

MÚSICA DEL CIELO OPRANDI PINTO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA VENTILAÇÃO NATURAL

APLICAÇÃO DE UM VENTILADOR COMO GERADOR
PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Fevereiro, 2022

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA VENTILAÇÃO NATURAL

APLICAÇÃO DE UM VENTILADOR COMO GERADOR
PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

MÚSICA DEL CIELO OPRANDI PINTO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias
Professor Associado, NOVA School of Science and Technology

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde
NOVA School of Science and Technology

Arguente: Prof. Doutor Diana Filipa da Conceição Vieira
NOVA School of Science and Technology

Vogal: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias
NOVA School of Science and Technology

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Fevereiro, 2022

Aproveitamento Energético da Ventilação Natural

Copyright © Música del Cielo Oprandi Pinto, 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.

À minha família e amigos...

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio de várias pessoas, às quais desejo agradecer:

Ao meu orientador, o Professor José Fernando de Almeida Dias, pela sua paciência, disponibilidade e atenção, que foi imprescindível no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, nomeadamente, a minha mãe, o meu irmão e a minha irmã, que demonstraram apoio, força, carinho e compreensão incondicionais.

Um especial agradecimento à Ana Matos, ao Edgar Farinha, ao João Pinto e à Mariana Fernandes, amigos que tanto me acompanharam ao longo do curso e que estiveram particularmente presentes nesta última e complicada etapa.

A todos os meus amigos e colegas que fizeram parte do meu percurso académico.

“The only constant is change.” (Heraclitus)

RESUMO

A dependência dos edifícios de sistemas de condicionamento do ar, AVAC, tem uma contribuição bastante significativa no consumo de energia. Segundo Allard e Ghiaus, [1], a nível europeu, o consumo total de eletricidade provocado por este setor está próximo dos 30 por cento do valor total. O que mostra a importância em encontrar opções que consigam reduzir estes níveis de consumo. Uma forma de contribuir para tal é implementando projetos que promovam a ventilação natural nos espaços interiores, a qual possui uma vasta potencialidade e, por essa razão, o foco desta dissertação é a exploração da mesma. A ideia base é tentar utilizar o ventilador, já implementado num determinado edifício, como gerador, de forma a produzir energia elétrica nos momentos em que a intensidade do vento é suficiente para garantir o número de renovações do ar por hora exigido para o espaço.

Após o estudo numérico da aplicação do ventilador para aproveitamento energético foi concluído que para um gasto energético anual de 76,20 Wh obtém-se um benefício de 14505,10 Wh, cuja combinação resulta num aproveitamento energético de 14428,90 Wh, representando uma poupança bastante significativa de energia elétrica no espaço, mais precisamente, 18935,56 %. Esta está também associada à diminuição de eventuais emissões de CO₂ equivalente provenientes da produção de eletricidade.

Palavras-chave: Aproveitamento energético, Ventilação natural, Ventilador, Vento.

ABSTRACT

Buildings' dependence on air conditioning systems, HVAC, has a very significant contribution to energy consumption. According to Allard and Ghiaus, [1], at European level, the total electricity consumption caused by this sector is close to 30 percent of the total value. This shows the importance of finding options that can reduce these levels of consumption. One way to contribute to this is by implementing projects that promote natural ventilation in indoor spaces, which has a vast potential, being therefore the main focus of the work presented in this dissertation. The base idea is to try to use the ventilator already placed in a certain building as a generator, in order to produce electricity when the wind intensity is enough to guarantee the number of air changes per hour required for the room.

After the numeric study of the application of the fan for energy use, it was concluded that for an annual energy expenditure of 76.20 Wh, a benefit of 14505.10 Wh is obtained, whose combination results in an energy recovery of 14428.90 Wh, representing a significant amount of electrical energy savings inside the building, precisely 18935,56 %. This is also associated with the reduction of possible CO₂ equivalent emissions from electricity production.

Keywords: Energy use, Natural ventilation, Ventilator, Wind.

ÍNDICE

Índice de Figuras	xix
Siglas	xxi
Símbolos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e objetivos	1
1.2 Metodologia e procedimento	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Ventilação	5
2.1 Ventilação natural - o seu papel e no que consiste	5
2.2 O que origina a ventilação natural	5
2.3 Estratégias mais comuns para dinamizar a ventilação natural	6
2.3.1 Exemplo de um edifício projetado de forma a aproveitar as diferen- tes estratégias	7
2.4 Condicionantes à ventilação natural	8
2.4.1 Camada limite	9
2.4.2 Coeficiente de pressão	9
2.5 Ventilação mecânica	10
3 Modelo analítico simplificado para a ventilação natural	11
3.1 O programa	11
3.2 Fundamentação teórica	11
3.2.1 Pressão causada pelo vento	12
3.2.2 Impulsão térmica	12
3.2.3 Equação da continuidade	12
3.2.4 Equação da quantidade de movimento	12
3.2.5 Equação da energia	13

