



**Mário David Siquilile Alves da Costa**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Aproveitamento Energético da Ventilação Natural**

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

Arguentes: Prof. Doutor Diana Filipa da Conceição Vieira

Vogal: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias





**Mário David Siquilile Alves da Costa**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Aproveitamento Energético da Ventilação Natural**

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

Arguentes: Prof. Doutor Diana Filipa da Conceição Vieira

Vogal: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2019**



## **Aproveitamento energético da ventilação natural**

Copyright © Mário David Siquilile Alves da Costa, 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 longo do meu percurso acadêmico e em especial durante a elaboração desta dissertação foram várias as pessoas estiveram presentes, prontas a ajudar e a oferecer a sua amizade. É difícil enumerar todos aquele que contribuíram para que chegasse a esta fase, mas sou grato pelo seu contributo.

Ao Professor José Fernando de Almeida Dias, como orientador científico, devo expressar a minha gratidão pela sua disponibilidade, mais-valia técnica no esclarecimento de dúvidas e paciência, as quais foram vitais para a elaboração desta dissertação.

Deixo uma palavra especial a todos os amigos que fiz na faculdade, que sempre se demonstram disponíveis a apoiar nos altos e baixos característicos deste percurso, fazendo com que o mesmo fosse mais fácil e menos solitário.

Gostava ainda de agradecer a todos os amigos que não estando ligados à minha vida académica diretamente, também foram de grande importância, transmitindo-me força para enfrentar todos os obstáculos.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento especial à minha família por todo o apoio, especialmente aos meus pais e ao meu irmão, por servirem de exemplo e por estarem sempre presentes para me apoiar.



## Resumo

A presente dissertação pretende analisar o aproveitamento energético obtido em um edifício através da ventilação natural. Com intuito de obter sistemas energéticos mais eficientes utilizando as potencialidades do vento, recorreu-se a um modelo simplificado da ventilação natural, trabalhando com um software de cálculo e estudos previamente elaborados como referência.

Primeiramente, são elaborados casos tutoriais para testar o funcionamento do programa de cálculo numérico (MatLab) que analisa e fornece os dados necessários para a resolução do caso de estudo. Os mesmos tutoriais servem como ajuda à compreensão dos fenómenos ocorrentes no interior de um edifício sob o efeito de ventilação natural.

Em seguida, é definido o caso de estudo e são propostas várias soluções para resolução dos problemas presentes no mesmo. As propostas implicam variações na geometria e em elementos a associar ao edifício, de forma a obter um melhor aproveitamento do vento.

Após encontrada a solução mais adequada, são acrescentadas limitações referentes ao número mínimo de renovações de ar necessárias, tendo por base os valores mínimos indicados na Norma Portuguesa 1991-1-4, levando a elaboração de simulações de vários casos que possam responder às diferentes solicitações impostas.

Por fim, os resultados obtidos serão analisados e comparados criteriosamente.

**Termos chave:** Ventilação natural, impulsão térmica, ventilador, potência, energia.



## Abstract

This dissertation intends to analyze the energy savings obtained in a building through natural ventilation. In order to obtain more efficient energy systems using the wind potential, we used a simplified model of natural ventilation, working with a calculation software and studies previously developed as a reference.

First, tutorial cases are designed to test the operation of the numerical calculation program (MatLab) that analyzes and provides the data needed for the resolution of the case study. The same tutorials help to understand the phenomena that occur inside a building under the effect of natural ventilation.

Then, the case study is defined and several solutions are proposed to solve the problems present in it. The proposals imply variations in the geometry and elements to be associated with the building, in order to obtain a better use of wind.

After finding the most appropriate solution, limitations are added regarding the minimum number of air renewals required, based on the minimum values indicated in the Norma Portuguesa 1991-1-4, leading to the elaboration of simulations of several cases that can respond to different requests. imposed.

Finally, the results will be carefully analyzed and compared.

**Key terms:** Natural ventilation, thermal buoyancy, fan, power, energy.



# Índice de matérias

Agradecimentos .....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Índice de figuras .....	ix
Nomenclatura.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação e Objetivo .....	1
1.2 Metodologia.....	2
1.3 Caso de Estudo .....	3
1.4 Estrutura da dissertação .....	4
2 Modelo simplificado da ventilação natural.....	5
2.1 Equações do modelo simplificado da ventilação natural.....	5
2.1.1 Equação da continuidade .....	6
2.1.2 Equação da quantidade de movimento.....	6
2.1.3 Equação da energia .....	9
2.1.4 Equação de estado para um gás ideal.....	10
3 Tutoriais.....	11
3.1 Caso Tutorial 1 .....	11
3.1.1 Espaço cúbico $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ .....	12
3.1.2 Espaço cúbico com geração de calor interior.....	14
3.2 Caso Tutorial 2 .....	17
3.2.1 Dois espaços cúbicos $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ em comunicação por uma abertura de ventilação ....	17
3.2.2 Dois espaços cúbicos com geração de calor .....	19
3.2.3 Dois espaços cúbicos com geração de calor com paredes adiabáticas.....	22
3.2.4 Dois espaços cúbicos com nova geometria.....	25
3.2.5 Dois espaços cúbicos com nova geometria e geração de calor .....	27
3.2.6 Dois espaços cúbicos com nova geometria, geração de calor e paredes adiabáticas ..	30
4 Resultados do caso de estudo.....	35
4.1 Definições do vento e coeficientes de pressão.....	36

4.2 Análise dos casos de estudo.....	37
4.2.1 Caso 1.....	38
4.2.2 Caso 2.....	42
4.2.3 Caso 3.....	45
4.3 Casos específicos da renovação de ar .....	48
4.3.1 Chaminé 0,5 m <sup>2</sup> para 1 renovação por hora .....	49
4.3.2 Chaminé 0,5 m <sup>2</sup> para 5 renovações por hora.....	51
4.3.3 Chaminé 5 m <sup>2</sup> para 1 renovação por hora .....	53
4.3.4 Chaminé 5 m <sup>2</sup> para 5 renovações por hora.....	55
4.4 Análise de resultados .....	57
4.4.1 Distribuição de vento em Lisboa .....	57
4.4.2 Resultados caso com chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora.....	59
4.4.3 Resultados caso com chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora .....	62
4.4.4 Resultados caso com chaminé 5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora.....	64
4.4.5 Resultados caso com chaminé 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora .....	66
4.4.6 Consumo energético do edifício .....	68
5 Conclusões.....	77
Bibliografia .....	79

## Índice de figuras

Figura 1.1- Modelo simplificado (alçado principal) .....	3
Figura 2.1 - Curva característica de uma chaminé cilíndrica .....	8
Figura 3.1- Caso tutorial 1, espaço cúbico .....	12
Figura 3.2- Modelo do espaço cúbico .....	12
Figura 3.3- Velocidade do ar na abertura 1 .....	13
Figura 3.4- Número de renovações de ar por hora no interior do espaço .....	14
Figura 3.5- Modelo do espaço cúbico com geração de calor .....	14
Figura 3.6- Velocidade do ar na abertura 1, com geração de calor .....	15
Figura 3.7- Velocidade do ar na abertura 1, com geração de calor (vista detalhada).....	16
Figura 3.8- Número de renovações de ar por hora no interior do espaço, com geração de calor	16
Figura 3.9- Variação de temperatura no interior do espaço cúbico.....	17
Figura 3.10- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação .....	17
Figura 3.11- Velocidade de ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos .....	18
Figura 3.12- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos .....	19
Figura 3.13- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação com geração de calor.....	19
Figura 3.14- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor..	20
Figura 3.15- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor.....	21
Figura 3.16- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor.....	21
Figura 3.17- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas.....	22
Figura 3.18- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas .....	23
Figura 3.19- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas .....	24
Figura 3.20- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação (geometria 2) .....	25
Figura 3.21- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos (geometria 2) .....	26
Figura 3.22- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos (geometria 2) ...	26
Figura 3.23- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação com geração de calor (geometria 2) .....	27

Figura 3.24- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2) .....	28
Figura 3.25- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2) .....	29
Figura 3.26- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2) .....	29
Figura 3.27- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2) .....	30
Figura 3.28- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas (geometria 2) .....	31
Figura 3.29- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2) .....	31
Figura 3.30- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas (geometria 2).....	32
Figura 3.31- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2) .....	32
Figura 3.32- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas (geometria 2) .....	33
Figura 4.1- Modelo da nave industrial (alçado principal) .....	36
Figura 4.2- Modelo da nave industrial (vista em planta) .....	36
Figura 4.3- Nave industrial com abertura junto ao chão .....	38
Figura 4.4- Velocidade do ar na abertura 1 para nave industrial com abertura junto ao chão ....	39
Figura 4.5- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com abertura junto ao chão .....	39
Figura 4.6- Variação de temperatura para nave industrial com abertura junto ao chão .....	40
Figura 4.7- Nave industrial com 4 aberturas exteriores com velocidade do vento nula.....	41
Figura 4.8- Velocidade do ar nas aberturas para nave industrial .....	41
Figura 4.9- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com 4 aberturas .....	42
Figura 4.10- Nave industrial com abertura junto ao teto.....	42
Figura 4.11- Velocidade do ar na abertura 1 para nave industrial com abertura junto ao teto....	43
Figura 4.12- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com abertura junto ao teto .....	44
Figura 4.13- Variação de temperatura para nave industrial com abertura junto ao teto.....	44
Figura 4.14- Nave industrial com chaminé .....	45
Figura 4.15- Velocidade do ar na abertura 1 para nave industrial com chaminé .....	46
Figura 4.16- Variação de temperatura para nave industrial com chaminé .....	46
Figura 4.17- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé .....	47

Figura 4.18- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminés de várias dimensões .....	48
Figura 4.19- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> .....	49
Figura 4.20- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e número de renovações mínimo igual a 1 renovação por hora .....	50
Figura 4.21- Velocidade de rotação do ventilador para garantir 1 renovação por hora com chaminé 0,5 m <sup>2</sup> .....	51
Figura 4.22- Área da abertura da chaminé com obturador para garantir 1 renovação por hora e chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> .....	51
Figura 4.23- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e número de renovações mínimo igual a 5 renovações por hora .....	52
Figura 4.24- Velocidade de rotação do ventilador para garantir 5 renovações por hora com chaminé 0,5 m <sup>2</sup> .....	52
Figura 4.25- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 5 m <sup>2</sup> 53	
Figura 4.26- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 5 m <sup>2</sup> e número de renovações mínimo igual a 1 renovação por hora .....	54
Figura 4.27- Área da abertura da chaminé com obturador para garantir 1 renovação por hora e chaminé de 5 m <sup>2</sup> .....	54
Figura 4.28- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 5 m <sup>2</sup> e número de renovações mínimo igual a 5 renovações por hora .....	55
Figura 4.29- Velocidade de rotação do ventilador para garantir 5 renovações por hora com chaminé 5 m <sup>2</sup> .....	56
Figura 4.30- Área da abertura da chaminé com obturador para garantir 5 renovações por hora e chaminé de 5 m <sup>2</sup> .....	56
Figura 4.31- Distribuição de Weibull, relativa à velocidade instantânea do vento ao longo do ano .....	58
Figura 4.32- Número de dias previstos para cada velocidade do vento .....	59
Figura 4.33- Velocidade de ar na abertura da chaminé com 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora .....	60
Figura 4.34- Diferença de pressão para chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora .....	60
Figura 4.35- Potência consumida para chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora .....	61
Figura 4.36- Potência consumida para chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora (vista detalhada) .....	62
Figura 4.37- Velocidade de ar na abertura da chaminé com 0,5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora .....	62
Figura 4.38- Diferença de pressão para chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora .....	63
Figura 4.39- Potência consumida para chaminé de 0,5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora .....	64
Figura 4.40- Velocidade de ar na abertura da chaminé com 5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora .....	65

Figura 4.41- Diferença de pressão para chaminé de 5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora.....	65
Figura 4.42- Velocidade de ar na abertura da chaminé com 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora.....	66
Figura 4.43- Diferença de pressão para chaminé de 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora.....	67
Figura 4.44- Potência consumida para chaminé de 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora .....	67
Figura 4.45- Potência consumida para chaminé de 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora (vista detalhada) .....	68
Figura 4.46- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora no sentido positivo da velocidade do vento .....	69
Figura 4.47- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora no sentido positivo da velocidade do vento (vista detalhada).....	69
Figura 4.48- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora no sentido negativo da velocidade do vento.....	70
Figura 4.49- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 1 renovação por hora no sentido negativo da velocidade do vento (vista detalhada).....	71
Figura 4.50- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido positivo da velocidade do vento .....	72
Figura 4.51- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido negativo da velocidade do vento.....	72
Figura 4.52- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido positivo da velocidade do vento .....	73
Figura 4.53- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido positivo da velocidade do vento (vista detalhada).....	74
Figura 4.54- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido negativo da velocidade do vento.....	74
Figura 4.55- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 5 m <sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido negativo da velocidade do vento (vista detalhada).....	75

## Nomenclatura

A – área

$A_{ab}$  – área da abertura

$A_k$  – área da abertura

CFD – Computational fluid dynamics

$C_{pk}$  – Coeficiente de pressão externa da abertura k

$C_{po}$  – Calor específico do ar

D - Diâmetro

g – Aceleração da gravidade

$H_k$  – Cota média da abertura k medida relativamente à abertura ao nível mais baixo no espaço i

N – Número de incógnitas do problema

NA(I) – Número de aberturas em cada espaço interno i

NESP – Número de espaços internos

p – Pressão

Pot - Potência

$p_0$  – Pressão estática de referência

$p_i$  – Pressão no espaço interno i

$p_k$  – Pressão no exterior da abertura k

Q – Caudal volúmico

$Q_f$  – Calor gerado no espaço i

Rot,  $\omega$  – Velocidade de rotação do ventilador

$T_0$  – Temperatura exterior

$T_i$  – Temperatura do espaço interno i

$U_0$  – Velocidade do vento

$U_i$  – Velocidade do ar no espaço interno i

$U_k$  – Velocidade média na abertura k

v – Velocidade de ar na abertura k

$z_0$  – Altura a que  $U_0$  é medido

$z_i$  – Parâmetro de rugosidade do terreno

$\alpha_0$  – Coeficiente de corte do vento

$\Delta\rho_i$  – Diferença entre massa volúmica do ar no espaço i e a massa volúmica do ar exterior

$\rho_i$  – Massa volúmica do ar no espaço i

$\rho_0$  – Massa volúmica do ar no exterior

$\zeta_k$  – Coeficiente de perda de carga na abertura k



# 1 Introdução

## 1.1 Motivação e Objetivo

Nos países desenvolvidos, o consumo energético e de recursos representa um problema, sendo que este ocorre de forma demasiado rápida, não permitindo a renovação natural destes recursos a uma velocidade que permita a sua reutilização, levando assim a dissipação de energia, resíduos e níveis de poluição acima do que o planeta pode comportar (Ghiaus e Allard 2005).

Os edifícios são tomados como grandes contribuidores para os problemas ambientais durante a sua construção e operação. Isto levou a que fossem efetuados variados estudos, com intuito de compreender a melhor forma de desenvolver designs de edifícios que permitissem uma redução na energia consumida, tentando ainda maximizar os recursos naturais (Siew, et al. 2011).

A utilização corrente dos edifícios leva à geração de substâncias poluentes, sendo que estas devem ser extraídas do seu interior, para que seja possível obter um ambiente apropriado à permanência de pessoas e à realização de variadas atividades. Para obter o efeito desejado, é necessário expulsar o ar poluído do interior do edifício, substituindo-o por ar limpo do exterior. Este processo pode ser feito através de ventilação natural, sendo desencadeada pela diferença de pressão criada pela ação do vento entre as fachadas do edifício e a alteração da densidade do ar por ação da temperatura, devido a aquecimento ocorrente com as atividades desenvolvidas no seu interior, ganhos solares por meio de vãos envidraçados ou funcionamento de aparelhos de aquecimento (Viegas 1995).

A ventilação natural não é uma nova invenção ou uma nova tendência. São vários os milénios em que se pode observar a utilização do vento para garantir, de forma natural, a qualidade de ar e uma temperatura de conforto dentro dos edifícios. O uso de ventilação mecânica, com auxílio de ventiladores e outros, tem sido mais comum durante o século vinte que a ventilação natural. Este acontecimento deve-se ao facto de a ventilação mecânica garantir um fluxo de ar constante, independentemente das condições atmosféricas, e possibilidade de tratamento de ar. Desde o final da década de 90 do século vinte, tem existido um grande crescimento na utilização de ventilação natural, em detrimento da ventilação mecânica, apesar das suas vantagens (Kleiven 2003).

A crescente preocupação com os fenómenos ambientais veio incentivar a um novo crescimento na popularidade da ventilação natural nos edifícios. Os edifícios modernos têm implementado, em quantidade crescente, a utilização de ventilação natural, permitindo assim um menor consumo energético, tal como uma melhor qualidade do ar (Moghaddam, Amindeldar e Bersharatzadeh 2011).

Assim sendo, o objetivo desta dissertação passa pela análise da capacidade de aproveitamento energético da ventilação natural de um edifício, usando-se esta como forma de poupança de energia, enquanto se mantém a qualidade desejada do ar no interior.

## 1.2 Metodologia

Um dos métodos principais para realizar este estudo seria a utilização de um programa de computational fluid Dynamics, também conhecido por CFD. Neste programa é feita uma simulação numérica dos escoamentos da ventilação nos espaços do edifício. Esta simulação recorre à resolução das equações de Navier-Stokes, usando métodos de discretização. Porém, este método necessita de recursos que não estão disponíveis, o que o torna menos indicado para este trabalho. Assim sendo, não pôde ser escolhido o referido método.

Tendo em conta as limitações providenciadas pelo método anteriormente mencionado, é escolhido um outro método que possibilite fazer o estudo em menos tempo. Este método baseia-se na utilização de um modelo simplificado que utiliza as equações da continuidade, quantidade de movimento e da energia. Adicionalmente, considera-se ainda o conhecimento obtido através de dados experimentais de coeficientes de perdas de carga referentes às aberturas e coeficientes de pressão referente à ação do vento no edifício, obtendo assim os parâmetros de ventilação mais importantes com auxílio de um modelo numérico. A partir deste modelo será possível ter acesso à informação referente às variáveis necessárias para mostrar o comportamento do escoamento de forma rápida. Estas variáveis serão a velocidade nas aberturas, que está diretamente relacionada com as renovações de ar no interior de cada espaço, a pressão, a temperatura e a massa volúmica. Cada um dos termos anteriores são referentes ao valor médio em cada espaço.

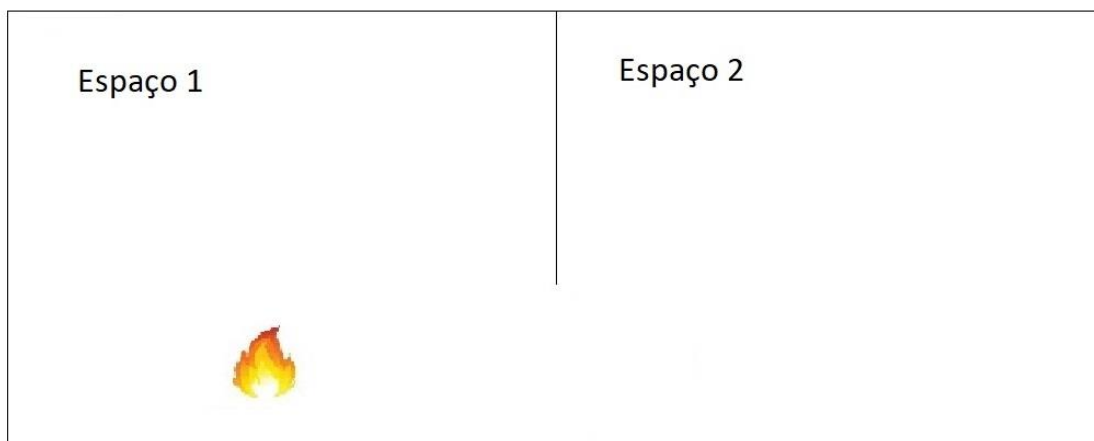
Utilizando este modelo, garante-se a possibilidade de efetuar mudanças referentes à geometria do edifício, às condições presentes no exterior do edifício e às componentes de ventilação, sendo isto efetuado de forma mais simples e obtendo também as soluções de cada caso individual rapidamente, facilitando as comparações entre os vários casos estudados. O modelo referido não possui a mesma capacidade de análise detalhada obtida através de um estudo com CFD, mas, ainda assim, fará uma aproximação suficientemente precisa dos fenómenos respetivos à ventilação que ocorre no edifício, permitindo chegar às conclusões propostas para este trabalho. É importante referir que estudos anteriores que possuem um modelo semelhante, auxiliaram na elaboração deste trabalho, nomeadamente: “*Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural*” (Teixeira 2009) e “*Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outsider environment by a chimney*” (Delgado, Borges e Conde 1996).

### 1.3 Caso de Estudo

Tal como referido anteriormente, pretende-se analisar a possibilidade de usar a ventilação natural para promover a renovação de ar dentro de um edifício, levando a que exista poupança de energia. Esta poupança surge ao deixar que o processo de ventilação ocorra de forma natural, com o auxílio do vento, ao invés do uso de um ventilador mecânico.

No caso de estudo a ser considerado, tem-se uma nave industrial composta por dois espaços. Dentro do edifício, pretende-se que os espaços tenham uma ligação entre si, através de uma abertura de comunicação, possibilitando a passagem de ar de um espaço para o outro e ainda permitindo que as pessoas se possam deslocar entre os espaços. No entanto, em um dos espaços, espaço 1, existe um processo de fabricação a decorrer que emite calor e poluentes. Estes efeitos do processo levam a alterações às propriedades do ar que são indesejadas no espaço 2, onde estão escritórios e onde zonas de atendimento a clientes, sendo necessário manter a qualidade do ar e manter uma temperatura constante.

Assim, o objetivo deste caso de estudo, será definir uma geometria para o edifício que permita a ventilação adequada, sem que haja contaminação do ar do espaço 1 para o espaço 2, independentemente das diferentes direções do vento. Para facilitar a interpretação dos resultados, considera-se a parede que está em contato com os dois espaços como adiabática, perdendo a sua capacidade de transferir calor, fazendo com que todas as trocas de calor entre os espaços sejam efetuadas através da abertura situada entre ambos. Quando não existir transporte convectivo de calor, do espaço 1 para o espaço 2, a variação de temperatura no espaço 2 terá de ser nula.



*Figura 1.1- Modelo simplificado (alçado principal)*

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está separada em 5 capítulos. O primeiro, capítulo atual, introduz a motivação e os objetivos para a realização deste estudo. Trata ainda de como será conduzido e explica de que modo se procederá para que se obtenham os resultados propostos.

No capítulo 2 é explicado o modelo teórico simplificado para a ventilação natural, o qual ajudará na obtenção dos resultados dos casos de estudo futuramente apresentados.

Em seguida, no capítulo 3, são feitos alguns casos tutoriais, com intuito de ajudar na compreensão do programa e dos fenómenos de ventilação que ocorrem no edifício. Este vai servir de base para o caso de estudo principal.

O capítulo 4 dedica-se ao desenvolvimento do caso de estudo central deste trabalho, onde são expostos os problemas e soluções, de modo a alcançar os objetivos propostos.

Por fim, o último capítulo terá comentários finais e as conclusões tiradas deste estudo.

## 2 Modelo simplificado da ventilação natural

A ventilação natural é causada pela velocidade do vento que incide no exterior do edifício, tal como pela diferença de temperatura existente entre o espaço interior e o exterior do edifício. Raramente se podem observar estes fenómenos em separado, sendo ambos de grande importância para o processo (Han, et al. 2018).

No modelo em uso, o edifício será categorizado como tendo  $n$  espaços internos, havendo dentro de cada espaço interno  $k$  aberturas e  $p$  paredes.

Durante o presente capítulo serão apresentadas as expressões que servem de base para os cálculos efetuados para o estudo. Estes cálculos estão compilados em linguagem Fortran, tal como se pode observar em outros trabalhos que servem de auxílio para o presente estudo, sendo estes (Delgado, Borges e Conde 1996), (Saraiva, Delgado e Borges 1985), (Teixeira 2009). Neste programa, é dado um input em um ficheiro de dados, onde são apresentadas as geometrias do edifício em questão, tal como as características dissipativas e térmicas do edifício, juntando-se às condições externas sob as quais o edifício está sujeito. Depois de inseridos os valores, o programa calculará as  $N$  incógnitas do problema, partindo do número de espaços internos,  $NESP$ , e o número de aberturas em cada um dos espaços,  $NA(I)$ , onde  $I$  representa o espaço interno em questão.

$$N = \sum_{I=1}^{NESP} (NA(I) + 3) \quad (2.1)$$

Isto representa as incógnitas para a velocidade, sendo uma para cada uma das  $m$  aberturas, uma para a pressão, uma incógnita para a massa volúmica e uma para a temperatura, para cada um dos  $n$  espaços.

### 2.1 Equações do modelo simplificado da ventilação natural

Tal como referido anteriormente, este método de resolução vai basear-se na solução das equações da continuidade, da quantidade de movimento, da energia e ainda da equação de estado de um gás ideal.

### 2.1.1 Equação da continuidade

$$\sum_{k=1}^{mi} U_k A_k = 0 \quad (2.2)$$

É considerado, para cada espaço interno, que se respeita a lei da continuidade, estando esta diretamente relacionada com a conservação de massa, permitindo assim assumir que as condições iniciais do fluido mantêm-se dentro do espaço interno. De notar que o termo  $U_k$  refere-se à velocidade média na abertura  $k$  e  $A_k$  refere-se à área dessa mesma abertura. Considera-se sempre que quando a velocidade  $U_k$  tem valor positivo simboliza a entrada de ar no espaço  $i$  e quando esta é negativa indica a saída do ar.

### 2.1.2 Equação da quantidade de movimento

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) - \frac{1}{2}\zeta_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (2.3)$$

O primeiro termo “ $(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g$ ” representa a impulsão térmica. Considerando o índice “\*” como sendo o valor das variáveis no espaço  $i$  no decurso da abertura  $k$ . Neste termo estão representadas as variações de densidade que ocorrem devido à diferença de temperatura no espaço, sendo que o ar mais frio e de maior densidade será mais pesado, ocupando a posição mais baixa do espaço. Em contrapartida o ar mais quente e de menor densidade será impulsionado para as alturas mais elevadas do espaço. Este efeito provoca um movimento do ar no interior do espaço, promovendo assim a ventilação do ar interior. Este termo irá depender da diferença de altura, por onde o ar frio entra no espaço e onde o ar quente sai do mesmo.

O segundo termo “ $(P_i^* - P_i)$ ” refere a diferença de pressão que corresponde à conversão da energia cinética do vento em pressão estática sobre as paredes do edifício. Esta pressão estática será superior à pressão presente no interior do edifício, assim esta diferença de pressão entre o exterior e o interior, vai promover a circulação do ar de fora para dentro do edifício. Pode-se considerar “ $P_i^*$ ” como sendo equivalente ao valor da pressão existente quando a abertura “ $k$ ” está conectada com o exterior,  $P_k$ :

$$P_k = \frac{1}{2} C_{p_k} \rho_0 U_0^2 \quad (2.4)$$

Esta expressão está dependente do valor da constante obtida experimentalmente,  $C_{p_k}$ , que representa o coeficiente de pressão no exterior da abertura k por ação do vento, sendo este calculada através de:

$$C_{p_k} = \frac{P_k - P_0}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (2.5)$$

O terceiro termo “ $\frac{1}{2}\zeta_k\rho_0U_k|U_k|$ ” é referente às perdas de carga que ocorrem na abertura k, tendo “ $\zeta_k$ ” como coeficiente de perda de carga na abertura, sendo este determinado experimentalmente e variando consoante o tipo de abertura em estudo.

A equação está definida para uma abertura simples, como portas, janelas ou aberturas de ventilação. Para outros tipos de aberturas, existem alterações a serem consideradas nas mesmas equações.

- Chaminé cilíndrica

Os estudos baseados em simulações presentes em (Delgado, Borges e Conde 1996) dão acesso às equações referentes à chaminé cilíndrica.

$$\Delta\rho_i H_k g - p_i + C_{p_k} \frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 - (1 + \zeta_{in}) \frac{1}{2}\rho_0 U_i^2 = 0, \left(\frac{U_i}{U_0} > 0\right) \quad (2.6)$$

$$\Delta\rho_i H_k g - p_i + C_{p_k} \frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 + F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) \frac{1}{2}\rho_0 U_i^2 = 0, \left(-1 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0\right) \quad (2.7)$$

onde

$$F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) = -1,25 \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_i}{0,8U_0}\right) \text{ se } -0,8 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \quad (2.8)$$

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

$$\Delta\rho_i H_k g - p_i - (1 + \zeta_{in}) \frac{1}{2}\rho_0 U_i^2 = 0, \left(\frac{U_i}{U_0} < -1\right) \quad (2.10)$$

O termo  $C_{pk}$  representa o coeficiente de pressão do vento à saída da chaminé, sendo este igual a  $C_{pk} = -1,15$  se  $U_i = 0$  e os coeficientes de perda de carga à saída da chaminé forem  $\zeta_{in} = 0,8$  e  $\zeta_{out} = 1,1$ , quando o ar entra ou sai, respetivamente (Delgado, Borges e Conde 1996). A velocidade do vento no exterior do edifício é representada pelo termo  $U_0$ , enquanto que  $U_i$  representa a velocidade na abertura da chaminé. Tal pode ser observado na figura 2.1.

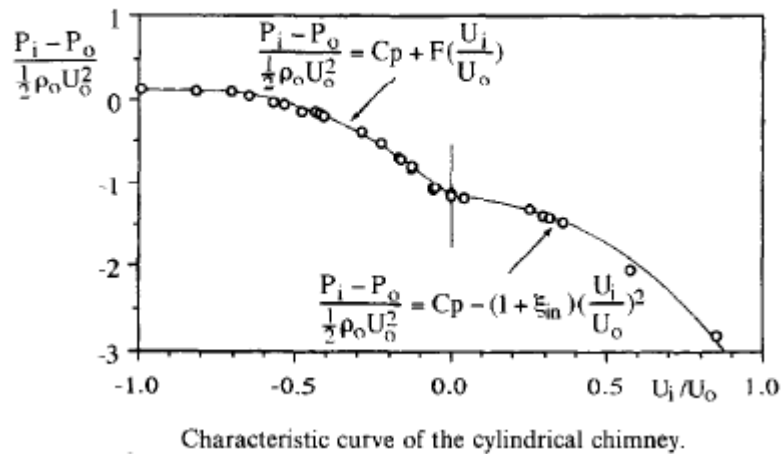


Figura 2.1 - Curva característica de uma chaminé cilíndrica

Fonte: (Delgado, Borges e Conde 1996)

- Ventilador de velocidade variável

Para os ventiladores de velocidade variável, são usadas equações obtidas a partir das suas curvas de funcionamento características, sendo estas aproximadas por um polinómio de 2º grau. Pode-se assim, através da análise adimensional, funcionar com velocidades de rotação variáveis ao longo do estudo (Gil e Araújo 2013).

