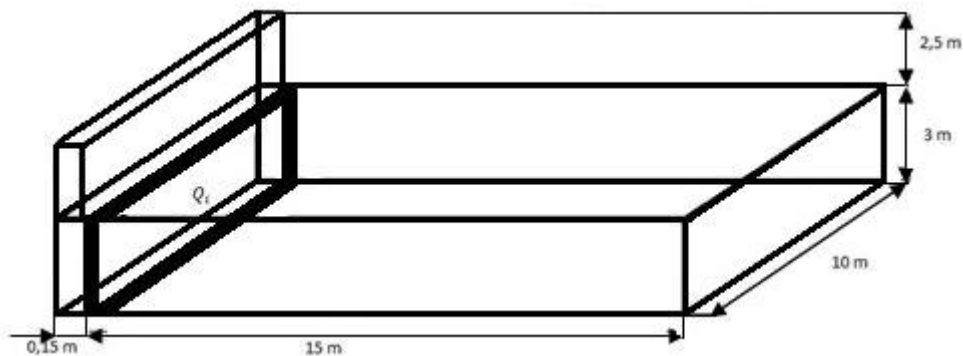


Figura 4.2- Geometria de edifício em estudo

O edifício considerado tem uma área de habitação com $15 \times 10 \text{ m}^2$ e um volume de $15 \times 10 \times 3 \text{ m}^3$. Admitiu-se uma espessura da parede de inércia térmica de $0,20 \text{ m}$ de construção média, sendo esta feita de paralelepípedos com um peso por área de 488 Kg/m^2 , ocupando a fachada do lado esquerdo do edifício. A coluna de ar, que separa o envidraçado da parede de inércia térmica, tem uma espessura de $0,15 \text{ m}$, cobrindo o envidraçado toda a área da parede de inércia térmica. Foi considerado vidro simples.

Na Figura 4.3, está representada a geometria do edifício. A vermelho estão representadas as possíveis aberturas de ventilação e a azul o envidraçado.

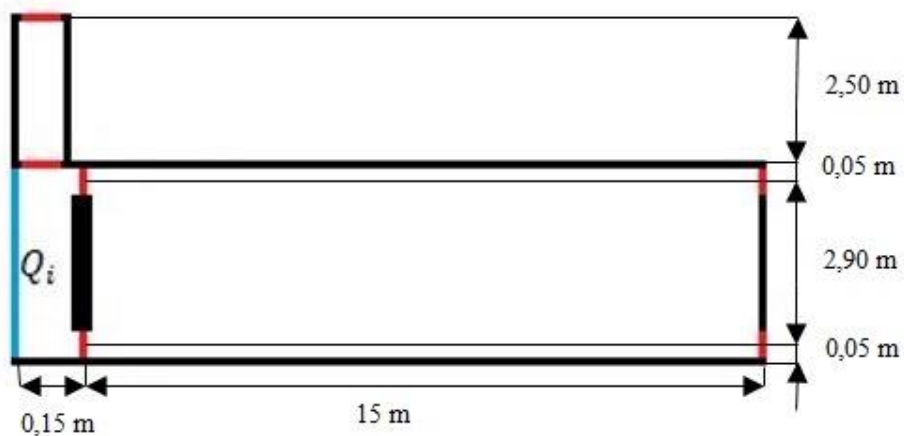


Figura 4.3 – Possíveis aberturas de ventilação consideradas para a geometria do edifício.

Foi considerada uma localização do edifício a 40° norte de latitude, encontra-se a chaminé térmica na parede do edifício direcionada para sul.

De seguida, foi calculada a potência de inércia térmica da parede. Foi admitido um fator de correção de 0,86, que considera o sombreamento. A área do envidraçado tem $10 \times 3 \text{ m}^2$.

Recorrendo ao método de cálculo da Carrier descrito no Anexo 1, na Figura 4.4 apresentam-se as potências térmicas instantâneas fornecidas à coluna de ar pela parede de inércia térmica em função da hora solar para o mês de janeiro.

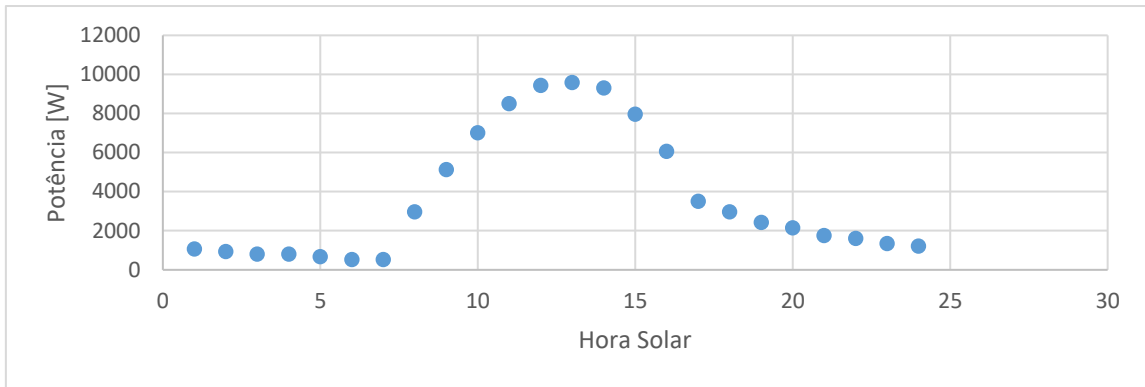


Figura 4.4 – Potência transmitida ao ar no mês de janeiro em função da hora solar.

Na Figura 4.5, apresentam-se as potências térmicas instantâneas (média horária) fornecidas à coluna de ar pela parede de inércia térmica em função da hora solar para o mês de julho.

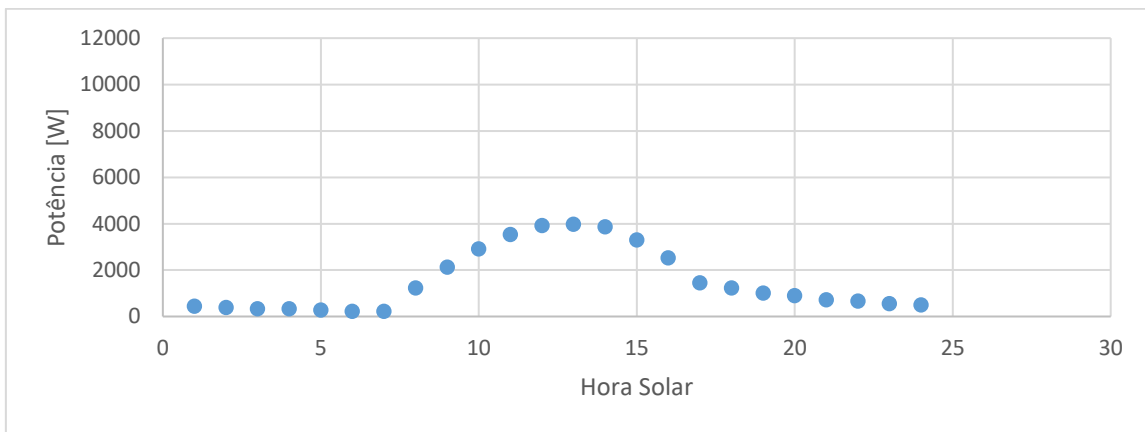


Figura 4.5 - - Potência transmitida ao ar no mês de julho em função da hora solar.

Verifica-se que, em ambos os meses a potência instantânea é máxima às 13 horas e mínima entre as 6 horas e 7 horas.

4.1. Sem chaminé e sem aberturas de ventilação

Com o objetivo de escolher o coeficiente global de transmissão de calor mais apropriado para as paredes e o teto do edifício, verificou-se as trocas de calor entre o interior do edifício e a coluna de ar. Foi considerado a geometria da Figura 4.6, com a chaminé fechada e sem aberturas de ventilação para o exterior, admitido duas aberturas interiores de área $0,1 \times 10 \text{ m}^2$ com uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$ (Holman & Lloyd, 2010), fazendo a ligação com o interior do edifício. O ponto médio da abertura superior encontra-se a 2,95 m do chão e o ponto médio da abertura inferior encontra-se a 0,05 m do chão, ficando estas com uma diferença de altura média de 2,90 m.

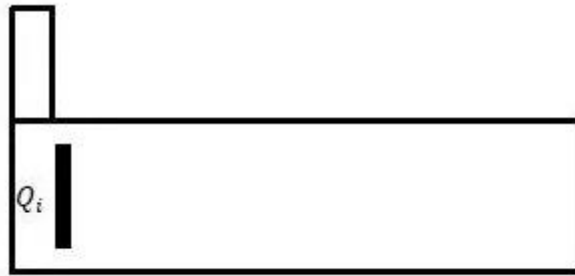


Figura 4.6 – Geometria do edifício, sem aberturas de ventilação.

De referir que, para esta geometria em que não há aberturas de ventilação entre o espaço interior e o exterior, foi necessário introduzir uma nova condição de fronteira que permite fixar o valor de pressão num desses espaços. Neste caso, a equação (2.5) para a abertura do espaço 1 foi substituída por $P_i = 0$, com $i = 1$.

Foram considerados dois coeficientes de transmissão de calor para o edifício,

U_{forte} :

- $U_{parede} = 1,25 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $U_{teto} = 1,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$

U_{fraco} :

- $U_{parede} = 0,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- $U_{teto} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$

O coeficiente de transmissão de calor para o vidro da coluna de ar, é constante em ambos os casos com $U_{vidro} = 2,3$ (Pina dos Santos & Matias, 2006).

Variando a potência no interior da coluna de ar, considerando os valores da Figura 4.4, verificou-se o comportamento do edifício em relação à variação de temperatura e à taxa de circulação de ar no interior da habitação para os diferentes coeficientes de transmissão de calor.

Na Figura 4.7, está representada a variação de temperatura no interior do edifício em função da hora solar.

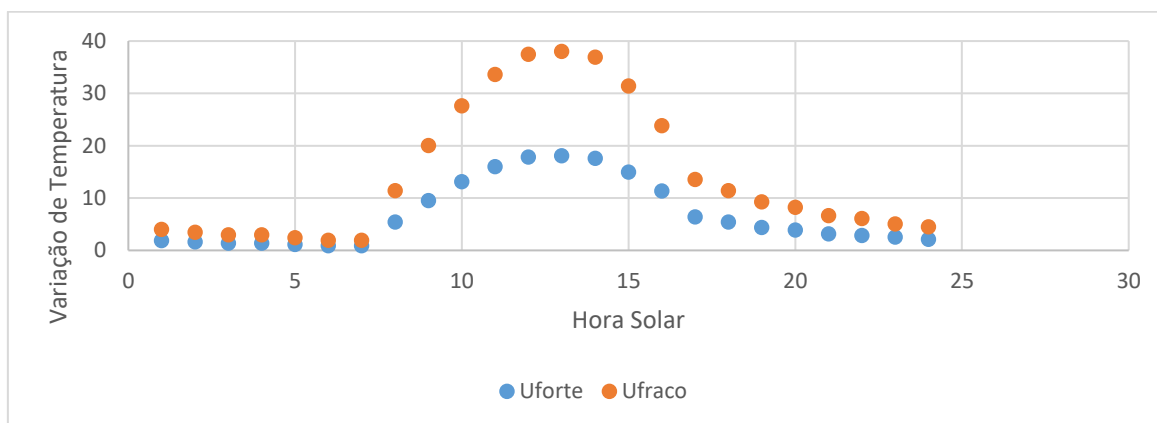


Figura 4.7 – Variação de temperatura no interior do edifício em função da hora solar no mês de Janeiro em função da hora solar.

Observando a Figura 4.7, verifica-se que a temperatura no interior do edifício aumenta com a potência, tal como esperado. É gerada uma circulação de ar entre a coluna de ar e o interior do edifício devido às correntes de convecção. O ar quente que vem da coluna de ar, entra para o interior do edifício (aquecendo-o) pela abertura superior, e o ar que se encontra no interior do edifício entra para a coluna de ar (onde é aquecido) pela abertura inferior.

Na Figura 4.8, está representada a taxa de circulação do ar interior em função da hora solar.

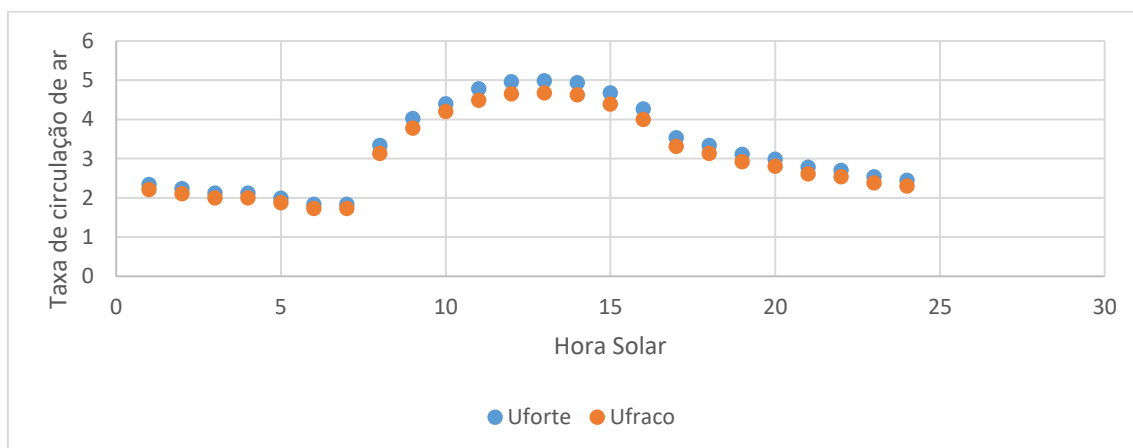


Figura 4.8 - Taxa de circulação de ar no mês de janeiro em função da hora solar.

Verifica-se uma ligeira diferença de resultados entre os coeficientes de transmissão de calor. Devido ao coeficiente global de transmissão de calor U_{fraco} dissipar menos energia através das paredes do edifício para o exterior, a diferença de temperatura entre a coluna de ar e o interior do edifício é menor em relação a U_{forte} , resultando numa taxa de circulação de ar inferior.

Apesar desta situação não ser viável por não haver renovações de ar, verificaram-se variações de temperatura bastante elevadas para os coeficientes de transmissão de calor mais fracos, ultrapassando o limite de conforto térmico. Desta forma, optou-se por usar os coeficientes de transmissão de calor mais fortes.

De seguida, admitindo o coeficiente de transmissão de calor U_{forte} , foi verificada a variação de temperatura (Figura 4.9) e a taxa de circulação de ar (Figura 4.10) considerando o mês de julho.

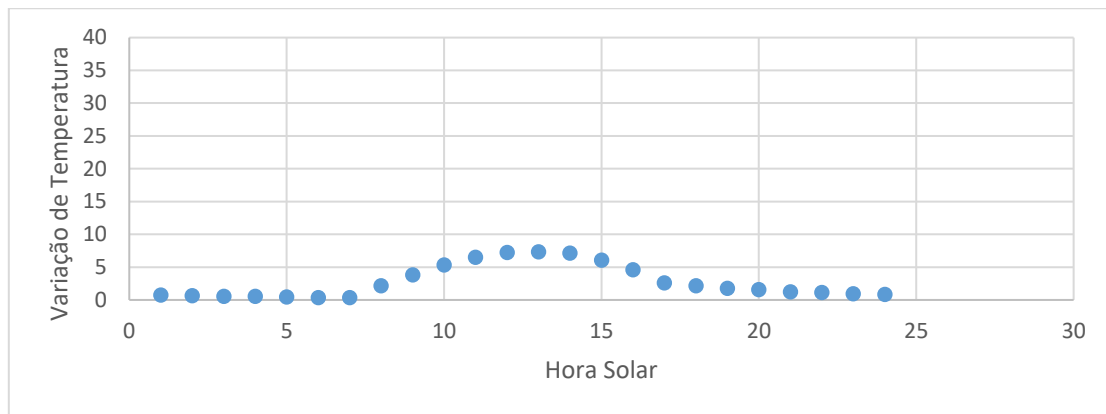


Figura 4.9 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho em função da hora solar.

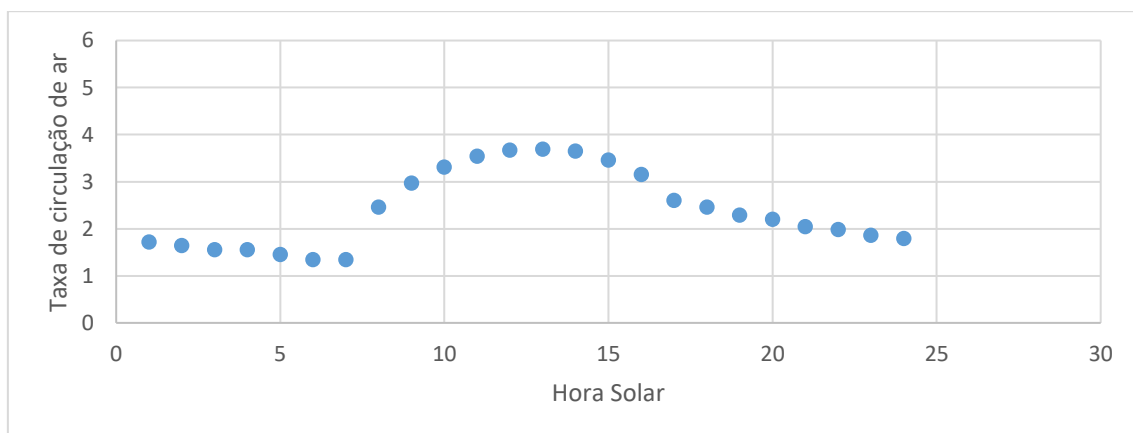


Figura 4.10 - Taxa de circulação de ar no mês julho em função da hora solar.

Apesar desta solução não promover a qualidade do ar interior ao não efetuar renovações de ar, permite o aquecimento no inverno. No verão, o seu efeito é indesejável.

4.2. Chaminé fechada e duas aberturas de ventilação para o exterior

4.2.1. Estação de aquecimento.

Considerando o mês de janeiro, altura do ano onde as pessoas procuram conforto térmico através do aquecimento dos espaços interiores, foi considerado duas aberturas exteriores situadas na fachada do lado direito do edifício. O ponto médio da abertura superior encontra-se a 2,95 m do chão e o ponto médio da abertura inferior a 0,05 m do chão. Ambas as aberturas têm uma área de $0,1 \times 10 \text{ m}^2$ e uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$ (Holman & Lloyd, 2010), como se pode ver na Figura 4.11. Manteve-se as mesmas aberturas interiores

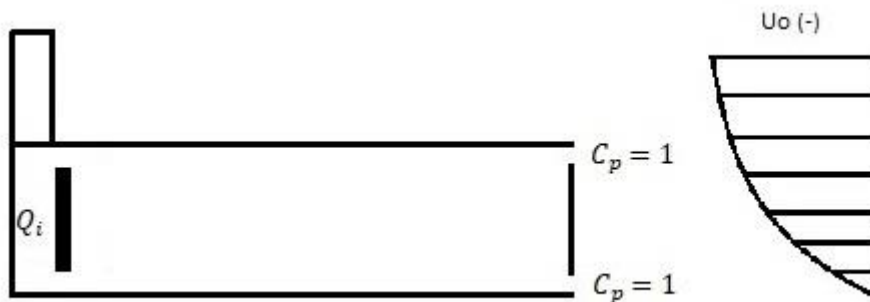


Figura 4.11 – Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado direito.