3.2.6	Equação dos gases perfeitos	13
3.3	Equação da chaminé	13
4	Modelação do ventilador inverso	17
4.1	Curva caraterística do ventilador	17
4.2	Curva caraterística do ventilador inverso	19
4.3	Implementação da curva caraterística do ventilador inverso no programa	24
5	Casos de estudo e resultados	27
5.1	Caso 1: paredes adiabáticas - com e sem geração de calor	27
5.2	Descrição da geometria do espaço em estudo	30
5.3	Condições no interior do espaço em estudo	32
5.4	Caso 2 - ventilação natural (sem ação do ventilador)	32
5.5	Caso 3 - aplicação do ventilador a funcionar continuamente	33
5.6	Caso 4 - aplicação do ventilador para garantir o número mínimo de reno- vações do ar por hora	35
5.7	Caso 5 - aplicação do ventilador no modo inverso para aproveitamento energético	37
5.8	Aproveitamento energético	39
5.9	Resultados	42
6	Conclusões	47
6.1	Conclusão	47
6.2	Trabalhos futuros	48
	Bibliografia	51
	Anexos	
I	Anexo 1 - Incorporação das condições no código <i>NONLIN</i>	53

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Exemplos de ventilação cruzada [5]	6
2.2	Efeito chaminé [5]	7
2.3	Queen's Building [1]	7
2.4	Exemplos de coletores solares [1, 4]	8
2.5	Perfil de velocidades do vento em diferentes zonas [3]	9
2.6	Variação do sinal do coeficiente de pressão, [3]	10
3.1	Curva caraterística da chaminé cilíndrica, [7]	14
4.1	Curvas caraterísticas do ventilador “VENT EF 314/I 9A/A”, [10]	17
4.2	Curva caraterística resultante - velocidade de rotação = 4750 rpm	18
4.3	Efeito da variação da velocidade de rotação na curva caraterística do ventilador	19
4.4	Comportamento típico das curvas caraterísticas da bomba a funcionar em modo bomba e em modo turbina, [12]	21
4.5	Comportamento típico das curvas caraterísticas totais da bomba para uma velocidade de rotação constante, [12]	22
4.6	Curva caraterística do ventilador inverso - velocidade de rotação = 4750 rpm	23
4.7	Efeito da variação da velocidade de rotação na curva caraterística do ventilador inverso	24
4.8	Curvas caraterísticas do ventilador e do ventilador inverso – velocidade de rotação = 4750 rpm	24
4.9	Representação do edifício exemplo	25
5.1	Representação do edifício do Caso 1 e dimensões (em metros)	27
5.2	Velocidade do ar na abertura de entrada, v_1 , em função da velocidade do vento, U_0	28
5.3	Variação da pressão no espaço, ΔP , em função da velocidade do vento, U_0	28
5.4	Variação da massa volúmica no espaço, $\Delta \rho$, em função da velocidade do vento, U_0	29
5.5	Variação da temperatura no espaço, ΔT , em função da velocidade do vento, U_0	29

5.6	Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0	30
5.7	Variação do coeficiente de pressão, ΔC_p , em função da velocidade do vento, U_0	30
5.8	Representação do edifício em estudo e dimensões (em metros)	31
5.9	Representação do edifício e do perfil de velocidade do vento	31
5.10	Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 - ventilação natural	33
5.11	Velocidade do ar na abertura de entrada, v_1 , em função da velocidade do vento, U_0 - ventilador contínuo	34
5.12	Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 - ventilador contínuo	34
5.13	Velocidade do ar na abertura de entrada, v_1 , em função da velocidade do vento, U_0 - ventilador contínuo	35
5.14	Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 - ventilador contínuo	35
5.15	Velocidade de rotação do ventilador, ω , em função da velocidade do vento, U_0 , de modo a garantir 1 NRPH – ventilador convencional	36
5.16	Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional	37
5.17	Velocidade do ar na abertura do ventilador, v_3 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional	37
5.18	Velocidade de rotação do ventilador, ω , em função da velocidade do vento, U_0 , de modo a garantir 1 NRPH – ventilador convencional e ventilador inverso	38
5.19	Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso	39
5.20	Velocidade do ar na abertura do ventilador, v_3 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso	39
5.21	Mapas médios simulados dos fatores de escala da distribuição de Weibull – 10m, [17]	41
5.22	Distribuição de Weibull da zona de Lisboa – 10m	42
5.23	Variação da pressão no espaço 2, ΔP_2 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso	42
5.24	Variação da pressão no espaço 3, ΔP_3 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso	43
5.25	Potência, P_{ot} , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso	43
5.26	Gastos energéticos anuais VS Ganhos energéticos anuais	44
I.1	Incorporação das condições do ventilador no código <i>NONLIN</i>	53
I.2	Incorporação das condições do ventilador inverso no código <i>NONLIN</i>	54