- Exaustor

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| - B_v \left(\frac{Rot}{1500}\right)^2 \quad (2.11)$$

- Insuflador

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| + B_v \left(\frac{Rot}{1500}\right)^2 \quad (2.12)$$

Na interpolação, surgem duas constantes, sendo estas  $A_v$  e  $B_v$ , variando consoante o ventilador. O número de rotações por minuto a qual o ventilador funciona é dado pelo termo  $Rot$ , sendo que 1500 Rotações por minuto (RPM) é considerada a velocidade de referência, da qual podem ser retiradas as duas constantes anteriormente mencionadas.

### 2.1.3 Equação da energia

$$Q_i + \sum_{n=1}^{mi} \rho_0 c_{p_0} U_k A_k T^+ + \sum_{n=1}^{mi} h_p A_p (T_i - T_i^{**}) = 0 \quad (2.13)$$

Esta equação é dada para cada espaço  $i$ , sendo que “\*” simboliza o espaço  $i$  em comunicação com a abertura  $k$  e “\*\*” simboliza o espaço  $i$  em comunicação com a parede  $p$ . A temperatura  $T^+$  vai variar consoante a velocidade média que atravessa a abertura  $k$ , sendo  $T^+=T_i$  quando esta velocidade é negativa e  $T^+=T_i^*$  se esta velocidade for invertida, sendo que esta velocidade é considerada positiva quando o ar entra para dentro do espaço  $i$  e negativa quando o ar sai. O primeiro termo “ $Q_i$ ” representa o calor que é gerado no espaço interno.

#### 2.1.4 Equação de estado para um gás ideal

Considera-se o ar como um gás ideal, podendo assim seguir a equação de estado para gases ideais ( $P = \rho RT$ ), sendo esta convertida para acomodar o problema de forma mais precisa sob a forma de:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} + \frac{T_i - T_0}{T_0} = 0 \quad (2.14)$$

O programa utilizado serve-se de conhecimento obtido experimentalmente para determinar os parâmetros relacionados com a ventilação de um edifício, a distribuição de pressões causada pela ação do vento e ainda as características de funcionamento dos ventiladores e chaminés presentes no estudo. Este programa terá um sistema de  $n$  equações algébricas não lineares com  $n$  incógnitas, sendo solucionado através do método de Brown (Delgado, Borges e Conde 1996).

### 3 Tutoriais

Para introduzir a análise da ventilação em um edifício sujeito à ação do vento são elaborados vários casos tutoriais. Estes são feitos para que se possam compreender melhor os fenómenos ocorrentes no edifício, tal como o funcionamento do programa em questão, sendo mais fácil a sua explicação no caso de estudo que será apresentado mais adiante.

Durante esta simulação considerou-se o vento na direção perpendicular às aberturas, podendo ser proveniente de sentidos opostos, mas nunca simultaneamente. Para estes tutoriais, são tomados os valores experimentais do coeficiente de perda de carga através das aberturas com o valor de 2,5, sendo este considerado um valor adequado para simular o caso em questão, e os coeficientes de pressão externos nas aberturas são considerados iguais a 1 quando têm o vento incidente sobre si e iguais a -1 quando a abertura se encontra do lado oposto ao qual o vento incide. Estes valores dos coeficientes de pressão são escolhidos com vista a facilitar a compreensão dos casos tutoriais. No caso de estudo final os coeficientes de pressão serão calculados de forma a corresponderem com as informações presentes nas normas específicas do tema.

Para se proceder ao estudo, são introduzidos vários dados no programa de ventilação natural com a finalidade de obter uma resposta do sistema do espaço interior. Os primeiros dados a ser tomados em conta, serão os dados referentes à geometria do espaço, seguindo-se das grandezas físicas a serem consideradas. Estas grandezas incluem os valores da velocidade do vento “ $U_0$ ”, temperatura de referência “ $T_0$ ”, pressão atmosférica “ $p_0$ ”, constante do ar “ $R$ ”, aceleração gravítica “ $g$ ” e calor específico do ar “ $c_{par}$ ”. À exceção do valor de  $U_0$ , os valores físicos serão constantes. Sendo  $T_0 = 288k$ ,  $p_0 = 1,016 \times 10^5 Pa$ ,  $R = 287 J/kg \cdot k$ ,  $g = 9,8 m/s^2$  e  $c_{par} = 1009 J/kg \cdot k$ . Os diferentes valores introduzidos, farão com que seja possível verificar como o sistema responde à variação da velocidade do vento, percebendo assim, de forma melhor, os fenómenos que ocorrem no interior do espaço. A velocidade do vento varia entre 0 e 15 m/s, para ambos os sentidos.

#### 3.1 Caso Tutorial 1

Neste primeiro caso, o edifício consiste num espaço cúbico de  $5 \times 5 \times 5 m^3$ . Este espaço tem duas aberturas de  $1 \times 1 m^2$ , estando em paredes opostas do edifício, sendo uma localizada junto ao chão e a outra junto ao teto. Consideram-se duas paredes distintas, sendo a parede “1” representativa do teto e parede “2” representativa das paredes laterais. Estas paredes têm trocas de calor com o exterior, sendo estas definidas pelos valores dos seus coeficientes globais,  $U$ , sendo estes  $0,54 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , para a parede “1”, e  $0,42 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  para a parede “2”. O chão não terá

grande relevância para o estudo, portanto não será considerado, evitando também que se perca calor através do mesmo.

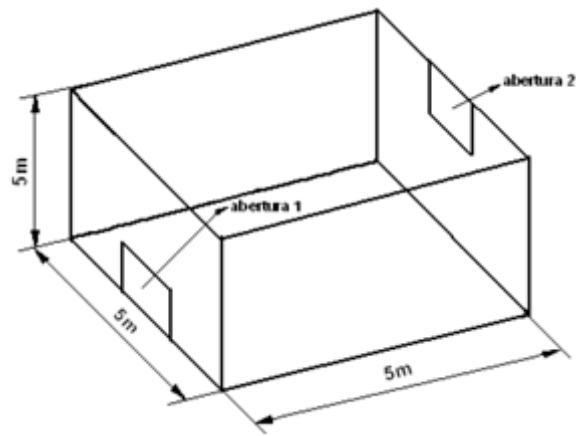


Figura 3.1- Caso tutorial 1, espaço cúbico

### 3.1.1 Espaço cúbico 5x5x5 m<sup>3</sup>

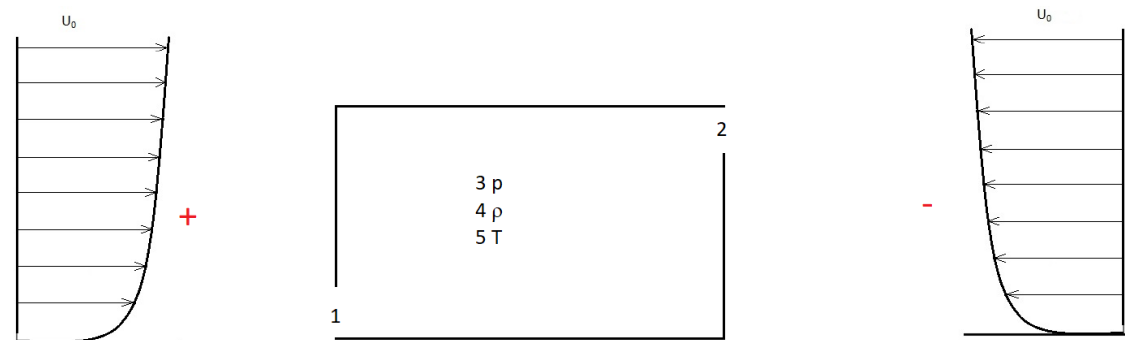
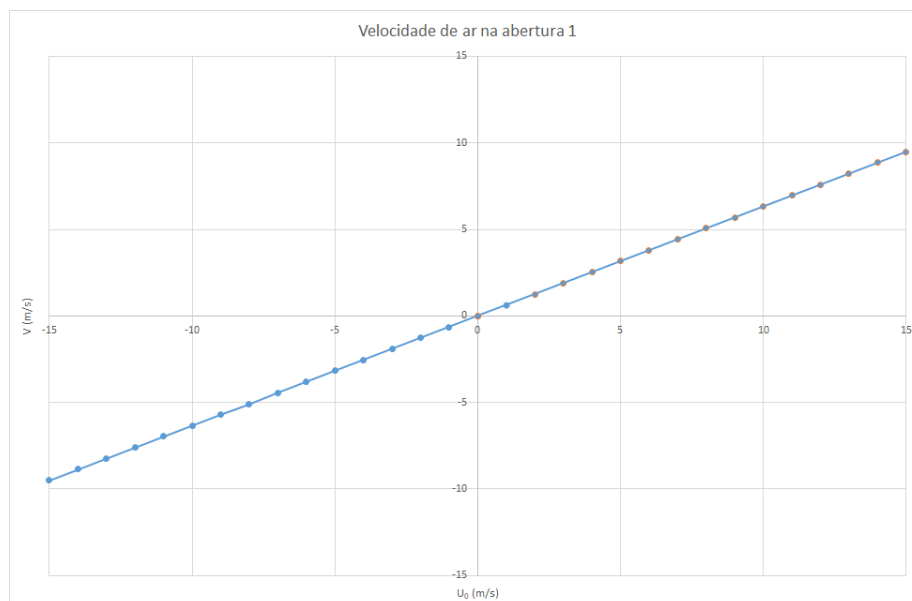


Figura 3.2- Modelo do espaço cúbico

Durante este primeiro caso tutorial, é possível observar na figura 3.3 que a ventilação varia de forma proporcional à velocidade do vento, sendo que a velocidade de ar na abertura “1” aumenta consoante o aumento da velocidade do vento. O mesmo se passa, em ordem inversa quando a velocidade do vento é proveniente de um sentido oposto.



*Figura 3.3- Velocidade do ar na abertura 1*

No que se trata da variação de temperatura, é notável que a falta de elementos que produzam energia na forma de calor no interior do edifício, juntamente com o facto de não serem considerados fatores energéticos provenientes do exterior vá levar a que não haja variação da temperatura no interior do espaço, independentemente da variação da velocidade do vento.

O Número de renovações de ar no interior do espaço desenvolve-se de forma linear, algo semelhante ao que acontece na velocidade do ar, aumentando proporcionalmente com o aumento da velocidade do vento. Quando se inverte o sentido do vento, o número de renovações mantém o padrão de proporcionalidade.

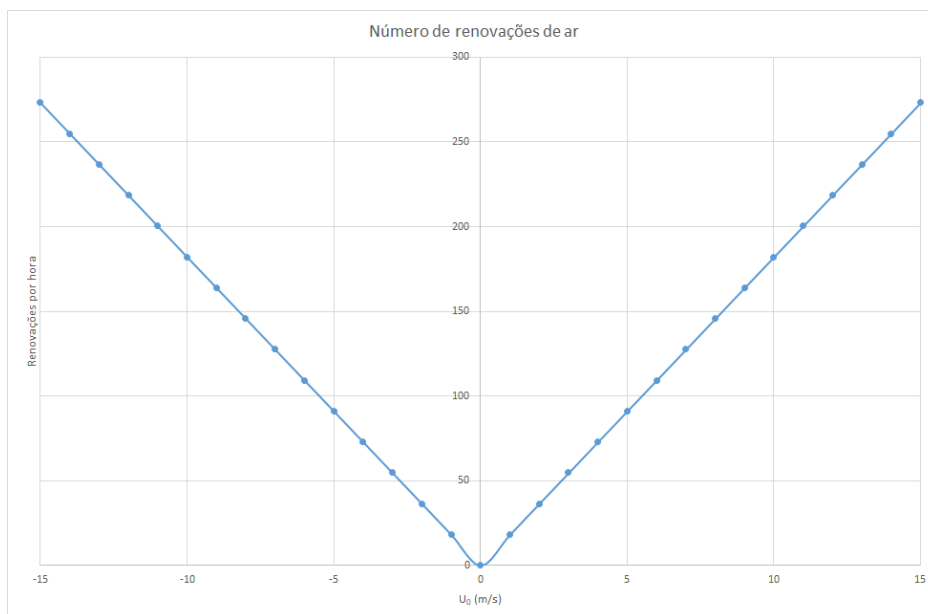


Figura 3.4- Número de renovações de ar por hora no interior do espaço

### 3.1.2 Espaço cúbico com geração de calor interior

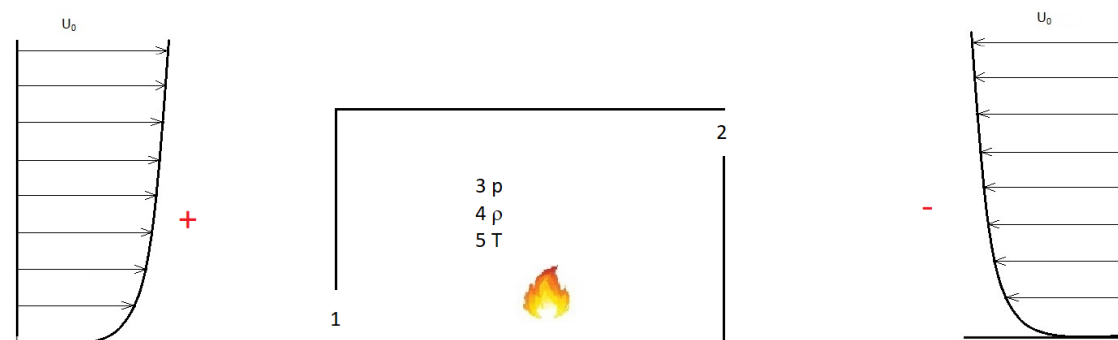


Figura 3.5- Modelo do espaço cúbico com geração de calor

No caso seguinte, o edifício, mantém a mesma geometria do caso anterior, sendo que a única alteração se trata de este possuir uma fonte de energia no seu interior que emite 25 000 W. Esta energia emitida fará com que a ventilação deixe de ser causada apenas pela velocidade do vento, passando a ser influenciada também pelo impulso térmico.

No gráfico seguinte, podemos ver a variação de velocidade do ar na abertura 1, consoante a variação da velocidade do vento. É possível conferir que para as maiores velocidades do vento, existe um acréscimo linear para a velocidade do ar na abertura. No entanto, quando a velocidade do vento toma valores mais reduzidos, verifica-se uma alteração no padrão do gráfico. Esta alteração deve-se ao facto de nessa gama de velocidades do vento, o efeito da impulsão térmica

ser mais relevante, uma vez que a pressão exercida pelo vento é menor. Isto faz com que mesmo quando a velocidade do vento seja igual a zero ainda exista ventilação.

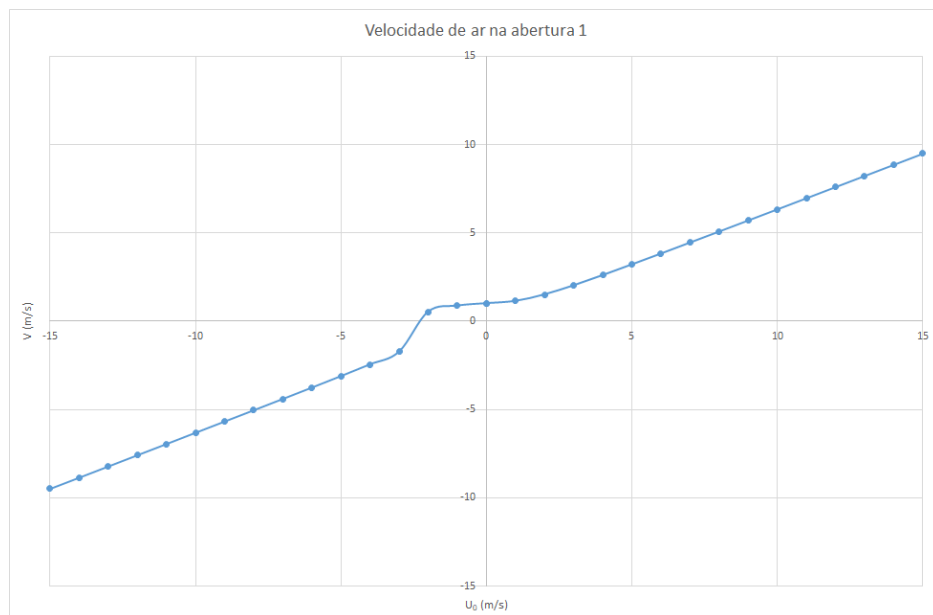


Figura 3.6- Velocidade do ar na abertura 1, com geração de calor

Para se obter uma melhor noção da evolução da velocidade de ar no interior do edifício aquando da ocorrência mais significativa da impulsão térmica, observa-se o gráfico subsequente. No gráfico mencionado, é possível reparar que quando a velocidade do vento, no sentido negativo, decresce, aproximando-se de zero, existe uma inversão do sentido da velocidade do ar na entrada 1, o que ocorre de forma bastante abrupta. Isto indica que o ponto em que a impulsão térmica começa a ser mais relevante para a ventilação do edifício que o vento. Aqui também é possível perceber que nesta geometria, a impulsão térmica favorece a ventilação para o sentido positivo, ou seja, os valores da velocidade de ar na entrada 1 serão sempre positivos, quando a impulsão térmica for o fator principal a desencadear a ventilação. Adicionalmente, assim que o efeito da impulsão térmica deixa de ser dominante, o padrão de ventilação toma uma forma semelhante ao que acontecia quando esta não se verificava.

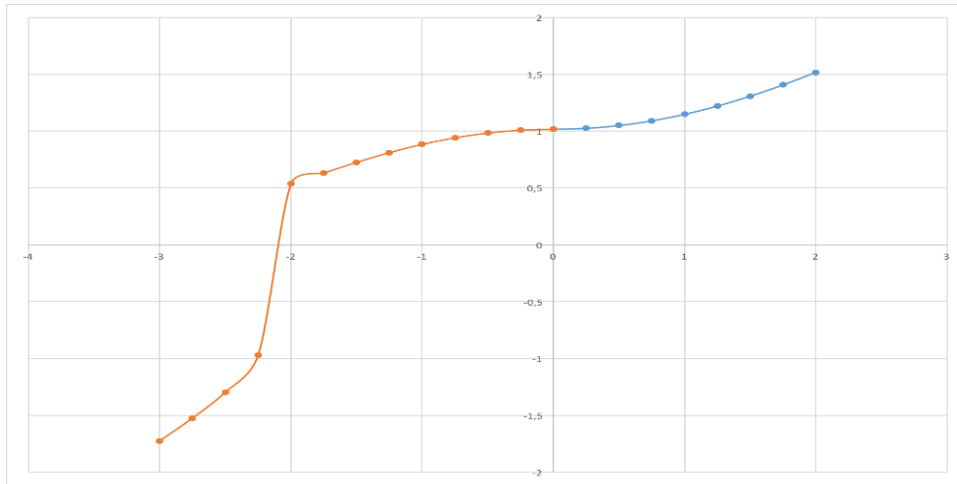


Figura 3.7- Velocidade do ar na abertura 1, com geração de calor (vista detalhada)

O gráfico apresentado em seguida mostra como se altera o número de renovações de ar no espaço considerado, sendo que este sofre algumas alterações em relação ao caso anterior, deixando de ser linear e sofrendo mudanças bruscas quando a velocidade do vento se aproxima de valores mais baixos. Esse fenómeno está associado ao efeito, já descrito anteriormente, da impulsão térmica que se mostra mais relevante que a força do vento.

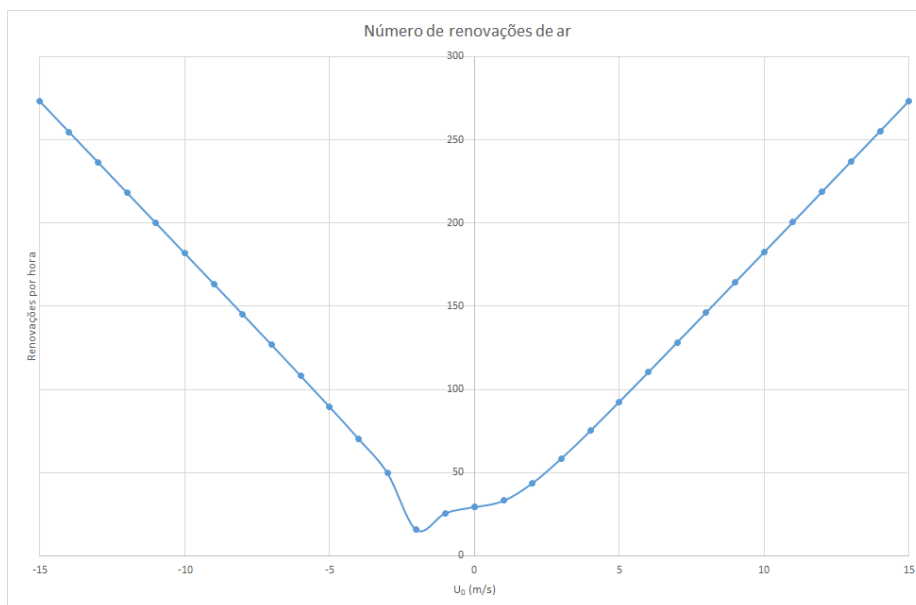


Figura 3.8- Número de renovações de ar por hora no interior do espaço, com geração de calor

É possível ainda observar a variação de temperatura no interior do espaço, tendo esta um perfil não linear, sendo notório que existe pouca variação de temperatura para velocidades do vento elevadas, aumentando de forma mais abrupta para valores de velocidade do vento mais reduzidos.

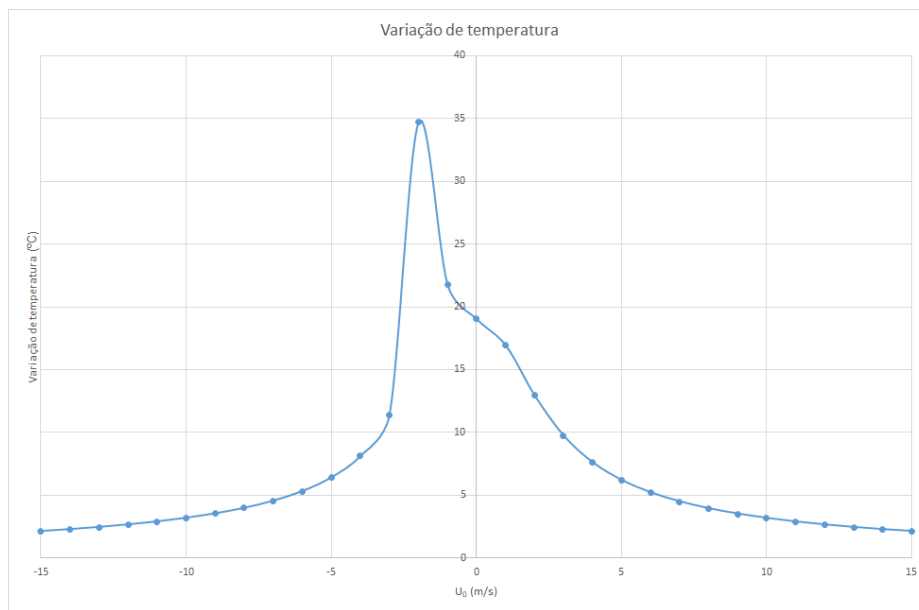


Figura 3.9- Variação de temperatura no interior do espaço cúbico

### 3.2 Caso Tutorial 2

#### 3.2.1 Dois espaços cúbicos 5x5x5 m<sup>3</sup> em comunicação por uma abertura de ventilação

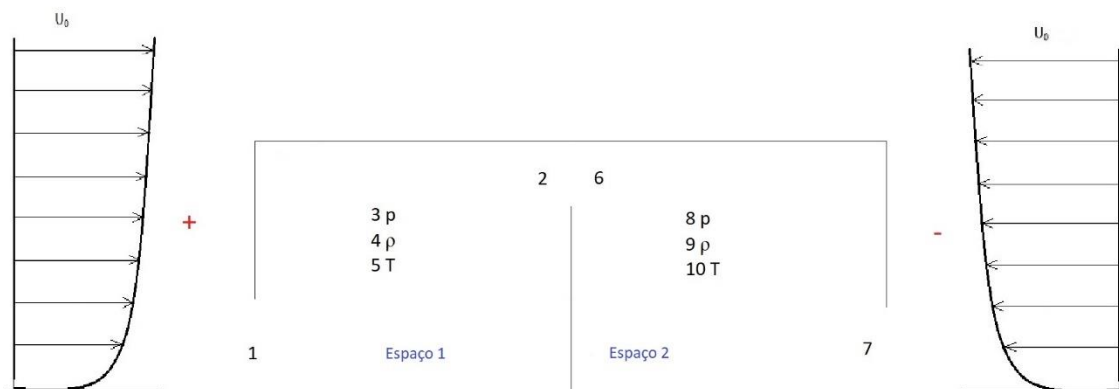


Figura 3.10- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação

No presente caso existem alterações na geometria, o edifício passa a ter dois espaços de dimensões 5x5x5 m<sup>3</sup>, cada. Estes espaços têm ligação para o exterior através de aberturas situadas junto ao chão e de dimensões 1x1 m<sup>2</sup>. Entre os espaços existe uma ligação, por onde circula o ar, de um espaço para o outro, também de 1x1m<sup>2</sup> de dimensões, mas estando esta localizada junto ao teto. Todas as restantes características relativas ao edifício mantêm-se.

Neste caso não existe fonte de energia no interior do edifício, fazendo com que toda a ventilação seja causada pela pressão exercida pelo vento. Isto faz com que a velocidade na abertura 1 siga um padrão linear, crescendo proporcionalmente em relação ao aumento da velocidade do vento, ata como pode ser analisado no gráfico seguinte. Para melhor compreensão, há que ter em conta que se considera que o edifício respeita as leis de conservação de massa, levando assim a que o caudal de ar seja constante em todo o edifício e as velocidades iguais em todas as aberturas, em consequência de as aberturas terem as mesmas dimensões.

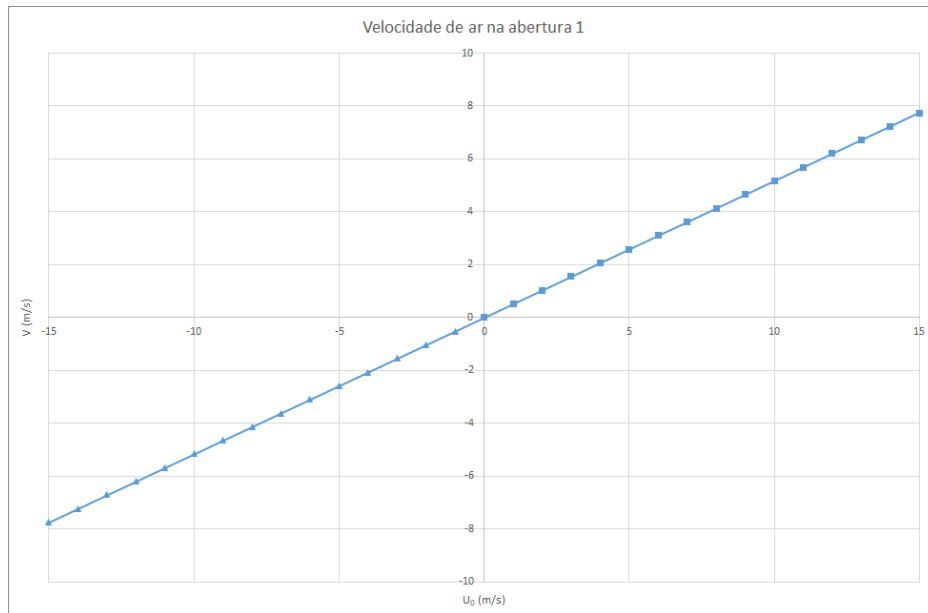


Figura 3.11- Velocidade de ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos

A inexistência de fontes de calor no interior do edifício promove a manutenção da temperatura interna, não havendo nenhuma variação da mesma em nenhum dos espaços. Esse mesmo fator faz com que a impulsão térmica seja nula, levando a que o número de renovações siga um padrão completamente linear, estando alinhado com a velocidade do vento, como se pode confirmar no gráfico seguinte.

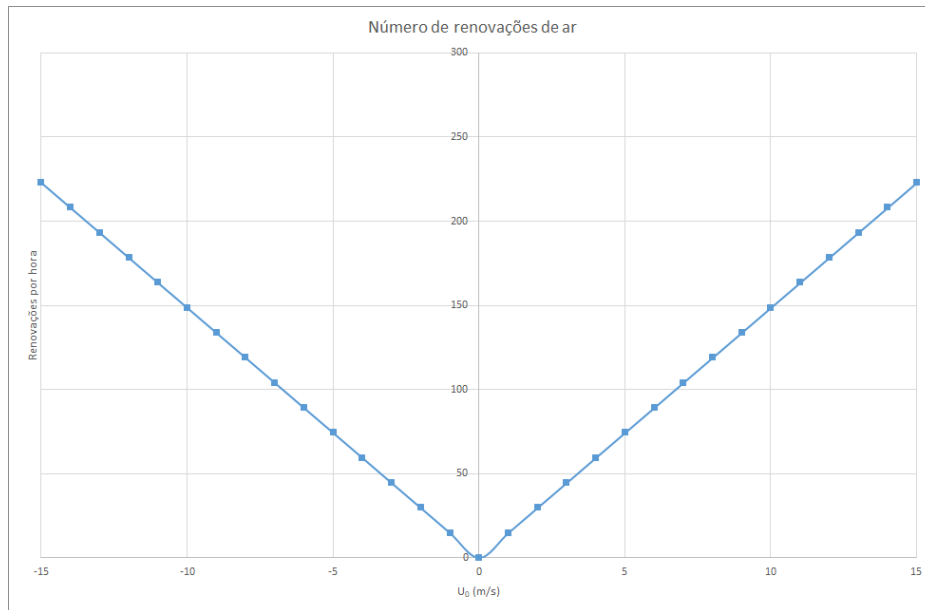


Figura 3.12- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos

### 3.2.2 Dois espaços cúbicos com geração de calor

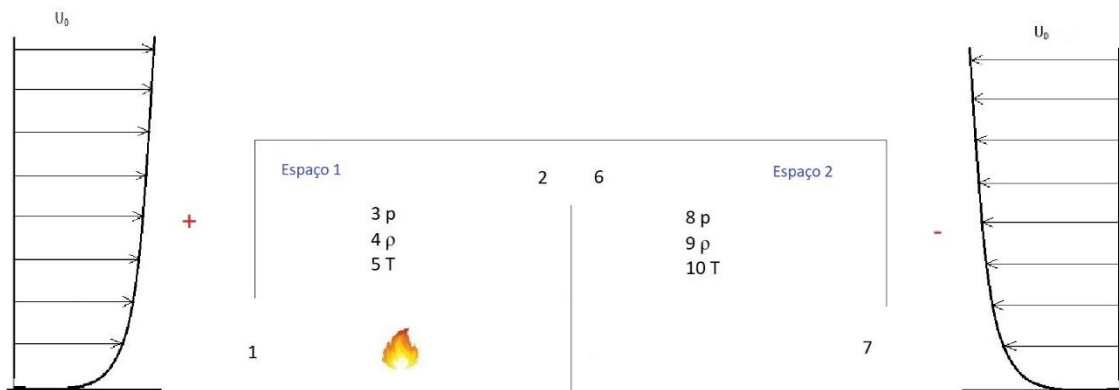


Figura 3.13- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação com geração de calor

Seguindo a mesma geometria do caso anterior, é acrescentada uma fonte de calor, com 25 000 W de energia, para o espaço 1. Esta adição fará com que a velocidade de circulação do ar se altere, deixando de ter um perfil linear quando a velocidade se aproxima de valores mais baixos, sendo que nesta gama de valores a impulsão térmica tem maior impacto que a pressão proveniente do vento.