Foi considerado vento incidente na fachada do lado direito do edifício com velocidade $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$, ficando as duas aberturas exteriores com um coeficiente de pressão $C_p = 1$ (CEN, 2010), como se pode ver na Figura 4.12, onde está representado o edifício e o sentido de circulação do ar através das aberturas de ventilação.

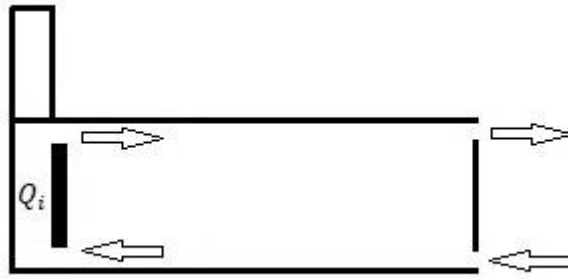


Figura 4.12 - Circulação de ar no mês de janeiro com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito.

Ao observar a Figura 4.12, é de notar que, uma porção de ar no interior do edifício entra para a coluna de ar e volta para o interior do edifício, ou seja, há recirculação de ar viciado no interior do edifício. O ar novo que entra no edifício, depois de ser poluído (por mobílias ou pessoas que se encontrem no interior da habitação) entra na coluna de ar, onde é aquecido pela parede, voltando a entrar para o interior do edifício aquecendo-o. Na Figura 4.13, pode-se verificar a taxa de circulação de ar.

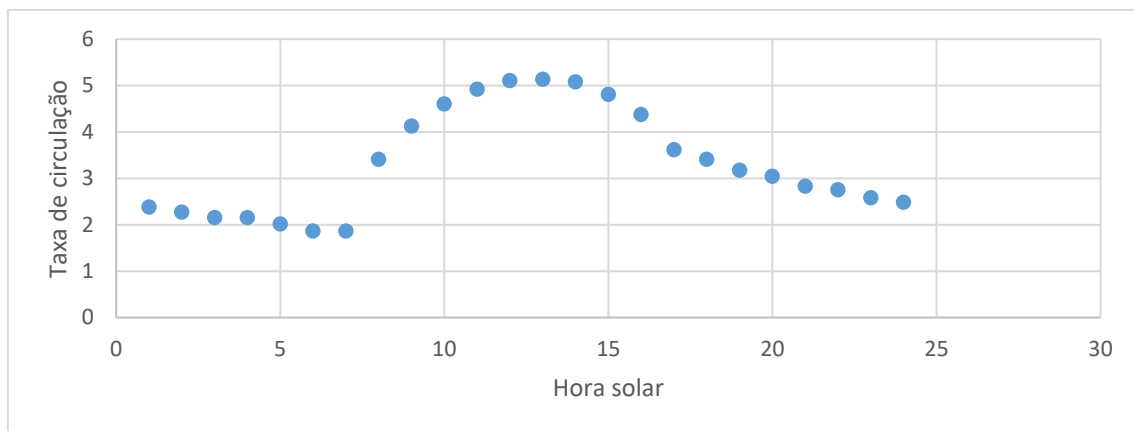


Figura 4.13 – Taxa de circulação de ar no mês de janeiro com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Na Figura 4.14, está representada a variação de temperatura em função da hora solar, quando o vento tem velocidade $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$.

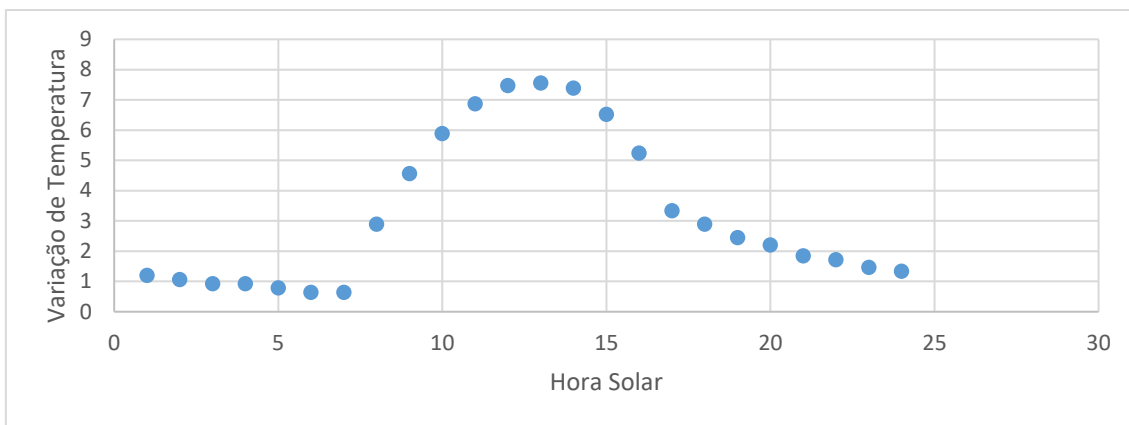


Figura 4.14 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de janeiro com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Na Figura 4.15, está representado o número de renovações em função da hora solar, quando o vento tem uma velocidade, $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$. Foi considerado que, 1 renovação de ar é suficiente para garantir uma qualidade do ar interior nos meses de aquecimento (Inverno).

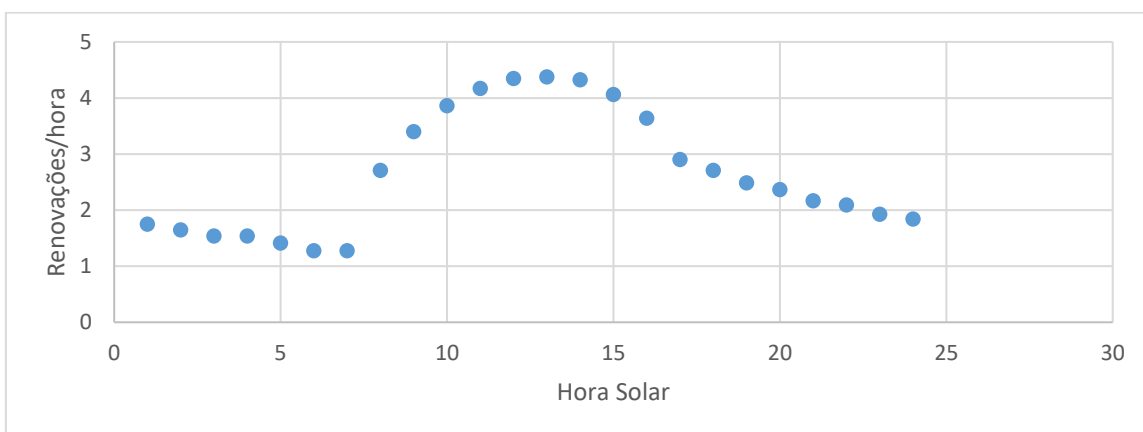


Figura 4.15 - Número de renovações no mês de janeiro com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Observando os resultados dos gráficos (Figura 4.14 e Figura 4.15), verifica-se uma elevada taxa de renovações de ar, conseguindo reter o calor gerado na coluna de ar no interior da habitação.

Verificou-se que, os resultados de variação de temperatura, de renovações de ar e taxa de circulação de ar para velocidades do vento exterior mais elevadas, permanecem iguais aos vistos anteriormente (Figura 4.14 e Figura 4.15). Como ambas as aberturas de ventilação exterior estão localizadas na mesma fachada do edifício, ficam com o mesmo coeficiente de pressão. Havendo conservação de massa, o volume de ar que entra para o interior do edifício é igual ao volume de ar que sai do mesmo, como foi visto na validação do programa (secção 3). Desta forma, são as

correntes de convecção térmica geradas na coluna de ar que determinam o caudal de ar que entra e sai do edifício, e conseqüentemente as renovações de ar e a variação de temperatura da habitação.

Nos gráficos seguintes (Figura 4.16 e Figura 4.17), está representada a variação de temperatura e número de renovações em função da hora solar quando o vento tem uma velocidade de $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito do edifício.

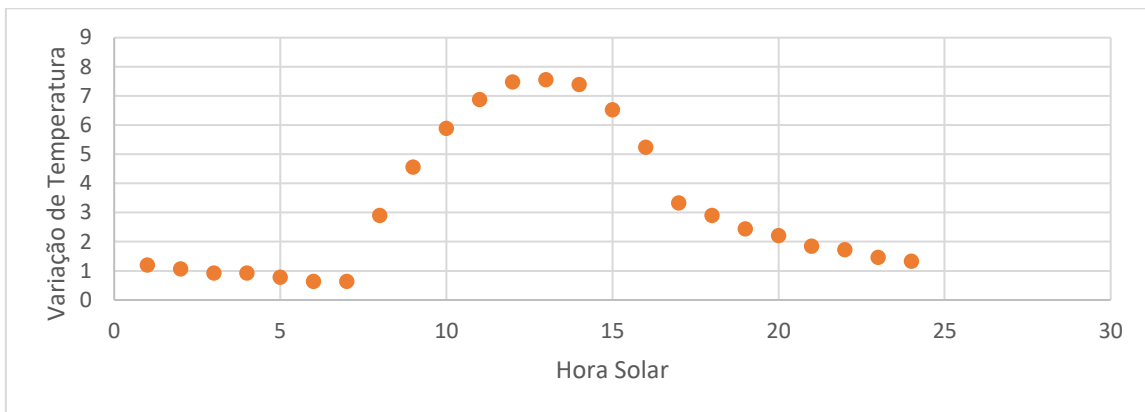


Figura 4.16 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de janeiro com $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

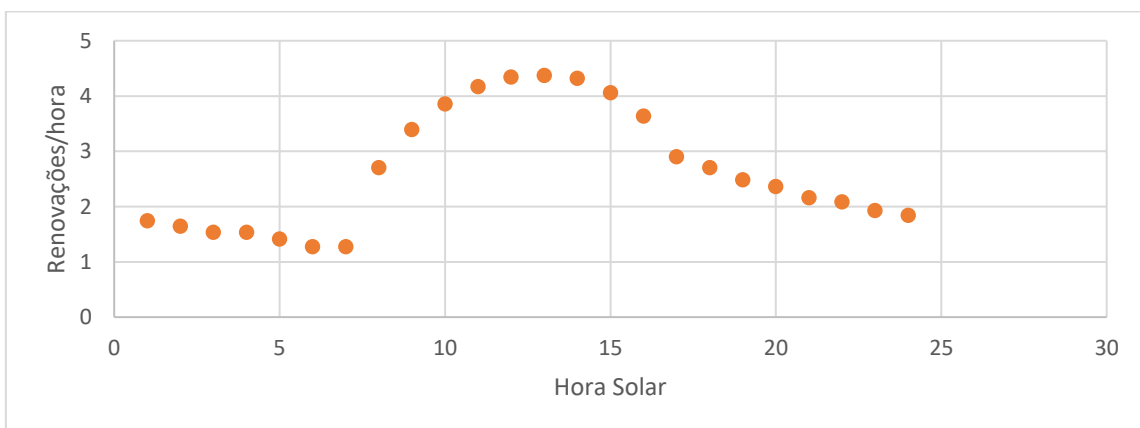


Figura 4.17 - Número de renovações no mês de janeiro com $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Como esperado, os resultados permanecem iguais aos calculados para uma velocidade do vento nula, $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$, tal como a taxa de circulação de ar, como se pode ver na Figura 4.18.

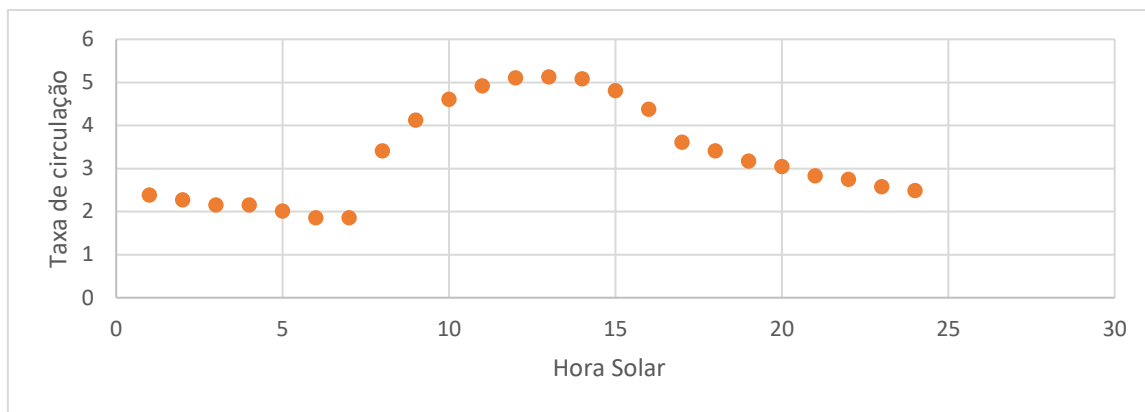


Figura 4.18 - Taxa de circulação de ar no mês de janeiro com, $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

De seguida, foi-se verificar o comportamento do edifício quando este é sujeito a vento incidente na fachada do lado esquerdo. Ficando as aberturas de ventilação exteriores com um coeficiente de pressão $C_p = -0,3$ (CEN, 2010), como se pode ver na Figura 4.19.

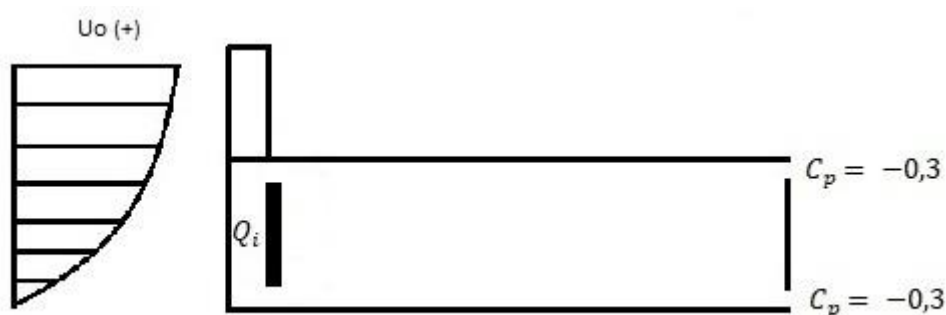


Figura 4.19 - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado esquerdo.

Nos gráficos seguintes (Figura 4.20, Figura 4.21, e Figura 4.22), está representadas a variação de temperatura, o número de renovações e a taxa de circulação de ar, respetivamente, quando o vento incide na fachada do lado esquerdo do edifício com velocidade nula, $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$.

Verificou-se que os resultados são iguais aos vistos anteriormente, com vento incidente na fachada do lado direito do edifício com uma velocidade do vento exterior de $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ e $U_0 = 5 \text{ m/s}$. Desta forma, apenas serão representados os gráficos de variação de temperatura, do número renovações e da taxa de circulação de ar, para uma velocidade do vento exterior de $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$.

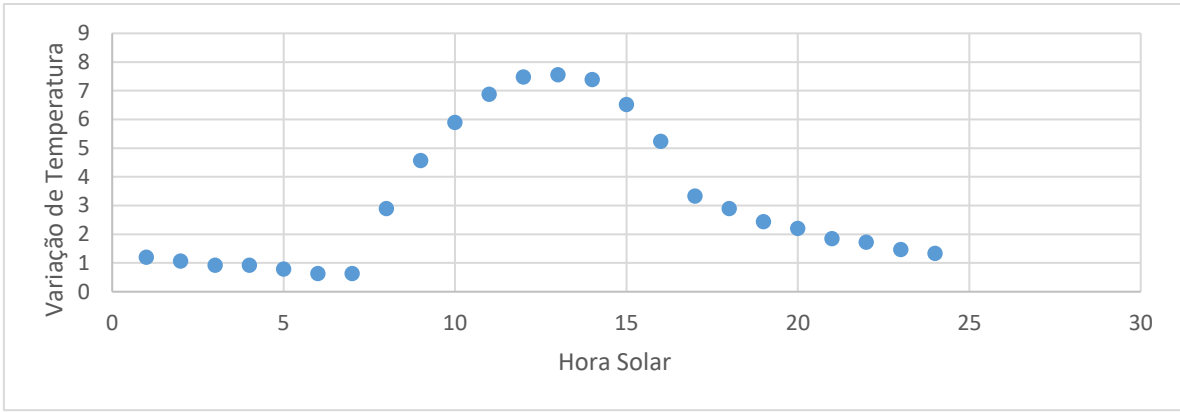


Figura 4.20 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

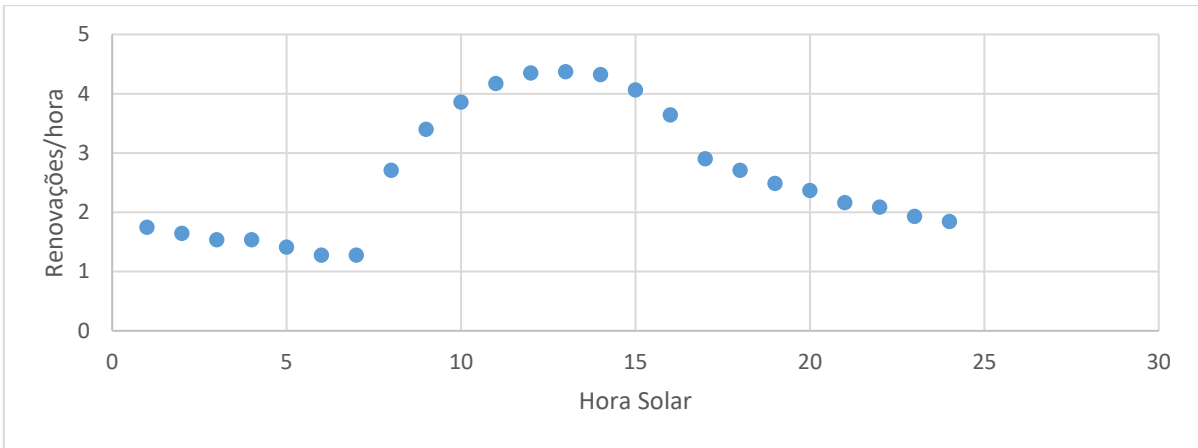


Figura 4.21 – Número de renovações no mês de janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

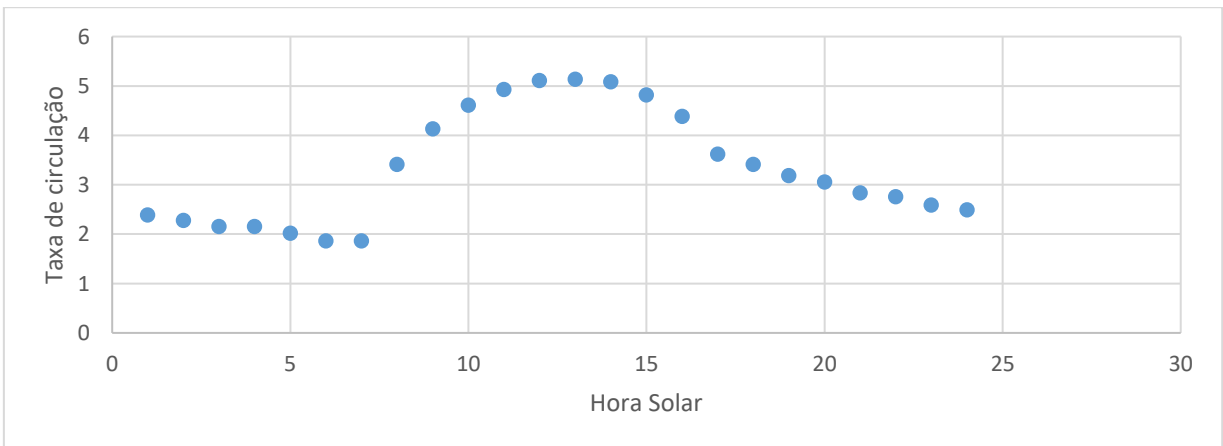


Figura 4.22 - Taxa de circulação de ar no mês de janeiro com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

Depois dos testes realizados ao edifício com a chaminé fechada e duas aberturas de ventilação exterior, conclui-se que, quando estas estão localizadas na mesma fachada do edifício, admitem o mesmo coeficiente de pressão numa situação estacionária. A pressão exercida pelo vento no lado exterior da abertura de ventilação é igual em ambas as aberturas. Por outro lado, devido à impulsão térmica, a pressão exercida no lado interior da abertura de ventilação não é igual para ambas as aberturas, ficando a abertura mais alta com uma pressão interior mais elevada que a abertura inferior. Desta forma, é a impulsão térmica gerada na coluna de ar que impõe o caudal de ar que entra e sai do edifício, como já referido.