SIGLAS

AVAC aquecimento, ventilação e ar condicionado

bep *best efficiency point*

CFD *computational fluid dynamics*

CL camada limite

CO₂ dióxido de carbono

C_p coeficiente de pressão

C_{p_k} coeficiente de pressão na abertura k

HVAC *heating, ventilation and air conditioning*

Na(i) número de aberturas no espaço interno i

NESP número total de espaços internos

NRPH número de renovações por hora

PAT *pump as turbine*

RSECE Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios

SÍMBOLOS

A	área [m ²]
A_k	área da abertura k [m ²]
B	braço [m]
B_k	pressão originada pela impulsão térmica na abertura k [Pa]
c	fator de escala [m/s]
cp_0	calor específico do ar [J/kg.K]
D	diâmetro [m]
ΔCp	variação do coeficiente de pressão
ΔP	variação da pressão [Pa]
ΔP_2	variação da pressão no espaço 2 [Pa]
ΔP_3	variação da pressão no espaço 3 [Pa]
$\Delta \rho$	variação da massa volúmica [kg/m ³]
ΔT	variação da temperatura [K]
$\Delta \rho_i$	variação da massa volúmica no espaço i [kg/m ³]
f	frequência de funcionamento [Hz]
F	força [N]
g	aceleração gravítica [m/s ²]
H	altura (pressão) [m]
H_k	diferença entre a cota média de referência e a cota média da abertura k [m]
h_p	coeficiente global de transmissão de calor [W/m ² .K]
k	fator de forma

SÍMBOLOS

k_i	número de aberturas no espaço interno i
l_i	número de paredes no espaço interno i
N	número total de incógnitas do problema
ω	velocidade de rotação [rpm]
ρ	massa volúmica [kg/m ³]
P	pressão [Pa]
P^*	probabilidade de ocorrência de determinada velocidade do vento
ρ_0	massa volúmica do ar exterior [kg/m ³]
P_i	pressão no interior do espaço i [Pa]
P_k	pressão causada pelo vento no exterior da abertura k [Pa]
P_{ot}	potência [W]
$\dot{Q}_i$	calor gerado no espaço interno i [W]
Q_v	caudal volúmico [m ³ /s]
η	rendimento
T_0	temperatura do ar exterior [K]
T_i	temperatura no interior do espaço i [K]
T_i^*	temperatura no interior do espaço em comunicação com o espaço interno i através da abertura k [K]
U_0	velocidade média do vento [m/s]
U_i	velocidade média no espaço i [m/s]
U_k	velocidade média na abertura k [m/s]
v	velocidade do escoamento [m/s]
v_1	velocidade do ar na abertura de entrada [m/s]
v_3	velocidade do ar na abertura 3 [m/s]
ξ	coeficiente de perda de carga
ξ_k	coeficiente de perda de carga da abertura k

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e objetivos

Os edifícios são um dos maiores setores consumidores de energia. Na Europa, aproximadamente 30 por cento da energia é consumida em edifícios, sendo uma grande quantidade utilizada para aquecimento, [1]. Com isto, é possível concluir que o paradigma climático atual é preocupante e uma questão de carácter global e urgente, tornando-se, assim, clara a necessidade em encontrar soluções para este crescente problema.

A gestão e eficiência de energia apresenta-se como a forma mais barata e direta de abordar as emissões de gases com efeito de estufa a curto prazo. A utilização de tecnologias ou sistemas mais eficientes pode contribuir de forma significativa para a redução do consumo excessivo de recursos naturais, [1]. A ventilação natural é um desses sistemas e os seus benefícios são cada vez mais reconhecidos e procurados, [2]. Algumas das vantagens associadas a este tipo de ventilação são, [3]:

- Menor consumo energético;
- Menos necessidade de dispositivos mecânicos para realizar a ventilação;
- Menores custos de manutenção;
- Maior longevidade e;
- Solução mais económica.

No entanto, também apresenta desvantagens, como, [3]:

- Dependência de fatores climáticos e da envolvente;
- Dificil controlo do ambiente interior e;
- Impossibilidade de filtrar e tratar o ar que circula no edifício.

Tendo em conta os pontos referidos, pretende-se aproveitar a ventilação natural para produzir energia elétrica, o qual é conseguido através da utilização do ventilador existente no edifício, devido ao sistema de ventilação AVAC, como gerador elétrico. Para tal,

é necessário garantir que a taxa mínima de renovações do ar do espaço é assegurada. Esta ideia surge da observação de sistemas aplicados em algumas centrais hidroelétricas, nos quais se utilizam bombas de modo inverso, ou seja, como turbina. Desta forma, é possível produzir energia elétrica nos momentos em que não é necessário realizar a bombagem da água para montante. Este estudo é abordado de forma análoga a estes sistemas, visto que não foi possível encontrar literatura específica para o caso pretendido - com a implementação de um ventilador.

A execução do mecanismo para produção de energia elétrica não é possível para qualquer intensidade do vento, visto que para valores de velocidade reduzidos, próximos de 0 m/s, é mais difícil conseguir garantir a taxa mínima de renovação do ar. Consequentemente, torna-se necessário forçar a ventilação com o auxílio do ventilador. A uma dada velocidade, a intensidade do vento é suficiente para assegurar o número de renovações mínimo exigido pelo espaço e, a partir dessa intensidade, é possível analisar a potencialidade da energia da passagem do ar na abertura para aproveitamento energético. Esta situação é o foco do estudo desta dissertação e é retratada no Capítulo 5.

1.2 Metodologia e procedimento

Para realizar o estudo do comportamento no interior dos espaços tem-se duas alternativas, a simulação numérica utilizando um programa CFD (*computational fluid dynamics*) ou a aplicação de um modelo simplificado.