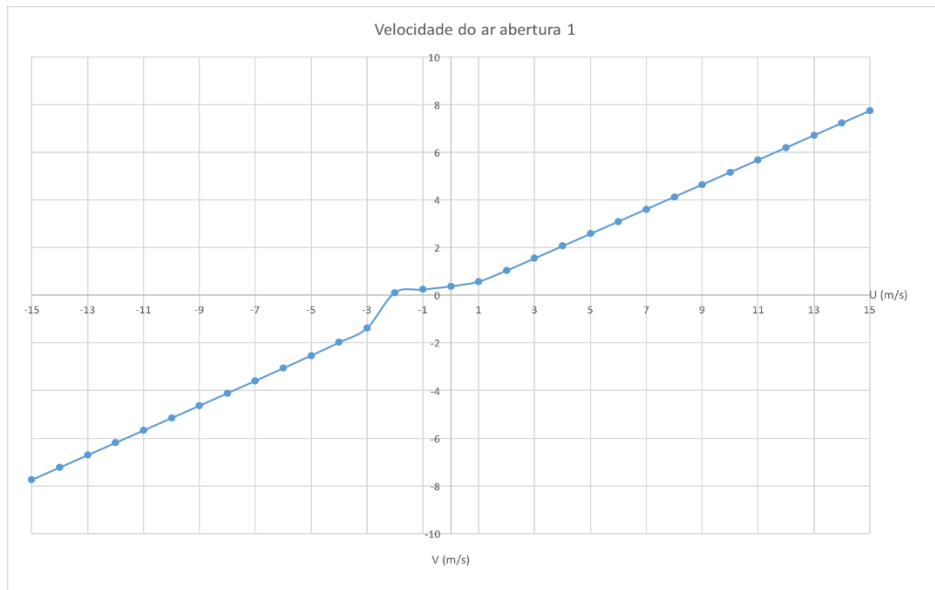


Figura 3.14- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor

A introdução de uma fonte de calor promove mudanças na variação de temperatura dos espaços. Estas variações são diferentes para cada espaço, sendo que o espaço 1 tem valores mais elevados que o espaço 2, justificando-se pelo facto de a fonte de calor se encontrar no espaço 1. É notório que para valores de velocidade do vento positivos, as variações de temperatura dos dois espaços têm diferenças muito aproximadas, sendo mais simples considerá-las iguais para os valores mais elevados da velocidade do vento no sentido positivo.

Para vento no sentido negativo as variações de temperatura são mais distintas entre os dois espaços. Esta divergência aumenta com o diminuir da velocidade do vento, devido ao facto de a temperatura ser constante no espaço 2, até a velocidade do vento diminuir a 3 m/s, e no espaço 2 a variação ser crescente durante o mesmo período. Quando a velocidade do vento é igual a 2 m/s assiste-se a um pico de variação de temperatura para ambos espaços. Com a continua diminuição da velocidade do vento, existe uma redução dos valores de variação de temperatura, tendo a aproximar os valores dos dois espaços.



Figura 3.15- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor

O número de renovações de ar neste caso tem um perfil aproximadamente linear para os valores de velocidade do vento mais elevadas, tanto no sentido positivo, como no negativo. No entanto, perde o cariz linear quando se trata de valores baixos de velocidade do vento, sendo que tem uma queda bastante abrupta quando o vento é proveniente de sentido negativo e se aproxima de 1 m/s de velocidade. O número de renovações vai ser igual para ambos espaços.

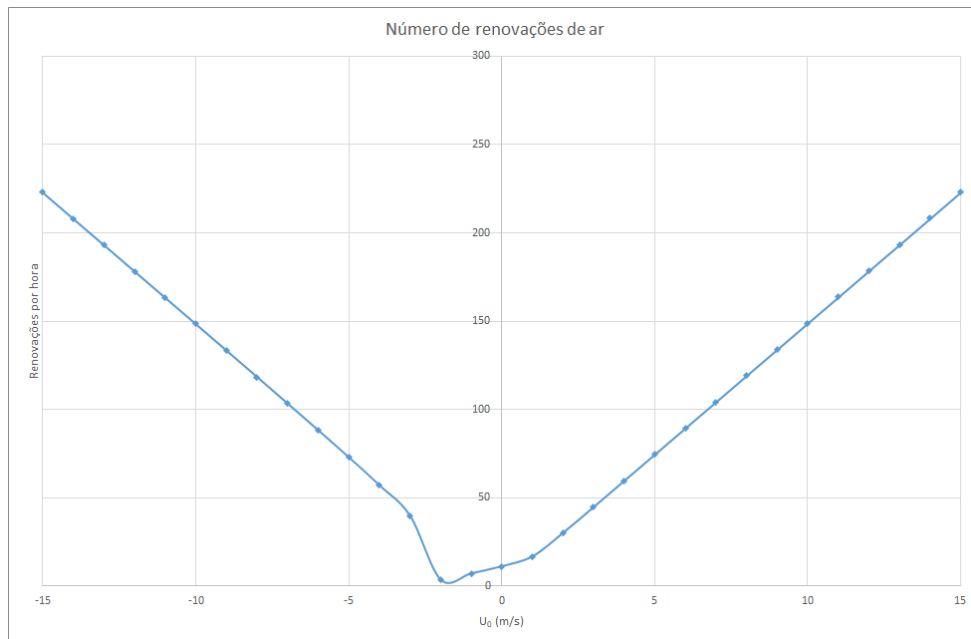


Figura 3.16- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor

### 3.2.3 Dois espaços cúbicos com geração de calor com paredes adiabáticas

O seguinte caso tem as condições previstas no caso 2.2, com a exceção de neste caso as paredes serem adiabáticas, ou seja, não existe transmissão de calor através das paredes. Este fator vai levar a mudanças significativas no edifício, permitindo uma melhor compreensão do funcionamento dos fenómenos que ocorrem no interior de cada espaço. Numa primeira análise, é possível reparar que a velocidade do ar é linear para as velocidades do vento mais elevadas, em ambos sentidos. No entanto, quando a velocidade do vento se aproxima de valores mais baixos, no sentido negativo, a velocidade do ar tende para infinito. Isto deve-se ao facto de as paredes não transferirem calor para o exterior, acumulando toda a energia emitida, levando a um aumento da temperatura até infinito, o que impossibilita o programa de encontrar um ponto de convergência, dando assim valores irrealistas. No gráfico seguinte é possível avaliar a evolução da velocidade, sendo que os valores que não constam no gráfico indicam os pontos onde existe impossibilidade de cálculo dos mesmos.

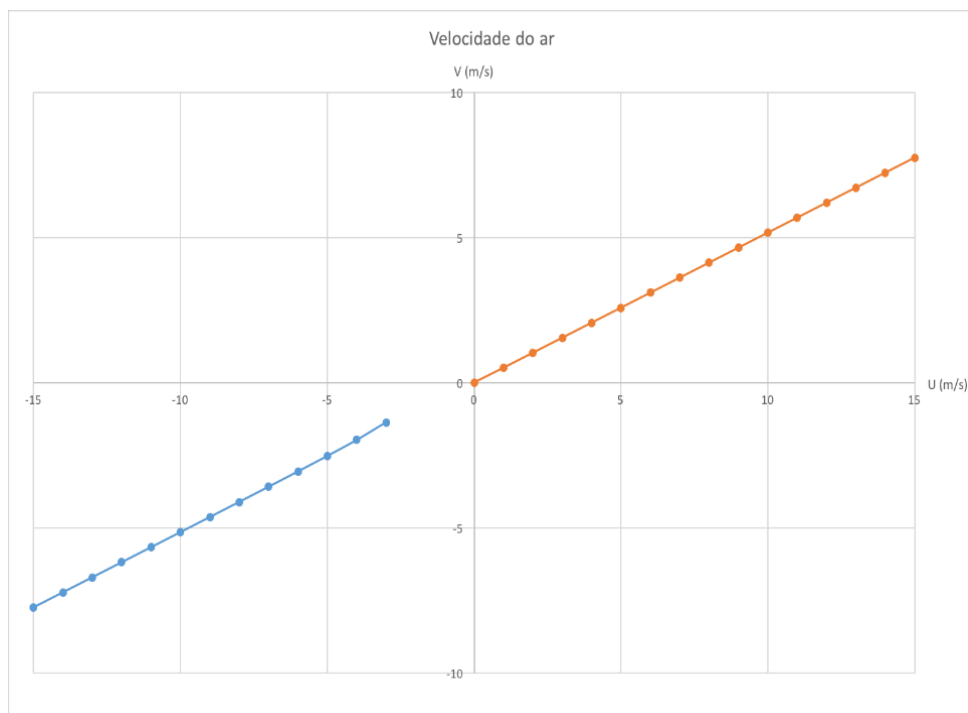


Figura 3.17- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas

A variação de temperatura nos dois espaços vai estar sujeita às mesmas limitações verificadas anteriormente, tendo uma gama de valores nos quais não é possível retirar valores plausíveis. Sendo assim, é possível reparar que para velocidades no sentido negativo do vento, o espaço 2 não terá qualquer variação de temperatura, já no espaço 1, a variação de temperatura

aumenta com a diminuição de velocidade. No entanto, quando as velocidades reduzem para valores abaixo de 3 m/s no sentido negativo, deixa de ser possível continuar a calcular os valores. Este fator deixa de ser sentido quando a velocidade se aproxima de 1 m/s no sentido positivo, sendo que a partir desse ponto a variação de temperatura se revela igual para os dois espaços, diminuindo com o aumento da velocidade do vento.

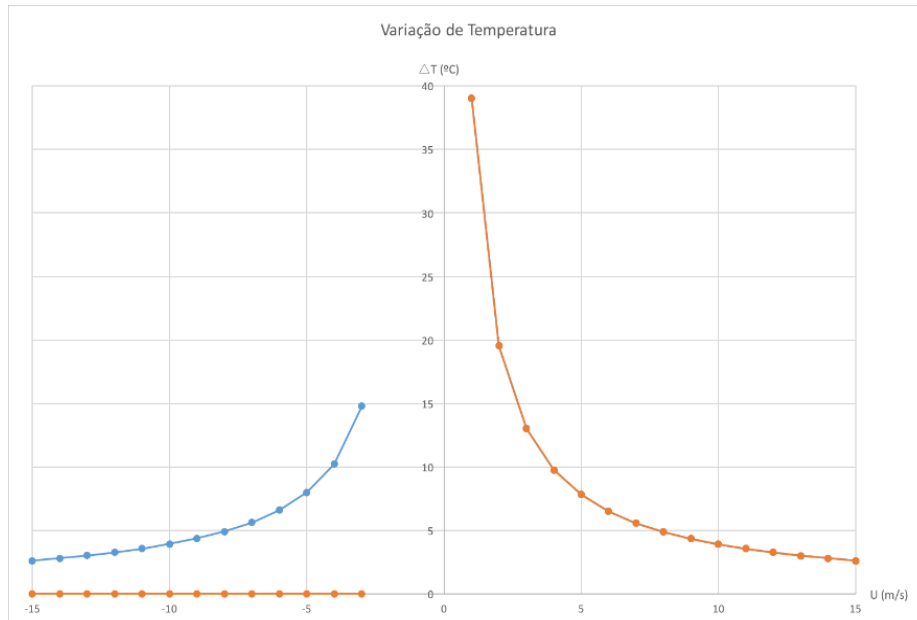
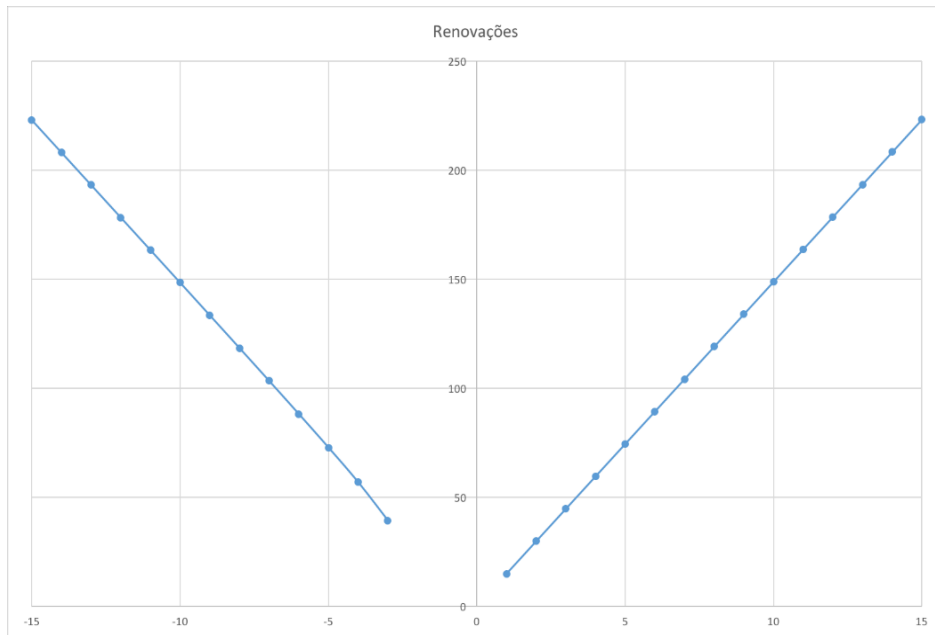


Figura 3.18- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas

Apesar da impossibilidade de apurar todos os dados referentes ao número de renovações no edifício, é possível reparar a partir dos dados obtidos que o número de renovações evolui de forma linear, aumentando proporcionalmente com o aumento da velocidade do vento, para ambos sentidos.



*Figura 3.19- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas*

Os valores em falta, nos gráficos anteriormente expostos, podem ser explicados pelo facto de as paredes serem consideradas adiabáticas. Este fator tem pouca influência na ventilação do edifício quando a velocidade do vento é elevada e é o principal fator que determina a ventilação. No entanto, na gama de valores em que a impulsão térmica é dominante na ventilação do edifício, vê-se que não é possível encontrar resultados coerentes. Isto é devido ao aumento de temperatura que se verifica nesta gama, sendo que o ar no interior do edifício aquece constantemente, mas não é possível renová-lo de forma eficiente devido a pouca ventilação gerada pelo vento. Este problema é acrescido pelo facto de as paredes serem adiabáticas, não possibilitando que o calor presente no interior seja extraído através das paredes. Isto leva a que a temperatura aumente infinitamente, sendo assim impossível de calcular os fenómenos ocorrentes nessa gama. Com isto, pode-se confirmar que esta geometria não favorece a ventilação, uma vez que sem a ação do vento, o resultado esperado indica um edifício que impossibilita qualquer atividade no seu interior.

### 3.2.4 Dois espaços cúbicos com nova geometria

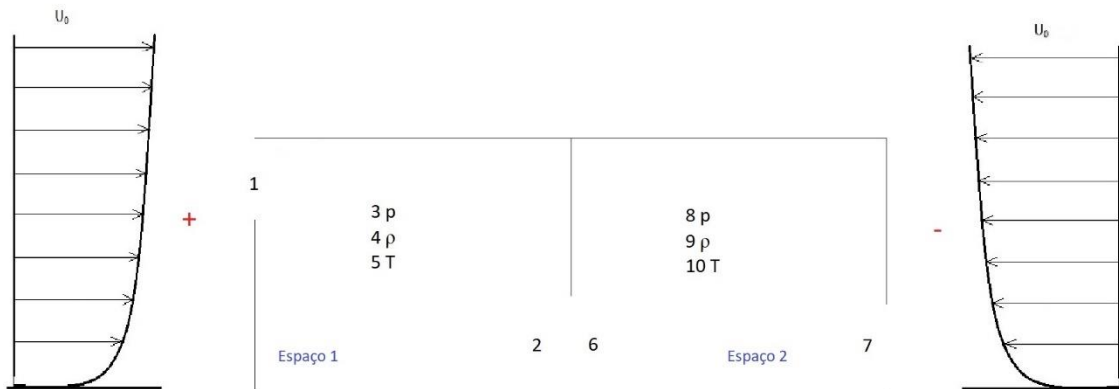


Figura 3.20- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação (geometria 2)

Com o objetivo de melhorar as condições presentes no caso anterior, é escolhida outra geometria para o edifício proposto. Este é composto por dois espaços, ambos de  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ , com duas aberturas para o exterior, estando uma em cada espaço, e uma abertura onde se é feita a passagem de ar de um espaço para o outro. Seguindo o sentido positivo do vento, temos a abertura para o exterior do espaço 1, estando esta junto ao teto. Entre os dois espaços a abertura está localizada junto ao chão e o mesmo acontece na abertura que o espaço 2 partilha com o exterior. Todas as aberturas têm  $1 \times 1 \text{ m}^2$ .

Esta análise dá-se sem a presença de uma fonte calor no edifício, estando apenas sujeito à ação do vento. Sendo a ação do vento o principal fator a agir sobre a ventilação do edifício, então todos os parâmetros estarão linearmente associados às alterações da velocidade do vento.

A velocidade do ar que atravessa a abertura 1 será diretamente proporcional à velocidade do vento. Estas velocidades terão padrões coincidentes sendo crescentes simultaneamente, tal como acontece quando são nulas.

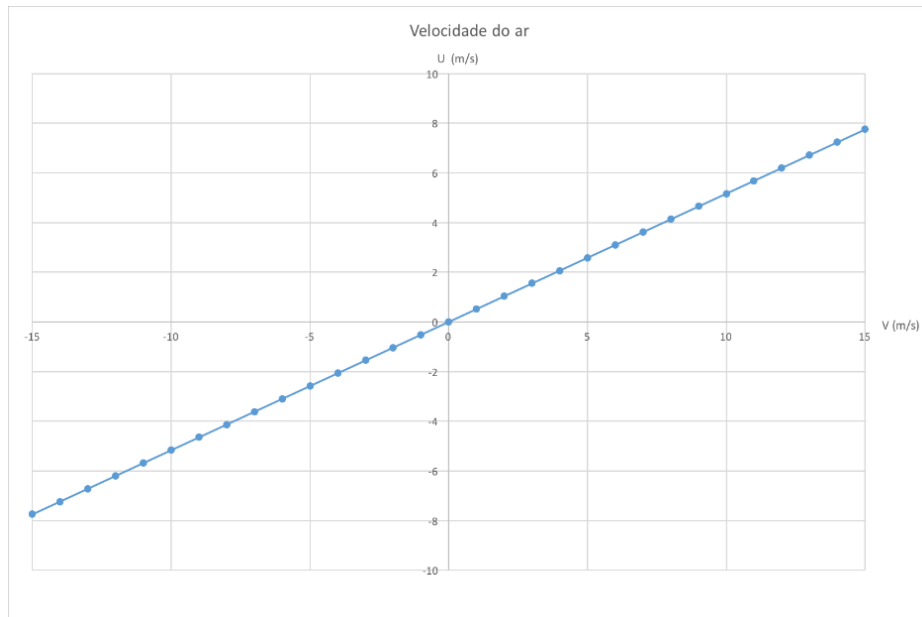


Figura 3.21- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos (geometria 2)

O número de renovações vai ser simétrico, sendo crescente de forma diretamente proporcional com o aumento da velocidade do vento, para ambos sentidos, tal como acontecia em casos anteriores, sempre que não existe fonte de calor.

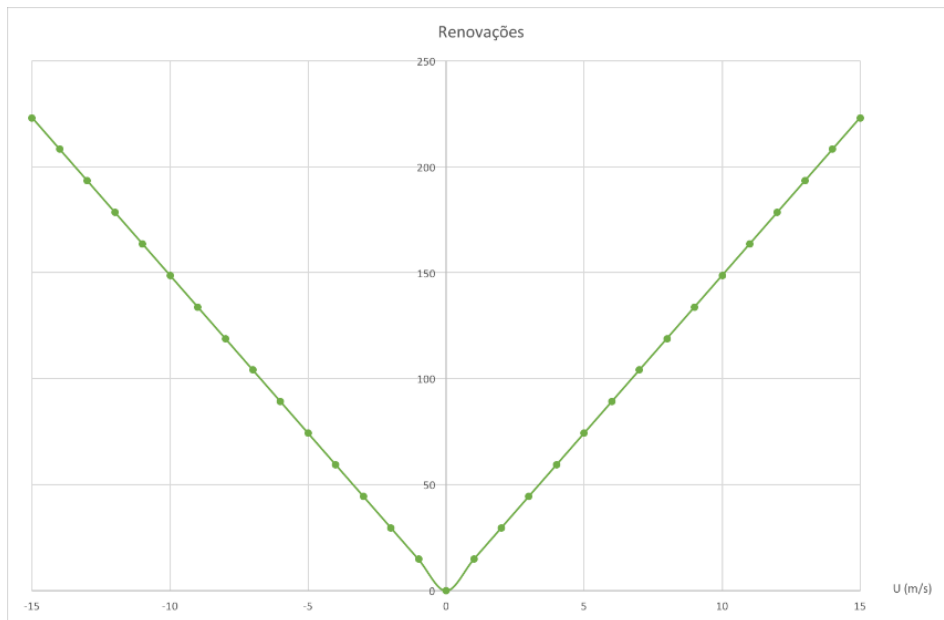


Figura 3.22- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos (geometria 2)

A ausência de uma fonte de calor no interior do edifício, leva a que não existam variações na temperatura no seu interior, resultando num gráfico com valores nulos, para todas as velocidades do vento.

### 3.2.5 Dois espaços cúbicos com nova geometria e geração de calor

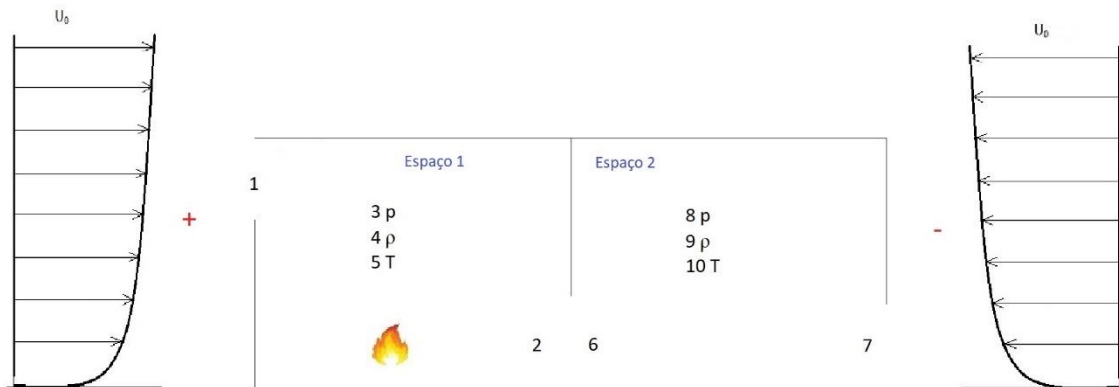


Figura 3.23- Modelo de dois espaços cúbicos em comunicação por uma abertura de ventilação com geração de calor (geometria 2)

O próximo caso a ser analisado mantém as características do anterior, existindo apenas o acréscimo de uma fonte de calor no espaço 1 com 25 000 W de potência.

A velocidade do ar terá um comportamento linear para as gamas de velocidades mais elevadas de velocidade do vento, para ambos sentidos. No entanto, quando a velocidade do vento se aproxima de valores mais perto de zero, a velocidade do ar no interior deixa de seguir um perfil linear, uma vez que nestas gamas o efeito do impulso térmico se faz sentir mais do que a velocidade do vento.

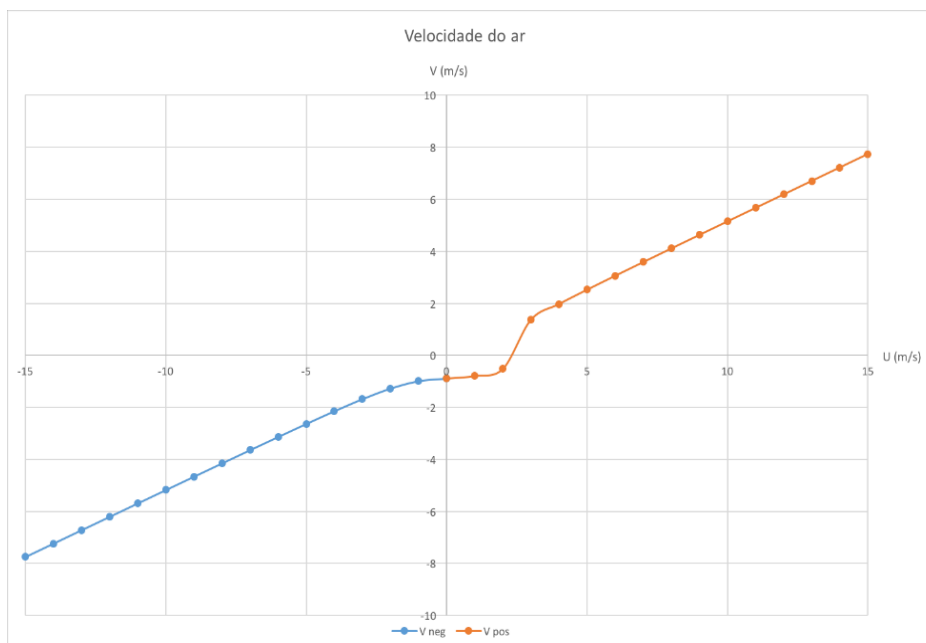


Figura 3.24- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2)

A existência de uma fonte de calor vai promover a variação de temperatura no interior do edifício. Esta só se faz sentir no espaço 2 quando o vento circula no sentido positivo.

No espaço 1, para velocidades de vento negativas, a variação de temperatura é crescente quando a velocidade do vento diminui. Esta tendência mantém-se para velocidades do vento positivas, sendo que os valores mais altos de variação de temperatura se registam quando os valores de velocidade do vento são muito baixos.

No espaço 2, quando o vento passa a ter sentido positivo, é notável o acréscimo na variação da temperatura, deixando esta de ser nula e crescendo muito rapidamente nos baixos valores de velocidade do vento, atingindo um pico nessa região. Em seguida a variação de temperatura decresce gradualmente, igualando-se ao mesmo decréscimo que acontece no espaço 1.

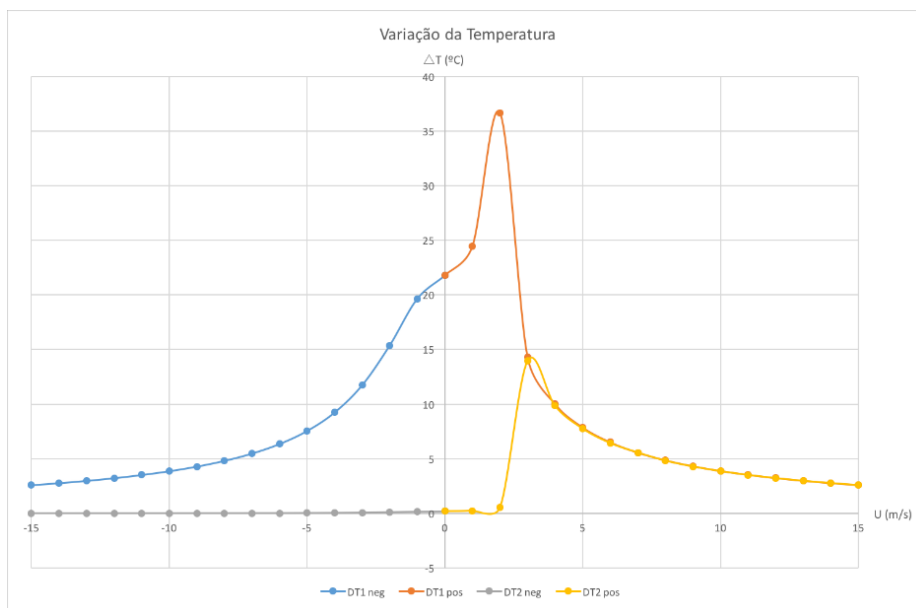


Figura 3.25- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2)

O número de renovações será aproximadamente igual para as velocidades de vento elevadas em ambos sentidos, sendo este crescente com o aumento da velocidade do vento. No entanto, para as velocidades do vento mais pequenas no sentido positivo, temos uma alteração no padrão, onde é possível ver que o número de renovações diminui mais do que o que seria esperado, sendo isto devido ao facto de nessa gama de velocidades do vento, a velocidade do ar não aumentar o suficiente para manter o número de renovações constante.

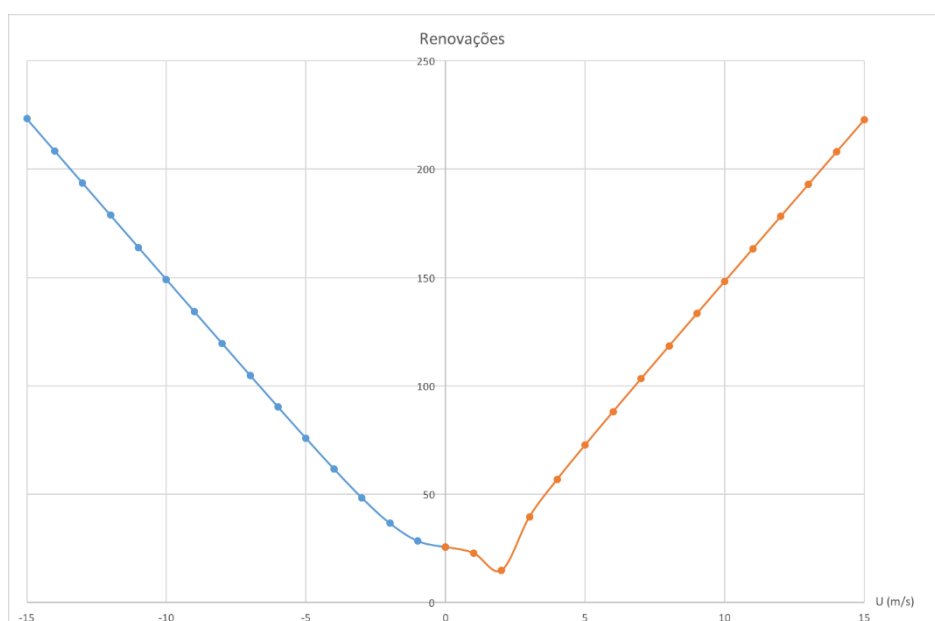


Figura 3.26- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2)

### 3.2.6 Dois espaços cúbicos com nova geometria, geração de calor e paredes adiabáticas

Tal como tinha sido feito na geometria anterior, as paredes são tomadas como adiabáticas, não havendo assim troca de calor do interior do edifício para o seu exterior através delas. Apesar desta mudança, é possível reparar que, quando comparado ao caso anterior em que as paredes não são adiabáticas, não existem grandes variações. A velocidade do ar, a variação de temperatura e o número de renovações mantém valores praticamente iguais aos do caso anterior, mantendo também a mesma evolução com as alterações da velocidade do vento. Os gráficos seguintes demonstram as semelhanças entre os dois casos.