De seguida, como o edifício é um espaço destinado à habitação, considerou-se que uma pessoa liberta uma potência calorífica média de 120 W. Foi testado para uma velocidade do vento nula com $U_0 = 0,001$ m/s e $C_p = 1$ as renovações de ar e a variação de temperatura. Admitindo que se encontra 1 pessoa no interior do edifício equivalente a 120 W, 5 pessoas, equivalente a 600 W, e 10 pessoas no interior da habitação, equivalente a 1200 W.

Nos gráficos seguintes (Figura 4.23, Figura 4.24, e Figura 4.25), está representada a variação de temperatura, o número de renovações e a taxa de circulação de ar, respetivamente, em função da hora solar, e do número de pessoas no interior do edifício.

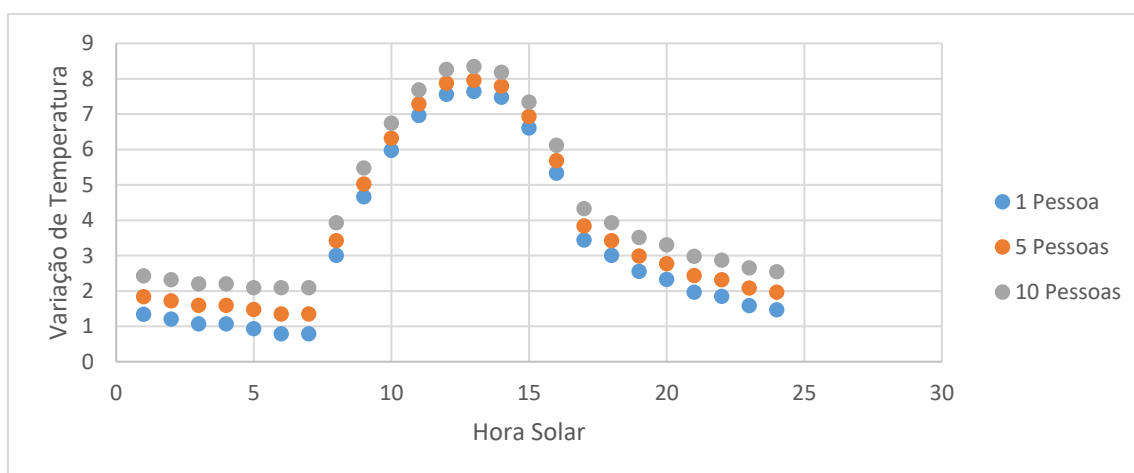


Figura 4.23 -Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Janeiro quando este está habitado em função da hora solar.

Observando a Figura 4.23 -Variação de temperatura no interior do edifício no mês de Janeiro quando este está habitado em função da hora solar verifica-se que a temperatura no interior do edifício aumenta proporcionalmente ao número de pessoas no seu interior, como era esperado.

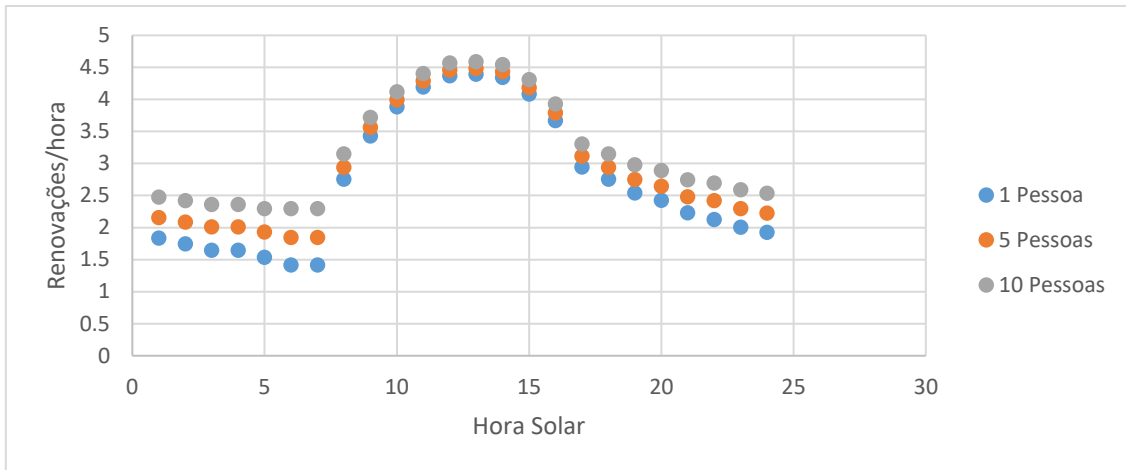


Figura 4.24 – Número de renovações no mês de janeiro quando o edifício está habitado em função da hora solar.

Verifica-se que, o número de renovações aumenta com o número de pessoas no interior da habitação, garantindo um ambiente saudável e conforto térmico na habitação.

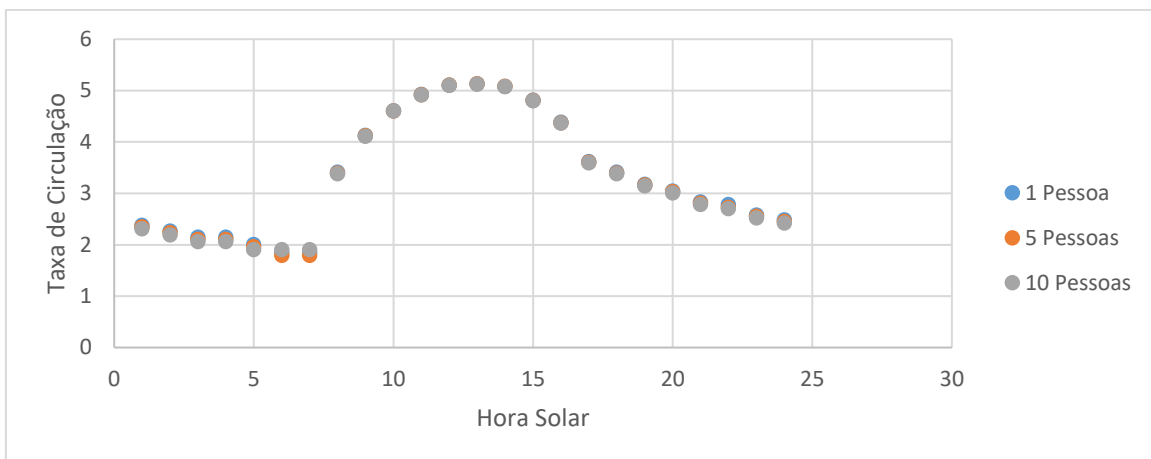


Figura 4.25 – Taxa de circulação de ar no mês de janeiro quando o edifício está habitado em função da hora solar.

Observando a Figura 4.25, a taxa de circulação de ar mantém-se constante entre as diferentes ocupações no interior da habitação. Verificando-se que esta é independente do número de pessoas que se encontra no interior da habitação. Assim, a variação de temperatura no interior do edifício (Figura 4.23), deve-se apenas ao calor transmitido pelas pessoas ao ar. Devido a esse aumento de temperatura aumenta as renovações de ar, como já referido.

4.2.2. Estação de arrefecimento

De seguida, foi testado o comportamento do edifício para o mês de julho. A geometria do edifício permaneceu a mesma, as aberturas de ventilação exteriores e interiores têm $1 m^2$ de área. Considerou-se vento incidente na fachada do lado esquerdo com velocidade nula, $U_0 = 0,001 m/s$.

Na Figura 4.26, está representada a variação de temperatura em função da hora solar no mês de julho.

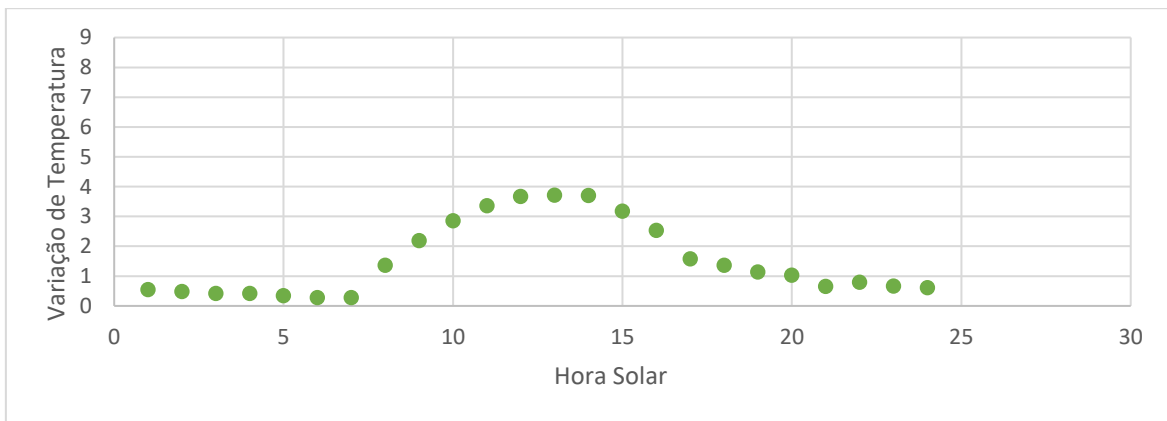


Figura 4.26 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 0,001 m/s$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Verifica-se um aumento da variação temperatura no edifício, tal como esperado. Apesar da temperatura atingir valores inferiores no mês de julho relativamente ao mês de janeiro, esta solução tem o efeito indesejado nas estações do ano quentes, uma vez que o objetivo será retirar o calor acumulado no interior do edifício, efetuando as renovações de ar necessárias para esse efeito.

Na Figura 4.27, está representado o número de renovações em função da hora solar. Confirmando-se que esta solução não serve para a estação de arrefecimento. Admitiu-se para a estação de arrefecimento, o mínimo de 1,5 renovações de ar que não é conseguido pelo edifício em estudo.

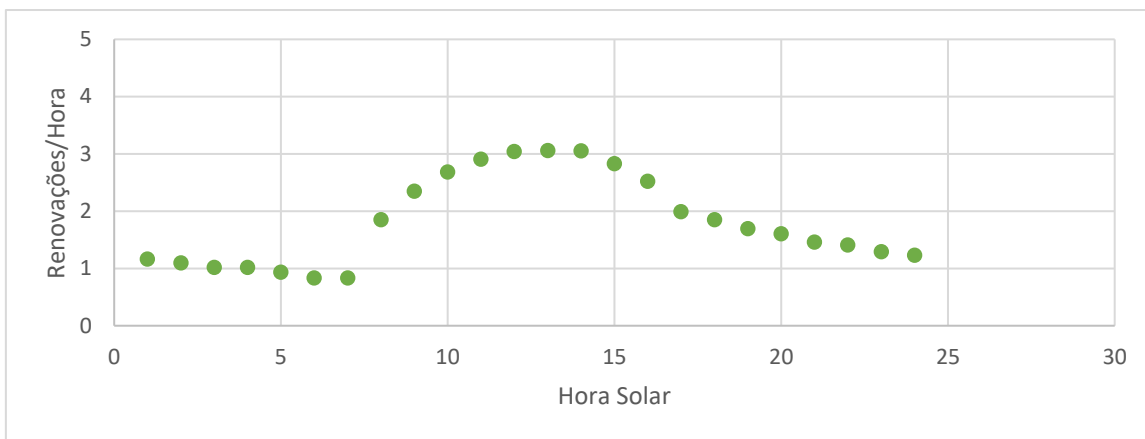


Figura 4.27 – Número de renovações no mês de julho com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Observando a Figura 4.27, verifica-se que o valor mais baixo de renovações de ar não satisfaz a condição de 1,5 renovação de ar. De seguida, é representado a taxa de circulação de ar (Figura 4.28).

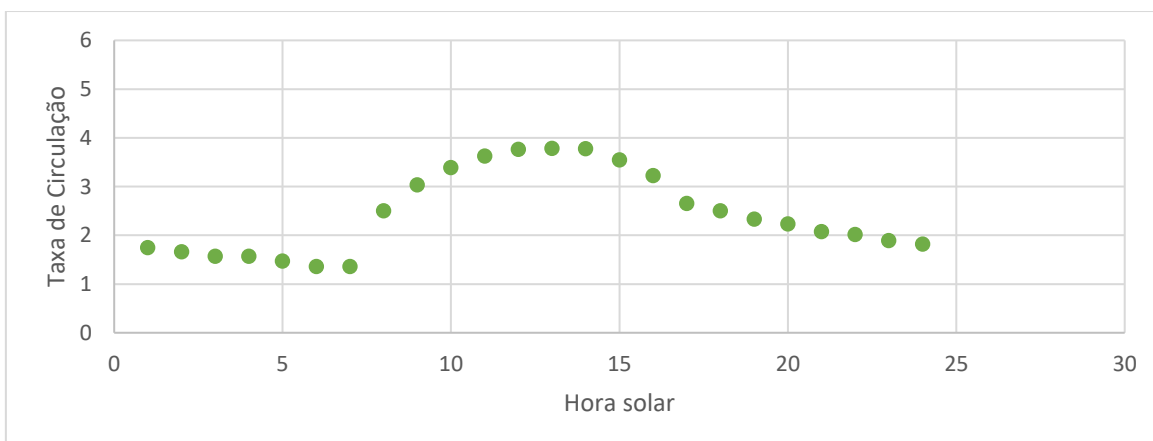


Figura 4.28 – Taxa de circulação de ar no mês de julho com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Pelo trabalho apresentado nesta secção pode-se concluir que, com as aberturas de ventilação consideradas, o efeito da chaminé térmica na estação de aquecimento é eficaz quando é pretendido aquecer o espaço interior.

4.3. Chaminé aberta e uma abertura de ventilação para o exterior

4.3.1. Estação de arrefecimento

Depois de concluído o estudo do edifício onde se pretendia elevar a temperatura deste assegurando o conforto térmico e a qualidade do ar interior (estação de aquecimento), foi-se verificar soluções para a estação de arrefecimento. O objetivo é conseguir 1,5 renovações de ar, como já referido, retirando o calor do interior do edifício.

Desta forma, alterou-se a localização das aberturas de ventilação internas e externas de maneira a que todo o calor proveniente da coluna de ar seja aspirado pela chaminé expelindo-o para o exterior do edifício. Forçando a entrada de ar novo, através da abertura exterior localizada na fachada do lado direito do edifício, para o interior da habitação.

Na Figura 4.29, está representada a localização das aberturas de ventilação e o coeficiente de pressão quando o vento incide na fachada do lado direito do edifício. Admitiu-se uma abertura exterior na fachada do lado direito, como já referido, com $0,1 \times 10 \text{ m}^2$ de área, onde o ponto médio da abertura tem $2,95 \text{ m}$ de distância do chão com uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$ e a chaminé com $5,5 \text{ m}$ de distância do chão com uma perda de carga $\varepsilon_k = 0,5$. A abertura interna que faz a ligação entre a coluna de ar e o interior do edifício tem $0,1 \times 10 \text{ m}^2$ de área, o seu ponto médio encontra-se a $0,05 \text{ m}$ do chão. A abertura interna que faz a ligação entre a coluna de ar e a chaminé, tem uma área de $1,022 \text{ m}^2$ com 3 m de distância do chão e uma perda de carga $\varepsilon_k = 0,5$.



Figura 4.29 - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado direito.

De seguida, fomos estudar o comportamento do edifício quando este é sujeito a uma velocidade do vento nula com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito do edifício, como já referido. Na Figura 4.30, está representado o edifício e sentido de circulação do ar através das aberturas de ventilação, verificando-se que todo o ar quente que se encontra na coluna de ar é aspirado pela chaminé.



Figura 4.30 - Criculação de ar no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito.

Na Figura 4.31, está representado o número de renovações em função da hora solar. Verifica-se que, o edifício satisfaz a condição de 1,5 renovações de ar nas horas de menor potência, entre 6 horas e 7 horas.

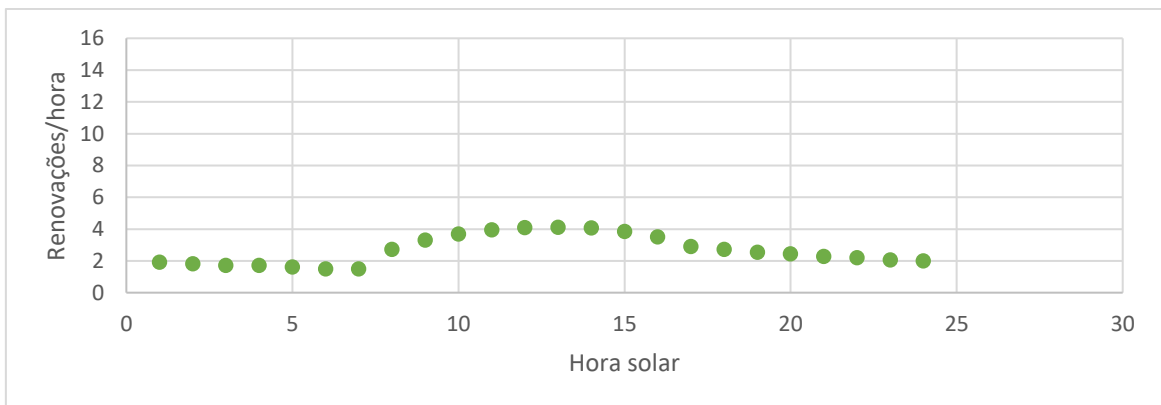


Figura 4.31 - Número de renovações no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Como o ar quente da coluna de ar é aspirado pela chaminé, libertando-o para o exterior, resulta uma variação de temperatura nula, como se pode ver na Figura 4.32. Forçando a entrada de ar fresco pela abertura exterior localizada na fachada do lado direito do edifício.