O primeiro resolve as equações de Navier-Stokes. Para tal, requer a utilização de métodos de discretização como, por exemplo, o método dos volumes finitos. Trata-se de um processo demorado e exigente do ponto de vista computacional. O modelo simplificado é mais prático, obtendo os resultados com facilidade e rapidez. Trata-se de um modelo numérico que executa as equações relativas à continuidade, quantidade de movimento e energia. Este recorre a resultados experimentais como, por exemplo, o coeficiente de pressão, as características das aberturas (coeficiente de perda de carga) e o efeito do vento, permitindo a obtenção das variáveis mais relevantes para a análise que se pretende realizar no interior do espaço, como é o caso do número de renovações do ar por hora, do valor da velocidade do ar nas aberturas, das variações de pressão, massa volúmica e temperatura, entre outros. Este modelo impõe algumas simplificações, desprezando, desta forma, determinados fenómenos que ocorrem ao escoamento. Não obstante, é uma aproximação válida. A simplicidade deste modelo torna-o mais vantajoso, o que contribuiu para a sua escolha.

O procedimento adotado neste estudo para a análise do aproveitamento energético inicia-se na descrição da geometria do espaço e das condições no seu interior. Depois, realiza-se a escolha de um ventilador apropriado para o edifício, seguida pela definição e simplificação da curva característica do ventilador e da modelação da mesma, de forma a possibilitar a determinação da curva para diferentes velocidades de rotação do ventilador. Partindo da curva característica obtida encontra-se a curva associada ao ventilador inverso

e, da mesma forma, define-se a expressão para velocidades de rotação do ventilador variáveis. Com estes resultados é possível estabelecer as condições que serão implementadas no código do programa utilizado para representar o comportamento do escoamento e os principais parâmetros ligados à ventilação natural no interior da divisão. Encontram-se, assim, reunidas as condições necessárias à realização das simulações simplificadas para estudar o caso pretendido, restando, apenas, a análise dos resultados dos gastos e dos ganhos energéticos do edifício.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo que se segue são apresentados os tipos de ventilação, assim como as suas origens e condicionantes. O Capítulo 3 contém a fundamentação teórica do modelo analítico simplificado para a ventilação natural e no Capítulo 4 é realizada a modelação do ventilador inverso. Os casos de estudo, aproveitamento energético e resultados estão descritos no Capítulo 5. Finalmente, no Capítulo 6, é exposta a conclusão e os trabalhos futuros.

VENTILAÇÃO

2.1 Ventilação natural - o seu papel e no que consiste

Através da renovação do ar de um determinado espaço é possível garantir o conforto térmico e a qualidade do ar no seu interior. Existe um valor mínimo de renovações a assegurar, o qual depende principalmente de parâmetros exigidos à qualidade do ar (devido à oxigenação e à dissipação de contaminantes), do número de ocupantes e da atividade praticada na fração autónoma. O seu incumprimento pode levar à origem de maus odores, ao crescimento de bolor, ao aumento da humidade relativa, à acumulação de pó e outras partículas nocivas, ao desconforto térmico, entre outros. É, portanto, um fator determinante ao zelo pela saúde humana e ao conforto dos ocupantes, [1].

Desta forma, é necessário promover a deslocação do ar no interior do espaço, o qual pode ser conseguido a partir de ventilação mecânica – insuflação e extração do ar através de ventiladores –, ventilação natural – o princípio base desta dissertação –, ou, ainda, um sistema híbrido.

A ventilação natural dá-se devido à existência de diferenças de pressão entre as fachadas do edifício, promovidas pela ação do vento atmosférico. Estas diferenças levam à deslocação de massas de ar e são observadas entre os dois lados de uma qualquer abertura de um edifício, seja de que natureza for, [4].

2.2 O que origina a ventilação natural

Os principais fatores que originam a ventilação natural são:

- A ação do vento – a conversão da energia cinética em pressão quando o vento encontra um edifício leva ao aumento da pressão na zona frontal ao escoamento e uma diminuição do lado oposto, o que permite a condução do escoamento para o interior da edificação, [4];
- A diferença de temperatura – as variações de temperatura entre o exterior e o interior, ou dois espaços internos, podem promover ou bloquear o escoamento do ar,

devido à manifestação de um fenómeno denominado de impulsão térmica, cuja origem parte do facto do ar quente ser menos denso que o ar frio, o que leva à sua ascensão, [1, 3, 4].

A combinação correta destes dois efeitos permite um melhor aproveitamento da ventilação natural, [3].

2.3 Estratégias mais comuns para dinamizar a ventilação natural

As principais formas de realizar a ventilação natural, que dependem dos fatores que foram referidos no subcapítulo anterior, Subcapítulo 2.2, são a ventilação cruzada e o efeito chaminé.

A primeira deve-se à existência de aberturas em lados opostos do edifício que provocam diferenças de pressão, como foi explicado no Subcapítulo 2.2. A apropriada disposição relativa das aberturas, como a colocação a alturas diferentes, permite cobrir um volume maior, assim como a incorporação de divisões mais amplas e abertas. Para a fluidez do escoamento também é importante ter em conta formas e posições das aberturas que reduzam a perda de carga, [3].