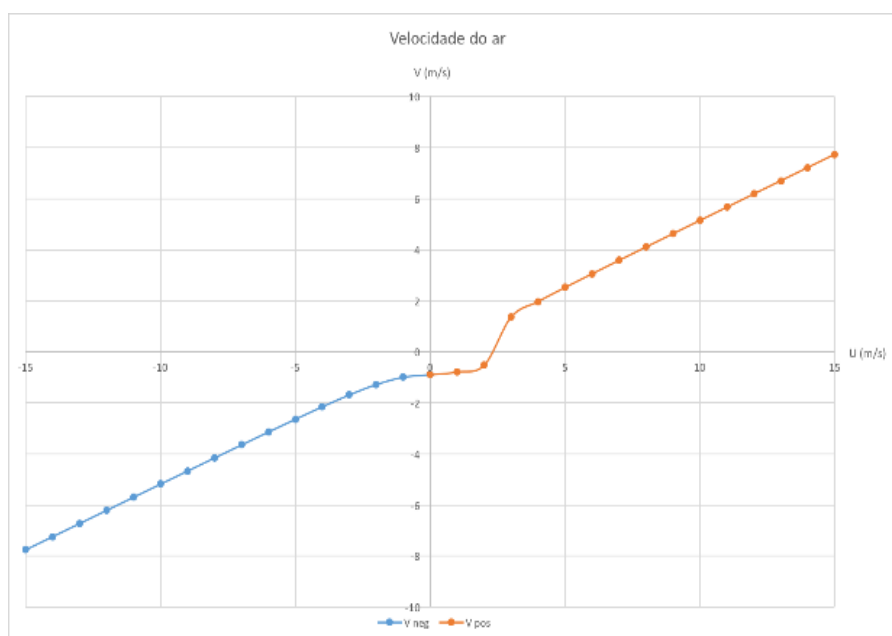


Figura 3.27- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2)

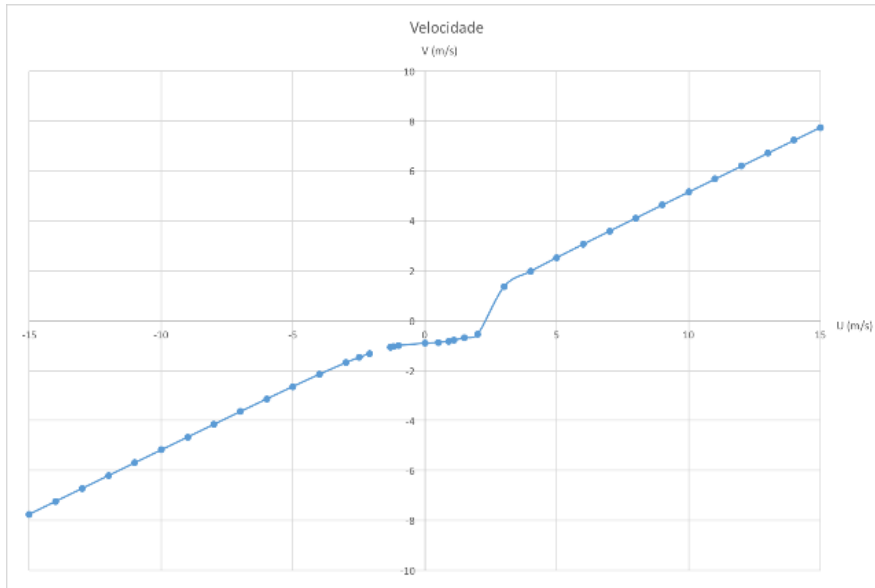


Figura 3.28- Velocidade do ar na abertura 1 para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas (geometria 2)

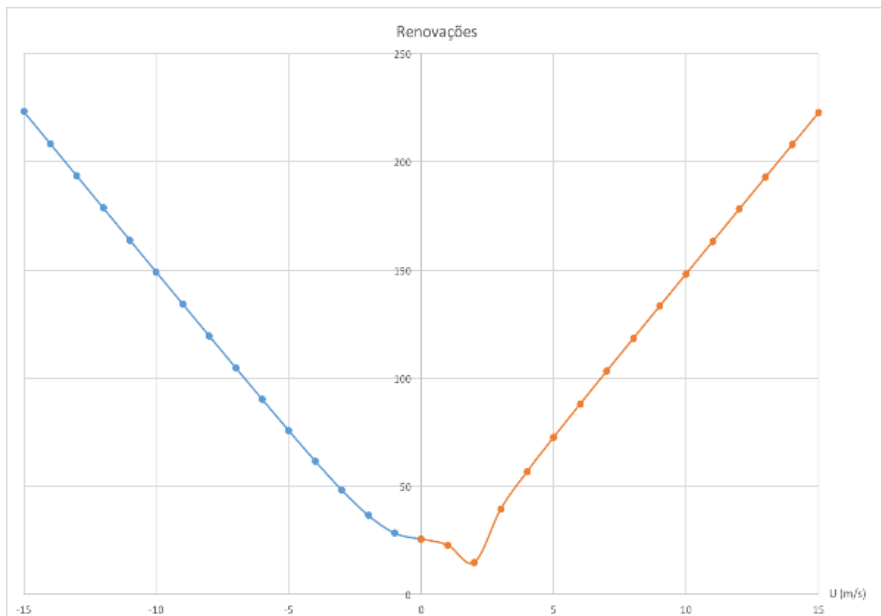


Figura 3.29- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2)

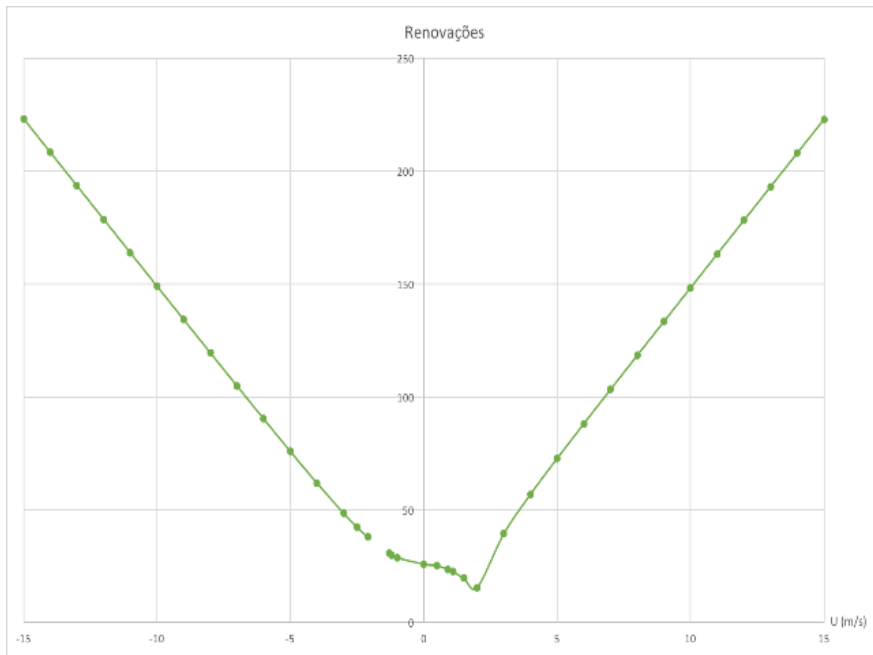


Figura 3.30- Número de renovações de ar por hora para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas (geometria 2)

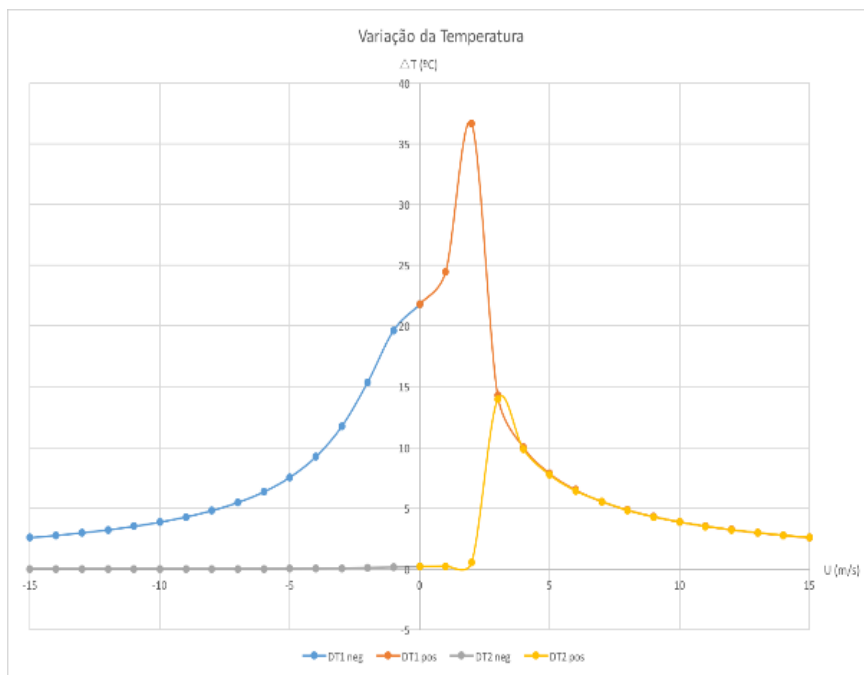


Figura 3.31- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor (geometria 2)

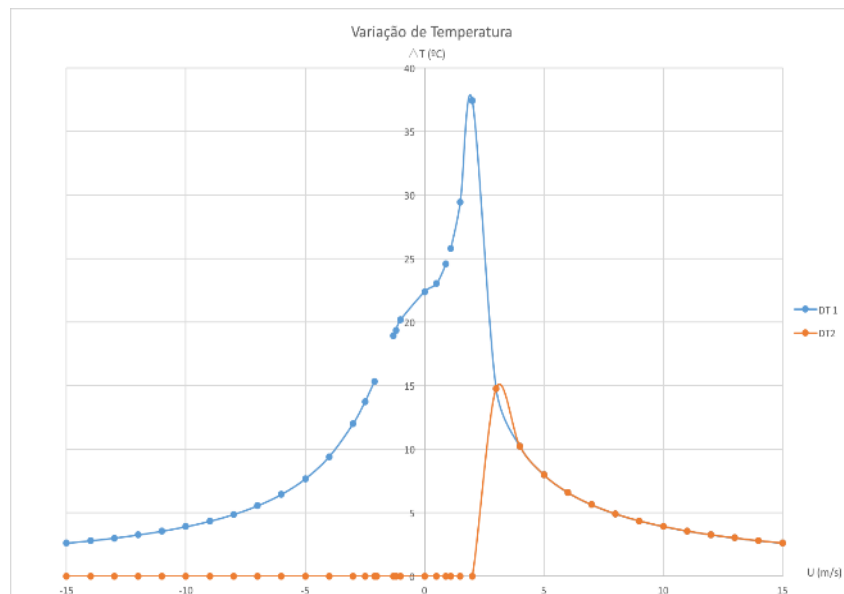


Figura 3.32- Variação de temperatura para dois espaços cúbicos com geração de calor e paredes adiabáticas (geometria 2)

É possível observar, tal como acontecia na geometria anterior, que existem gamas de velocidades do vento que continuam a não poderem ser definidas, quando as paredes são adiabáticas. Mas neste caso essas gamas têm menor representatividade, sendo mais fácil compreender a evolução da ventilação do edifício nestas condições. A pouca variância entre os casos adiabático e não adiabático reforça que esta geometria é mais favorável à ventilação, não necessitando assim que o calor seja extraído através das paredes para que se mantenha um ambiente controlado no interior, provando que a ventilação natural é suficiente para garantir que a temperatura não aumente de forma descontrolada.



## 4 Resultados do caso de estudo

No primeiro capítulo, foi feita uma introdução do caso de estudo. Este tem como objetivo analisar as potencialidades energéticas que se podem obter através da utilização da ventilação natural.

O edifício em causa trata-se de uma nave industrial e é composto por dois espaços, ambos com dimensões iguais. Cada espaço tem um volume de  $25 \times 25 \times 6 \text{ m}^3$  e entre os dois espaços existe uma abertura de comunicação de  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , onde transitam pessoas e, por conseguinte, ar. No espaço 1 decorre um processo industrial que liberta  $10\,000 \text{ W}$  de energia sob a forma de calor, de forma contínua. Este processo faz com que o ar se torne mais quente do que o desejável e contém contaminantes, sendo assim imperativo que se evite que o seu efeito afete o outro espaço do edifício, espaço 2, onde se encontram mais pessoas, na qual se quer que o ar tenha as condições normais previstas para um espaço habitável. De notar que no espaço 2 existe também uma abertura ligada ao exterior,  $2 \times 2 \text{ m}^2$  de área, por onde entra o ar exterior, que permite a renovação do ar interno. As paredes da nave têm coeficiente global de transferência de calor,  $U$ , de valor  $U=0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  para a parede referente ao teto e  $U=0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  para as restantes paredes. O chão não é considerado relevante para este exercício, não existindo transferências de calor através do mesmo.

Para que este processo ocorra da forma desejada, é necessário garantir que haja renovação suficiente dentro dos espaços do edifício. Existem leis criadas para essa finalidade, facilitando a determinação dos valores de renovação mínima a ter em conta em cada caso. A necessidade de evitar que o ar contaminado do espaço 1 entre no espaço 2 leva a procurar uma geometria do edifício que permita garanti-lo, para todas as condições impostas pelo vento.

Com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados, considera-se a parede que está em contato com os dois espaços como adiabática. Isto fará com que todas as trocas de calor entre os dois espaços sejam feitas através da abertura, impedindo ambiguidade na leitura dos resultados, onde poderia ser difícil de perceber se a transmissão de calor era efetuada pela passagem indesejada de ar, ou apenas por transferência de calor pela parede.

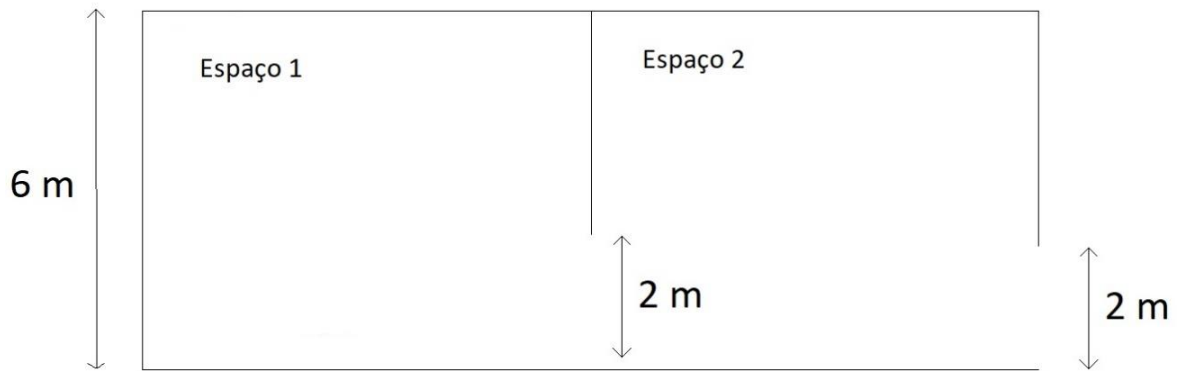


Figura 4.1- Modelo da nave industrial (alçado principal)

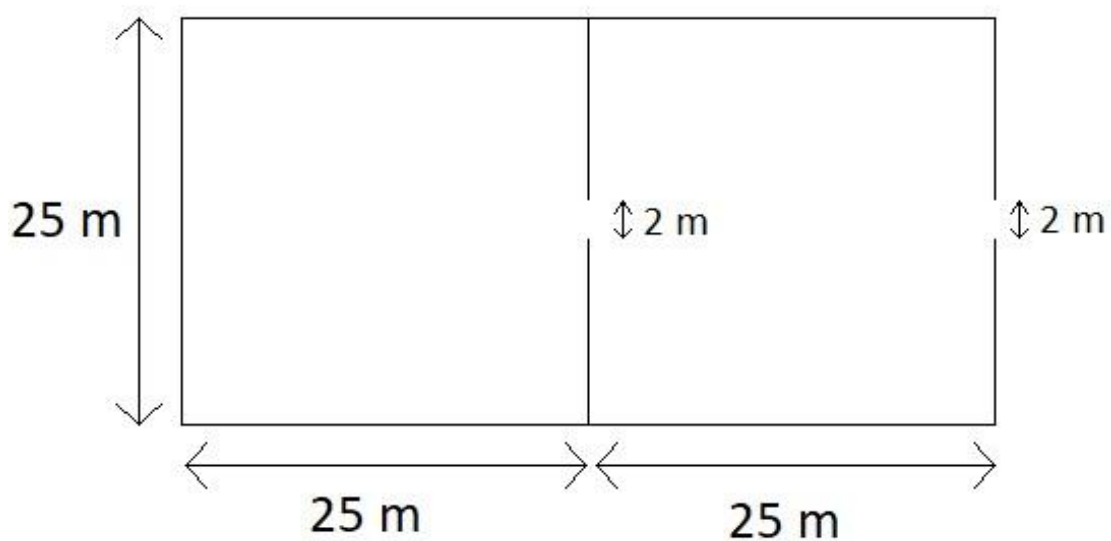


Figura 4.2- Modelo da nave industrial (vista em planta)

#### 4.1 Definições do vento e coeficientes de pressão

Para melhor definir o problema, é necessário estudar o efeito que o vento vai exercer no edifício. Assim, é necessário recorrer à Norma Portuguesa (NP EN 1991 - 1-4 2010) referente às ações do vento.

A velocidade do vento é o fator que será mais relevante, sendo por isso determinante encontrar os valores associados ao caso em questão. Esta é diferente para as diferentes alturas, sendo que esta aumenta significativamente, quanto maior for a altura a qual está a ser medida. No entanto, a velocidade do vento de referência,  $U_0$ , é medida a 10 m de altura em relação ao solo. Sendo que a altura do edifício não excede os 10 m da altura onde é medida a velocidade de referência, a mesma pode ser utilizada para todos os casos do edifício em questão.

Um parâmetro importante para definir o caso de estudo será o coeficiente de pressão externo para as aberturas do edifício. De acordo com (Charisi, Thiis e Aurelien 2019), os coeficientes de pressão são coeficientes adimensionais que demonstram a pressão efetuada pelo vento em uma posição específica de um edifício.

Neste caso apenas existirá uma abertura externa, sendo que a direção do vento é considerada sempre na direção perpendicular à abertura, podendo estar no sentido incidente à abertura ou no sentido oposto.

Os valores dos coeficientes de pressão são obtidos experimentalmente, através de medições das diferenças de pressões existentes entre a altura em que o vento tem a sua velocidade de referência e o ponto a que se pretende obter o coeficiente.

A partir da norma anteriormente mencionada, é possível encontrar os valores do coeficiente de pressão externa para a abertura em questão. Estes valores são escolhidos consoante as características geométricas do edifício, tendo como resultado um coeficiente de pressão externa de valor igual a -0,3 para quando o vento está em sentido negativo, ou seja, não incide diretamente na abertura, e coeficiente de pressão externa igual a 1 quando o vento está no sentido positivo, incidindo diretamente sobre a abertura.

## 4.2 Análise dos casos de estudo

Em seguida, serão analisadas várias soluções para resolução do problema em questão. Os vários casos, terão pequenas alterações para que possa ser possível perceber a evolução que cada diferente configuração pode trazer a este problema. Pressupõe-se que algumas soluções serão más soluções, enquanto que outras poderão ser mais viáveis, podendo assim ter uma noção mais clara do caminho que se deve escolher quando se aborda este problema. No final será apresentada a solução mais eficiente em termos energéticos.

#### 4.2.1 Caso 1

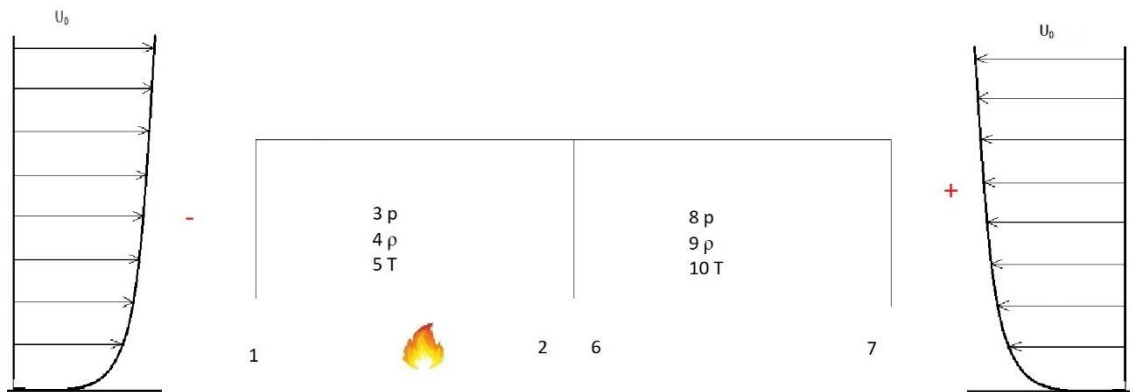


Figura 4.3- Nave industrial com abertura junto ao chão

Para proceder à primeira proposta para resolver o problema em questão, é acrescentada uma abertura exterior no espaço 1, estando esta localizada junto ao chão, onde tem dimensões semelhantes às restantes aberturas presentes no edifício,  $2 \times 2 \text{ m}^2$ . É ainda definido o coeficiente de pressão externa para a nova abertura, sendo este igual ao inverso da abertura externa do espaço 2, ou seja, igual a 1 quando o vento está no sentido negativo e igual a -0,3 quando o vento está no sentido positivo. Procedendo à análise do funcionamento da ventilação do edifício, é possível observar a evolução da velocidade, que se dá de forma linear. Esta é diretamente proporcional à velocidade do vento, mostrando assim que esta geometria não sofre influência da impulsão térmica.

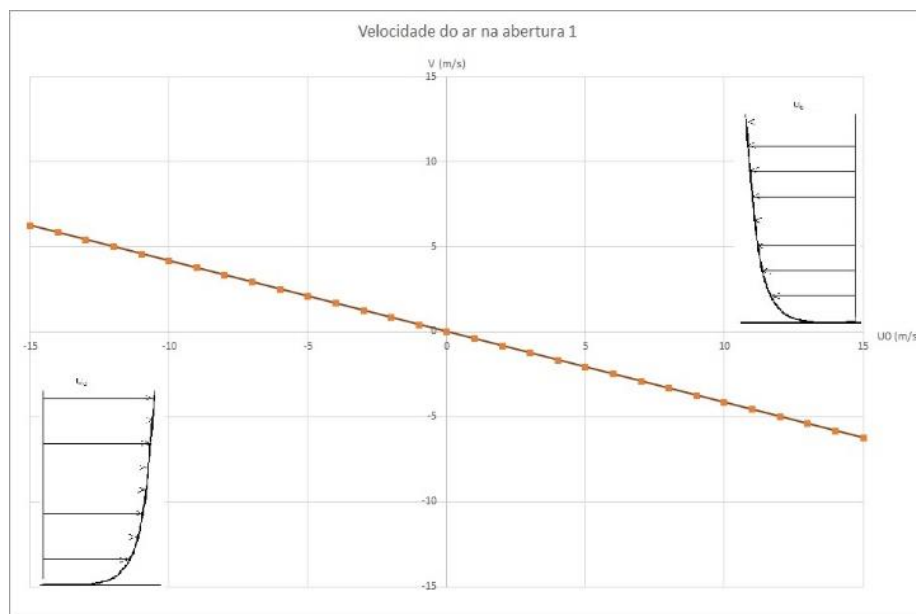


Figura 4.4- Velocidade do ar na abertura 1 para nave industrial com abertura junto ao chão

No seguimento dos resultados obtidos na observação da velocidade do ar no interior do edifício, pode-se inferir que o número de renovações do ar segue um padrão semelhante, estando este, também proporcional de forma direta à velocidade do vento. Mais uma vez, é possível ver a inexistência do efeito da impulsão térmica, levando a que quando o vento tem velocidade nula não exista renovação de ar no interior do edifício.

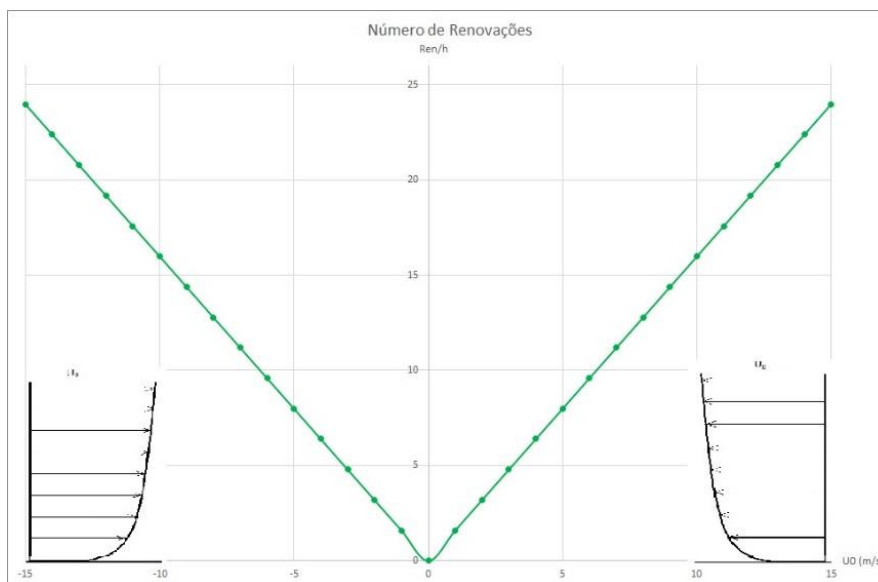


Figura 4.5- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com abertura junto ao chão

A variação de temperatura nos dois espaços, exposta no gráfico seguinte, é aproximadamente nula quando a velocidade do vento se encontra no sentido negativo. Enquanto

que no sentido positivo é possível notar que o espaço 2 deixa de sofrer alteração de temperatura, indicando que o ar quente produzido no espaço 1 sai todo pela abertura exterior deste mesmo espaço. Quando a velocidade do vento é nula, pode-se observar um acréscimo considerável da variação de temperatura do espaço 1. Isto deve-se ao facto de nesse momento não existir renovação de ar no espaço, fazendo com que o ar no seu interior aqueça continuamente, aumentando a sua temperatura de forma descontrolada e indesejável.

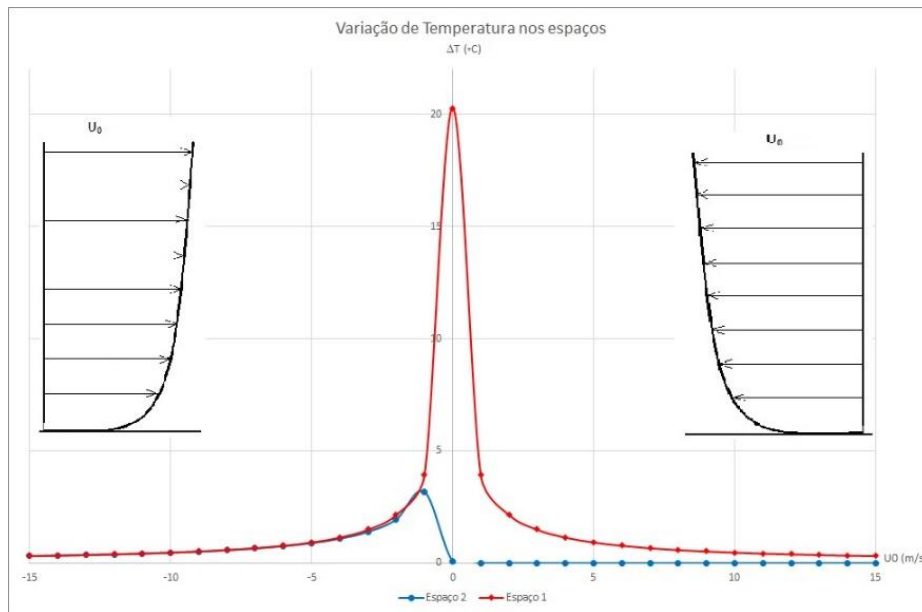


Figura 4.6- Variação de temperatura para nave industrial com abertura junto ao chão

Para melhor compreender alguns fenómenos ocorrentes no edifício, considera-se que as aberturas exteriores se encontram divididas em duas. É possível observar que com esta especificação a velocidade do ar nas aberturas exteriores têm um comportamento específico quando a velocidade do vento se iguala a zero. Pode ver-se que em ambas aberturas exteriores o ar sai do espaço por cima e entra por baixo, tendo valores simétricos. No entanto, o módulo das velocidades de ar nas aberturas do espaço 1 são maiores que no espaço 2, como se pode observar na figura 4.8. A simetria dos valores nas entradas justifica a razão pela qual no caso anterior a velocidade do ar ter sido nula em ambas entradas.