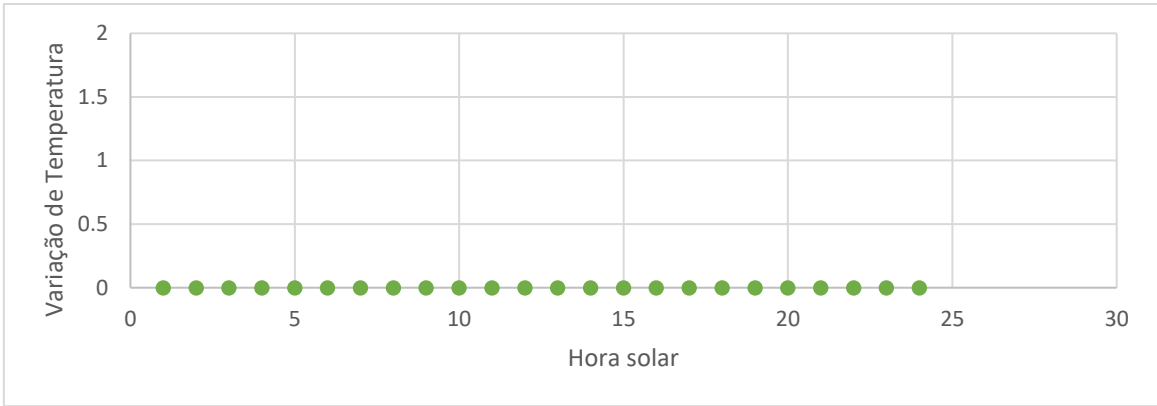


Figura 4.32 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

De seguida, foi considerada uma velocidade do vento $U_0 = 5 \text{ m/s}$, tendo-se verificado que a potência transmitida ao ar gerada pela parede de inércia térmica, não influencia o número de renovações.

Na Figura 4.37, está representado o número de renovações em função da hora solar com vento incidente na fachada do lado direito.

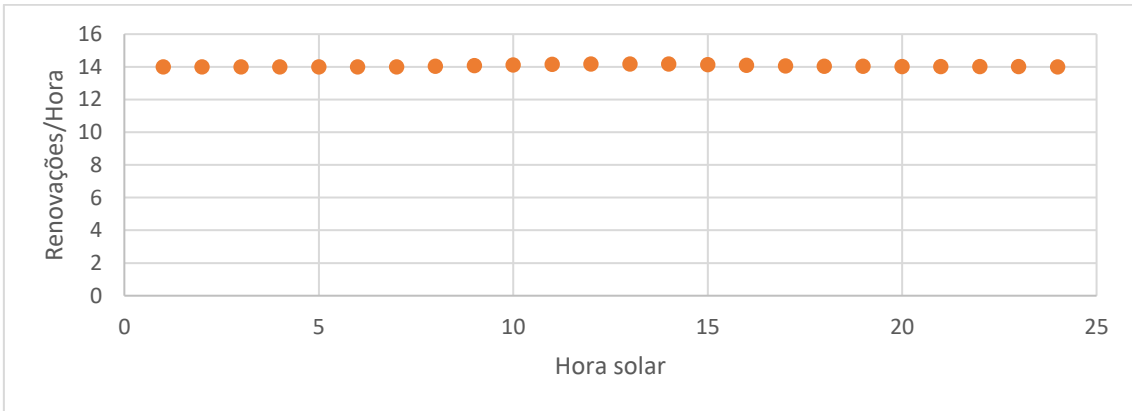


Figura 4.33 - Número de renovações no mês de julho com, $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Observando o gráfico (Figura 4.33), verifica-se um elevado número de renovações, resultando numa variação de temperatura nula, como se pode ver na Figura 4.34.

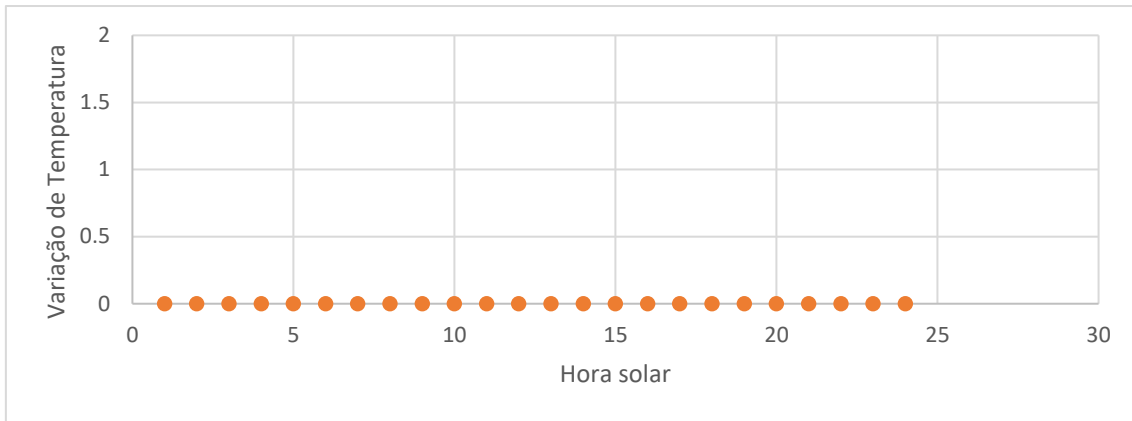


Figura 4.34 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

De seguida, foi verificado o comportamento do edifício quando o vento incide na fachada do lado esquerdo com uma velocidade $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$, ficando a abertura exterior na fachada do lado direito com um coeficiente de pressão $C_p = -0,3$ (CEN, 2010), como se pode ver na Figura 4.35.

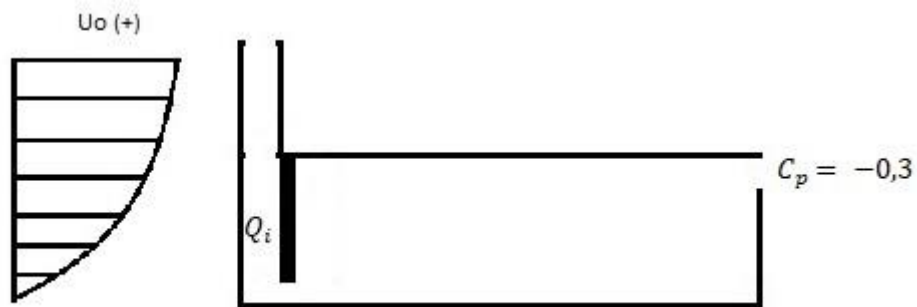


Figura 4.35 - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão com vento incidente na fachada do lado esquerdo.

Na Figura 4.36, está representado o número de renovações em função da hora solar.

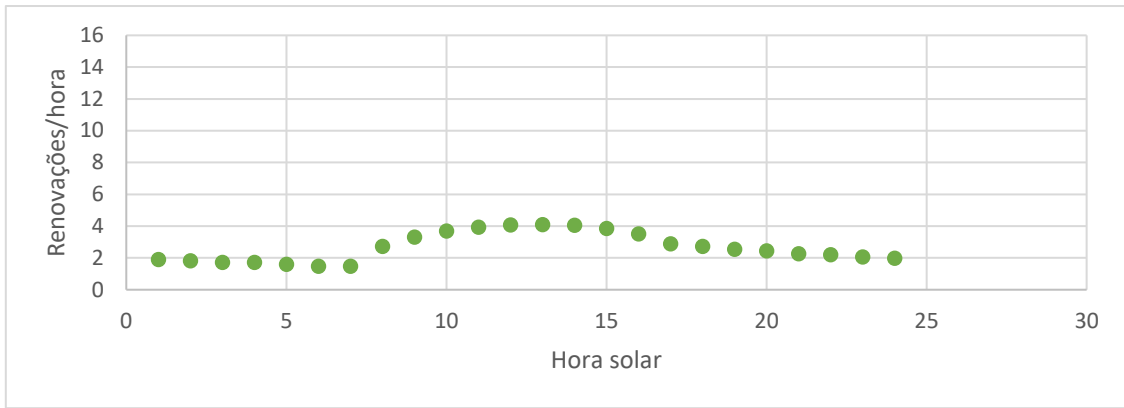


Figura 4.36 -- Número de renovações no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

Observando a Figura 4.36, verifica-se que o edifício consegue as mesmas renovações de ar quando o vento incide na fachada do lado direito, resultando numa variação de temperatura nula como se poder ver na Figura 4.37, que representa a variação de temperatura em função da hora solar.

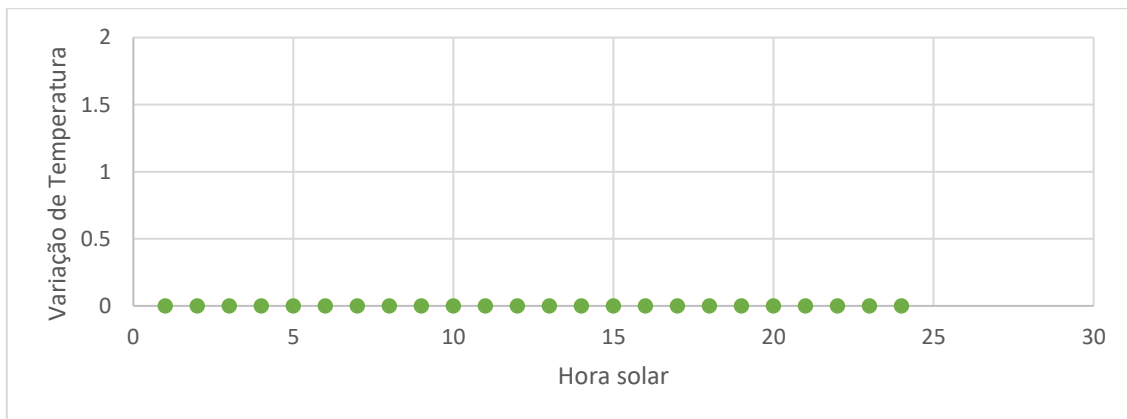


Figura 4.37 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

De seguida, verificou-se o comportamento do edifício quando este é sujeito a vento incidente na fachada do lado esquerdo com uma velocidade $U_0 = 5 \text{ m/s}$.

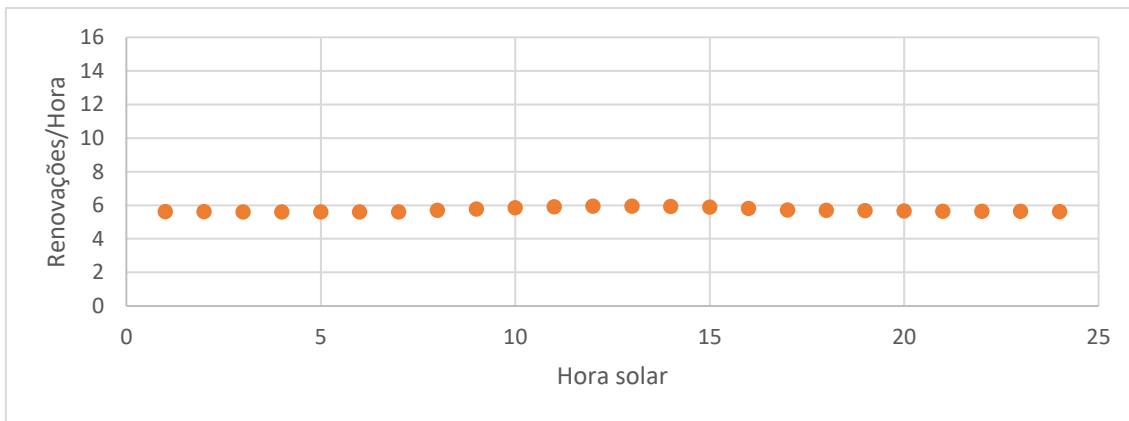


Figura 4.38 - Número de renovações no mês de julho com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

Observando a Figura 4.38, verifica-se que o número de renovações não depende da potência dissipada pela parede para velocidades do vento mais elevadas, tal como esperado. Comparando o caso onde o vento incide na fachada do lado direito (Figura 4.33), verifica-se uma diferença acentuada nas renovações de ar.

Na Figura 4.39, está representada a variação de temperatura em função da hora solar quando o vento tem uma velocidade de $U_0 = 5$ m/s.

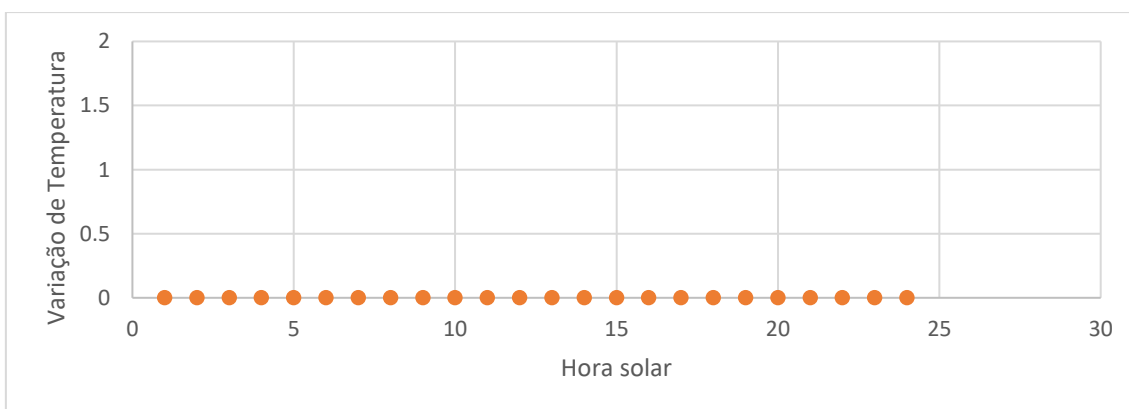


Figura 4.39 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 5$ m/s incidente na fachada do lado esquerdo em função da hora solar.

Segundo a norma portuguesa (CEN, 2010), os coeficientes de pressão aplicáveis a edifícios e a partes de edifícios, dependem das dimensões da superfície carregada e da respetiva orientação segundo a direção do vento. Desta forma, foi verificado o comportamento do edifício, quando este está sujeito a vento incidente na fachada frontal do edifício. Foi admitido um coeficiente de pressão para a abertura exterior de ventilação de $C_p = -1,4$, como se pode ver na Figura 4.40.

De referir que, é aplicado o mesmo coeficiente de pressão quando o vento incide na fachada posterior do edifício.

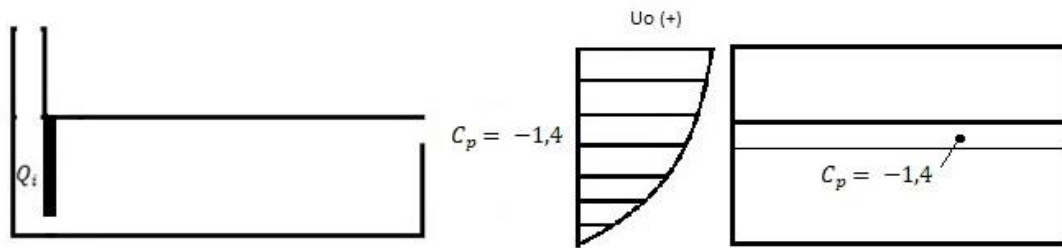


Figura 4.40 - - Localização de Aberturas e coeficiente de pressão.

Na Figura 4.41, está representado o número de renovações em função da hora solar. Considerou-se velocidade do vento nula $U_0 = 0,001$ m/s.

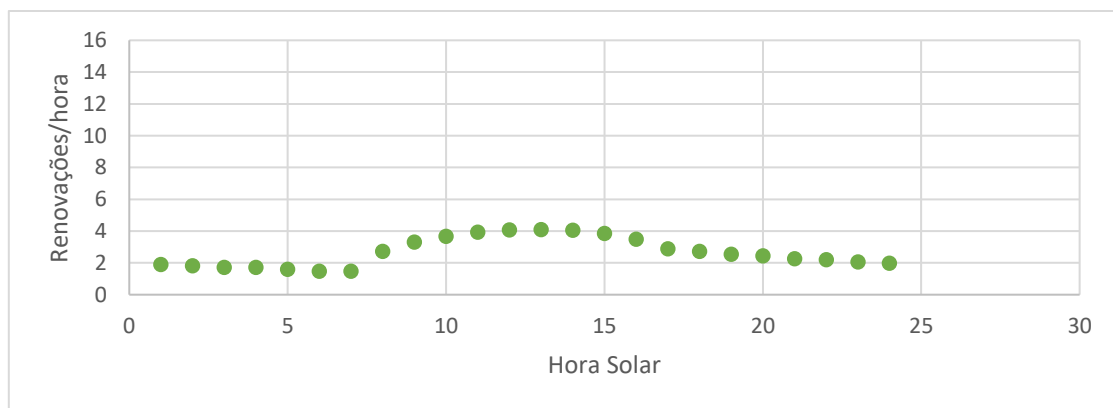


Figura 4.41 – Número de renovações no mês de julho com $U_0 = 0,001$ m/s incidente na fachada frontal em função da hora solar.

Observando o gráfico (Figura 4.41), verifica-se que o número de renovações conseguido pelo edifício é igual ao visto anteriormente (Figura 4.31 e Figura 4.36), quando a abertura de ventilação tem um coeficiente de pressão $C_p = 1$ e $C_p = -0,3$. Desta forma, é esperado que a variação de temperatura seja nula, como se pode ver no gráfico seguinte (Figura 4.42), onde está representada a variação de temperatura em função da hora solar.

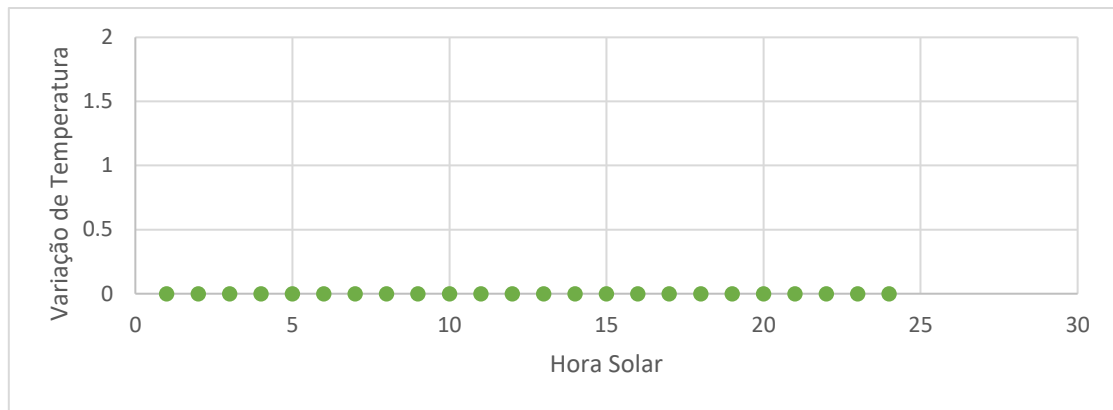


Figura 4.42 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada frontal em função da hora solar.