As figuras que se seguem, Subfiguras 2.1(a) e 2.1(b), ilustram alguns exemplos do que foi descrito.

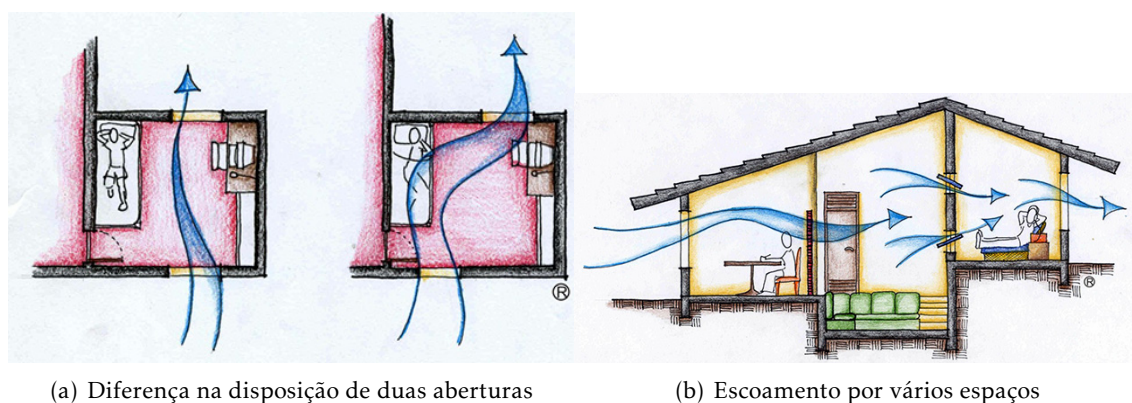


Figura 2.1: Exemplos de ventilação cruzada [5]

O efeito chaminé, que se observa na Figura 2.2, remete para o escoamento que resulta da ascensão do ar de temperatura superior (que o torna menos denso), como é explicado no Subcapítulo 2.2 pelo fenómeno da impulsão térmica. A presença de uma chaminé a uma cota superior à do edifício resulta em maiores variações de pressão e, consequentemente, uma maior taxa de ventilação, [3].

A conjugação dos dois tipos de engenho é determinante para um resultado mais eficaz, visto que se o vento dominante se der num determinado sentido, promovendo a ventilação

2.3. ESTRATÉGIAS MAIS COMUNS PARA DINAMIZAR A VENTILAÇÃO NATURAL

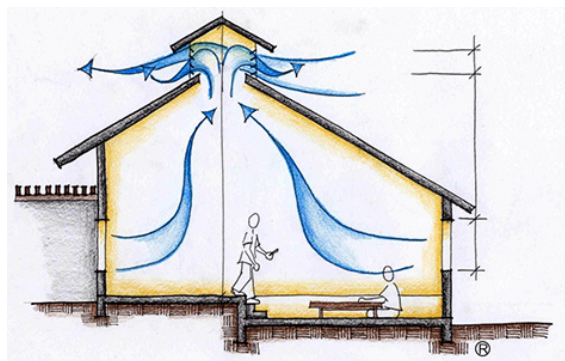


Figura 2.2: Efeito chaminé [5]

cruzada nesse mesmo sentido, mas o efeito chaminé foi projetado de forma a ventilar no sentido oposto, os dois fenômenos podem se anular para um certo valor de velocidade do vento. Este resultado não é o pretendido e, por esta razão, é recomendado que aberturas de entrada se encontrem em conformidade com a direção predominante do vento, como referido em Allard e Ghiaus. [1].

2.3.1 Exemplo de um edifício projetado de forma a aproveitar as diferentes estratégias

O Queen's Building, que se pode observar na Figura 2.3, pertencente à Universidade de De Montfort, situada em Leicester, Reino Unido, é um caso bem conseguido no que diz respeito ao aproveitamento eficaz da ventilação natural, influenciando uma primeira geração de construções ventiladas de forma natural, [1].

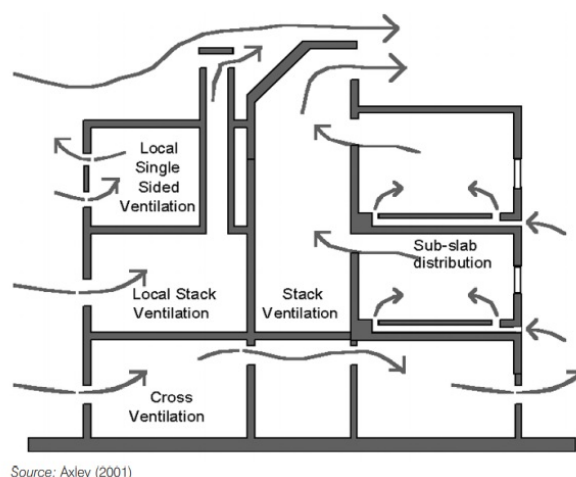


Figura 2.3: Queen's Building [1]

Devido à diminuição da intensidade do vento nas zonas urbanas por vezes torna-se difícil garantir a circulação do ar, o que provoca uma maior dependência no efeito térmico. Se a diferença de temperatura entre o ambiente interior e exterior não for suficiente é

possível induzir a ventilação através de um coletor solar, que se trata de uma zona que aproveita o calor que provém do Sol para aquecer parte do ar, por efeito de estufa, Allard e Ghiaus. [1].