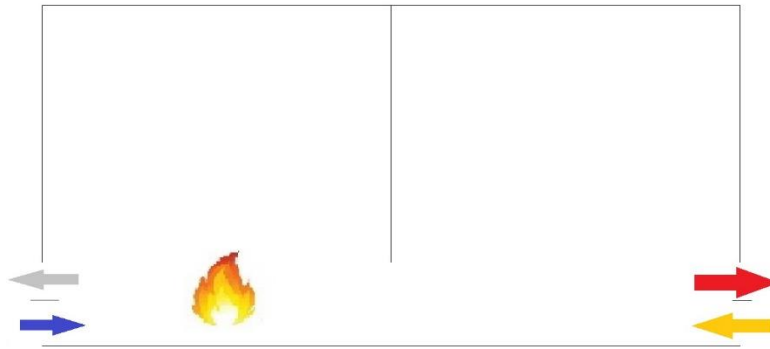


Figura 4.7- Nave industrial com 4 aberturas exteriores com velocidade do vento nula

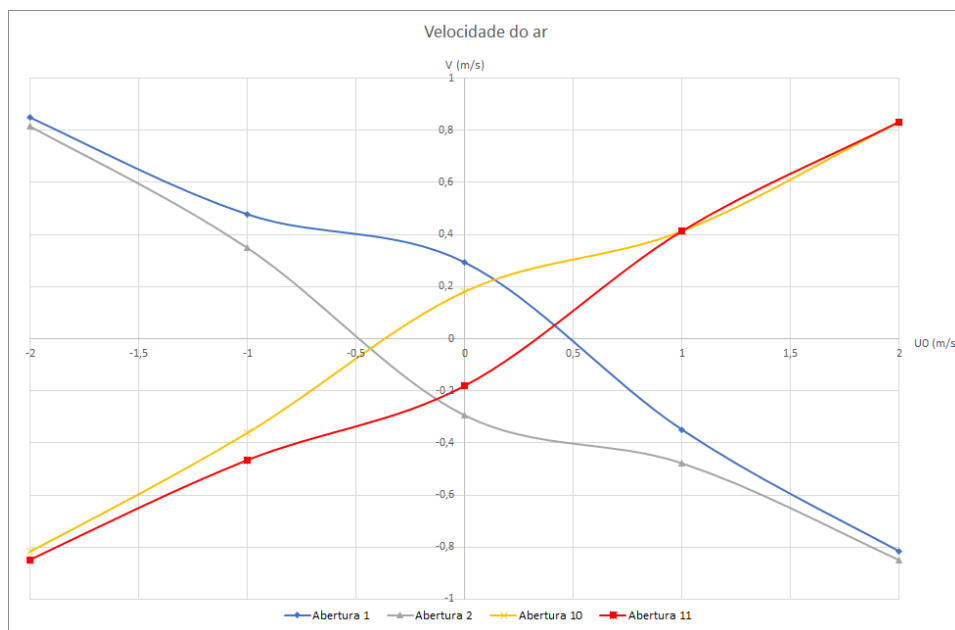


Figura 4.8- Velocidade do ar nas aberturas para nave industrial

As alterações observadas nas velocidades do ar nas entradas permitem obter novas conclusões acerca do número de renovações dentro do espaço, que anteriormente era zero. Como se pode ver, o facto de a velocidade do ar nas aberturas não ser completamente nula, leva a que exista um número de renovações, devido à circulação de ar que existe no seu interior, o que contraria o resultado obtido na simulação anteriormente efetuada. Este resultado revela que a impulsão térmica acaba por ter efeito nesta geometria, ainda que este não seja muito relevante.

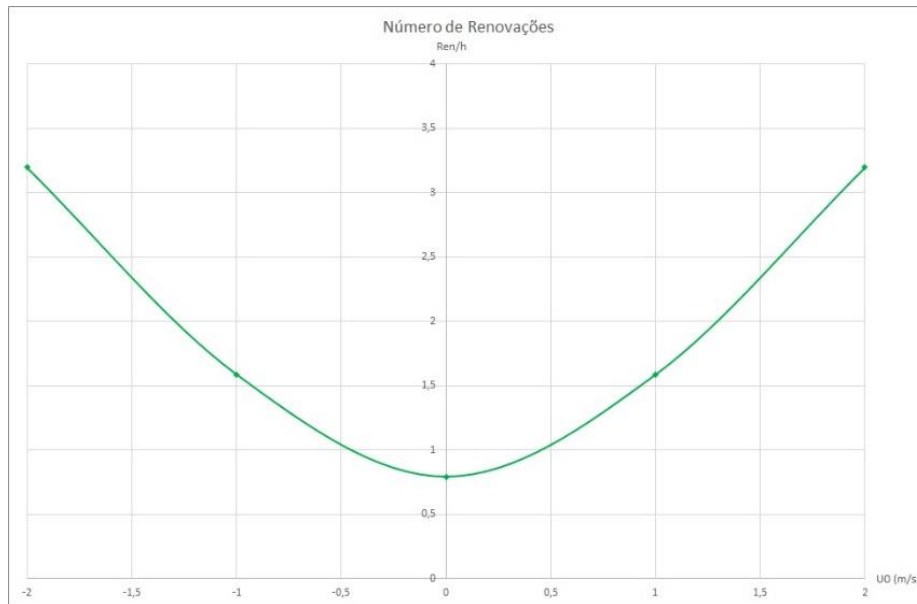


Figura 4.9- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com 4 aberturas

A geometria proposta não vai de encontro com as condições necessárias estabelecidas, uma vez que é possível observar que para todas as gamas de velocidade do vento no sentido negativo, o ar presente no espaço 2 é aquecido, indicando assim que este está contaminado pelo ar do espaço 1, o que contraria o efeito pretendido do edifício. De notar ainda que nesta geometria, a incapacidade de renovar o ar de forma eficiente, como se pode observar na figura 4.6, leva a que a temperatura possa subir de forma descontrolada, causando problemas adicionais ao caso em questão.

#### 4.2.2 Caso 2

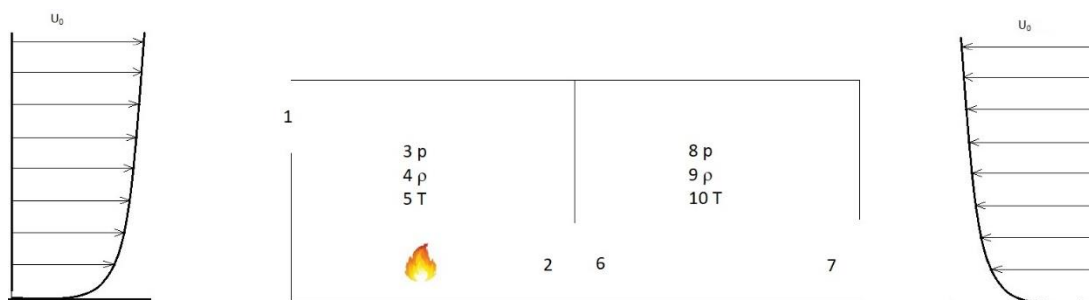


Figura 4.10- Nave industrial com abertura junto ao teto

Para resolver os problemas existentes no caso anterior, é proposta uma nova geometria para o edifício. A alteração é feita na abertura 1, deslocando esta da sua posição junto ao chão, passando para uma posição mais elevada, junto ao teto. Nestas condições, o coeficiente de pressão

externa, para a abertura nova, tem os mesmos valores que no caso anterior, estando ambas aberturas em situações semelhantes relativamente ao vento e ao edifício. Com esta mudança é esperado um resultado mais aproximado do pretendido, em termos da capacidade de ventilação do edifício nas condições previstas.

A velocidade de ar que entra para o edifício continua a seguir um padrão linear, sendo proporcional à velocidade do vento, tal como acontecia no caso anterior, para a maior parte das gamas de velocidade do vento. No entanto, quando a velocidade do vento tem valores baixos, aproximadamente nulos, é notável o efeito da impulsão térmica, algo que não era possível observar no caso anterior.

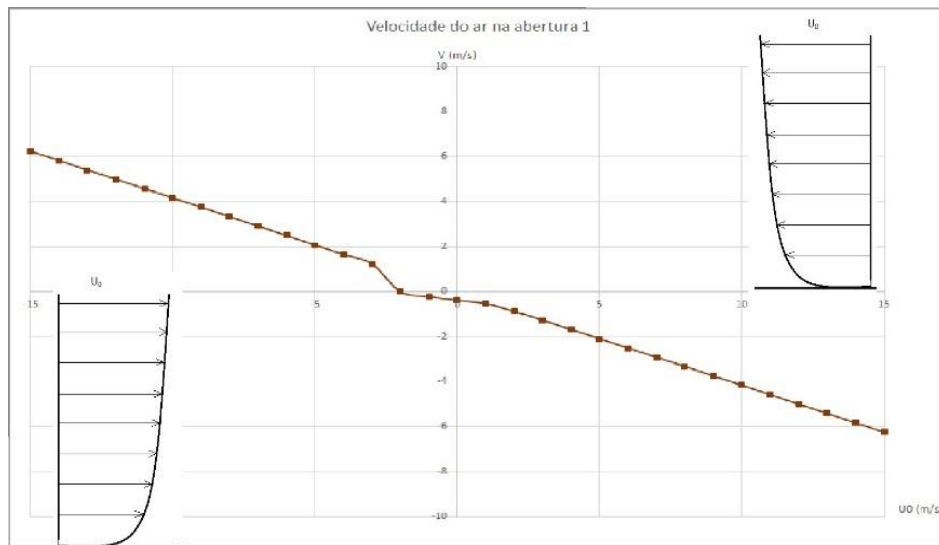


Figura 4.11- Velocidade do ar na abertura 1 para nave industrial com abertura junto ao teto

O número de renovações, tal como a velocidade, mantém-se muito semelhante ao caso anterior, excetuando a gama de velocidades do vento em que o efeito da impulsão térmica se faz sentir. Este efeito faz com que o valor mínimo de renovações do ar dentro do espaço ocorra para outro valor de velocidade do vento, ao contrário do que acontecia anteriormente, que ocorria quando este era nulo.

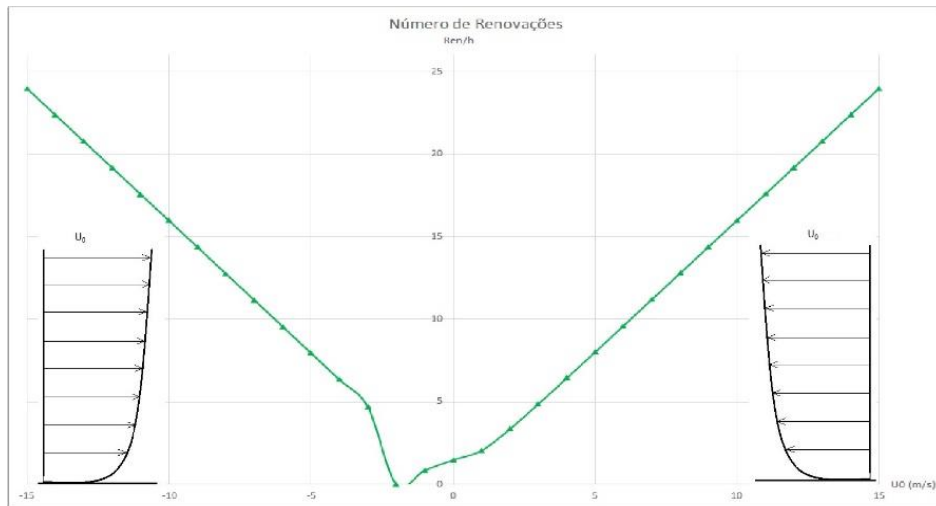


Figura 4.12- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com abertura junto ao teto

A variação de temperatura mantém um padrão semelhante ao caso anterior, sofrendo alteração na gama de velocidade na qual se observa o máximo de variação, tal como ocorre no número de renovações, e ainda uma redução ligeira da variação de temperatura no espaço 1. Com isto também se pode notar que a gama de velocidades do vento no qual o ar do espaço 1 não contamina o espaço 2 aumenta. No entanto este aumento é muito reduzido, e não corresponde ao efeito desejado, onde o mesmo deveria ocorrer para todas as gamas de velocidade do vento. Assim sendo, esta geometria, apesar de ser mais vantajosa para os pressupostos pretendidos, também não serve.

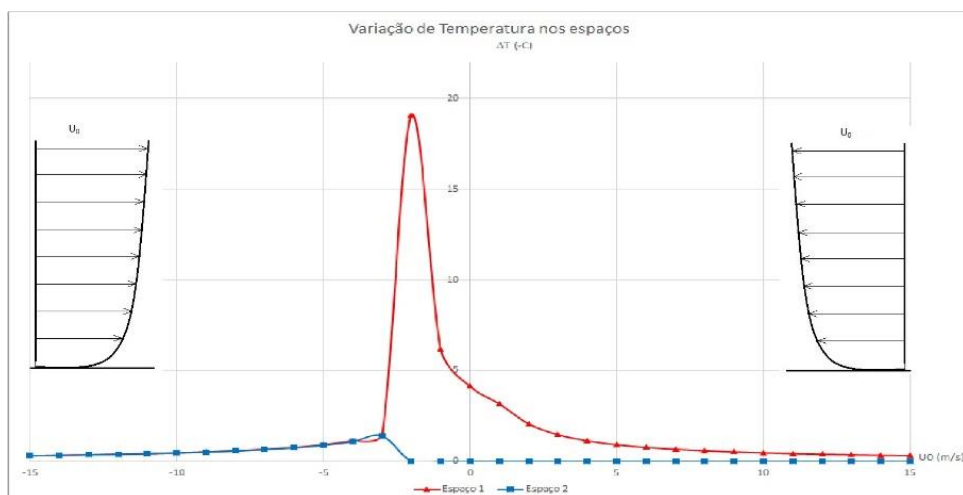


Figura 4.13- Variação de temperatura para nave industrial com abertura junto ao teto

### 4.2.3 Caso 3

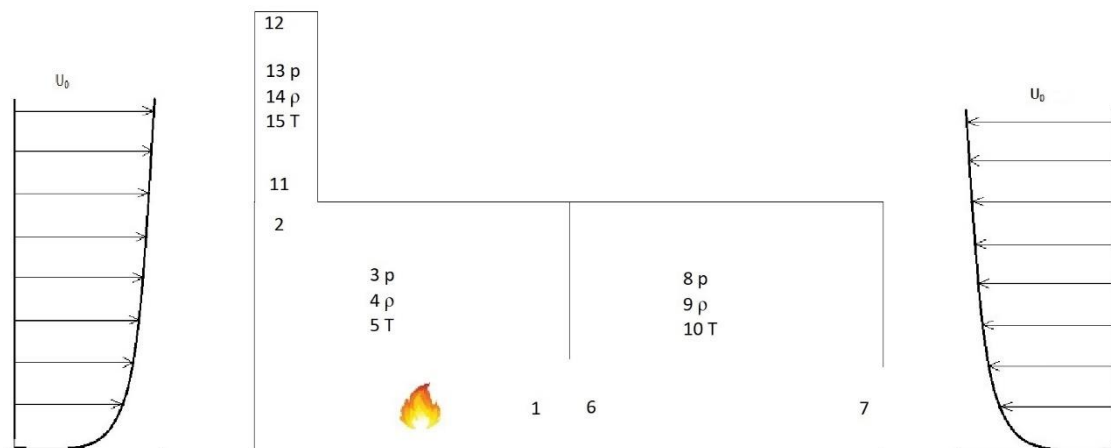


Figura 4.14- Nave industrial com chaminé

Para melhorar a geometria do edifício, com a intenção de alcançar o objetivo proposto, adiciona--se uma chaminé de 6 m de altura com uma área de abertura de  $0,5 \text{ m}^2$ . Espera-se que funcione de forma mais eficiente que no caso anterior, uma vez que se trata de uma solução mais adequada para a ventilação de um espaço. Sabe-se, a partir de (Delgado, Borges e Conde 1996), que o coeficiente de pressão exterior na chaminé será sempre igual a  $-1,15$ .

O gráfico seguinte demonstra os valores de velocidade do ar na abertura inferior do Espaço 1. Como é possível observar, os valores da velocidade do ar mantêm-se sempre positivos, independentemente do sentido do vento no exterior do edifício, indicando que é produzido o efeito desejado, sendo que o ar presente no Espaço 1 nunca se desloca para o Espaço 2. É de notar ainda que a velocidade nunca chega a ser nula devido ao efeito da impulsão térmica, garantido que haja sempre renovação do ar dentro do edifício.

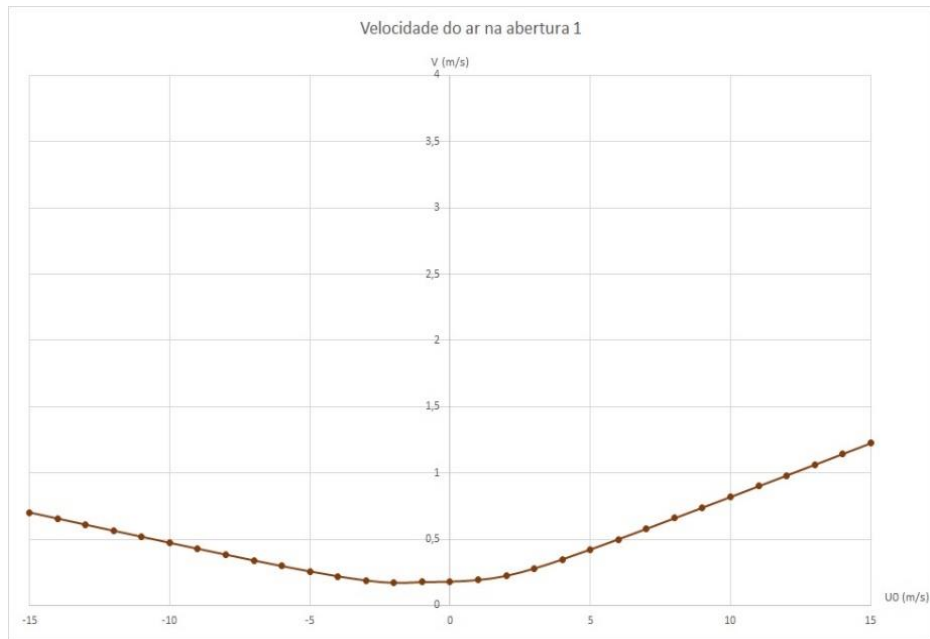


Figura 4.15- Velocidade do ar na abertura 1 para nave industrial com chaminé

A variação de Temperatura no interior dos espaços ajuda a reforçar a ideia anteriormente mencionada, uma vez que é possível notar que no Espaço 2 este valor se mantém nulo, não existindo assim passagem de ar do Espaço 1, aquecido, para o Espaço 2. Este efeito reforça a ideia de que não se contamina o Espaço 2, garantido assim que para todas as possibilidades de velocidade do vento, as condições necessárias são mantidas.

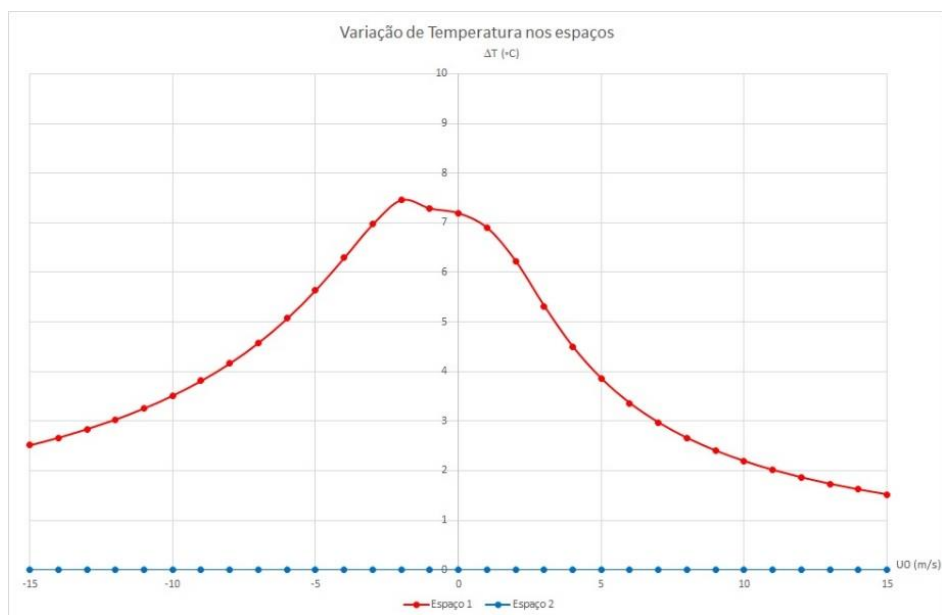


Figura 4.16- Variação de temperatura para nave industrial com chaminé

O número de renovações do ar no edifício segue o mesmo padrão que tem vindo a ser analisado nos casos anteriores, estando diretamente ligado à evolução da velocidade de ar nas aberturas. O facto de este nunca ser nulo, reforça o argumento utilizado, que define a impulsão térmica como fator chave que ajuda na manutenção da ventilação no edifício, quando o vento deixa de ser suficiente. Este fator promove a que as condições de habitabilidade sejam mais fáceis de manter no espaço desejado.

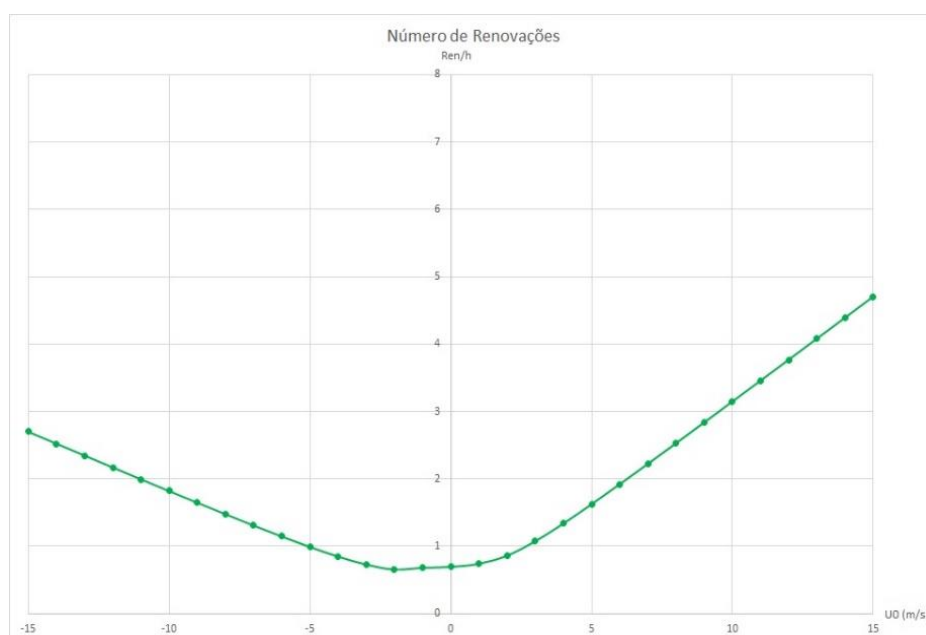


Figura 4.17- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé

Este valor de renovações obtido indica uma gama de renovações muito específica. Para diferentes atividades que poderão ocorrer no edifício, as taxas de renovação necessárias podem variar significativamente. Estes valores podem ser obtidos com recurso ao (DL nº 79/2006 2006), de onde é possível ter acesso aos vários caudais mínimos de ar necessários para as diferentes atividades dentro de um edifício. A partir destes caudais, calcula-se o número de renovações de ar mínimo proposto por lei, consoante a atividade designada para o espaço. Daí, surge a necessidade de prever alterações à geometria que possibilitem alterar estes valores sem que se comprometa os parâmetros desejados, já anteriormente adquiridos. Com intuito de observar estas possibilidades, estuda-se a variação do número de renovações do edifício para diferentes

dimensões da chaminé. As dimensões observadas da área de abertura da chaminé são de 0.5 m<sup>2</sup>, 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup> e 5 m<sup>2</sup>.

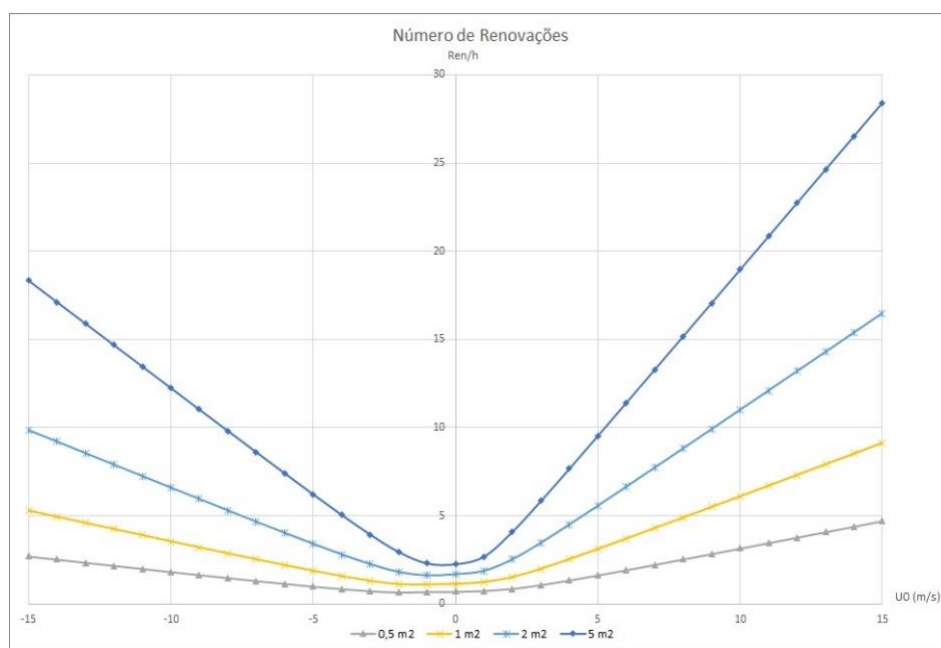


Figura 4.18- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminés de várias dimensões

Analisando os resultados alcançados no gráfico anterior, é possível concluir que a alteração da dimensão da chaminé muda de forma considerável o número de renovações, podendo esta ser adaptada consoante as necessidades propostas. Assim, partindo do número mínimo de renovações necessário, pode-se definir a dimensão mais conveniente para se utilizar no edifício.

### 4.3 Casos específicos da renovação de ar

A partir dos estudos realizados anteriormente, torna-se possível definir as características do edifício, de forma a que este cumpra com os pressupostos previamente estabelecidos. No entanto, existe também o objetivo de estudar o funcionamento do edifício para diferentes atividades no seu interior. Este fator leva a que seja necessário verificar os valores mínimos de renovações no espaço, de acordo com o que indica a legislação.

Partindo do decreto-lei mencionado no subcapítulo precedente, assume-se que a gama de valores de caudais mínimos representada vai corresponder a uma variação de valores entre, no mínimo 1 renovação de ar no espaço em uma hora, e, no máximo, 5 renovações de ar por hora. O valor mínimo está associado a espaços como supermercados, lojas de comércio, gabinetes, entre outros. Já no valor máximo, está associado serviços de refeições e cafés.

Para que o edifício consiga ter um funcionamento adequado, a área de secção da chaminé tem de ser adaptada, de forma a que a chaminé permita maior ou menor escoamento de ar para o exterior do edifício. Com isso serão considerados dois tamanhos para chaminé, sendo uma chaminé de 0,5 m<sup>2</sup> de área e outra de 5 m<sup>2</sup> de área. São feitos estudos, onde para cada uma das chaminés é verificado o comportamento do edifício associado ao número de renovações de ar mínimo imposto por lei. Isto obrigará a tomar algumas medidas para que se possa ultrapassar alguns problemas que surgem.

#### 4.3.1 Chaminé 0,5 m<sup>2</sup> para 1 renovação por hora

Para a área mencionada o edifício tem o seguinte número de renovações de ar por hora, em cada espaço.

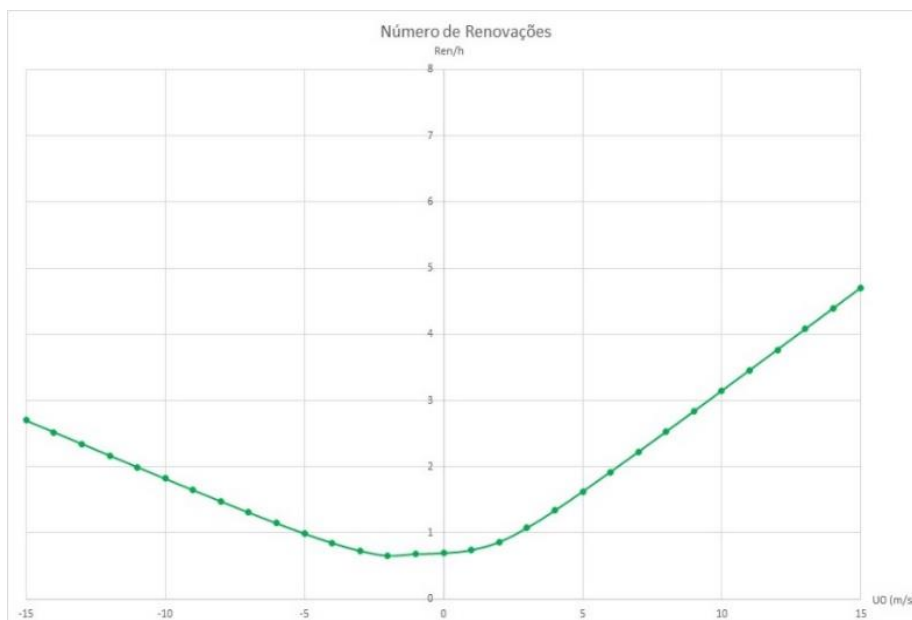


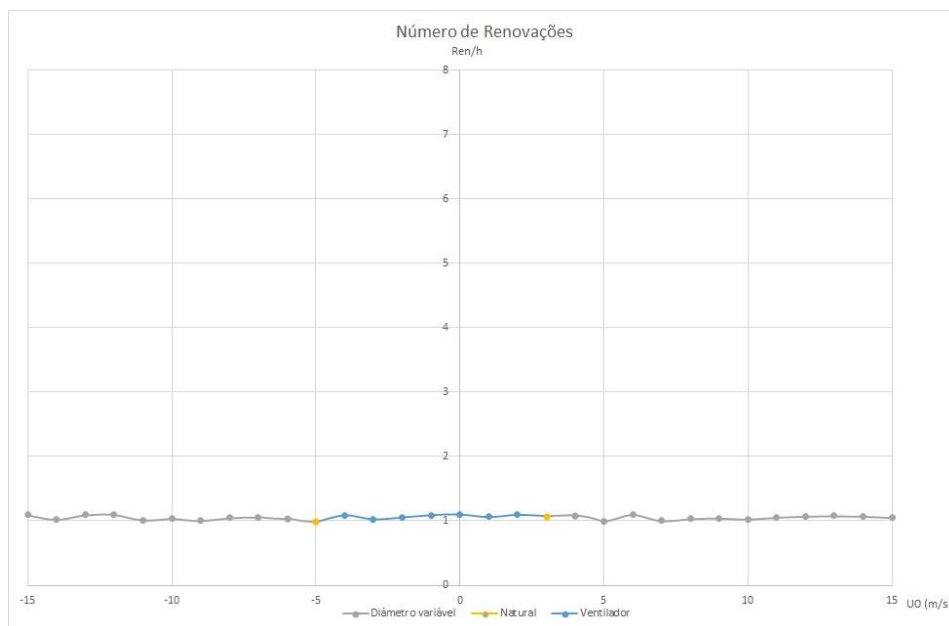
Figura 4.19- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 0,5 m<sup>2</sup>

No entanto, ao assumir a intenção de manter o número de renovações mínimo igual a 1 renovação por hora, são necessárias algumas alterações.

Existe uma gama de velocidades do vento na qual o número de renovações é inferior ao mínimo. Este problema pode ser resolvido inserindo um ventilador mecânico na abertura da chaminé, sendo que este ajudará na ventilação do edifício, garantindo que este cumpre os requisitos mínimos estipulados. O ventilador terá velocidade de rotação variável, permitindo que se ajuste à necessidade presente para cada velocidade do vento. Assim garante-se que o número de renovações se mantém constante, sem que haja gastos de energia adicionais, os quais não são necessários.