De seguida, fomos estudar o comportamento do edifício quando o vento exterior tem velocidade de $U_0 = 5 \text{ m/s}$.

Na Figura 4.43, está representada a variação de temperatura em função da hora solar.

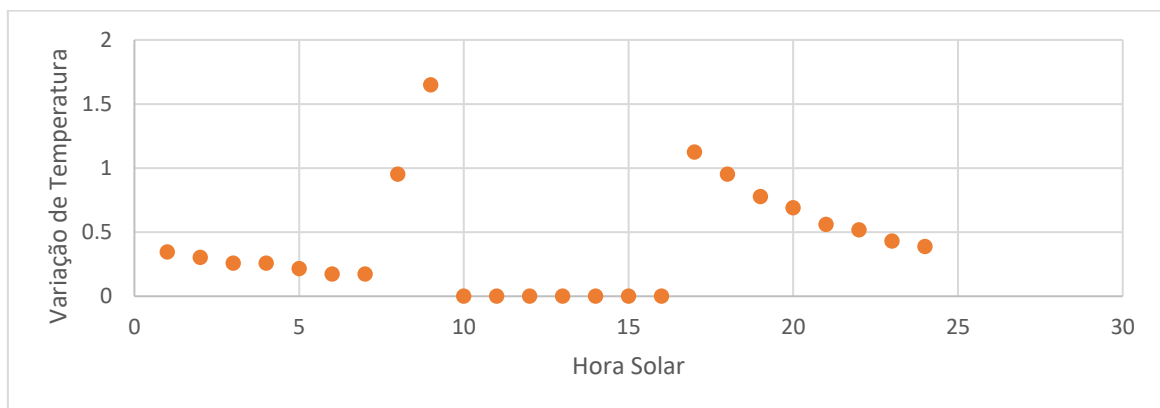


Figura 4.43 - Variação de temperatura no interior do edifício no mês de julho com $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada frontal em função da hora solar.

Observando o gráfico (Figura 4.43), verifica-se uma descontinuidade de resultados entre as 10 horas e 16 horas, onde é nula a variação de temperatura. Entrando ar novo pela abertura de ventilação da fachada do lado direito e saindo ar viciado pela chaminé.

Nas restantes horas, a pressão exercida pela impulsão térmica no lado interior da abertura da chaminé é inferior à pressão exercida pelo vento no lado exterior da abertura da chaminé. Entrando através desta o ar novo e levando o ar quente da coluna de ar para o interior do edifício. A pressão exercida pela impulsão térmica aumenta com a potência dissipada pela parede de inércia térmica, como também o caudal de ar que entra e sai do edifício.

Na Figura 4.44, está representado o número de renovações em função da hora solar.

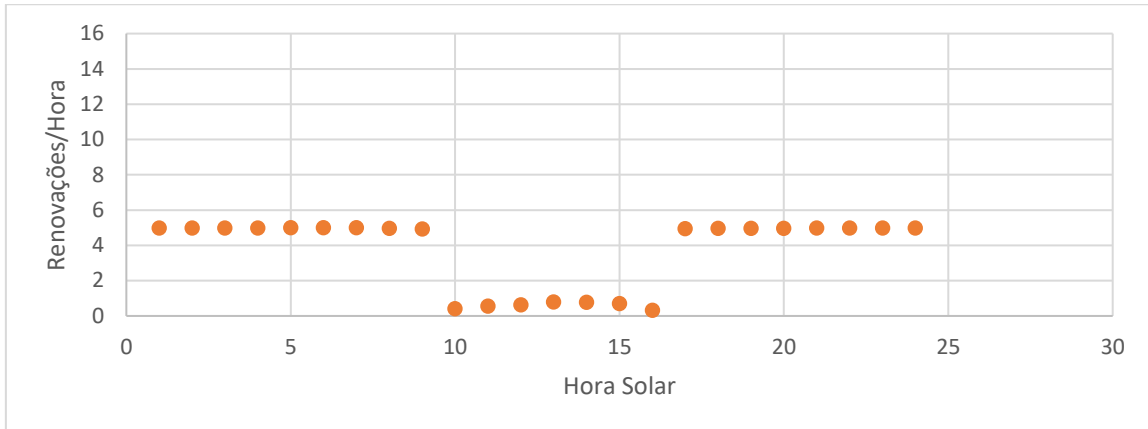


Figura 4.44 - Número de renovações no mês de julho com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada frontal em função da hora solar.

Observando a Figura 4.44, verifica-se que entre as 10 horas e 16 horas o edifício não consegue efetuar as renovações de ar necessárias para garantir um ambiente saudável no seu interior. Nas restantes horas solares, o edifício consegue realizar as renovações de ar levando para o interior do edifício o ar quente da coluna de ar.

Na Figura 4.45, está representado o edifício e sentido de circulação do ar através das aberturas de ventilação.

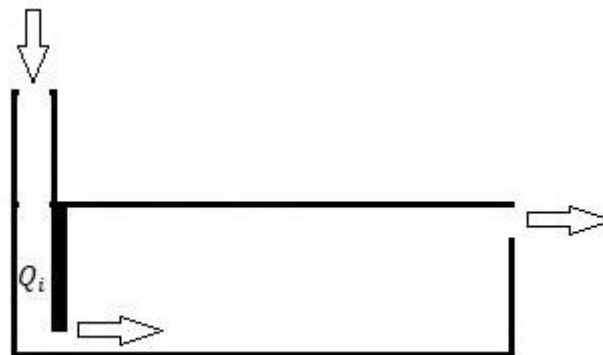


Figura 4.45 - Circulação de ar no mês de Julho com $U_0 = 5 \text{ m/s}$ incidente na fachada frontal.

De seguida, como o edifício é um espaço destinado à habitação, e considerando que uma pessoa liberta uma potência calorífica média de 120 W, foi testado para uma velocidade do vento nula com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$, admitindo um coeficiente de pressão $C_p = 1$, as renovações de ar e a variação de temperatura em função da hora solar. Quando se encontra 1 pessoa no interior do

edifício equivalente a 120 W, com 5 pessoas equivalente a 600 W, e com 10 pessoas no interior da habitação equivalente a 1200 W.

Nos gráficos seguintes (Figura 4.46 e Figura 4.47), está representada a variação de temperatura e o número de renovações, respetivamente, em função da hora solar e do número de pessoas no interior do edifício.

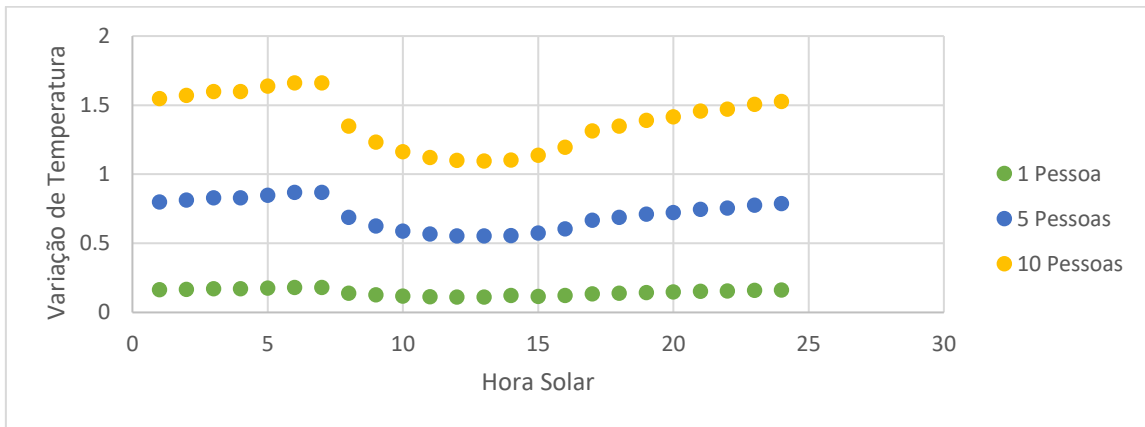


Figura 4.46 – Variação de Temperatura no interior do edifício no mês de julho quando o este está habitado em função da hora solar.

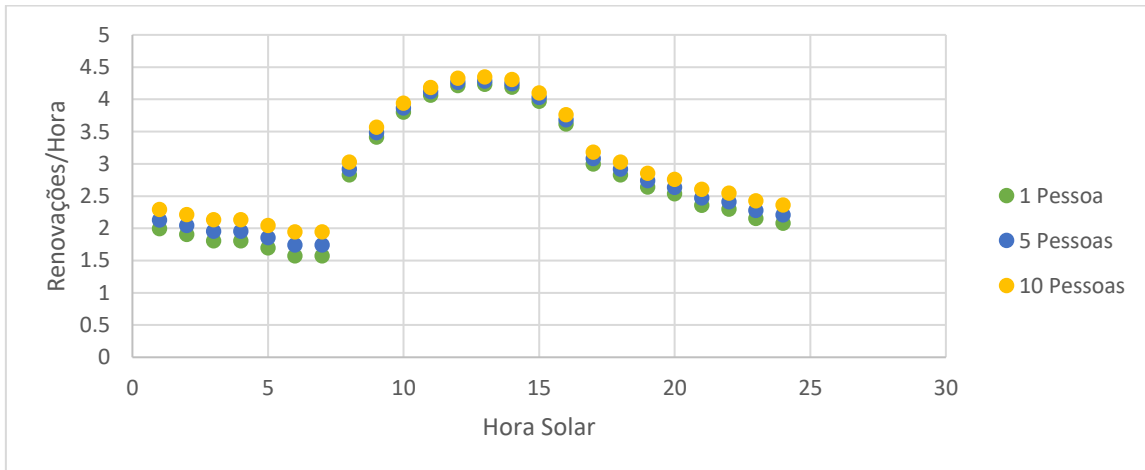


Figura 4.47- Número de renovações no mês de julho quando o edifício está habitado em função da hora solar.

4.3.2. Estação de aquecimento

De seguida, fomos estudar o comportamento do edifício nos mês de janeiro com esta localização de aberturas de ventilação.

Na Figura 4.48, está representado o número de renovações em função da hora solar, foi admitido vento incidente na fachada do lado direito com velocidade $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ e um coeficiente de pressão $C_p = 1$ para abertura exterior. De referir que, com a velocidade do vento nula é indiferente o coeficiente de pressão admitido para a abertura de ventilação da fachada do lado direito, como se viu anteriormente (secção 4.3.1).

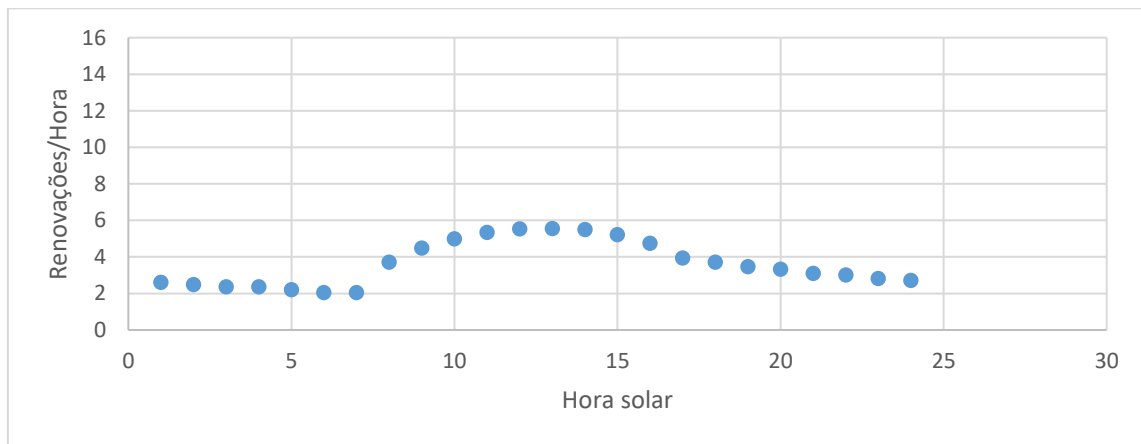


Figura 4.48 - Número de renovações no mês de janeiro com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Observando o gráfico (Figura 4.48), verifica-se que na estação de aquecimento com esta localização de aberturas de ventilação, o edifício consegue mais renovações de ar em relação à estação de arrefecimento (secção 4.3.1).

De maneira que, seria possível diminuir a área das aberturas com o objetivo de acumular maior quantidade de calor no interior do edifício. O que não acontece, pois, o ar quente da coluna de ar é aspirado pela chaminé, fazendo com que esta solução tenha um efeito indesejado nos meses de frio.

Na Figura 4.49, está representada a variação de temperatura em função da hora solar.

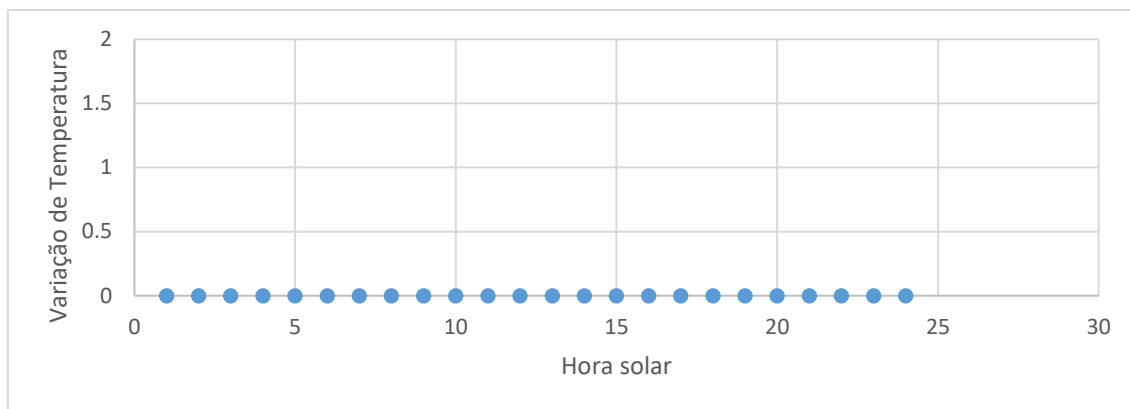


Figura 4.49 – Variação de temperatura no interior do edifício no mês de janeiro com $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$ incidente na fachada do lado direito em função da hora solar.

Pelo trabalho apresentado nesta secção, pode-se concluir que o efeito da chaminé térmica na estação de arrefecimento consegue o pretendido, ou seja retirar o calor acumulado no interior do edifício. Apesar de em alguns casos, o ar novo entrar pela chaminé levando o ar quente da coluna de ar para o interior do edifício, esta situação pode ser contornada com a localização da abertura, considerando a norma portuguesa (CEN, 2010).

4.4. Ventilação mecânica

Na presente secção fez-se um estudo de ventilação mecânica, considerando a mesma geometria de edifício (secção 4). Retirou-se a chaminé térmica solar, e introduziram-se ventiladores para retirar o calor do interior do edifício, desempenhando estes a mesma função que a chaminé térmica solar na estação de arrefecimento. Desta forma, admitiu-se as mesmas aberturas de ventilação da secção 4.3, como se pode ver na Figura 4.50.

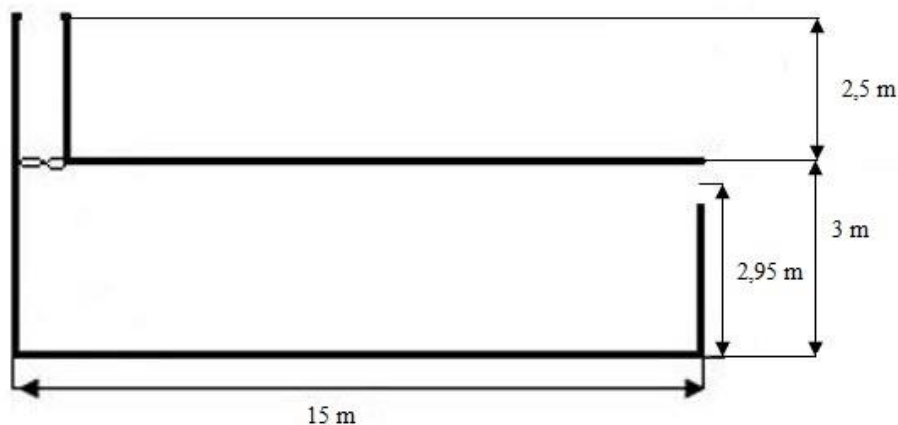


Figura 4.50 - Geometria de edifício com Ventilador.

O ventilador considerado, é o modelo MF-150 LL do fabricante Sodeca (Sodeca, n.d.). Na Figura 4.51, está representada a curva característica (P-V) do ventilador considerado.

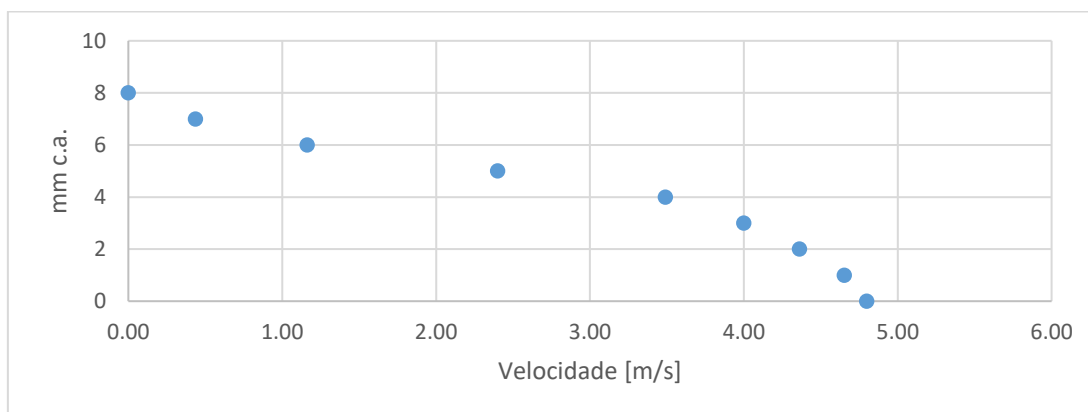


Figura 4.51- Curva (P-V) do ventilador

Para efeitos de cálculo, houve a necessidade de introduzir as curvas características do ventilador e do insuflador na equação de Bernoulli para o escoamento de uma abertura interior, que se traduziram nas seguintes equações:

Para o insuflador:

$$(\rho \times h - \rho' \times h') \times g + P' = -78,4 + 59,5 \times U \times |U| \quad (4.1)$$

Para o exaustor:

$$(\rho \times h - \rho' \times h') \times g + P' = 78,4 + 59,5 \times U \times |U| \quad (4.2)$$

O índice (') refere-se ao espaço adjacente àquele que está a ser analisado (Lopes Teixeira, 2009).

Depois de várias simulações, verificou-se que o ventilador considerado deve ter uma área de secção transversal de $0,1719 \text{ m}^2$ para este conseguir 1,5 renovações de ar. A área do ventilador é resultado de estudo feito onde se verificou que, seria preciso nove ventiladores do modelo do ventilador mecânico considerado neste estudo. Admitiu-se uma velocidade do vento nula $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$, com este incidente na fachada do lado direito e do lado esquerdo do edifício, onde se obteve os mesmos resultados. Relembrando que, para valores positivos da velocidade do vento corresponde a vento incidente na fachada do lado esquerdo, e para valores negativos da velocidade do vento corresponde a vento incidente na fachada do lado direito, como se pode ver na Figura 4.52.