As figuras seguintes exemplificam a aplicação deste tipo de método em paredes verticais, Subfigura 2.4(a), e em chaminés térmicas, Subfigura 2.4(b).

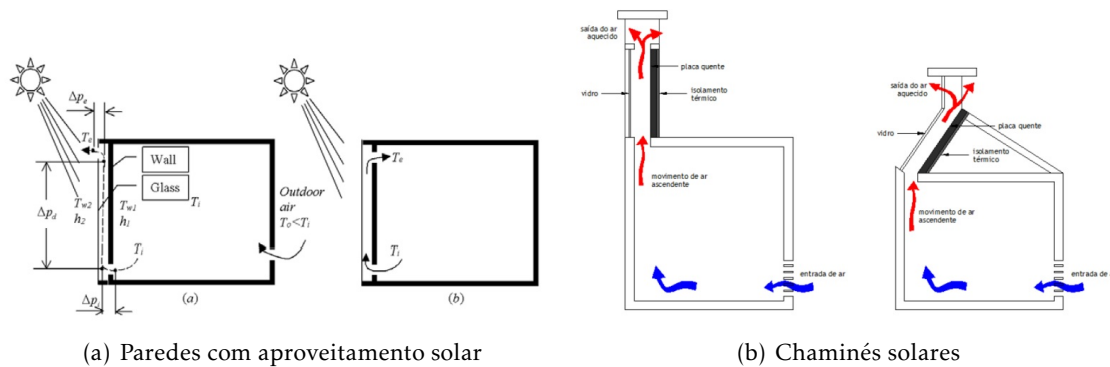


Figura 2.4: Exemplos de coletores solares [1, 4]

Para os casos em que não é possível garantir a taxa de renovação do ar mínima deve-se combinar a ventilação natural com a mecânica, por exemplo, através de um ventilador, [1]. Isto exige um estudo prévio para explorar a solução da forma mais eficiente possível.

2.4 Condicionantes à ventilação natural

É importante compreender que este tipo de ventilação depende fortemente das condições meteorológicas, o que o torna suscetível a variações, pondo em causa a garantia do número mínimo de renovações do ar por hora. Apesar disso, na maioria dos casos verifica-se o cumprimento dessa taxa, [4].

Por conseguinte, devem ser tidas em conta as seguintes variáveis que condicionam a ação do vento no edifício e, consequentemente, a ventilação natural, [4, 6]:

- A arquitetura do edifício;
- A dimensão, a forma e as propriedades dinâmicas (por outras palavras, a aerodinâmica) da estrutura;
- A direção de incidência do vento;
- A estação do ano e;
- As características da envolvente, ou seja, a rugosidade do terreno, a orografia da zona e a existência de obstáculos, como é o caso de construções vizinhas.

A velocidade média do vento é calculada tendo em conta estas variáveis e baseia-se em valores de referência cuja probabilidade anual de excedência é de 0,02, [6].

2.4.1 Camada limite

Para analisar com precisão as ações do vento é necessário entender que estas dependem do atrito que se verifica junto ao solo, o qual é estudado pela teoria da camada limite – zona da troposfera que está sujeita ao efeito provocado pelas características da superfície da Terra, [3]. A espessura (ou altura) é variável e acima desta tem-se a atmosfera livre (não perturbada), [3]. A Figura 2.5 representa uma ilustração da camada limite em diferentes locais.

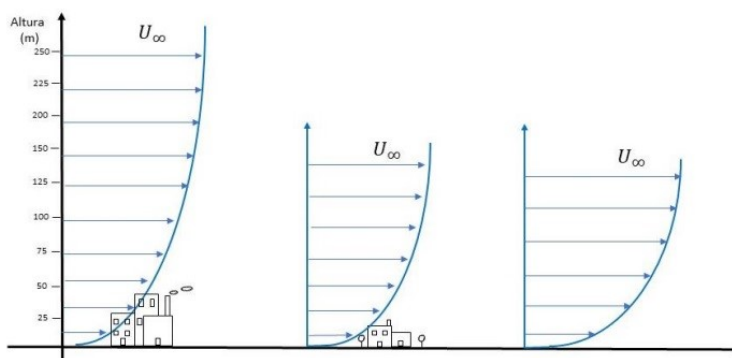


Figura 2.5: Perfil de velocidades do vento em diferentes zonas [3]

O perfil de velocidades da camada limite sofre influência de fatores como, [3, 4]:

- Velocidade média do vento acima da subcamada de rugosidade;
- Propriedades locais do solo;
- Montante do local;
- Fluxo de calor;
- Presença de nuvens e;
- Estado da CL nas últimas 6 a 8 horas.