Estando resolvido o problema existente na gama de velocidades do vento em que o número de renovações é inferior ao mínimo, através da inserção de um ventilador, é necessário reparar outra questão. Com o valor mínimo estipulado em 1 renovação de ar por hora, torna-se desnecessário ter números de renovação muito superiores a este valor, podendo até ser um fator negativo para a qualidade do ambiente no interior do edifício. Observando o gráfico anterior, é notório que para velocidades de vento mais elevadas, os valores da taxa de renovação sobem bastante acima do desejado. Assim, integrou-se um obturador na chaminé, com a meta de ajudar a balancear este fenómeno e ajudar a garantir o valor das renovações por hora perto de 1. Este obturador vai reduzir a área de secção útil pela qual o ar atravessa a chaminé, reduzindo a assim a velocidade com que o ar é renovado. Para que esta adição possa ser precisa, a área do obturador é manuseada de forma a que garanta sempre o valor desejado.

O uso destes dois aparelhos ajuda a manter o número de renovações dentro do esperado para todas as gamas de velocidades do vento. O mesmo se pode comprovar observando o gráfico seguinte.



*Figura 4.20- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 0,5 m<sup>2</sup> e número de renovações mínimo igual a 1 renovação por hora*

Como se pode ver, com estes ajustes, o número de renovações é aproximadamente igual a 1 para todas as gamas de velocidade do vento. É de notar que para manter esta consistência, a área da secção da abertura da chaminé varia, graças ao obturador, enquanto que o ventilador funciona entre 100 rpm e 80 rpm. Tal pode ser observado nos seguintes gráficos.

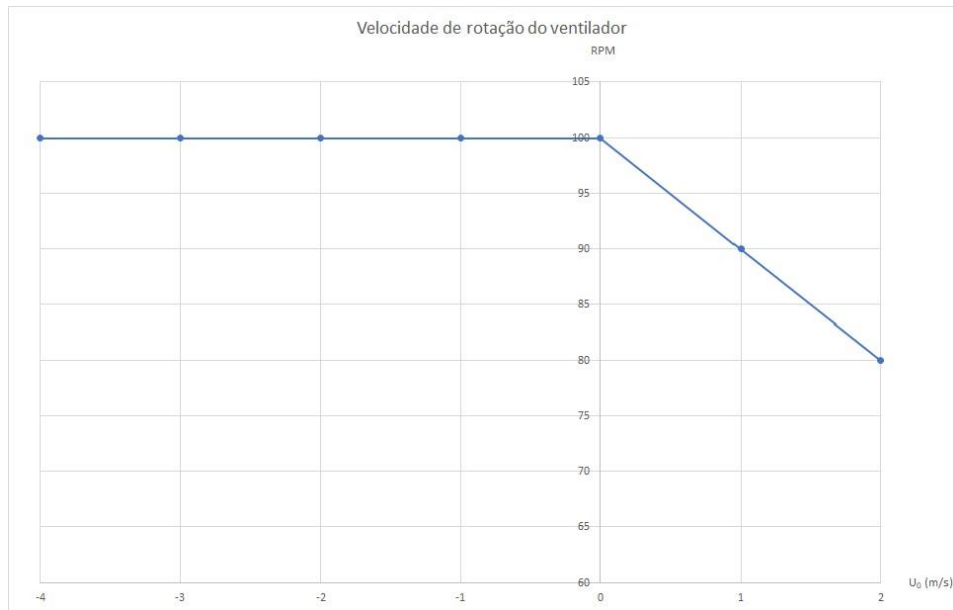


Figura 4.21- Velocidade de rotação do ventilador para garantir 1 renovação por hora com chaminé 0,5 m<sup>2</sup>

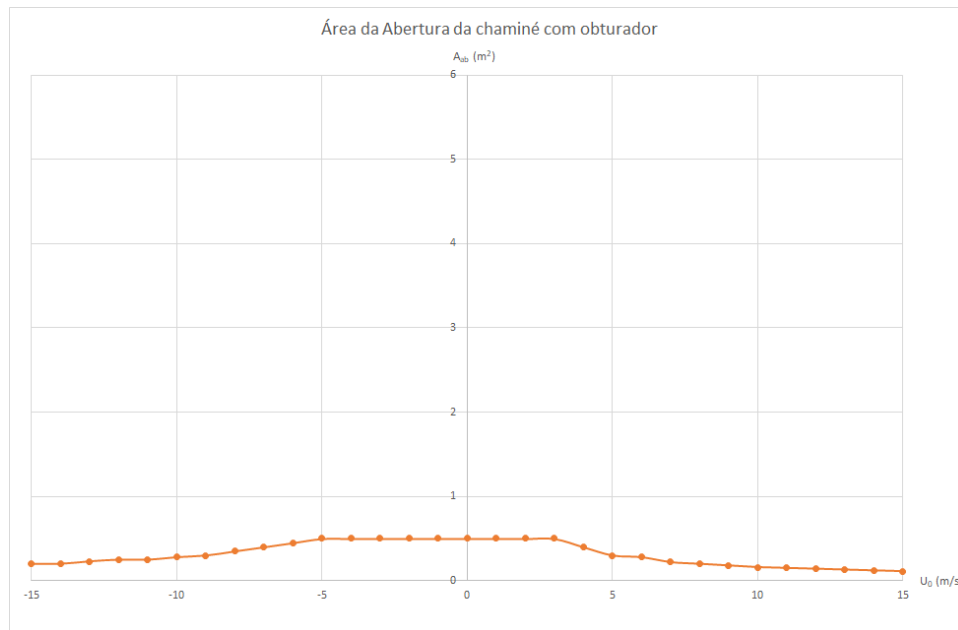


Figura 4.22- Área da abertura da chaminé com obturador para garantir 1 renovação por hora e chaminé de 0,5 m<sup>2</sup>

#### 4.3.2 Chaminé 0,5 m<sup>2</sup> para 5 renovações por hora

Na eventualidade das condições necessárias serem diferentes e se considerar o número de renovações de ar no espaço mínimo igual a 5 renovações por hora, haverá a necessidade de utilizar o ventilador. O uso de ventilador abrange todas as gamas de velocidade do vento, uma vez que a

ventilação natural não atinge as 5 renovações por hora em nenhuma das velocidades do vento estudadas. Assim, a velocidade de rotação do ventilador é ajustada de forma a garantir o valor mínimo considerado.

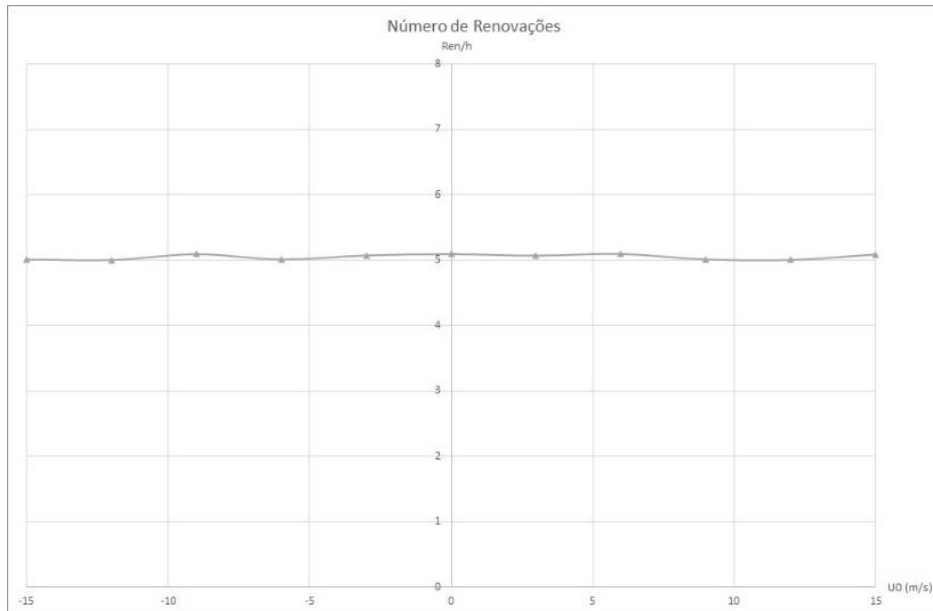


Figura 4.23- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de  $0,5 \text{ m}^2$  e número de renovações mínimo igual a 5 renovações por hora

No gráfico anterior, é possível observar que a taxa de renovação se mantém sempre dentro dos valores desejados, graças à velocidade variável de rotação do ventilador.

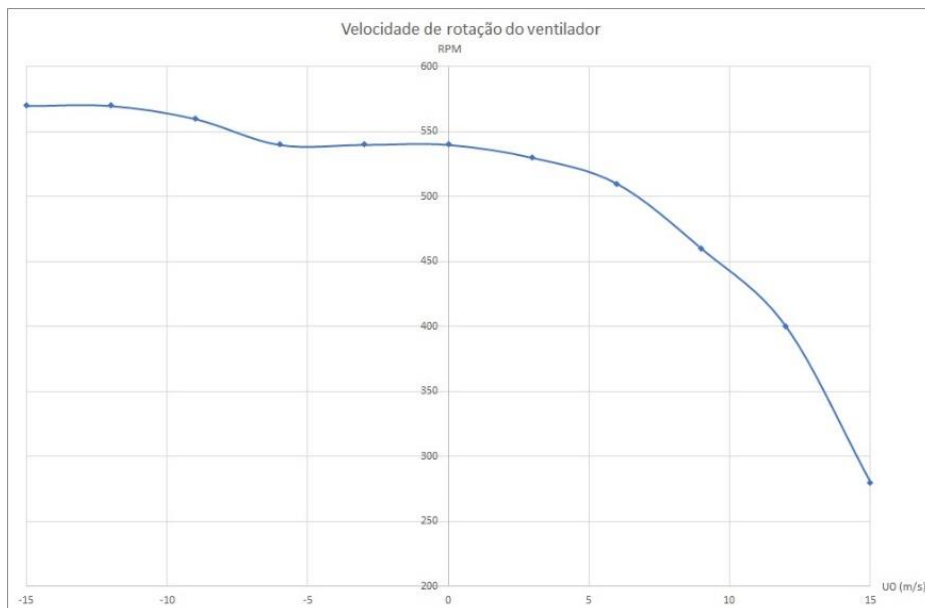


Figura 4.24-Velocidade de rotação do ventilador para garantir 5 renovações por hora com chaminé  $0,5 \text{ m}^2$

### 4.3.3 Chaminé 5 m<sup>2</sup> para 1 renovação por hora

Adotando a mesma geometria para o edifício, mas mudando a área em planta da chaminé para 5 m<sup>2</sup>, surgem novos desafios. Tendo em conta que o número de renovações, que se verifica no edifício após o aumento da área da chaminé, aumenta consideravelmente, como se pode ver no gráfico seguinte, passam a existir novos desafios para garantir que a taxa de renovação se mantenha perto de 1 renovação por hora.

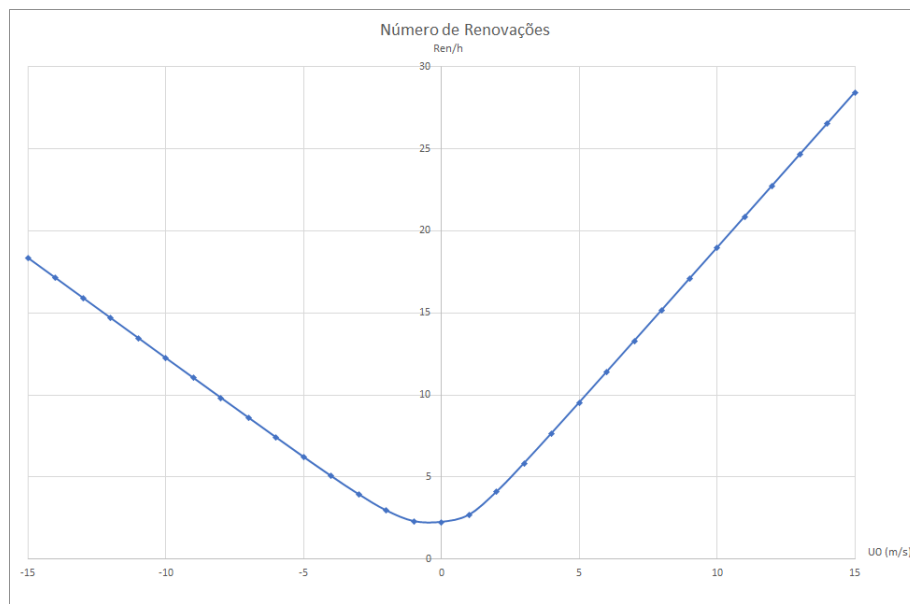


Figura 4.25- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 5 m<sup>2</sup>

Para o número de renovações mínimas igual a 1 renovação por hora, é necessário o uso de obturador na chaminé. Devido ao facto de a renovação de ar no edifício ser bastante superior ao necessário, para todas as gamas de vento, a área da abertura da chaminé terá de ser sempre reduzida, para que se obtenha a finalidade pretendida.

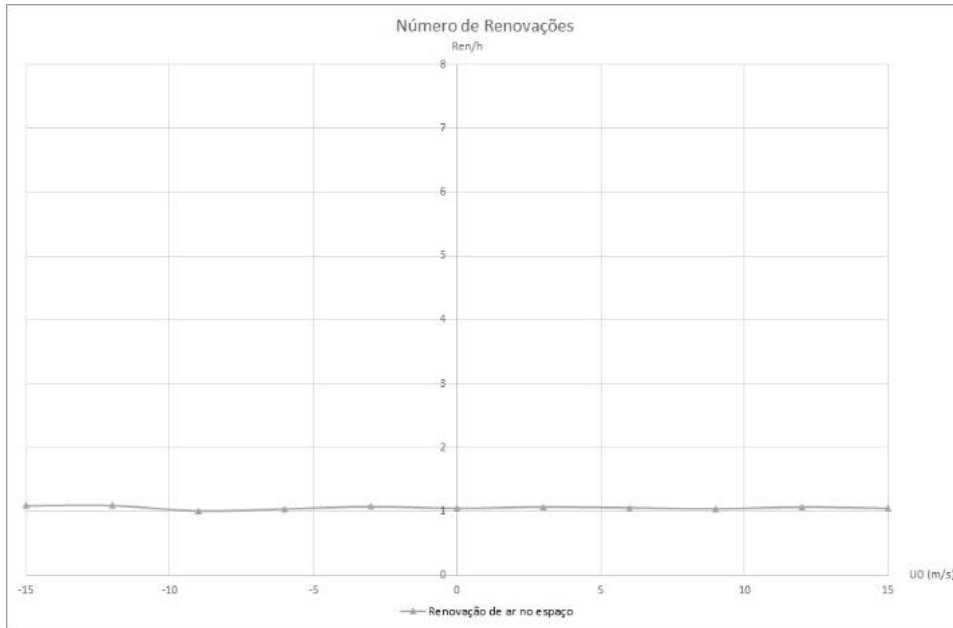


Figura 4.26- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de  $5 \text{ m}^2$  e número de renovações mínimo igual a 1 renovação por hora

A variação da área de abertura do obturador pode ser observada no gráfico seguinte.

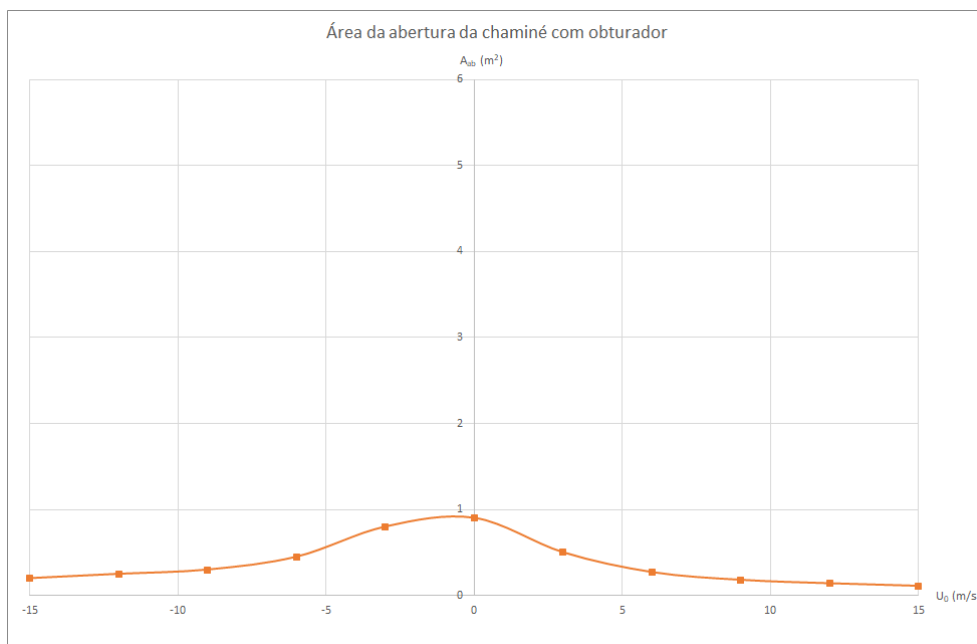


Figura 4.27- Área da abertura da chaminé com obturador para garantir 1 renovação por hora e chaminé de  $5 \text{ m}^2$

Como é possível notar, é necessário que a área da abertura seja consideravelmente reduzida para que consiga limitar o número de renovações de modo a que este seja aproximadamente igual a 1. Isto mostra que a chaminé tem dimensões exageradas para as solicitações propostas.

#### 4.3.4 Chaminé 5 m<sup>2</sup> para 5 renovações por hora

Aumentando o número mínimo de renovações para 5, revelam-se novos obstáculos. O número de renovações para esta chaminé é superior ao mínimo estabelecido para algumas gamas de velocidade do vento, mas em contrapartida é inferior em outras gamas. Isto leva a que se use tanto o ventilador como o obturador, para que se mantenha um valor constante de renovação do ar no interior do edifício. O mesmo processo foi tido quando se considerou a chaminé de 0,5 m<sup>2</sup> com taxa de renovação mínima de 1 renovação de ar por hora.

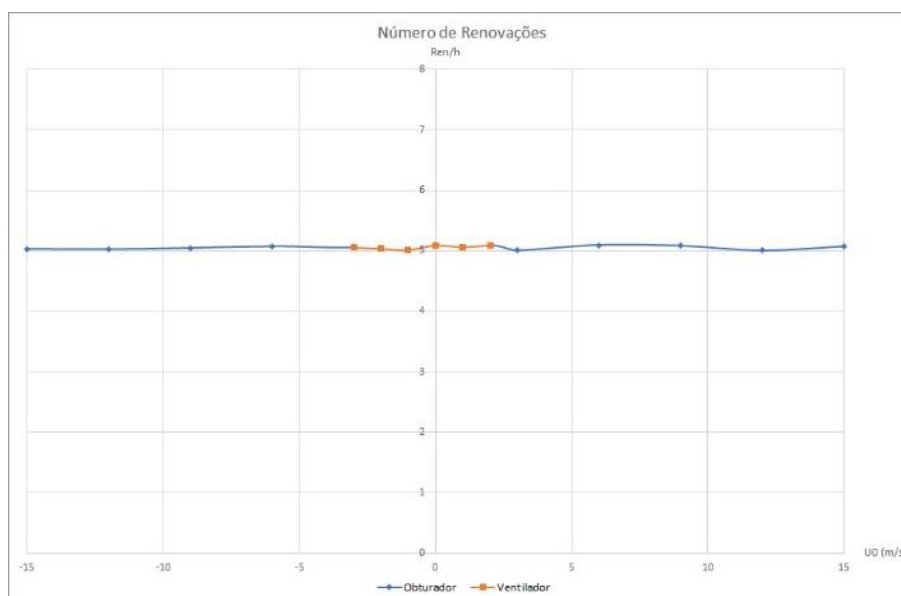


Figura 4.28- Número de renovações de ar por hora para nave industrial com chaminé de 5 m<sup>2</sup> e número de renovações mínimo igual a 5 renovações por hora

Como se pode ver no gráfico anterior, as gamas mais altas de velocidade do vento farão com que se utilize o obturador, para reduzir o número de renovações, enquanto que nas gamas mais baixas se usa ventilador, com intuito de ter o efeito contrário.

Nos gráficos seguintes, é possível observar as variações na velocidade de rotação do ventilador e também na área da abertura sobre o efeito do obturador.

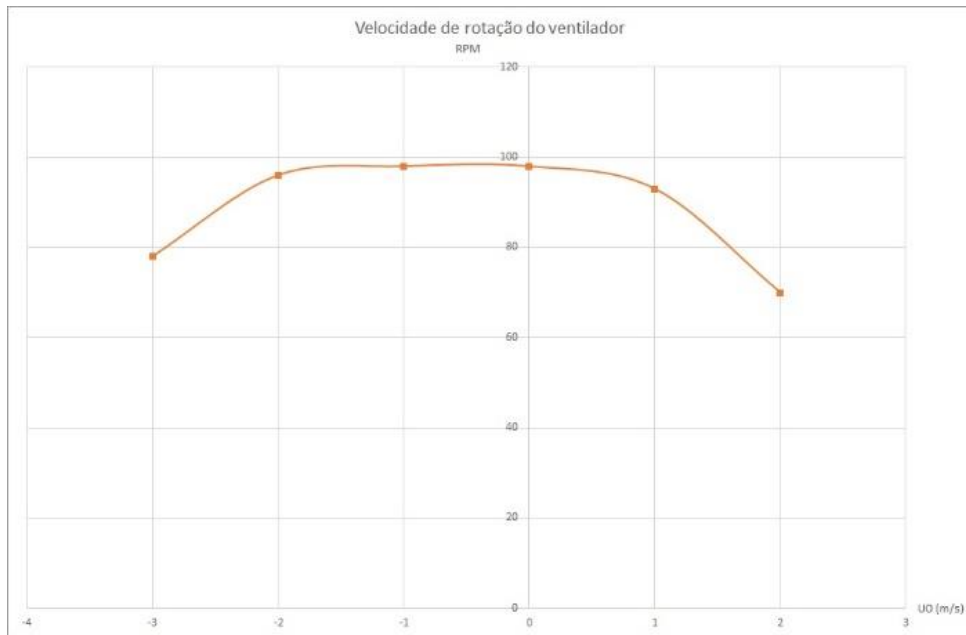


Figura 4.29- Velocidade de rotação do ventilador para garantir 5 renovações por hora com chaminé 5 m<sup>2</sup>

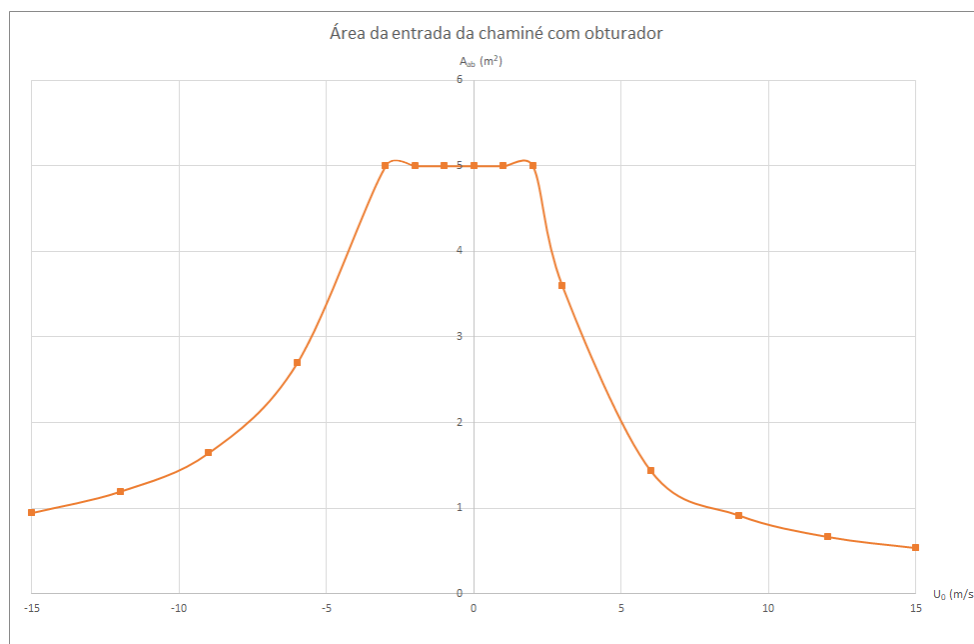


Figura 4.30- Área da abertura da chaminé com obturador para garantir 5 renovações por hora e chaminé de 5 m<sup>2</sup>

#### 4.4 Análise de resultados

Partindo dos dados obtidos no estudo anterior, surge a necessidade de os interpretar de forma a ter uma resposta que explique as potencialidades energéticas para cada caso exposto do edifício referido. Para tal, é necessário calcular a energia que é poupada em cada caso, podendo assim comparar cada um e analisar as suas diferenças. Estes valores têm de ser obtidos através da potência produzida, a qual é calculada a partir dos dados retirados do programa, sendo estes o módulo da diferença de pressão entre a chaminé e o espaço 1 do edifício, a velocidade de ar na abertura da chaminé e a área da abertura da chaminé, podendo esta variar quando na presença de um obturador. Com estes dados, procede-se ao cálculo da potência através da fórmula seguinte.

$$potência = |p_1 - p_3| \times A \times v \quad (4.1)$$

##### 4.4.1 Distribuição de vento em Lisboa

O local em que o edifício está localizado, é relevante para que se possa definir as condições a que este estará sujeito. A partir destas informações, será possível ajustar os resultados obtidos a quantidade de vento que é característica da zona.

Para definir as características do vento na região deve-se seguir as leis de distribuição de classes de vento. Regularmente, usa-se a distribuição de Weibull como função de distribuição para recurso eólico. Esta distribuição depende de dois parâmetros,  $k$  e  $A$ , (Costa 2004), sendo os anteriores parâmetros de forma e de escala, respetivamente. A partir desta distribuição, é possível ter uma representação estatística aceitável da distribuição da velocidade instantânea do vento ao longo do ano. De acordo com (Vaz 2008), a lei de distribuição de Weibull pode ser apresentada conforme a próxima expressão:

$$p(u) = ku^{k-1}A^{-k}e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k} \quad (4.2)$$

Onde  $p(u)$  representa uma função densidade probabilidade:

$$\int_0^{\infty} p(u) du = 1 \quad (4.3)$$

Assumindo que  $k=2$ , valor que representa as condições presentes em Portugal, e  $A = 1,125\bar{u}$ , com  $\bar{u} = 16,9 \frac{km}{h} = 4,7 \frac{m}{s}$ , valores para Lisboa.

O gráfico seguinte revela a distribuição de Weibull para a frequência de ocorrência de velocidades do vento na região de Lisboa.

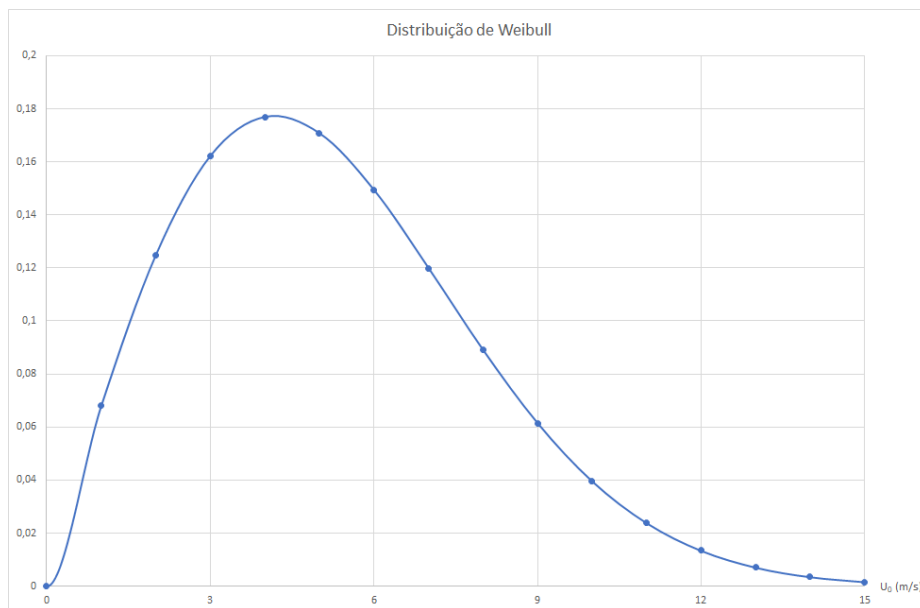


Figura 4.31- Distribuição de Weibull, relativa à velocidade instantânea do vento ao longo do ano

Esta distribuição de Weibull, sendo uma função densidade de probabilidade, tem integral da área abaixo do gráfico igual a, mostrando que  $p(u)$  é a probabilidade de ocorrência de vento com velocidade  $u$ .

Adicionalmente, para que se perceba melhor o significado real da probabilidade indicada, em termos de tempo, adapta-se o valor da distribuição de Weibull para que mostre a probabilidade em número de dias que cada velocidade do vento será sentida durante um ano:

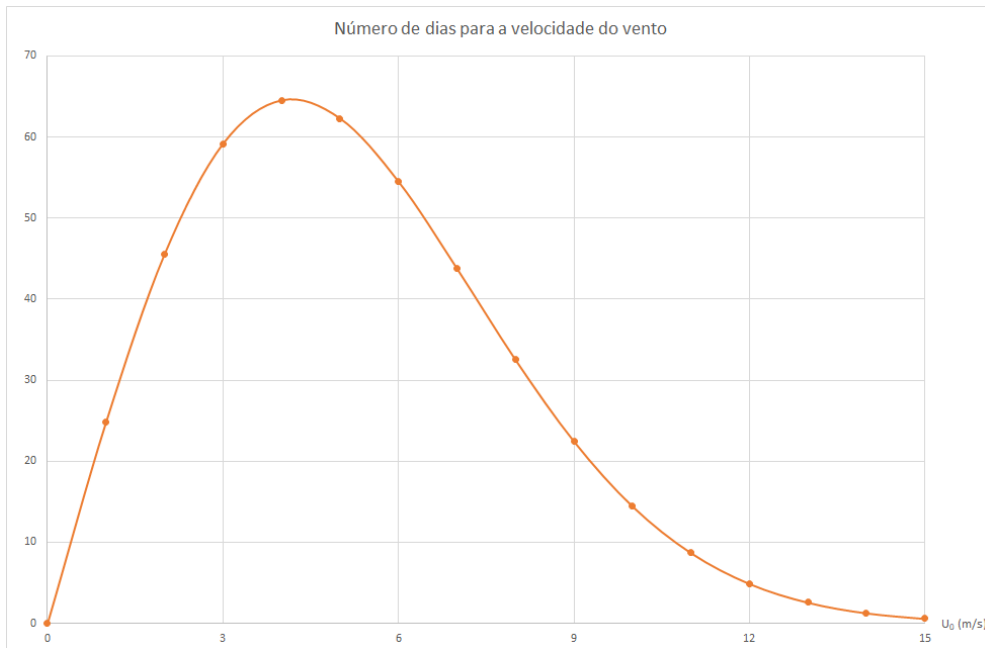


Figura 4.32- Número de dias previstos para cada velocidade do vento

#### 4.4.2 Resultados caso com chaminé 0,5 m<sup>2</sup> e 1 renovação por hora

Tal como referido anteriormente, os valores da velocidade do vento à entrada da chaminé, a diferença de pressão entre o espaço 1 e a chaminé e a área de abertura da chaminé são de grande importância, sendo que estes ajudarão a compreender a variação da potência para cada velocidade de vento. Os valores da área da chaminé estão foram expostos anteriormente, pelo que existe a necessidade de mostrar os valores que representam os restantes fatores.