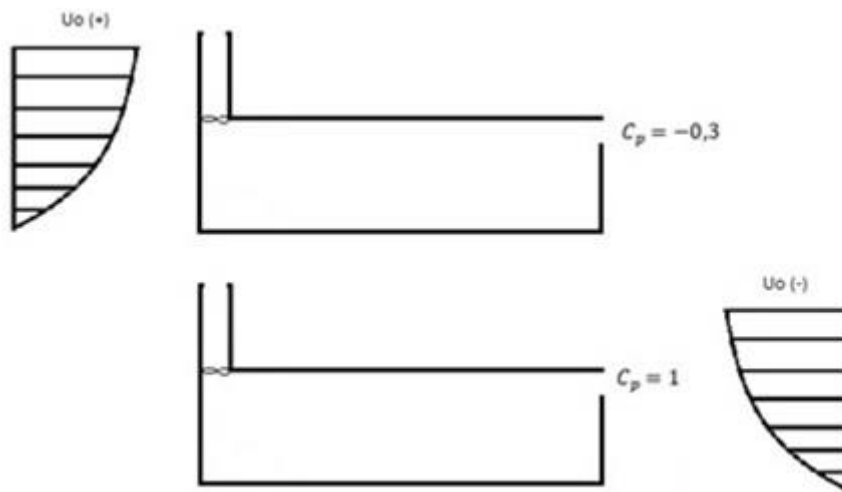


Figura 4.52 – Geometria do edifício com ventilador e coeficiente de pressão das aberturas com vento incidente na fachada do lado direito e esquerdo.

Desta forma, foi calculada uma nova curva (P-Qv) do ventilador, como se pode ver na Figura 4.53.

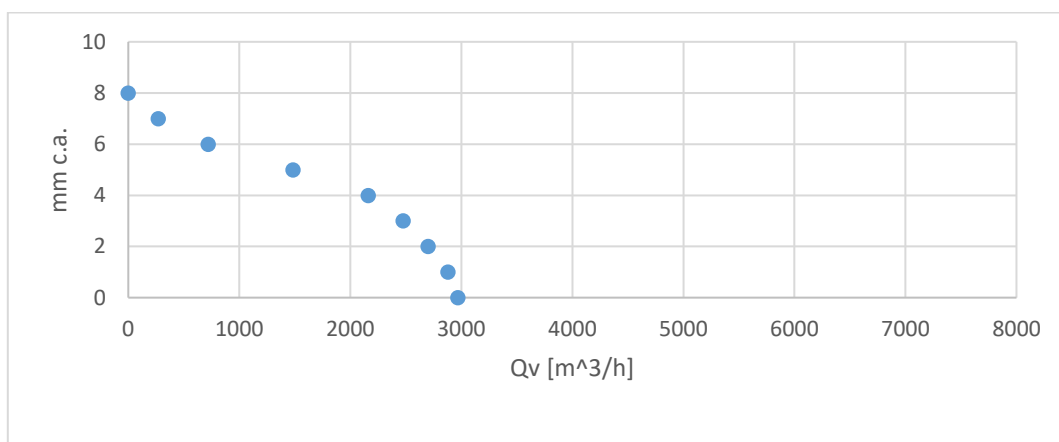


Figura 4.53 - Curva (P-Qv), Ventilador.

Na Figura 4.54, estão representadas as rotações por minuto (RPM) do ventilador em função da velocidade do vento, mantendo constante o número de renovações com 1,5 Renovações/Hora.

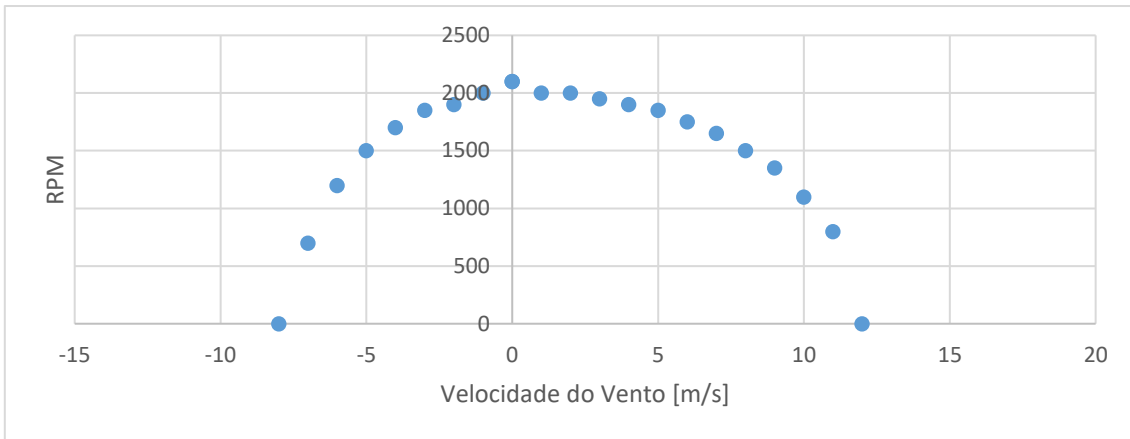


Figura 4.54 - RPM em função da velocidade do vento realizando 1,5 Renovações/Hora.

Observando a Figura 4.54, verifica-se a necessidade de o ventilador estar a funcionar entre -8 m/s e 12 m/s. Ou seja, quando o vento incide na fachada do lado esquerdo do edifício até uma velocidade do vento de $U_0 = 12$ m/s, o ventilador está ligado. Quando o vento incide na fachada do lado direito do edifício até uma velocidade do vento de $U_0 = 8$ m/s, o ventilador está a ligado.

Após verificada a gama de velocidade do vento correspondentes ao funcionamento do ventilador, foi calculado a potência consumida por este, onde cada valor de velocidade do vento corresponde à velocidade de rotação do ventilador (RPM) vista no gráfico acima (Figura 4.54).

Na Figura 4.55, está representada a potência consumida pelo ventilador em função da velocidade do vento.

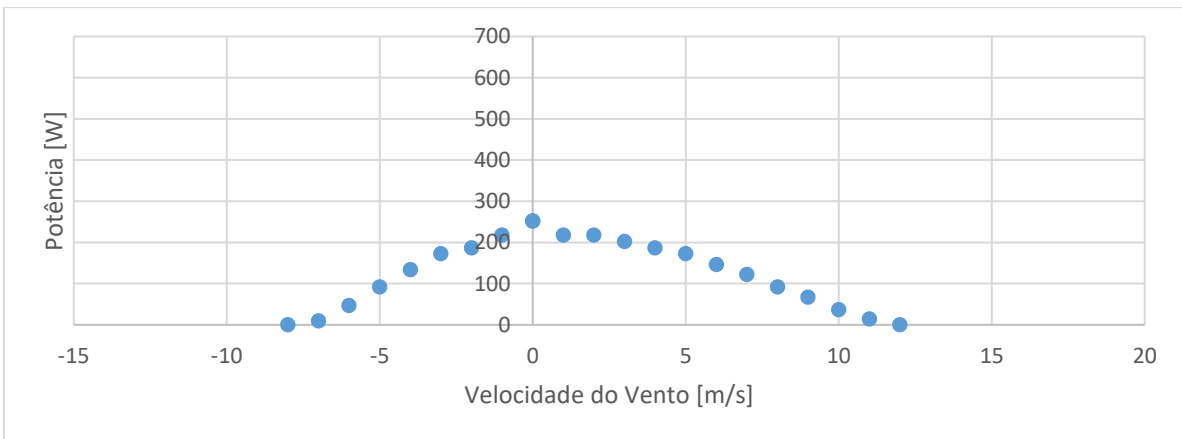


Figura 4.55 - Potência consumida pelo ventilador em função da velocidade do vento.

Como já referido anteriormente, o ventilador apenas funciona para velocidade do vento de -8 m/s a 12 m/s. Desta forma, para velocidades superiores a estas, o edifício apenas fica sujeito a

ventilação natural. Foi-se estudar o comportamento do edifício quando este funciona apenas com ventilação natural.

Na Figura 4.56, está representado o número de renovações em função da velocidade do vento. Com a cor azul, está representado o número de renovações quando o ventilador está a funcionar, mantendo um valor contante de 1,5 renovações/hora. Com a cor laranja, está representado o número de renovações conseguido apenas com ventilação natural.

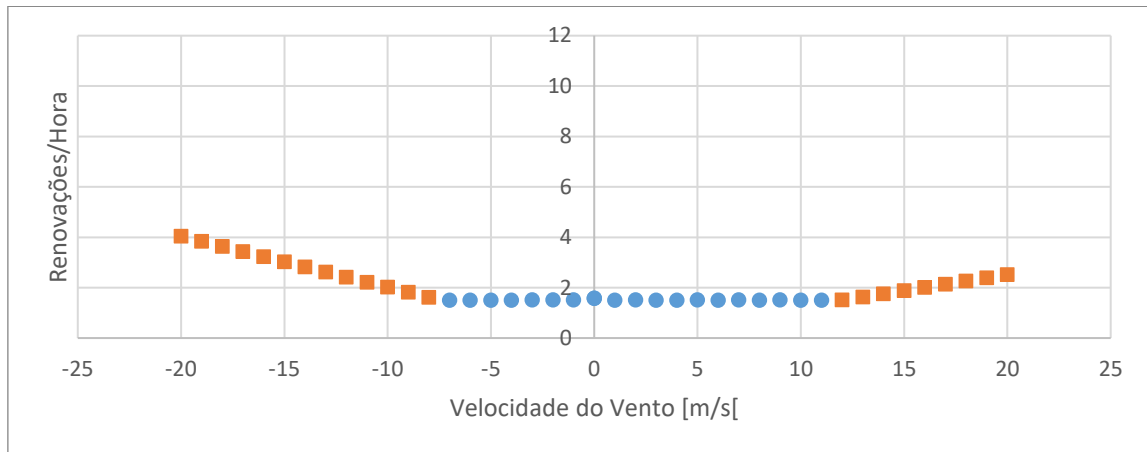


Figura 4.56 - Número de renovações em função da velocidade do vento com ventilador e ventilação natural.

De modo a conseguir 4 renovações de ar, foi-se verificar para que velocidades do vento há necessidade de ter um ventilador a funcionar. Repetindo o mesmo processo, verificou-se que o ventilador considerado precisa de uma área de secção transversal de $0,4393 \text{ m}^2$. Admitiu-se uma velocidade do vento nula $U_0 = 0,001 \text{ m/s}$, com este incidente na fachada do lado direito e do lado esquerdo do edifício. Obteve-se os mesmos resultados para as duas direções do vento.

Desta forma, foi calculada uma nova curva (P-Qv) do ventilador, como se pode ver na Figura 4.57.

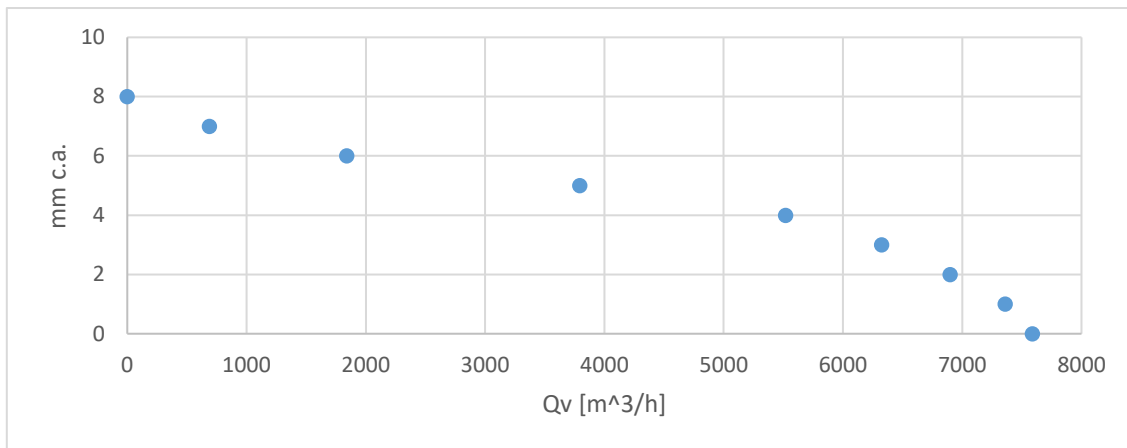


Figura 4.57 - Curva (P-Qv), Ventilador

De seguida, variou-se o número de rotações do ventilador (RPM) em função da velocidade do vento, mantendo constantes as renovações de ar em 4 Renovações/hora.

Foi considerado vento incidente na fachada do lado direito e do lado esquerdo do edifício, ficando a abertura exterior com um coeficiente de pressão $C_p = 1$ e $C_p = -0,3$.

Na Figura 4.58, estão representadas as rotações por minuto (RPM) do ventilador em função da velocidade do vento.

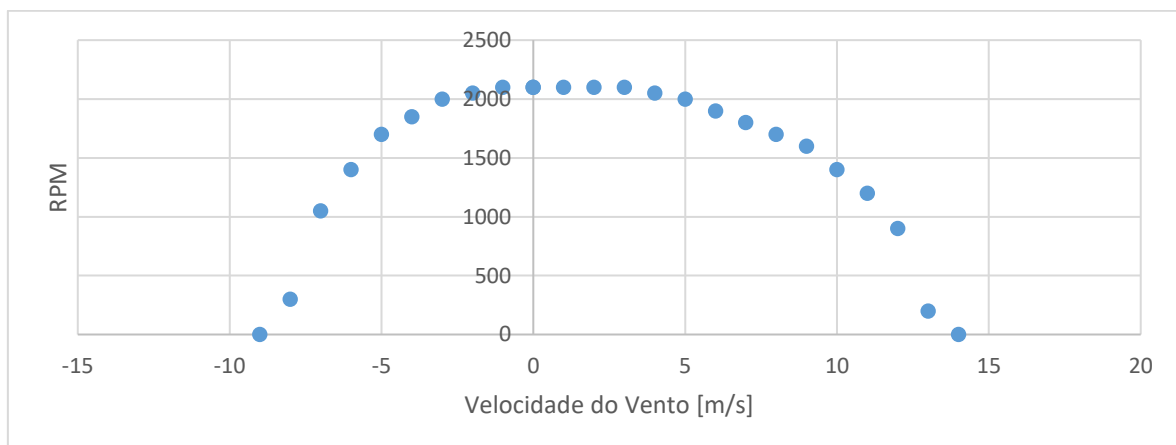


Figura 4.58 - RPM em função da velocidade do vento realizando 4 Renovações/Hora.

Observando a Figura 4.58, verifica-se a necessidade de o ventilador estar a funcionar entre -9 m/s e 14 m/s. Ou seja, o ventilador funciona até uma velocidade do vento de $U_0 = 14 \text{ m/s}$ quando o este incide na fachada do lado esquerdo do edifício. Quando o vento incide na fachada do lado direito do edifício o ventilador funciona até uma velocidade do vento de $U_0 = 9 \text{ m/s}$.

Após verificar o intervalo de velocidade do vento que o ventilador está ligado, foi calculado a potência consumida por este.

Na Figura 4.59, está representado a potência consumida pelo ventilador em função da velocidade do vento.

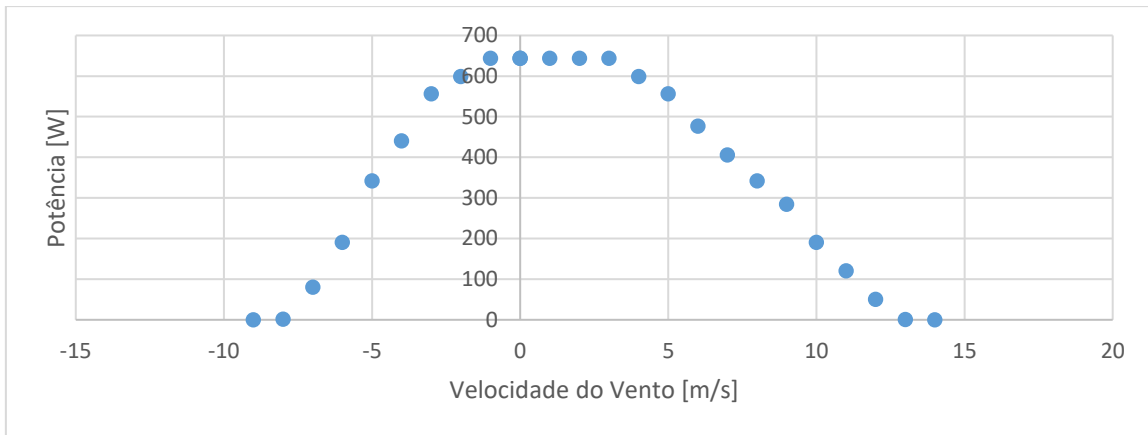


Figura 4.59 - Potência consumida pelo ventilador em função da velocidade do vento.

Depois de concluído o cálculo da potência consumida pelo ventilador, para as respectivas velocidades do vento, foi verificado o número de renovações que o edifício consegue quando é sujeito apenas a ventilação natural.

Na Figura 4.60, com a cor azul está representado o número de renovações em função da velocidade do vento. Com a cor laranja, está representado o número de renovações apenas com ventilação natural.

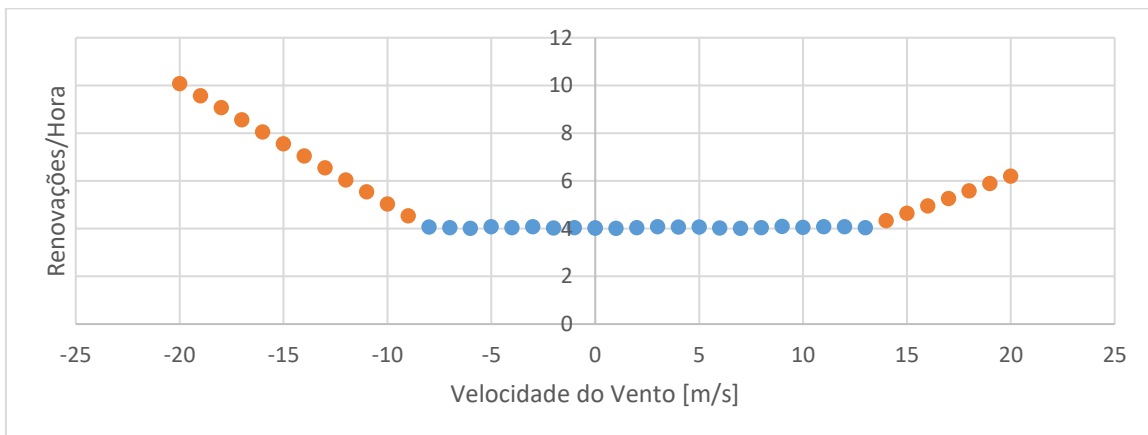


Figura 4.60 - Número de renovações em função da velocidade do vento com ventilador e ventilação natural.