2.4.2 Coeficiente de pressão

Como se viu no Capítulo 2.2, a pressão é uma variável fundamental à ventilação natural, por esta razão é importante compreender o que é o coeficiente de pressão, C_p . O coeficiente de pressão que é referido neste estudo resulta da combinação dos dois tipos de coeficiente de pressão, interior e exterior, e caracteriza o efeito provocado pelo vento num corpo, seja este o próprio edifício ou partes que o constituem, [6]. Trata-se de uma forma de medir a diferença de pressão e é obtido de forma experimental, geralmente, em túneis de vento, com o auxílio de um tubo de Pitot ou Prandtl, [3]. No lado de barlavento toma um valor positivo e a sotavento e restantes lados negativo, [3, 6], como se pode observar na Figura 2.6.

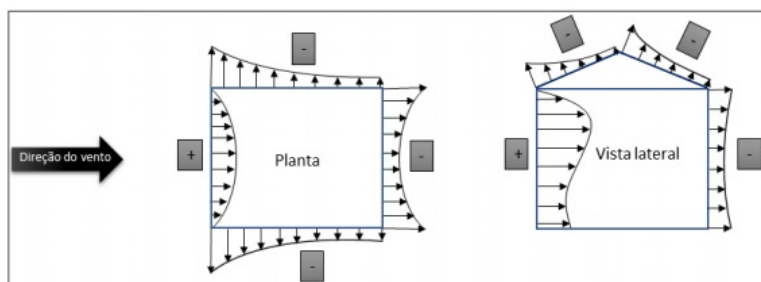


Figura 2.6: Variação do sinal do coeficiente de pressão, [3]

2.5 Ventilação mecânica

Como o espaço exige um determinado valor mínimo de renovações do ar por hora torna-se difícil depender apenas da ação da ventilação natural e, por essa razão, é necessário, em determinados instantes – quando a intensidade do vento não permite assegurar a taxa de renovação do ar –, o auxílio de um mecanismo que promova a ventilação no interior da divisão. A este fenómeno dá-se o nome de ventilação mecânica, [3], o qual permite satisfazer os requisitos do espaço forçando a movimentação do escoamento para insuflar ou extrair o ar da fração autónoma.

A aplicação de um ventilador é um exemplo de um mecanismo que permite alcançar o objetivo pretendido, sendo este o dispositivo adotado neste estudo para conseguir as condições exigidas pelo espaço.

MODELO ANALÍTICO SIMPLIFICADO PARA A VENTILAÇÃO NATURAL

3.1 O programa

O modelo analítico simplificado para a ventilação natural que se vai apresentar no subcapítulo seguinte, Subcapítulo 3.2, é a base do programa utilizado, *Vent3*, o qual foi escrito em linguagem Matlab. O código necessita de um ficheiro de dados, que descreve as características geométricas e térmicas do edifício, da sua interação com o vento atmosférico e das suas aberturas de ventilação, quer interiores quer exteriores, e após a realização dos cálculos cria um outro ficheiro com os resultados obtidos: a velocidade do ar em cada uma das aberturas de ventilação; a pressão, a massa volúmica e a temperatura em cada um dos espaços internos do edifício.

3.2 Fundamentação teórica

Neste subcapítulo são apresentadas as equações que governam a forma como a ventilação natural é promovida, segundo o modelo simplificado.

Para tal, é necessário considerar um edifício com n espaços internos ($i = 1, 2, \dots, n$), cada um dos quais possui k_i aberturas e l_i paredes, permitindo o contacto com o exterior ou entre os mesmos, [7]. No interior de cada espaço interno pode, ou não, existir geração de calor.

$$N = \sum_{i=1}^{NESP} (Na(i) + 3) \quad (3.1)$$

Como descrito na Equação 3.1, o número total de incógnitas do problema, N , depende do número total de espaços internos, $NESP$, e do número de aberturas no espaço interno i , $Na(i)$, [8].

Cada espaço interno i será descrito pelas seguintes variáveis: velocidade em cada uma das aberturas de ventilação, às quais se juntam mais três variáveis, a pressão, a massa volúmica e a temperatura do espaço interno.

3.2.1 Pressão causada pelo vento

A pressão causada pelo vento no exterior da abertura k , P_k [Pa], é descrita da seguinte forma, [7]:

$$P_k = C_p \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 \quad (3.2)$$

Na equação anterior, Equação 3.2, observa-se que a pressão referida é calculada através do coeficiente de pressão, C_p - cujo valor é obtido, geralmente, de forma experimental -, da massa volúmica, ρ_0 [kg/m³], e da velocidade média do vento, U_0 [m/s].

3.2.2 Impulsão térmica

Como foi explicado no Subcapítulo 2.2, se existir uma diferença de temperatura entre o espaço interior e o exterior (ou um espaço contíguo) dá-se o fenómeno da impulsão térmica, como descrito na Equação 3.3, [7].

$$B_k = -\Delta\rho_i H_k g \quad (3.3)$$

Esta parcela, B_k [Pa], é somada ao efeito causado pela variação de pressão e depende da variação da massa volúmica no interior do espaço, $\Delta\rho_i$ [kg/m³], da diferença de cotas médias das aberturas por onde se dá o escoamento, H_k [m], e da aceleração gravítica, g [m/s²].

3.2.3 Equação da continuidade

A equação da continuidade, Equação 3.4, para cada espaço interno é, [7]:

$$\sum_{k=1}^{m_i} U_k A_k = 0 \quad (3.4)$$

Donde U_k [m/s] remete para a velocidade média na abertura k e A_k [m²] é a área de passagem. É importante referir que quando o vento se desloca para o interior da fração autónoma U_k toma um valor positivo. Caso contrário, é negativo, [9].