No gráfico seguinte é possível observar a variação da velocidade do ar à entrada da chaminé com a variação da velocidade do vento. No entanto, esta velocidade encontra uma gama em que os seus valores se mantêm constantes, apesar da variação da velocidade do vento. Esse efeito é devido à introdução do ventilador, sendo que este mantém o valor constante, perto do que é exigido.

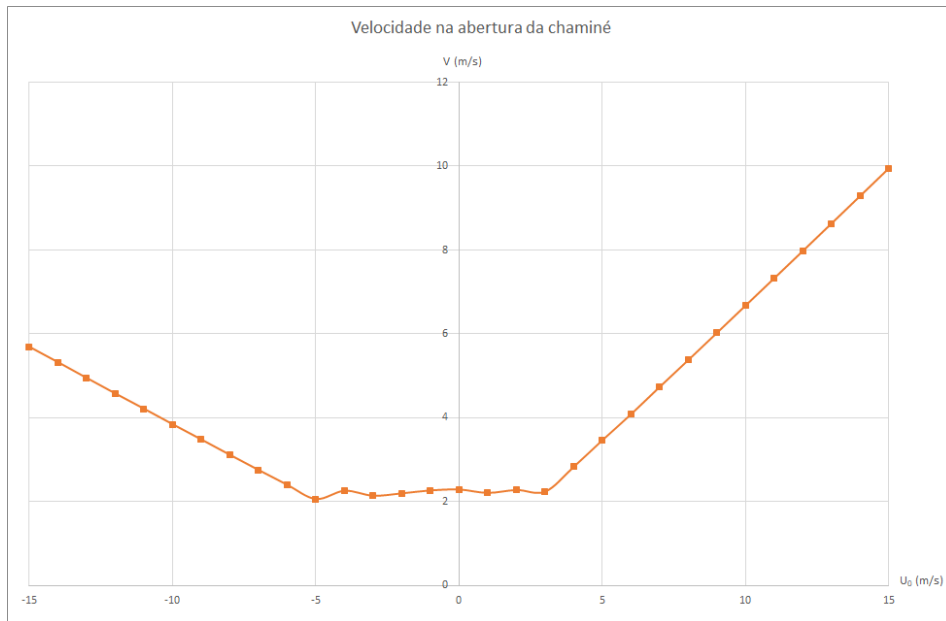


Figura 4.33- Velocidade de ar na abertura da chaminé com  $0,5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora

O gráfico seguinte demonstra a diferença de pressão que existe entre o espaço 1 e a chaminé. Esta diferença tem valores mais elevados quando a velocidade do vento é maior, em contrapartida, nota-se pouca variação quando a velocidade do vento é reduzida, sendo essa gama a mesma onde se tem o ventilador em funcionamento.

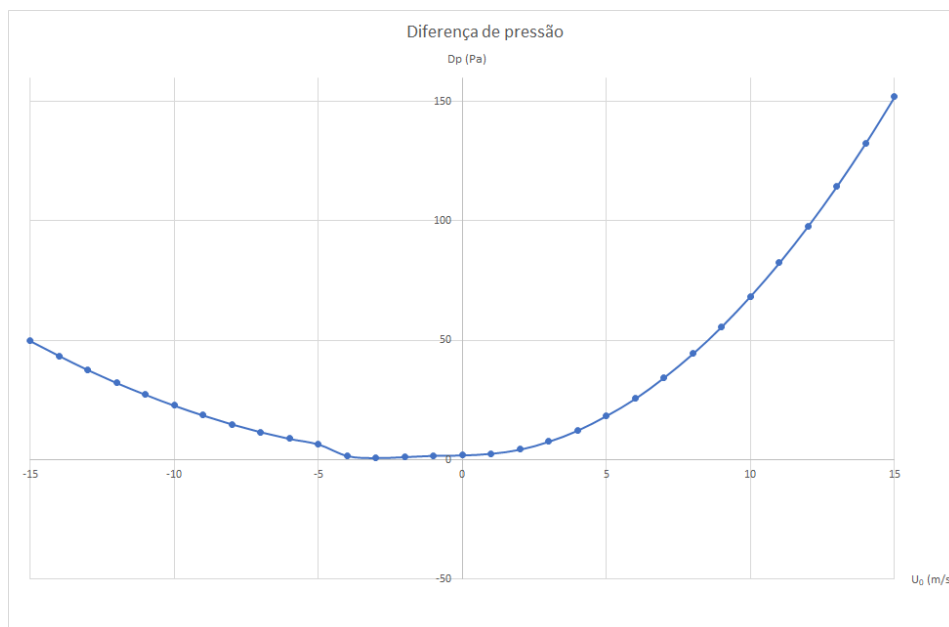
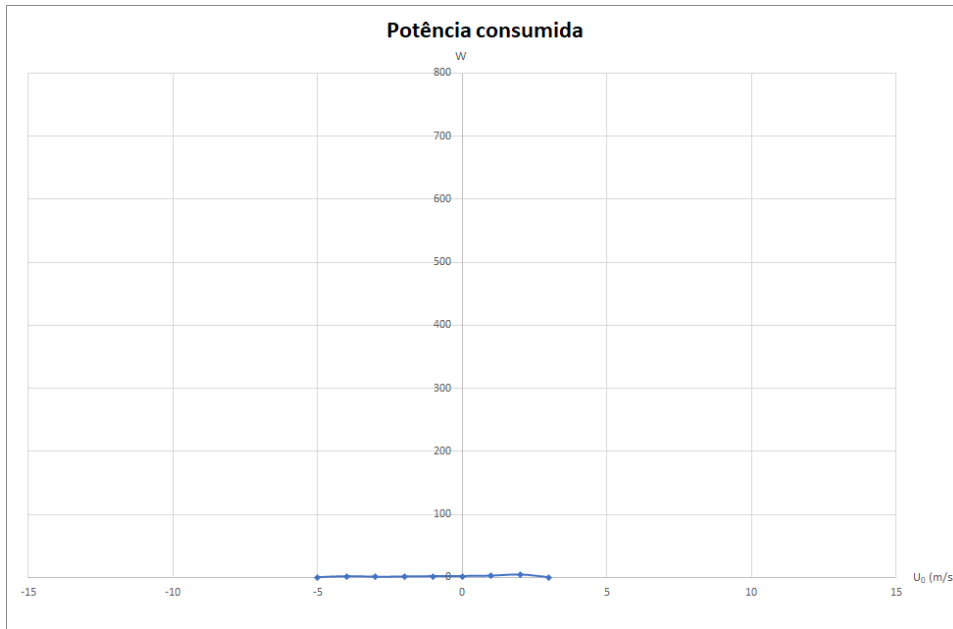


Figura 4.34- Diferença de pressão para chaminé de  $0,5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora

A partir dos valores que podem ser retirados no gráfico anterior, torna-se possível calcular a potência consumida. A potência considerada representa a potência despendida pelo ventilador, sendo esta calculada apenas quando este se encontra em funcionamento.



*Figura 4.35- Potência consumida para chaminé de 0,5 m<sup>2</sup> e 1 renovação por hora*

Para ter uma melhor noção da evolução da potência, foca-se o gráfico na zona mais crítica. Aqui é possível observar a evolução da potência dentro das gamas em que o ventilador funciona, onde se pode chegar à conclusão de que os valores de potência consumida são bastante baixos, uma vez que a velocidade de ar na abertura da chaminé e a diferença de pressão são bastante reduzidas durante esta gama.

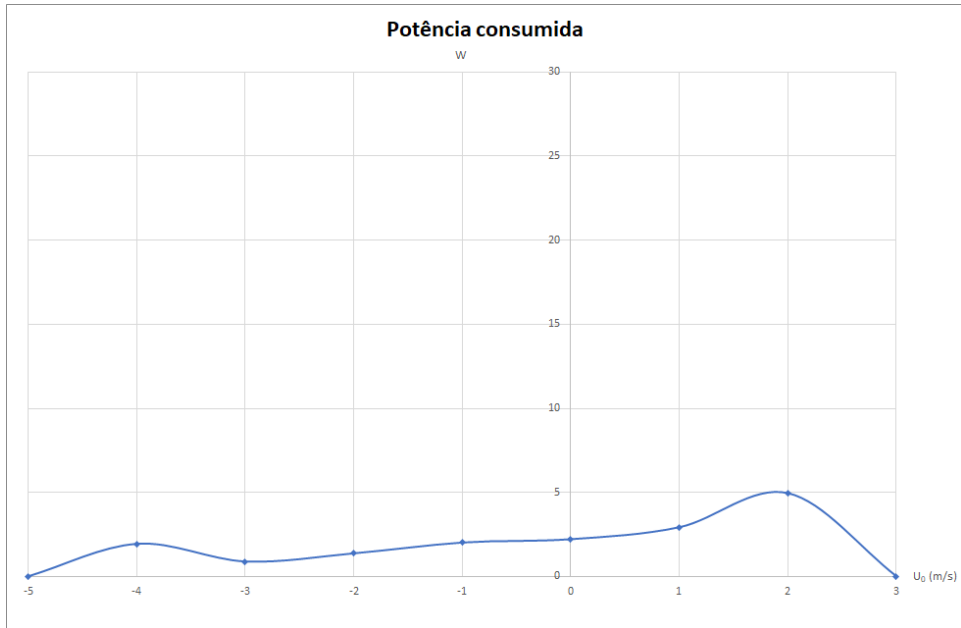


Figura 4.36- Potência consumida para chaminé de  $0,5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora (vista detalhada)

#### 4.4.3 Resultados caso com chaminé $0,5 \text{ m}^2$ e 5 renovações por hora

Ao aumentar o número mínimo de renovações de ar para 5, existirá a necessidade de utilizar um ventilador para todas as gamas de velocidade do vento. Este fator leva a que a velocidade do ar à entrada da chaminé tenha um padrão muito constante, uma vez que a velocidade de rotação do ventilador é ajustada para manter a ventilação num padrão estável.

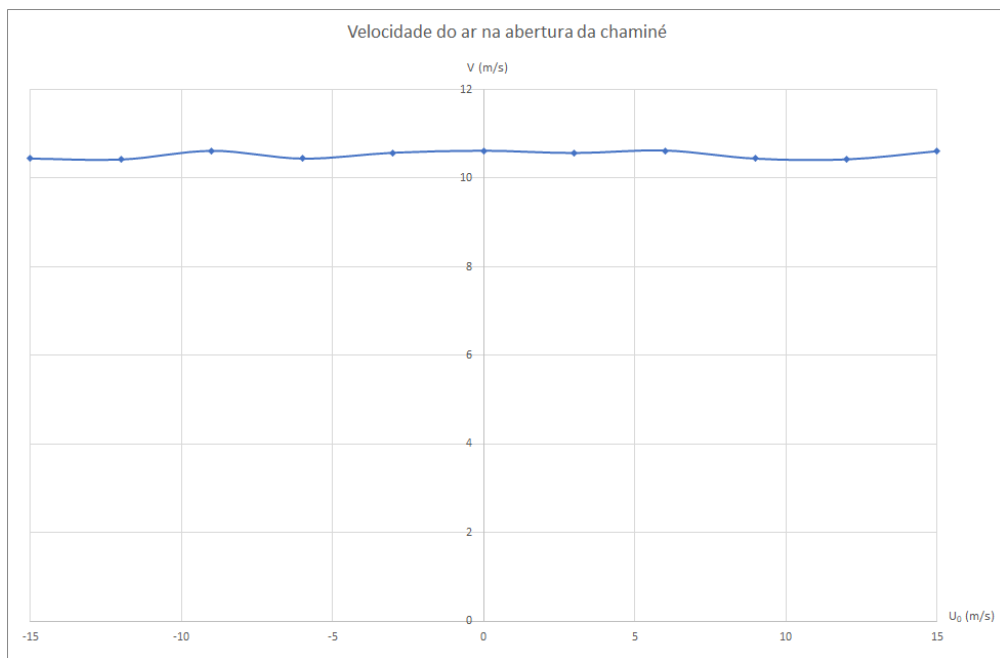
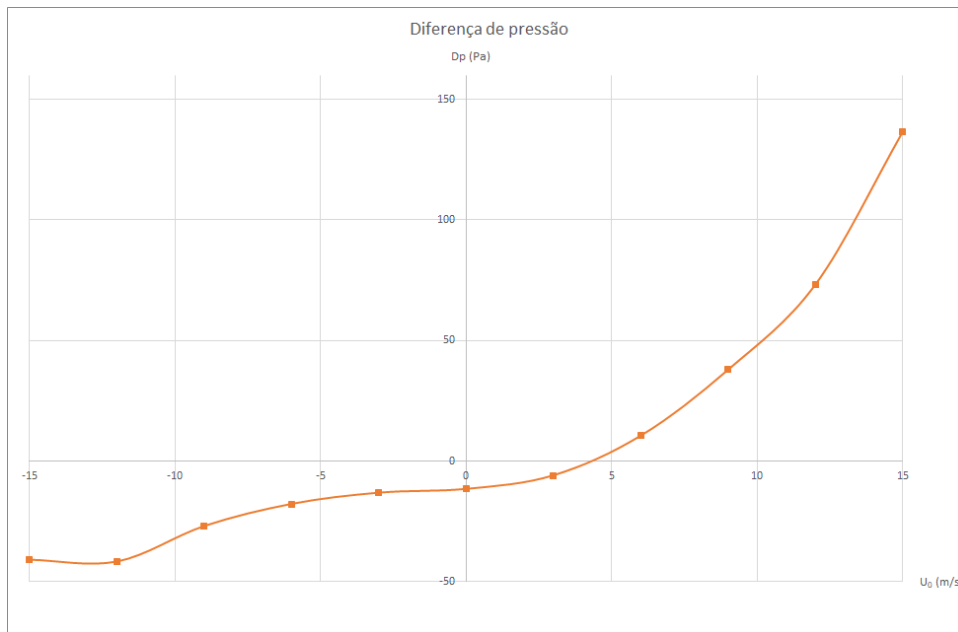


Figura 4.37- Velocidade de ar na abertura da chaminé com  $0,5 \text{ m}^2$  e 5 renovações por hora

A diferença de pressão terá um padrão irregular, sendo crescente inversamente quando o vento se encontra no sentido negativo. No sentido positivo, esta diferença tem um cariz crescente, com o aumento da velocidade do vento, mas sendo no sentido positivo.



*Figura 4.38- Diferença de pressão para chaminé de 0,5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora*

A potência terá os valores superiores, em relação ao caso anterior, uma vez que neste caso a velocidade do ar que entra na chaminé tem de ser sempre maior para que se cumpram os requisitos mínimos estabelecidos para a renovação de ar no edifício.

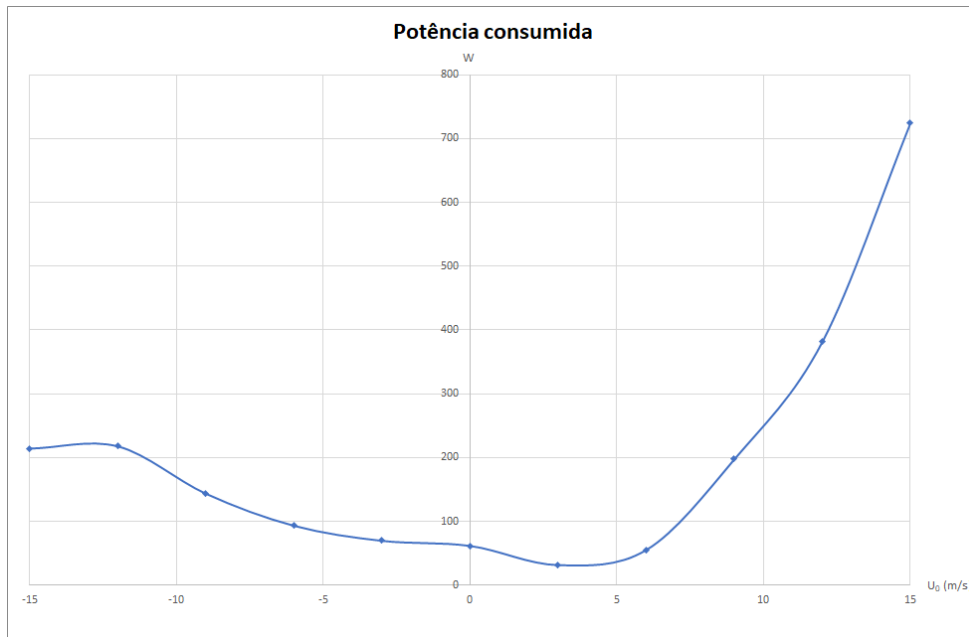


Figura 4.39- Potência consumida para chaminé de  $0,5 \text{ m}^2$  e 5 renovações por hora

#### 4.4.4 Resultados caso com chaminé $5 \text{ m}^2$ e 1 renovação por hora

De seguida se observa o resultado da variação da área da chaminé, onde esta passa a ter  $5 \text{ m}^2$  na abertura, mas onde se considera o mínimo de renovações igual a 1. O padrão que pode ser observado na velocidade do ar na abertura da chaminé assemelha-se muito ao caso anterior em que se considerava a necessidade de garantir 1 renovação por hora. A grande diferença está no facto deste caso não necessitar de um ventilador para garantir os requisitos propostos.

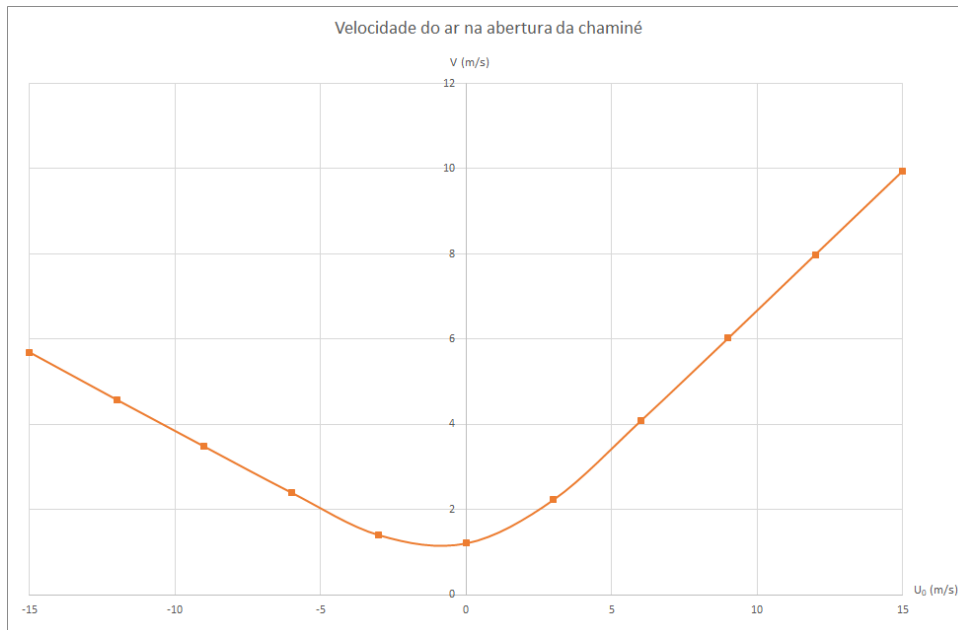


Figura 4.40- Velocidade de ar na abertura da chaminé com  $5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora

A diferença de pressão, tal como acontece na velocidade do ar, é bastante assemelhada ao caso com os mesmos requisitos em termos de número de renovações, havendo poucas diferenças.

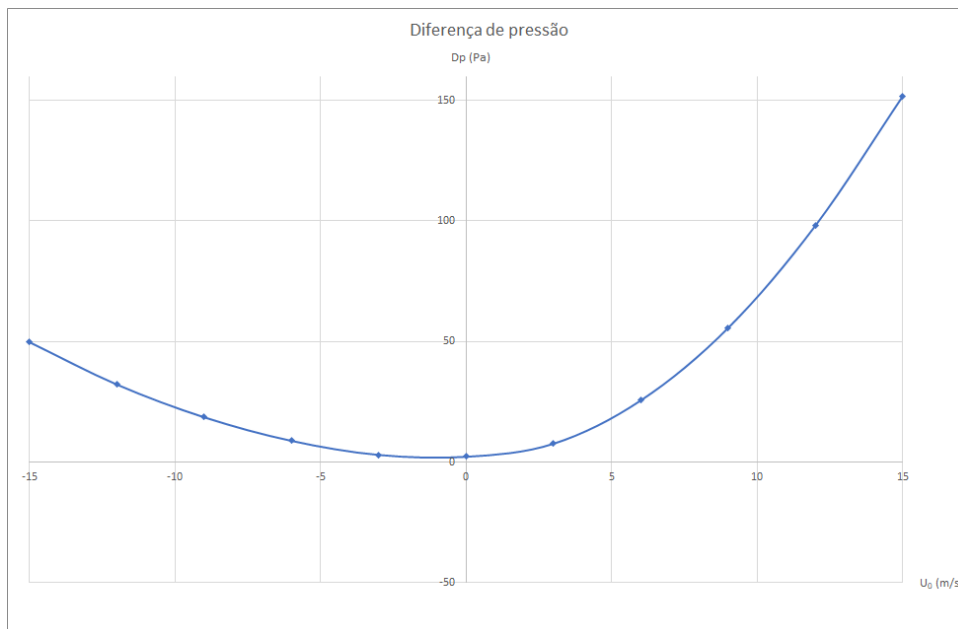


Figura 4.41- Diferença de pressão para chaminé de  $5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora

No entanto, o facto de não existir nenhum ventilador faz com que não haja potência consumida, sendo toda a ventilação feita através da ventilação natural. Assim sendo, este caso não regista qualquer tipo de gasto energético.

#### 4.4.5 Resultados caso com chaminé 5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora

Por fim, este caso tem a mesma dimensão na chaminé, mas tem o número de renovações mínimo igual a 5. No que se trata da velocidade de ar à entrada da chaminé, o padrão é bastante parecido ao primeiro caso, havendo apenas a distinção de neste caso os valores da velocidade serem ligeiramente menores, principalmente na zona de ação do ventilador.

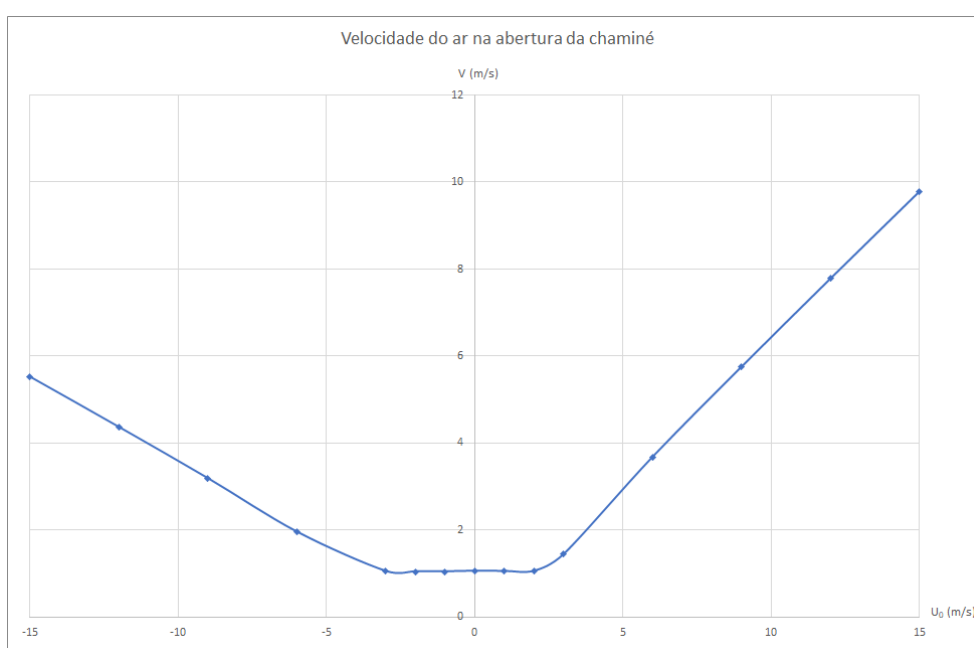


Figura 4.42- Velocidade de ar na abertura da chaminé com 5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora

Já a diferença de pressão tem um padrão semelhante ao terceiro caso, havendo a distinção de na gama em que o ventilador está em funcionamento a diferença de pressão se tornar negativa.

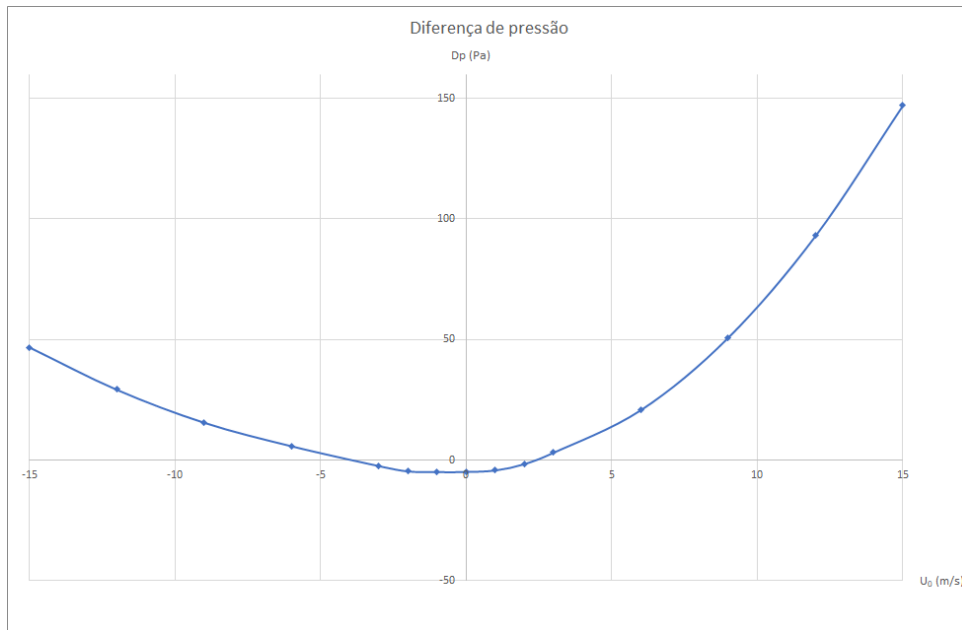


Figura 4.43- Diferença de pressão para chaminé de 5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora

No que se trata da potência consumida, tal como no primeiro caso em que o ventilador tinha uma gama de funcionamento pequena, os valores são baixos.

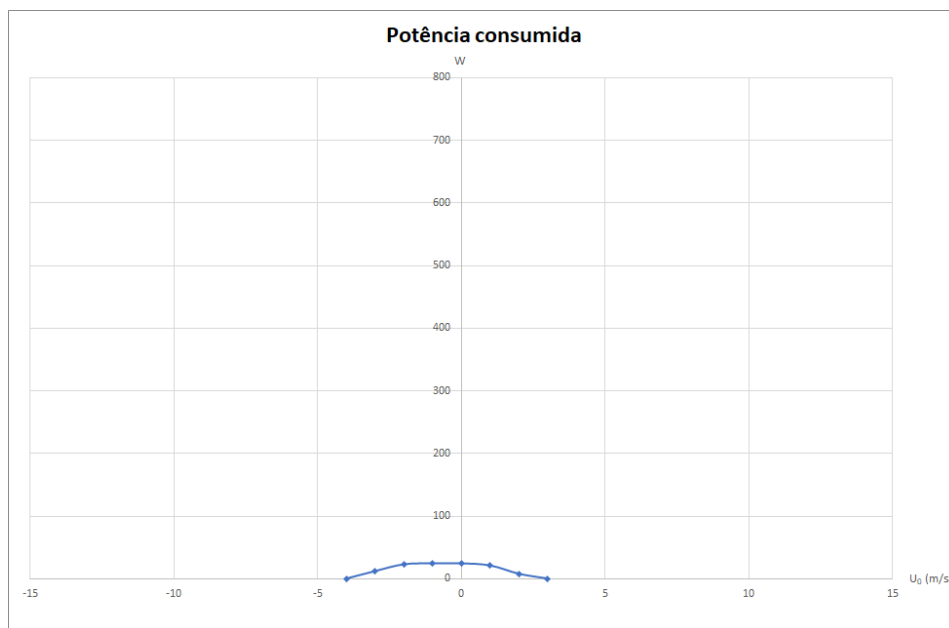


Figura 4.44- Potência consumida para chaminé de 5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora

Com um maior detalhe, é possível observar que a potência consumida será maior que no primeiro caso, devendo-se ao facto de neste caso estarem envolvidos valores de renovação necessária mais altos que implicam maior potência da parte do ventilador.

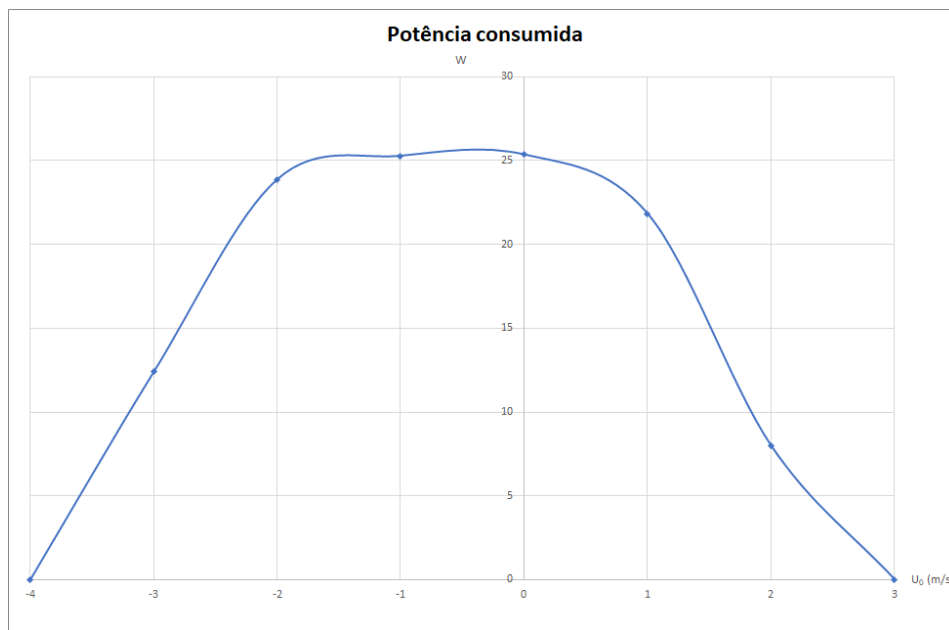


Figura 4.45- Potência consumida para chaminé de 5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora (vista detalhada)

#### 4.4.6 Consumo energético do edifício

Para que seja possível ter noção do aproveitamento energético do edifício, é necessário calcular a energia consumida para garantir a ventilação nas condições propostas, a partir da potência. Esta será combinada com a probabilidade de ocorrência de cada velocidade do vento, dando a distribuição de energia necessária durante um ano, em MJ/ano. Devido ao facto de a distribuição de Weibull apenas considerar a velocidade do vento em absoluto, perde-se a distinção entre os vários sentidos do vento. Assim, a insuficiência de meios para poder fazer uma distribuição semelhante, em que os sentidos do vento seriam considerados, leva a que se escolha apenas um sentido para cada estudo, de cada vez.