Depois de concluído este estudo, onde se verificou a necessidade de usar um ventilador para desempenhar a função da parede de inércia térmica, foi escolhida uma localização como exemplo de maneira a estimar a probabilidade de funcionamento do ventilador. Sendo a localização do edifício que determina a quantidade de vento que o edifício vai receber, fez-se uma estimativa da energia que se gasta devido à ventilação. Assumiu-se a localização de Lisboa para este efeito. Considerando que a cidade de Lisboa se encontra a uma latitude 38° N, a variação de radiação solar incidente na parede, é desprezável na variação de latitude admitida no cálculo efetuado de potência da parede (Anexo 1).

Com auxílio da distribuição de probabilidade de Weibull (Anexo 2) é possível estimar-se o consumo de energia necessário quando o ventilador está em funcionamento. Foi feito um cálculo simples, onde se verificou o consumo de energia anual. Sabendo que, $1 \text{ W} = 1 \text{ Joule/Segundo}$ e que $1 \text{ Ano} = 31536000 \text{ Segundos}$. Multiplicando o consumo de energia em função da velocidade do vento (Figura 4.55) pelo número de segundos que tem 1 ano, obteve-se os seguintes valores de potência anual consumida (Figura 4.61).

É de referir que, nesta secção foi apenas considerado a potência consumida para efetuar 4 renovações de ar (Figura 4.55).

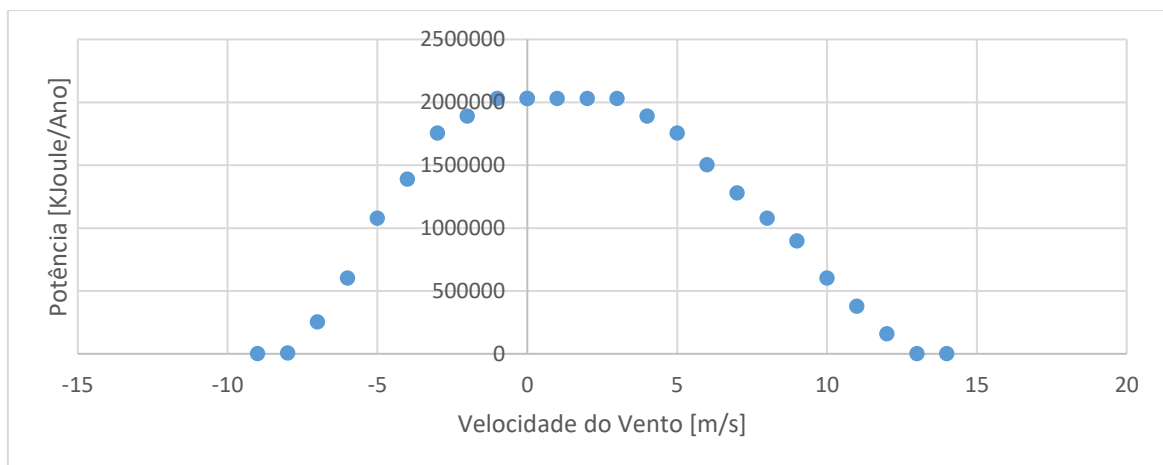


Figura 4.61 -Potência anual consumida para realizar 4 renovações/Hora.

De seguida, considerando localização do edifício, multiplica-se os valores de potência anual, para as respetivas velocidades do vento, pela probabilidade de ocorrência dessas velocidades. Obtém-se o seguinte gráfico (Figura 4.62). Com a cor azul, está representada a potência consumida quando se tem vento incidente na fachada do lado direito do edifício, e com a cor verde a potência consumida quando o vento incide na fachada do lado direito do edifício.

Foi feita uma aproximação, de modo a conseguir calcular as áreas que representam o consumo de potência anual. Foram utilizadas duas aproximações para dois integrais distintos, de modo a representar a energia consumida anualmente para as duas direções do vento.

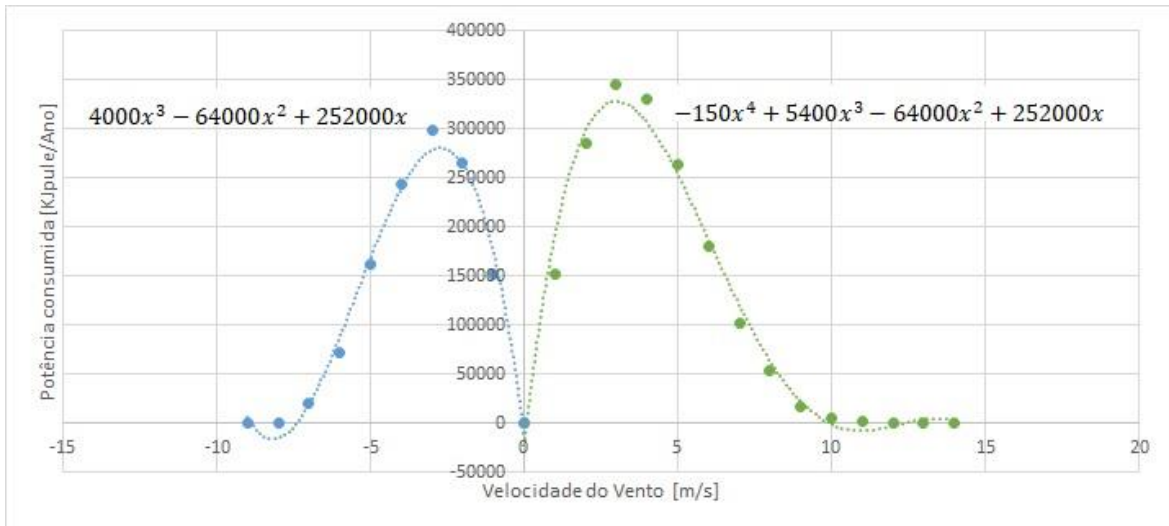


Figura 4.62 - Potência consumida anualmente para realizar 1,5 renovações/hora com vento incidente na fachada do lado esquerdo e lado direito do edifício.

Desta forma, aplicando os respetivos limites de integração obtém-se a energia consumida anualmente.

Quando vento incidente na fachada do lado direito, tem-se:

$$\int_0^9 4000x^3 - 64000x^2 + 252000x = 1215000 \frac{kJoule}{Ano} = 337,5 \frac{kWh}{Ano}$$

Quando vento incidente na fachada do lado esquerdo, tem-se:

$$\int_0^9 -150x^4 + 5400x^3 - 64000x^2 + 252000x = 1736680 \frac{kJoule}{Ano} = 482,4 \frac{kWh}{Ano}$$

Pode-se concluir que, o uso do ventilador, apesar de conseguir controlar o número de renovações de ar pretendidas, não compensa o gasto de energia necessário para esse efeito, pois a chaminé térmica satisfaz as necessidades de ventilação, tanto na estação de aquecimento como na de arrefecimento. De referir que, nesta secção foi apenas verificado o consumo de energia de modo a que o ventilador consiga efetuar 4 renovações de ar. De referir que, no caso da estação de aquecimento há um gasto de energia adicional para garantir um conforto térmico no interior do edifício

5. Conclusão

A presente dissertação, teve como objetivo principal a climatização de um edifício, destinado à habitação, com uma chaminé térmica. Este estudo permite concluir que, a ventilação natural é suficiente para garantir um ambiente saudável no interior do edifício, não sendo preciso equipamentos para desempenhar essa função.

Este sistema trás várias vantagens, nomeadamente, a diminuição do consumo de energia para o aquecimento e o aumento do conforto térmico. São sistemas passivos de baixa manutenção, que podem atuar tanto como sistema de aquecimento durante o inverno, como de arrefecimento durante o verão, quando dimensionados da forma correta.

No entanto, este sistema também apresenta algumas desvantagens. Para se conseguir uma maior eficácia durante o inverno, este sistema é fortemente dependente da radiação solar e de uma boa orientação. A parede pode limitar o espaço habitável, impedir a iluminação natural ou mesmo a vista para o exterior. E há ainda a hipótese de ocorrência de um sobre aquecimento no verão. Contudo, grande parte destas desvantagens podem ser contornadas quando se dimensiona convenientemente o sistema. A chaminé térmica apresenta vantagens nomeadamente o facto de ser facilmente adaptada ao que se pretende, podendo apenas ocupar uma pequena área da fachada, ou ocupar uma área maior até serem conseguidos os resultados pretendidos. Também é possível variar o volume da coluna de ar consoante o resultado desejado.

Para futuros estudos, é importante referenciar que a potência entregue ao ar transmitida pela parede de inércia térmica, foi obtida para uma temperatura constante da envolvente da parede. Sendo que, no desenvolvimento deste trabalho foi feita uma simplificação, onde não se considerou com rigor a temperatura da envolvente da parede, pois esta não é constante. Esta simplificação afeta os resultados finais de potência entregue ao ar. Havendo uma maior amplitude térmica entre a parede e o ar envolvente, esta vai transmitir uma potência mais elevada ao ar que está em contacto com a parede.

Na ventilação natural, os fatores mais condicionantes são a temperatura exterior e a velocidade do vento, pois são estes que apresentam a maior alteração nos resultados, como também a localização das aberturas de ventilação. As estratégias de ventilação estudadas na presente dissertação, permitem concluir que, para atingir um bom desempenho de ventilação de um edifício, este não pode estar sujeito às mesmas estratégias de ventilação.

Torna-se importante referir que, não é o programa utilizado neste trabalho que resolve o problema, sendo este, apenas uma ferramenta que nos dá resultados sobre as condições de ventilação

impostas ao programa. O que resolve o problema, são os diferentes casos particulares que se criaram, nomeadamente ao nível das diferentes localizações de aberturas de ventilação e das diferenças de carga térmica dentro e fora do edifício. Na elaboração deste trabalho foram feitas mais de 2000 simulações no programa de cálculo.

Pode-se concluir que, não existe nenhuma estratégia de ventilação natural que seja adequada para todos os edifícios, nem para todas as estações do ano.

Bibliografia

CAD – Companhia de Arquitectura e Design. (n.d.). Retrieved September 9, 2017, from <http://planetacad.com/>

Carrier Air Conditioning Company. (1999). *Carrier Air Conditioning Company Handbook of Air Conditioning System Design*. (MARCOMBO, Ed.). New York: McGRAW-HILL.

CEN. (2010). Eurocodigo 1 : Acções em estruturas — Acções gerais — Part 1-4 : Acções do vento. *Communities*, 4, 1–148

Delgado, J. F. A. D., Borges, A. R. J., & Conde, J. M. P. (1996). Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 65(1–3), 371–381.

Guerreiro Modesto, F. R. (2015). *Rafael Filipe Modesto Guerreiro Aproveitamento energético da ventilação natural*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Holman, J. P., & Lloyd, J. (2010). *Fluid Mechanics SI.2. Refrigeration And Air Conditioning* (Fourth, Vol. 6).

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (n.d.). Retrieved September 16, 2017, from <https://www.ipma.pt/pt/>

Isabel, A., Ferreira, C., Paulo, D., Antunes, F., Doutora, P., & Maria, H. (2015). *Desempenho térmico de paredes de Trombe em soluções estruturais leves com aço*. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra

J. F. A. Dias Delgado,, A.R. Janeiro Borges, J. A. G. S. (1985). Um programa de cálculo automático (PCA) de ventilação natural: VENTIL.FOR. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.

Lopes Teixeira, J. F. B. N. (2009). *Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências

e Tecnologia.

Macedo Martins, J. M. (2016). *Projeto de ventilação de edifícios de habitação coletiva*.

Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

Moghaddam, E. H., Amindeldar, S., & Besharatizadeh, A. (2011). New approach to natural ventilation in public buildings inspired by Iranian's traditional windcatcher. *Procedia Engineering*, 21, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1985>

Pina dos Santos, C. A., & Matias, L. (2006). Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios LNEC_ITE_50.pdf. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Sequeira, A. A. (2010). *Ventilação Natural*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

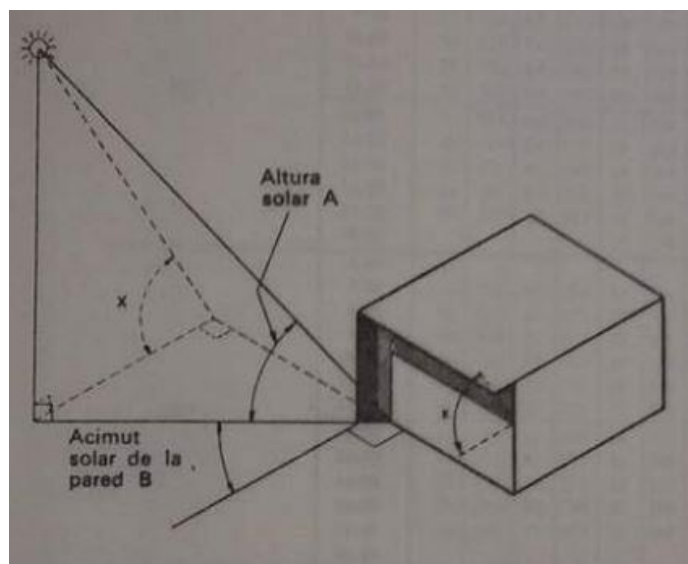
Sodeca. (n.d.). Comercial Ventilation. In Sodeca (Ed.) (pp. 364–365). Barcelona: SODECA.

Anexos

Anexo 1

A tabela 7 (A 0.3), é utilizada para determinar a carga real de refrigeração devido aos ganhos de calor solar quando a temperatura do espaço envolvente é constante, sendo considerados vários tipos de construção da parede. A tabela 6 (A 0.2), contém os ganhos máximos de calor solar para diferentes orientações da parede, bem como, o mês e a latitude.

Outro aspeto importante no cálculo da potência de inércia térmica, é o fator de sombra dos envidraçados. Por norma, todas as janelas encontram-se protegidas da radiação solar por edifícios na sua envolvente, de forma que, as zonas da janela sombreada não são afetadas pela radiação direta, apenas recebem a radiação difusa. A localização do sol é definida pelo seu azimute e altitude, como se pode ver em A 0.1.



A 0-1 – Ângulos solares.

O ângulo de azimute (ângulo B) é formado pelo plano vertical normal à parede e o plano vertical que passa pelo sol. O ângulo de altitude (ângulo A), é formado pelo plano horizontal e pelo plano vertical que passa no sol. O ângulo x, é definido pela seguinte relação,

$$\tan x = \frac{\tan A}{\cos B} \quad (0.1)$$

Assim, com auxílio à tabela 18 (A 0.4), retira-se os valores do ângulo de azimute e altura solar para as diferentes horas do dia, nos respetivos meses. De seguida, usando o gráfico 1 (A 0.5),

onde a parte superior do gráfico serve para determinar a tangente do ângulo B, e a parte inferior para determinar a tangente do ângulo x, é possível calcular a área sombreada do envidraçado. Obtidos estes valores, o fator de sombra é calculado pela seguinte expressão,

$$Fator\ de\ sombra = \frac{A_{Envidraçado} - A_{Sombreada}}{A_{Envidraçado}} \quad (0.2)$$

Como referido anteriormente, os métodos utilizados para obter os valores da capacidade de armazenamento dos materiais, considera a temperatura constante. Nos casos onde a temperatura varia, é necessário multiplicar os valores de carga térmica por um fator de correção. Isto porque, ao variar a temperatura nos períodos de carga máxima, há um acréscimo de carga.

Desta forma, a potência de inércia térmica é calculada através da seguinte fórmula,

$$Q_i = \left(\text{Radiação que atravessa o vidro} \frac{Kcal}{m^2 \times hora} \right) \times (\text{Área do vidro } m^2) \times \\ (\text{Factor de inercia térmica da parede}) \times (\text{Fator de correção}) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (0.3)$$

O valor de radiação que atravessa o envidraçado, é retirado da tabela 6 (A 0.2) e o fator de inércia térmica da parede, para as diferentes horas do dia, é retirado da tabela 7 (A 0.3). O fator de correção, engloba possíveis fatores de sombra e variação de temperatura.

TABLA 6. MÁXIMAS APORTACIONES SOLARES A TRAVÉS DE CRISTAL SENCILLO*
kcal/ (hora) (m²)

LATITUD NORTE	MES	ORIENTACION (LATITUD NORTE)									MES	LATITUD SUR
		N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Horiz.		
0°	Junio	160	423	398	113	38	113	398	423	612	Diciembre Nov. y Enero Oct. y Febrero Sept. y Marzo Agosto y Abril Julio y Mayo Junio	0°
	Julio y Mayo	130	414	412	141	38	141	412	414	631		
	Agosto y Abril	67	382	442	214	38	214	442	382	664		
	Sept. y Marzo	27	320	452	320	38	320	452	320	678		
	Oct. y Febrero	27	214	442	382	92	382	442	214	664		
	Nov. y Enero	27	141	412	414	181	414	412	141	631		
	Diciembre	27	113	398	423	222	423	398	113	612		
10°	Junio	108	414	420	149	38	149	420	414	659	Diciembre Nov. y Enero Oct. y Febrero Sept. y Marzo Agosto y Abril Julio y Mayo Junio	10°
	Julio y Mayo	81	401	428	179	38	179	428	401	649		
	Agosto y Abril	35	352	442	254	38	254	442	352	678		
	Sept. y Marzo	27	279	444	344	75	344	444	279	669		
	Oct. y Febrero	27	179	420	404	198	404	420	179	623		
	Nov. y Enero	24	100	387	434	287	434	387	100	569		
	Diciembre	24	75	371	442	324	442	371	75	547		
20°	Junio	70	417	433	198	38	198	433	417	678	Diciembre Nov. y Enero Oct. y Febrero Sept. y Marzo Agosto y Abril Julio y Mayo Junio	20°
	Julio y Mayo	51	374	442	230	38	230	442	374	680		
	Agosto y Abril	29	320	447	304	70	304	447	320	669		
	Sept. y Marzo	27	235	442	379	174	379	442	235	631		
	Oct. y Febrero	24	141	398	453	301	453	398	141	564		
	Nov. y Enero	21	70	347	444	382	444	347	70	488		
	Diciembre	21	48	328	452	404	452	328	48	461		
30°	Junio	54	377	436	244	57	244	436	377	678	Diciembre Nov. y Enero Oct. y Febrero Sept. y Marzo Agosto y Abril Julio y Mayo Junio	30°
	Julio y Mayo	43	355	444	271	81	271	444	355	647		
	Agosto y Abril	29	292	447	349	170	349	447	292	637		
	Sept. y Marzo	24	244	428	412	284	412	428	244	574		
	Oct. y Febrero	21	105	364	442	393	442	364	105	485		
	Nov. y Enero	19	43	314	439	431	439	314	43	393		
	Diciembre	16	32	284	439	442	439	284	32	355		
40°	Junio	46	360	439	301	144	301	439	360	642	Diciembre Nov. y Enero Oct. y Febrero Sept. y Marzo Agosto y Abril Julio y Mayo Junio	40°
	Julio y Mayo	40	344	444	339	187	339	444	344	631		
	Agosto y Abril	29	276	438	395	276	395	438	276	580		
	Sept. y Marzo	24	157	404	439	379	439	404	157	496		
	Oct. y Febrero	19	94	330	442	439	442	330	94	349		
	Nov. y Enero	13	32	271	423	438	423	271	32	279		
	Diciembre	13	27	293	401	447	401	293	27	230		
50°	Junio	43	341	444	366	252	366	444	341	596	Diciembre Nov. y Enero Oct. y Febrero Sept. y Marzo Agosto y Abril Julio y Mayo Junio	50°
	Julio y Mayo	38	317	442	387	287	387	442	317	572		
	Agosto y Abril	29	254	428	425	374	425	428	254	501		
	Sept. y Marzo	21	157	374	442	428	442	374	157	401		
	Oct. y Febrero	13	78	284	425	452	425	284	78	254		
	Nov. y Enero	10	24	173	344	414	344	173	24	143		
	Diciembre	8	19	127	314	382	314	127	19	108		
		S	SE	E	NE	N	NO	O	SO	Horiz.		
ORIENTACION (LATITUD SUR)												

A 0-2 – Ganho de calor no pico solar, através de vidro simples.

TABLA 7. FACTORES DE ALMACENAMIENTO SOBRE CARGA TÉRMICA, APORTACIONES SOLARES A TRAVÉS DE VIDRIO.

Con elementos de sombra interiores*
Funcionamiento de 24 horas diarias, Temperatura interior constante**

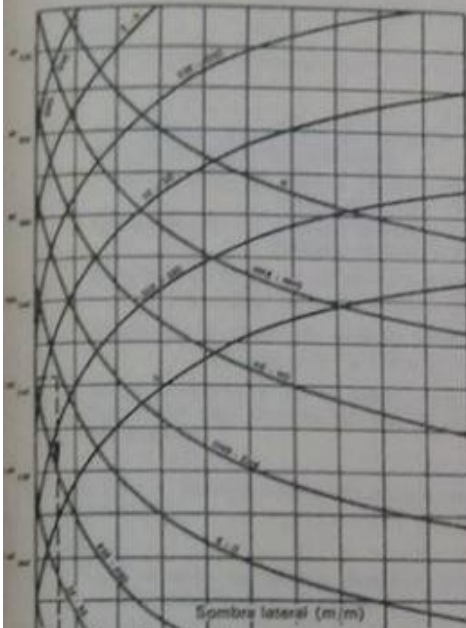
ORIENTACIÓN (Latitud Norte)	PESO*** (kg por m ² de superficie de suelo)	HORA SOLAR																								ORIENTACIÓN (Latitud Sur)					
		MAÑANA												TARDE													MAÑANA				
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5						
NE	750 y más	0,47	0,58	0,54	0,42	0,27	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,14	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	SE				
	500	0,48	0,60	0,57	0,46	0,30	0,24	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,13	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02						
	150	0,55	0,76	0,73	0,58	0,36	0,24	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,07	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0						
E	750 y más	0,39	0,56	0,62	0,59	0,49	0,33	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	E					
	500	0,40	0,58	0,65	0,63	0,52	0,35	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03							
	150	0,46	0,70	0,80	0,79	0,64	0,42	0,25	0,19	0,16	0,14	0,11	0,09	0,07	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0	0							
SE	750 y más	0,04	0,28	0,47	0,59	0,64	0,62	0,53	0,41	0,27	0,24	0,21	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	NE					
	500	0,03	0,28	0,47	0,61	0,67	0,65	0,57	0,44	0,29	0,24	0,21	0,18	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04							
	150	0	0,30	0,57	0,75	0,84	0,81	0,69	0,50	0,30	0,20	0,17	0,13	0,09	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0							
S	750 y más	0,06	0,06	0,23	0,38	0,51	0,60	0,65	0,67	0,64	0,59	0,42	0,24	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	N					
	500	0,04	0,04	0,22	0,38	0,52	0,63	0,70	0,71	0,69	0,59	0,45	0,26	0,22	0,18	0,16	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05							
	150	0,10	0,21	0,43	0,63	0,77	0,86	0,88	0,82	0,56	0,50	0,24	0,16	0,11	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0							
SO	750 y más	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,24	0,39	0,53	0,63	0,66	0,61	0,47	0,23	0,19	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	NO					
	500	0,07	0,08	0,08	0,08	0,10	0,24	0,40	0,55	0,66	0,70	0,64	0,50	0,26	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06							
	150	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,23	0,47	0,67	0,81	0,86	0,79	0,60	0,26	0,17	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0							
O	750 y más	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,18	0,36	0,52	0,63	0,65	0,55	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	O					
	500	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,18	0,36	0,54	0,66	0,68	0,60	0,25	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07							
	150	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,19	0,42	0,65	0,81	0,85	0,74	0,30	0,19	0,13	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01							
NO	750 y más	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,16	0,33	0,49	0,61	0,60	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	SO					
	500	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,16	0,34	0,52	0,65	0,64	0,23	0,18	0,15	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05							
	150	0,03	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,17	0,39	0,63	0,80	0,79	0,28	0,18	0,12	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01							
N y sombra	750 y más	0,08	0,37	0,67	0,71	0,74	0,76	0,79	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,29	0,26	0,23	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	S y sombra					
	500	0,06	0,31	0,67	0,72	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,30	0,26	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09							
	150	0	0,25	0,74	0,83	0,88	0,91	0,94	0,96	0,96	0,98	0,98	0,99	0,99	0,26	0,17	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01							

A 0-3 – Fator de calor acumulado, através dos ganhos de calor solar através do vidro,

TABLA 18. ALTURA Y AZIMUT DEL SOL

LATITUD NORTE °	HORA SOLAR	21 Enero		20 Feb		22 Marzo		20 Abril		21 Mayo		21 Junio		23 Julio		24 Agosto		22 Sept.		23 Oct		21 Nov		22 Dic		HORA SOLAR	
		Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.	Alt.	Azi.		
0°	6.00	14	113	15	102	15	90	15	78	14	69	14	66	14	69	15	78	15	90	15	102	14	113	14	124	6.00	
	7.00	28	113	30	103	30	89	30	77	28	67	27	63	28	67	30	77	30	89	30	103	28	113	27	117	7.00	
	8.00	42	117	44	106	45	89	44	74	42	63	41	58	42	63	44	74	45	89	44	106	42	117	41	123	8.00	
	9.00	54	126	58	112	60	89	58	68	54	54	53	49	54	58	60	67	58	112	60	126	54	126	53	121	9.00	
	10.00	65	144	71	127	75	88	71	53	65	56	52	52	65	71	75	88	71	127	75	144	65	144	67	148	10.00	
	11.00	70	180	79	180	90	0	79	0	70	0	67	0	79	0	90	0	79	180	79	180	79	180	87	180	11.00	
	12.00	65	216	71	233	75	272	71	307	65	324	62	328	65	324	71	307	75	272	71	233	65	216	63	212	12.00	
	13.00	54	234	58	248	60	271	58	292	54	306	53	311	54	306	58	292	60	271	58	248	54	234	53	229	13.00	
	14.00	42	242	44	254	45	271	44	286	42	292	41	302	42	292	44	286	45	271	44	254	42	242	41	238	14.00	
	15.00	28	247	30	257	30	271	30	283	28	293	27	292	28	293	30	283	30	271	30	257	28	247	27	243	15.00	
	16.00	14	249	15	258	15	270	15	282	14	291	14	294	14	291	15	282	15	270	15	258	14	249	14	246	16.00	
	17.00																										17.00
	18.00																										18.00
10°	6.00	10	112	12	102	15	92	16	81	17	72	18	68	17	72	18	81	15	92	12	102	10	112	9	116	6.00	
	7.00	24	117	27	108	30	95	31	83	32	72	32	68	32	72	31	83	30	95	27	108	24	117	23	121	7.00	
	8.00	37	124	41	115	44	99	46	88	46	72	45	67	46	72	46	88	44	99	41	115	37	124	35	128	8.00	
	9.00	48	136	54	123	59	106	61	84	60	67	58	67	60	67	61	84	59	106	54	123	48	136	46	139	9.00	
	10.00	57	155	64	144	72	122	73	84	73	53	70	44	73	53	75	84	72	122	64	144	57	155	53	164	10.00	
	11.00	60	180	67	180	80	180	89	0	80	0	77	0	89	0	80	180	67	180	60	180	60	180	57	180	11.00	
	12.00	57	205	64	216	72	238	75	276	71	307	70	316	73	307	75	276	72	238	64	216	57	205	53	204	12.00	
	13.00	48	224	54	235	59	254	61	276	60	293	58	299	60	293	61	276	59	254	54	235	48	224	46	227	13.00	
	14.00	37	236	47	245	44	261	46	276	46	288	45	293	46	288	44	261	44	245	47	236	37	236	35	232	14.00	
	15.00	24	243	37	252	30	265	31	272	32	280	32	292	32	280	31	272	30	265	37	252	24	243	23	239	15.00	
	16.00	10	247	32	257	15	268	16	279	17	288	18	292	17	288	16	279	15	268	32	257	10	247	9	244	16.00	
	17.00																										17.00
	18.00																										18.00
20°	6.00	8	114	10	104	14	95	18	84	20	75	21	68	21	75	21	84	14	95	10	104	8	114	7	117	6.00	
	7.00	19	121	22	112	28	101	32	89	34	79	35	75	34	79	32	89	28	101	22	112	19	121	17	124	7.00	
	8.00	30	130	36	121	42	108	46	94	48	87	48	77	48	82	46	94	42	108	36	121	30	130	28	133	8.00	
	9.00	40	142	47	133	55	120	59	102	62	85	62	77	62	85	59	102	55	120	47	133	40	142	38	145	9.00	
	10.00	47	158	55	152	68	143	72	117	75	88	74	75	88	72	117	68	143	55	152	47	158	44	163	10.00		
	11.00	50	180	59	180	80	180	81	180	90	0	87	0	90	0	87	180	59	180	50	180	47	180	47	180	11.00	
	12.00	47	202	55	208	66	217	72	243	75	272	76	286	75	272	72	243	66	217	55	208	47	202	44	207	12.00	
	13.00	40	218	47	227	55	240	59	258	62	275	62	283	62	275	59	258	55	240	47	227	40	218	38	215	13.00	
	14.00	30	230	34	239	43	252	46	266	48	278	48	283	48	278	46	266	43	252	34	239	30	230	28	237	14.00	
	15.00	19	235	23	248	28	250	32	271	34	281	35	285	34	281	32	271	28	250	23	248	19	235	17	236	15.00	
	16.00	8	246	10	254	14	265	18	276	20	285	21	288	20	285	18	276	14	265	10	254	8	246	7	243	16.00	
	17.00																										17.00
	18.00																										18.00
30°	6.00	2	115	7	107	12	97	19	87	23	79	24	76	23	79	19	87	12	97	7	107	2	115	1	117	6.00	
	7.00	14	124	19	116	26	104	31	95	35	86	37	82	35	86	31	95	26	104	19	116	14	124	13	126	7.00	
	8.00	24	134	30	127	38	116	44	104	48	93	49	88	48	93	44	104	38	116	30	127	24	134	21	136	8.00	
	9.00	32	146	40	141	49	130	56	117	61	107	62	96	61	107	56	117	49	130	40	141	32	146	29	149	9.00	
	10.00	38	162	48	159	57	151	67	140	73	122	75	112	73	122	67	140	57	151	48	159	38	162	35	164	10.00	
	11.00	40	180	49	180	60	180	71	180	80	180	83	180	80	180	71	180	60	180	49	180	40	180	37	180	11.00	
	12.00	38	198	46	201	57	209	67	220	73	238	75	248	73	238	67	220	57	209	46	201	38	198	35	196	12.00	
	13.00	32	214	40	219	49	230	56	243	61	257	62	264	61	257	56	243	49	230	40	219	32	214	29	211	13.00	
	14.00	24	226	30	233	38	244	44	256	48	267	49	272	48	267	44	256	38	244	30	233	24	226	21	224	14.00	
	15.00	14	236	19	244	26	254	31	265	35	274	37	278	35	274	26	254	19	244	14	236	11	234	11	234	15.00	
	16.00	2	243	7	253	13	263	19	273	23	281	24	284	23	281	19	273	13	263	7	253	2	243	1	245	16.00	
	17.00																										17.00
	18.00																										18.00
40°	6.00																									6.00	
	7.00																									7.00	
	8.00	8	125	15	119	23	110	30	102	35	93	37	89	35	93	30	102	23	110	15	119	8	125	5	127	8.00	
	9.00	17	136	24																							

GRÁFICO 1. SOMBRA DEBIDA A LOS ALEROS, SALIENTES Y EDIFICIOS ADYACENTES



Caso :

Ventana con cuadro metálico orientada al oeste retirada 0,20 m y con un alero de 0,60 m situado a 0,15 m encima de la ventana.

Determinar :

Las sombras debidas al alero y al saliente, a las 14 horas del 23 de julio, para una latitud de 40° norte.

Solución :

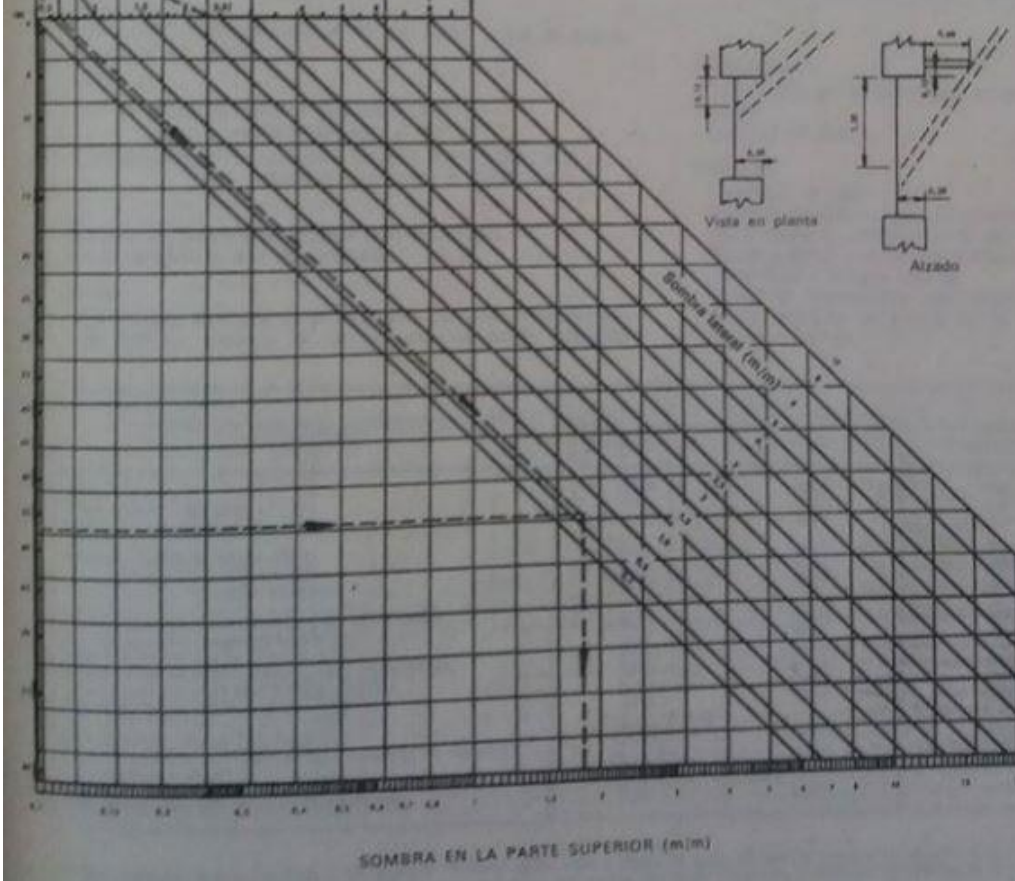
Según la tabla 18 :

Azimut del sol = 242°.

Altura del sol = 57°.

Utilizar las curvas adjuntas.

1. Trazar una horizontal que pasa por 242° de azimut. Corta a la curva E-O en un punto de abscisa 0,6 m/m (sombra lateral).
2. Trazar por este punto de abscisa 0,6 una paralela a las rectas designadas 0,2-0,5. La abscisa del punto en que esta recta corta la horizontal que pase por el punto correspondiente a una altura del sol de 57°, es igual a 1,8 m/m (sombra debida al alero).
3. Sombra lateral : $0,6 \times 0,2 = 0,12$ m.
4. Sombra debida al alero : $1,8 (0,6 + 0,2) - 0,15 = 1,30$ m.



A 0-5 – Sombreamiento do edificio.

Anexo 2

Uma forma de caracterizar o vento local é recorrer a leis de distribuição de classes do vento. Uma das funções de distribuição frequentemente utilizadas para esse efeito, é a distribuição de Weibull. A distribuição de Weibull é feita á custa de dois parâmetros, k e A , sendo esses parâmetros de forma e de escala, respetivamente. Esta distribuição dá uma representação estatística razoável daquela que é a distribuição da velocidade instantânea do vento ao longo do ano. A lei de distribuição de Weibull pode ser expressa pela seguinte expressão (Guerreiro Modesto, 2015).

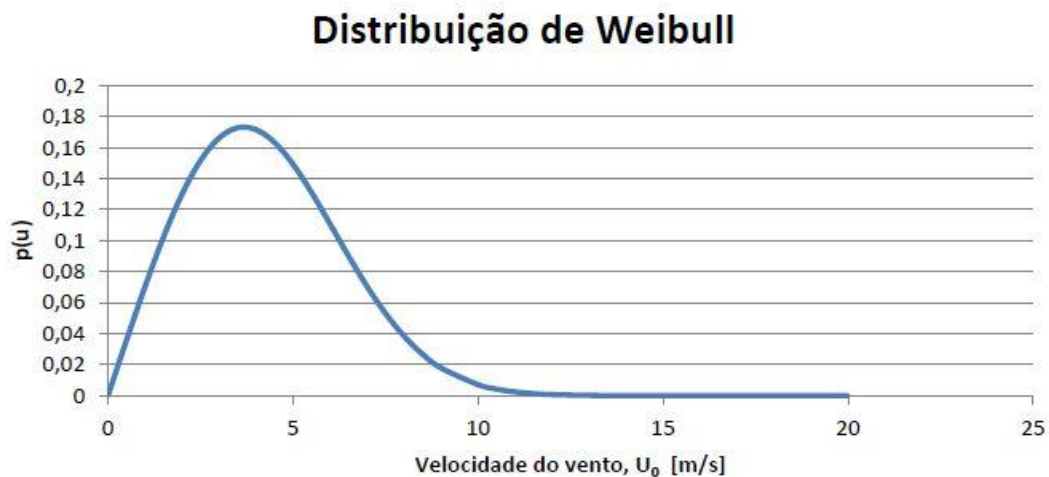
$$p(u) = ku^{k-1}A^{-1} \exp \left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k \right] \quad (0.4)$$

Sendo que $p(u)$ é uma função densidade de probabilidade:

$$\int_0^{\infty} p(u)du = 1 \quad (0.5)$$

Assumindo $k=2$, que representa as condições em Portugal e $A = 1,125\bar{u}$ com $\bar{u} = 4,7$ m/s, para a região de Lisboa (“Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” n.d.).

Tem-se então a seguinte distribuição de Weibull ($A = 0,6A = 0,6$), também chamada de Rayleigh, sendo este um caso particular da distribuição de Weibull com $k=2$, para a frequência de ocorrência de velocidades do vento na região de Lisboa.



A 0-6 -Distribuição de Weibull (Guerreiro Modesto, 2015).