Para o caso da chaminé com 0,5 m<sup>2</sup> e 1 renovação mínima por hora tem-se o seguinte gráfico, que demonstra a gama em que a energia é gasta, com o funcionamento do ventilador. Como se pode ver, no gráfico seguinte, esta gama é bastante reduzida, sendo consumida energia para poucas velocidades do vento, como já havia sido mencionado. Este caso representa a velocidade do vento no sentido positivo.

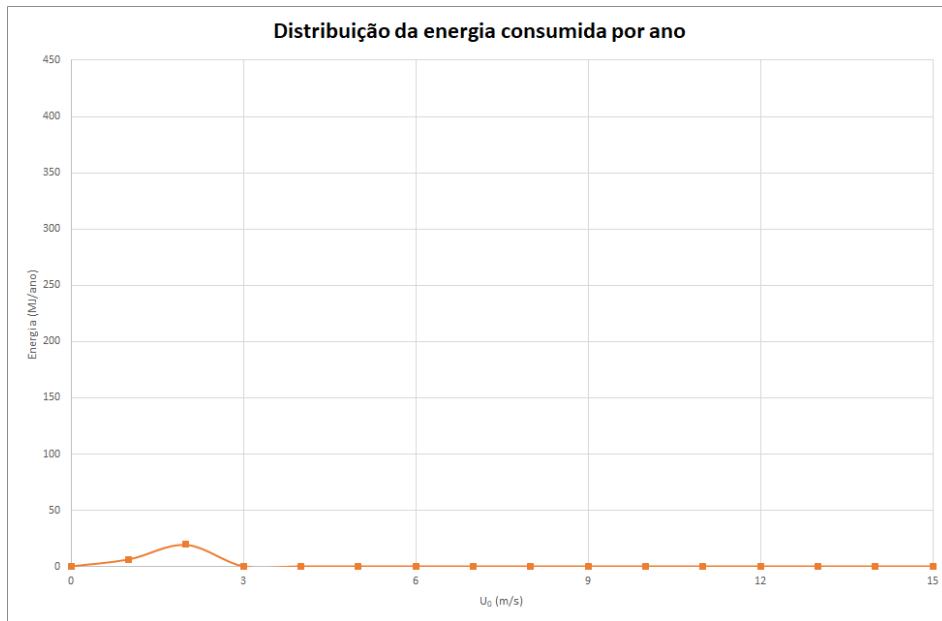


Figura 4.46- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m<sup>2</sup> e 1 renovação por hora no sentido positivo da velocidade do vento

O gráfico seguinte permite uma análise mais precisa do caso anteriormente mencionado, onde se pode ter uma noção mais exata dos valores que estão envolvidos.

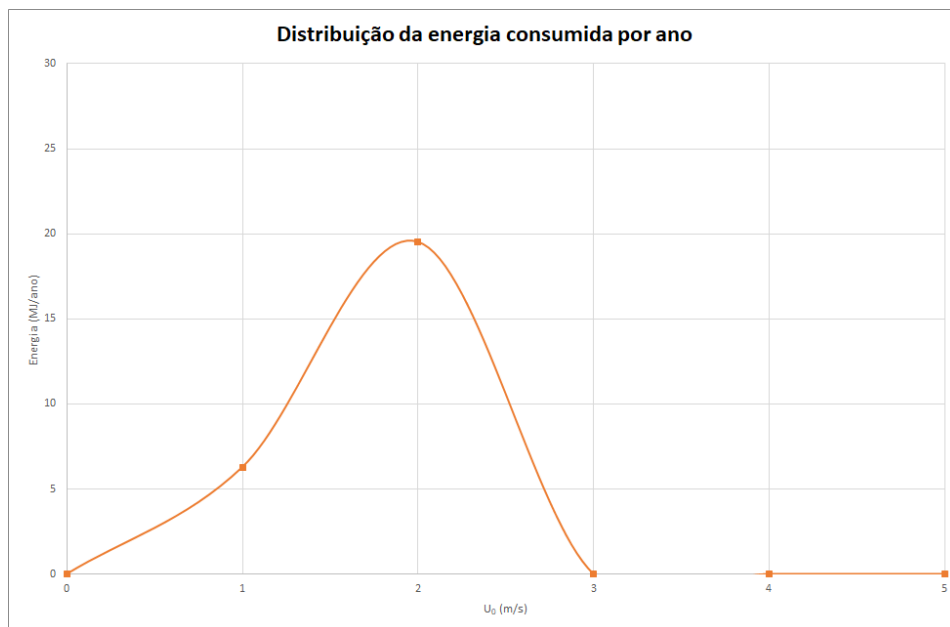


Figura 4.47- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m<sup>2</sup> e 1 renovação por hora no sentido positivo da velocidade do vento (vista detalhada)

No sentido negativo da velocidade do vento continua a existir uma gama muito reduzida em que se consome energia e onde os valores de consumo se representam na mesma ordem de grandeza dos valores existentes quando a velocidade do vento é positiva.

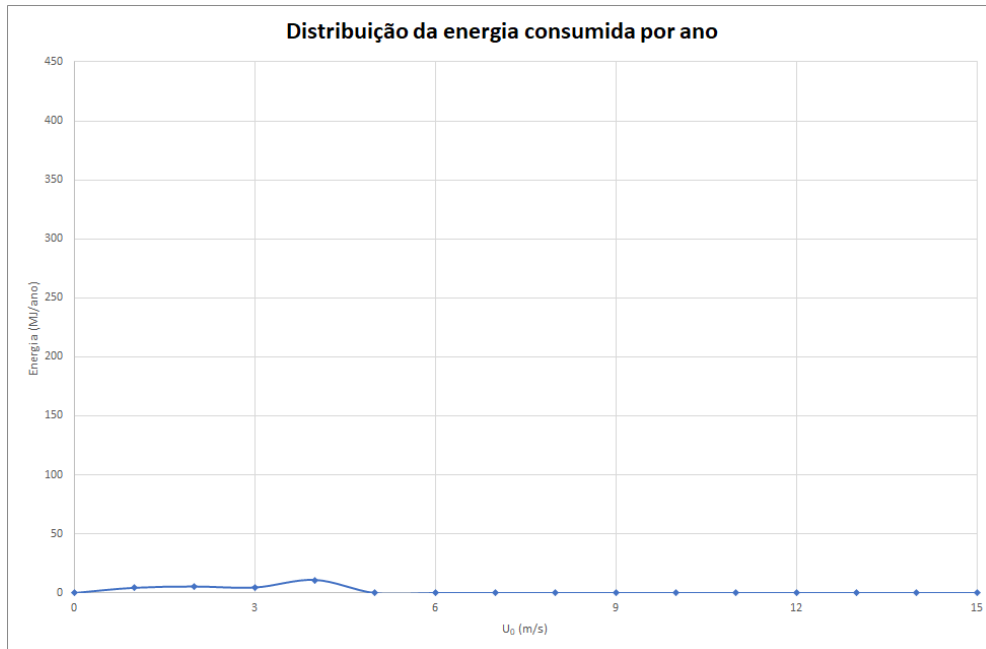
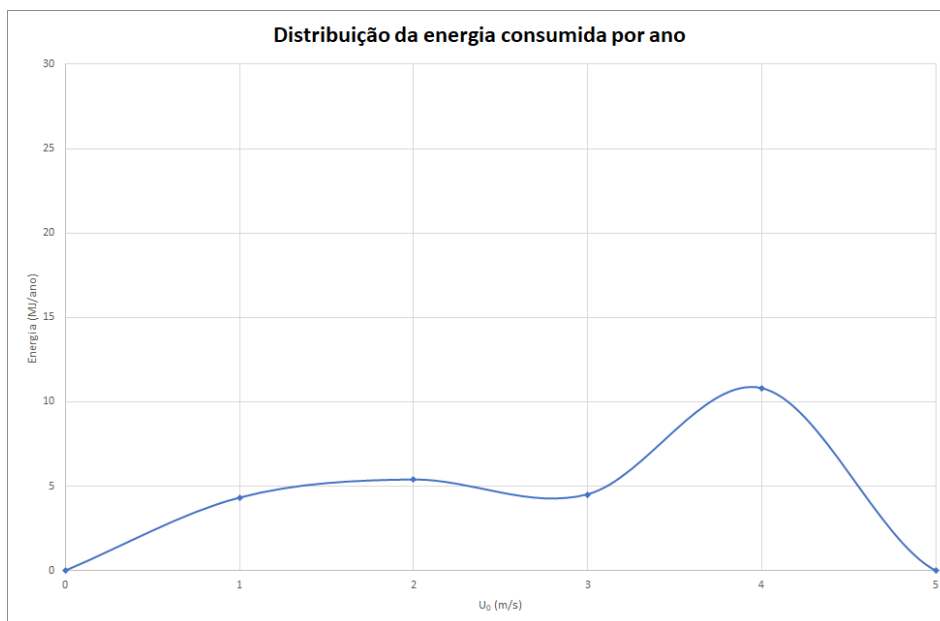


Figura 4.48- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé  $0,5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora no sentido negativo da velocidade do vento

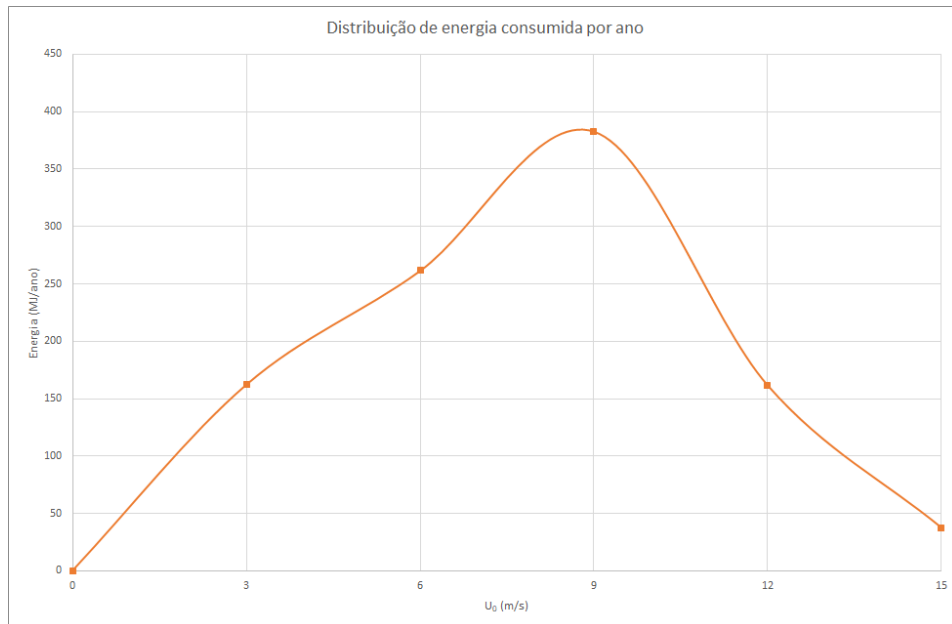
Novamente, para um melhor acesso aos valores energéticos deste caso, elabora-se um gráfico mais detalhado. A partir deste gráfico é notório que neste sentido do vento a necessidade de ventilador abrange uma maior gama de velocidades, no entanto, os valores máximos de energia gasta são inferiores.



*Figura 4.49- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé  $0,5 \text{ m}^2$  e 1 renovação por hora no sentido negativo da velocidade do vento (vista detalhada)*

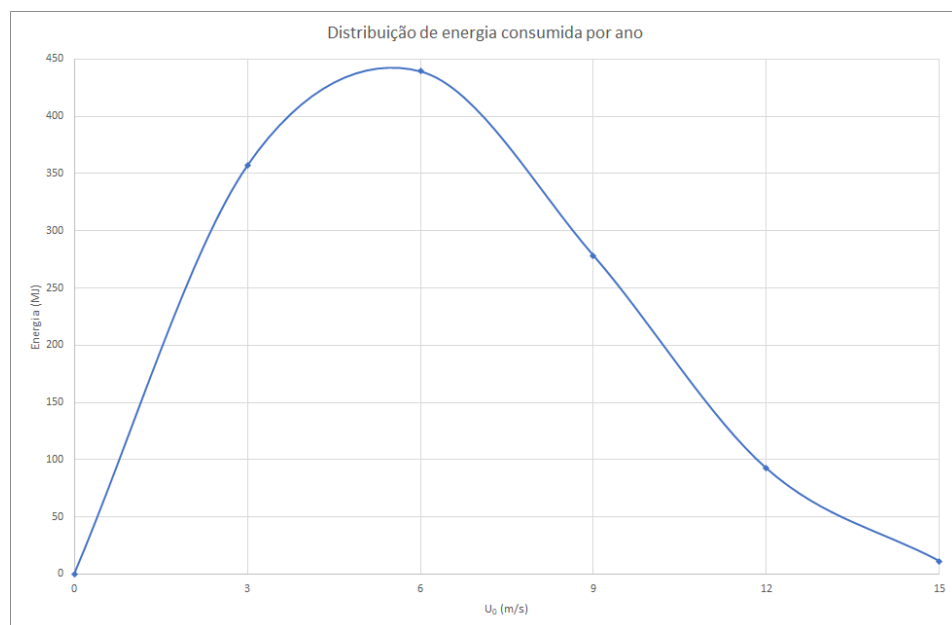
Este caso mostra que a introdução do ventilador vai levar a um gasto energético, mas devido ao facto de a utilização do mesmo ser efetuada numa gama de velocidades do vento reduzidas e com necessidade de pouca potência do ventilador, o valor energético despendido não é muito elevado.

Ao aumentar o número de renovações mínimas para 5, com a mesma chaminé, os valores energéticos aumentam, uma vez que será necessário a utilização de um ventilador para todas as gamas de velocidade do vento. O elevado número de renovações necessárias, em relação ao tamanho da chaminé, faz com que o ventilador funcione a um regime de alta velocidade de rotação, levando a que a potência despendida seja elevada. Consequentemente, os valores energéticos serão bastante elevados. O próximo gráfico representa a distribuição de energia que será consumida em um ano, sendo este para o sentido positivo da velocidade do vento.



*Figura 4.50- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido positivo da velocidade do vento*

No sentido negativo da velocidade do vento obtém-se valores da mesma ordem de grandeza, onde se podem considerar os valores energéticos como sendo elevados.



*Figura 4.51- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 0,5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido negativo da velocidade do vento*

É notório que para ambas direções a energia consumida decresce abruptamente quando a velocidade do vento atinge valores mais elevados, devendo-se ao facto de nesta gama de

velocidades a probabilidade de ocorrência das mesmas ser bastante reduzida, tal como mostra o gráfico da distribuição de Weibull.

No terceiro caso em que se aumenta a chaminé para  $5 \text{ m}^2$  e com renovação mínima igual a 1, não existe gasto energético pois não é requisitada a utilização de um ventilador. A área da chaminé tem uma dimensão que permite um escoamento de ar muito superior ao necessário, garantido que a ventilação natural cumpre com os requisitos impostos em termos do número mínimo de renovações de ar por hora no interior do edifício.

Por fim, analisa-se o resultado do caso que tem chaminé de  $5 \text{ m}^2$  com 5 renovações por hora como taxa mínima. Neste caso a gama em que existe necessidade de um ventilador volta a ser bastante reduzida, levando a que a energia gasta também seja menor em comparação com o caso em que o ventilador está em constante funcionamento. No sentido positivo da velocidade do vento temos o seguinte gráfico, onde se pode observar a pequena gama de velocidades do vento em que se consome energia.

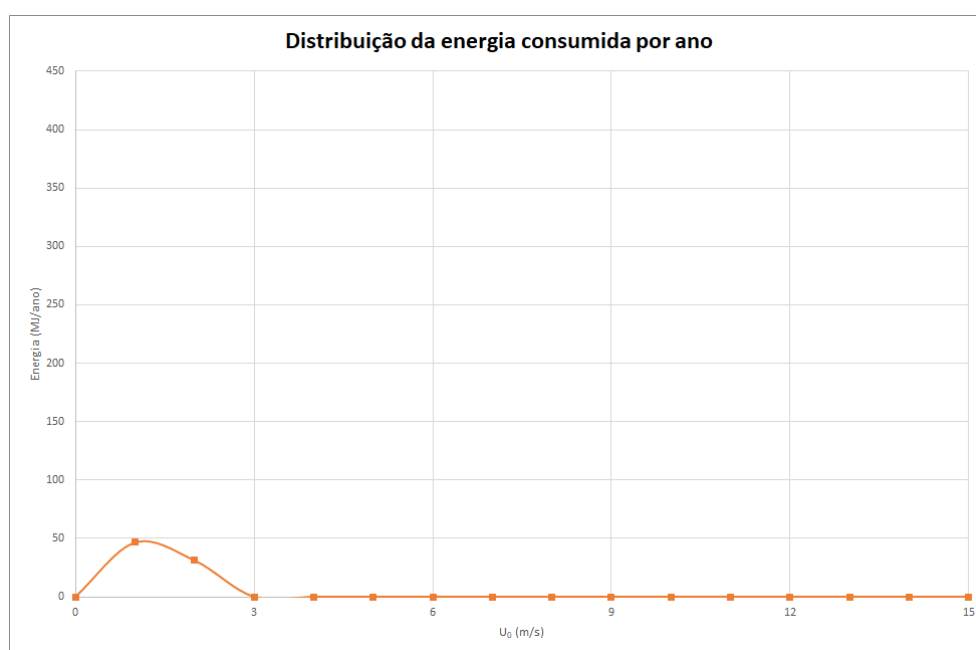


Figura 4.52- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé  $5 \text{ m}^2$  e 5 renovações por hora no sentido positivo da velocidade do vento

Com um gráfico mais detalhado torna-se possível ver a evolução do gasto energético, consoante as velocidades do vento, seguindo um padrão expectável de acordo com a distribuição de Weibull.

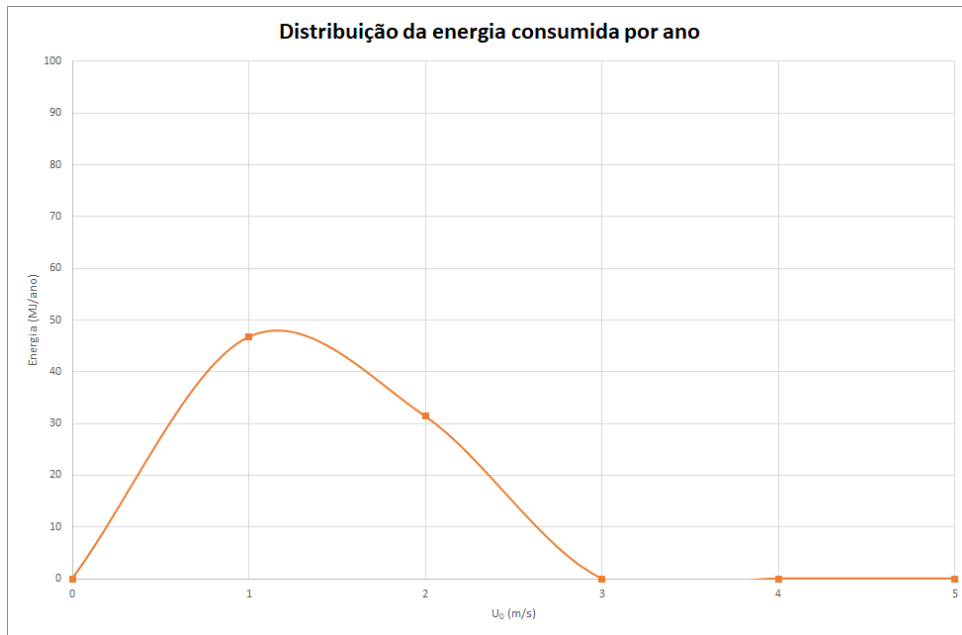


Figura 4.53- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé  $5 \text{ m}^2$  e 5 renovações por hora no sentido positivo da velocidade do vento (vista detalhada)

Para o vento proveniente do sentido negativo, apresenta-se o seguinte gráfico que segue um padrão bastante parecido com o que se observa no sentido positivo. No entanto os valores de energia despendidos são quase duplicados neste caso.

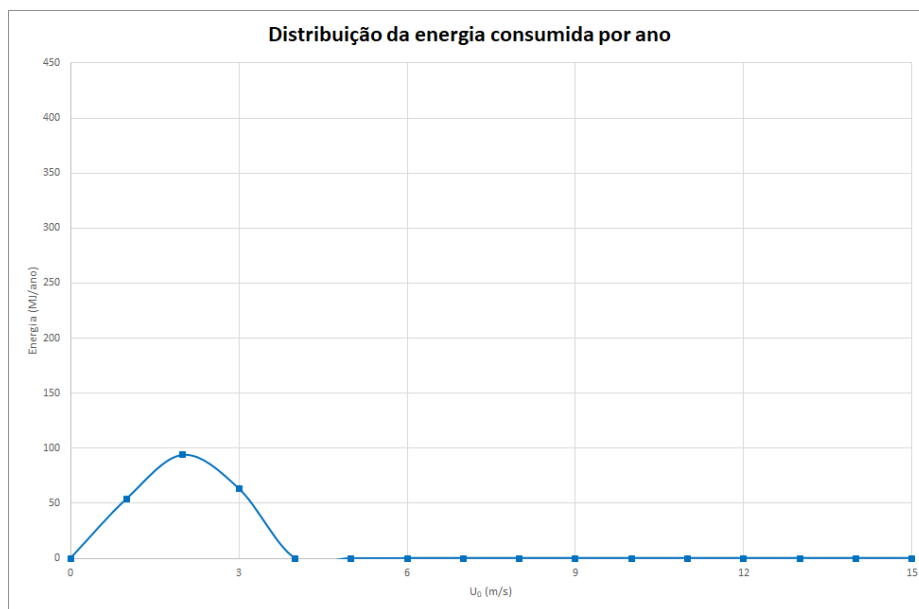
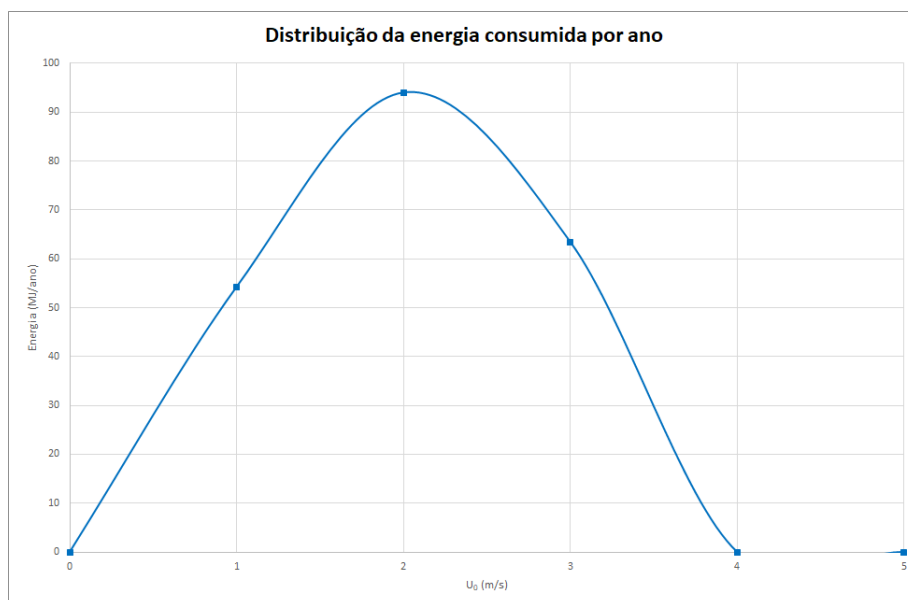


Figura 4.54- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé  $5 \text{ m}^2$  e 5 renovações por hora no sentido negativo da velocidade do vento

Como se pode reparar no gráfico seguinte, que apresenta mais precisão, a evolução dos valores energéticos está bastante alinhada com o previsto pela distribuição de Weibull. Este facto prova que a probabilidade de ocorrência de vento vai influenciar diretamente no consumo energético associado à ventilação.



*Figura 4.55- Distribuição da energia consumida por ano para chaminé 5 m<sup>2</sup> e 5 renovações por hora no sentido negativo da velocidade do vento (vista detalhada)*

Como se pode observar, partindo do edifício com a geometria considerada, apesar das variações de dimensão da chaminé e das taxas de renovações propostas, o comportamento esperado mantém-se em vários casos. Isto indica que, consoante as necessidades criadas pelas atividades, ou limitações associadas às dimensões, é possível ajustar as características e esperar um resultado semelhante.

É importante referir que a geometria escolhida para o edifício do caso de estudo favorece a análise pretendida. No entanto, um caso real não seria tão simplificado, sendo necessário ter conta a existência de outras perdas de carga, outras aberturas como janelas e portas, para além de se considerar o interior do edifício sem componentes que possam bloquear o limitar a livre circulação do ar.



## 5 Conclusões

O ambiente que se vive nos dias de hoje impulsiona um pensamento mais crítico acerca do consumo energético, sendo que se pretende que este seja o mais sustentável possível. Com isto, este estudo vem com intuito de analisar a possibilidade de manter esta linha de pensamento no que trata à ventilação de um edifício. Esta ventilação, dependendo maioritariamente do vento que incide nas fachadas do edifício, é vista como uma forma eficiente de poupança de energia. No entanto, para que fosse possível atingir o objetivo proposto, no estudo presente analisou-se um caso que se assemelha com uma situação real, a qual qualquer edifício poderia estar exposto. Os resultados do estudo provam a importância da geometria do edifício para otimizar a ventilação, onde as geometrias menos adequadas demonstram grande dificuldade em escoar o ar do interior do edifício para o seu exterior, levando posteriormente a necessidade de auxílio para que tal seja possível e, por conseguinte, gasto energético.

Uma das limitações que foi adicionada ao estudo e teve grande importância foi a necessidade de garantir que a circulação do ar no edifício fosse sempre no mesmo sentido, independentemente do sentido do vento no exterior do edifício. Tal limitação causou questões adicionais, levando à introdução de uma chaminé, de forma a garantir o efeito desejado. A introdução da mesma fez com que o escoamento no interior do edifício ocorresse sempre no sentido desejado, provando ser um elemento de grande importância para este estudo. Esta chaminé foi também determinante para definir o potencial energético do edifício, uma vez que alterações na sua dimensão tiveram um impacto na ventilação. Observando-se que quanto maior a chaminé, maior a quantidade de ar que se escoar no edifício, sendo assim a ventilação mais eficaz, diminuindo a necessidade de uso de ventiladores.

Tendo em conta o número mínimo de renovações de ar por hora dentro do edifício, sendo este um valor de referência dependente das atividades que decorrem no interior do edifício, foi necessário adicionar componentes ao caso estudo. Estes componentes incluem a introdução de um ventilador para aumentar a velocidade com que o ar do edifício é renovado, quando esta se encontra abaixo do valor mínimo necessário, e o outro ajuste é a inclusão de um obturador que reduz a dimensão da chaminé, com o objetivo de reduzir a taxa de renovação do ar quando esta é superior ao necessário. Estes fatores, ajudam a manter a estabilidade da ventilação no interior do edifício, garantindo assim que as atividades que ocorram no seu interior não sofram com as alterações do ambiente exterior.

Ao analisar os resultados dos vários estudos, pode concluir-se que a ventilação natural garante aproveitamento energético para a geometria em questão, sendo que a energia que será poupada varia consoante os requisitos da atividade a ser escolhida, quanto maior for a área de

entrada da chaminé mais rapidamente será renovado o ar no interior do edifício, garantindo assim maior poupança energética.

O programa utilizado é uma ferramenta indispensável para este estudo. Contudo, este não resolve o problema, servindo apenas para definir algumas das variáveis necessárias para a resolução do problema partindo das geometrias consideradas, posicionamento das aberturas e outros elementos de ventilação. Este faz com que se possam testar configurações diferentes do edifício, variando diferentes parâmetros, dando a capacidade de obter informações fundamentais para que se possam resolver e obter os resultados.

Por fim, é importante salientar que os resultados obtidos indicam que em edifícios com condições semelhantes, o aumento do número mínimo de renovações de ar no interior pode levar à necessidade de inclusão de um ventilador para auxiliar a ventilação, provocando gasto energético, ou no caso de já funcionar com um ventilador, leva a um aumento da potência gasta no ventilador para que funcione com uma velocidade de rotação mais alta, permitindo garantir o número de renovações de ar requerido.

## Bibliografia

- Charisi, Stergiani, Thomas K. Thiis, e Tormod Aurelien. *Full-Scale Measurements of Wind-Pressure Coefficients in Twin Medium-Rise Buildings*. Faculty of Science and Technology, Norwegian University of Life Sciences, 2019.
- Costa, P. A. S. *Atlas do potencial eólico para Portugal continental*. Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2004.
- Delgado, J. F. A. D., A. R. J. Borges, e J. M. P. Conde. “Wind action and temperature difference effects on a ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney.” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 65, 1996: 371-381.
- “DL nº 79/2006.” *Decreto-Lei nº 79/2006* (Diário da República - I Série-A), Abril 2006.
- dos Santos, Carlos A. Pina, e Luís Matias. *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- Ghiaus, Cristian, e Francis Allard. *Natural Ventilation in the Urban Environment*. London, New York: Earthscan, 2005.
- Gil, L., e S. B. Araújo. “Apontamentos de Máquinas Hidráulicas.” Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- Han, Dong-Hun, et al. “Experimental study on thermal buoyancy-induced natural ventilation.” Em *Energy & Buildings*. Elsevier, 2018.
- Kleiven, Tommy. *Natural Ventilation in Buildings: Architectural concepts, consequences and possibilities*. Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- Moghaddam, E. Hamzanlui, S. Amindeldar, e A. Bersharatizadeh. “New approach to natural ventilation in public buildings inspired by iranian's traditional windcatcher.” *2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities*. Procedia Engineering, 2011.

“NP EN 1991 - 1-4.” *Norma Portuguesa para Acções em estruturas parte 1-4: Acções gerais: Acções do vento* (Instituto Português da Qualidade), 2010.

Saraiva, J. A. G., J. F. A. D. Delgado, e A. R. J. Borges. *Pavilhões Industriais: Solicitações, Interferência e Ventilação Natural*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985.

Siew, C. C., A. I. Che-Ani, N. M. Tawil, N. A. G. Abdullah, e M. Mohd-Tahir. “Classification of Natural Ventilation Strategies in Optimizing Energy Consumption in Malaysian Office Buildings.” *The 2nd International Building Control Conference 2011*. Procedia Engineering, 2011.

Teixeira, João Filipe Barreto Neves Lopes. *Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2009.

Vaz, D. C. *Energia Eólica: notas do docente de TER-I/MERCEUS*. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2008.

Viegas, João Carlos. *Ventilação natural em edifícios de habitação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995.