3.2.4 Equação da quantidade de movimento

Esta expressão, Equação 3.5, resume-se à equação de Bernoulli e descreve a forma como a pressão se comporta, [9]. A primeira parcela refere-se à impulsão térmica, a segunda à variação de pressão e a última caracteriza as perdas de carga.

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) - \xi_k \frac{1}{2} \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (3.5)$$

É importante referir que o indicativo (*) identifica as variáveis pertencentes ao espaço em comunicação através da abertura k , que P_i [Pa] trata-se da pressão no interior do espaço i e ξ_k é o coeficiente de perda de carga.

Considera-se que a pressão é hidrostática, [9], e que, como a velocidade do ar nos espaços interiores é muito menor que na passagem pelas aberturas, estas são os únicos elementos que contribuem para a dissipação de energia, [7]. Por esta razão só se tem em conta a perda de carga nas aberturas.

3.2.5 Equação da energia

A equação da energia, Equação 3.6, tem em conta as contribuições do calor existente no interior do espaço, a convecção dada pelo movimento do vento e a transmissão de calor que se dá nas paredes e cobertura através da condução, [7].

$$\dot{Q}_i + \sum_{k=1}^{m_i} \rho_0 c p_0 U_k A_k T^+ + \sum_{p=1}^{l_i} h_p A_p (T_i - T_i^{**}) = 0 \quad (3.6)$$

Mais uma vez, o índice (*) remete para o espaço em comunicação com o espaço interno i, ligados através da abertura k, e (**) é referente ao espaço contíguo, novamente a i, mas com a parede como elemento associativo, [7].

$\dot{Q}_i$ [W] é o calor gerado no espaço interno i, cp_0 [J/kg.K] é o calor específico do ar e h_p [W/m².K] descreve o coeficiente global de transmissão de calor. A variável T^+ toma o valor de T_i quando $U_k < 0$ ou T_i^* caso $U_k > 0$.

Considera-se que a temperatura no interior de cada espaço é constante, [9].

3.2.6 Equação dos gases perfeitos

Finalmente, considera-se que o ar se comporta como um gás perfeito, desta forma, combinando a equação de estado com a hipótese de Boussinesq, obtém-se a Equação 3.7, [9]:

$$\frac{\Delta \rho_i}{\rho_0} + \frac{(T_i - T_0)}{T_0} = 0 \quad (3.7)$$

Nesta expressão, Equação 3.7, a variável T_0 diz respeito à temperatura no exterior [K].

As equações que foram apresentadas, Equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, caracterizam o modelo analítico simplificado para a ventilação natural. No entanto, além das janelas e portas, existem outros tipos de aberturas (caraterizadas por um coeficiente de perda de carga), como, por exemplo, chaminés e ventiladores.

3.3 Equação da chaminé

A implementação de uma chaminé promove o efeito de aspiração do ar na divisão, provocando, conseqüentemente, o aumento da taxa de ventilação, [7]. A chaminé cilíndrica é um método natural frequentemente aplicado na indústria e cujos resultados, descritos na curva caraterística da Figura 3.1, são testados através de um túnel de vento, [7].

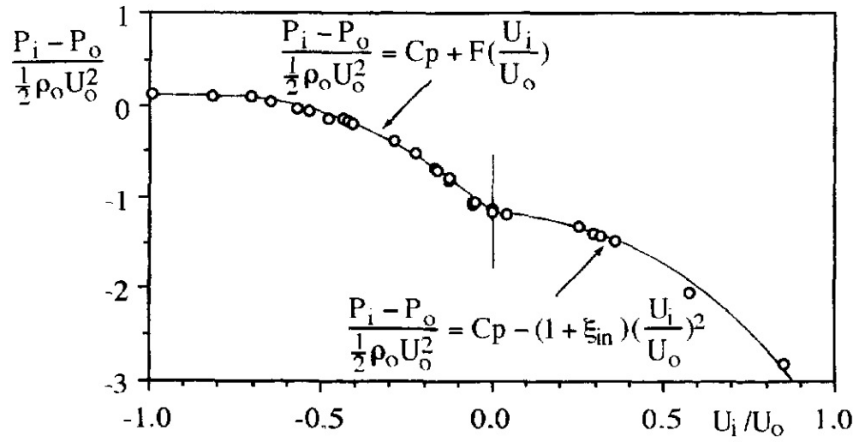


Figura 3.1: Curva característica da chaminé cilíndrica, [7]

É importante esclarecer que para:

- $U_i < 0$: o escoamento flui para fora da chaminé – da chaminé para o exterior;
- $U_i > 0$: o escoamento flui para o interior da chaminé – do exterior para a chaminé.

Considerando também a contribuição da impulsão térmica a equação da quantidade de movimento, segundo Dias Delgado, Janeiro Borges e Paixão Conde. [7] e Teixeira. [9], toma a forma descrita na expressão da Equação 3.8, quando o ar escoar para o interior da chaminé ($U_i/U_0 > 0$).

$$\Delta \rho_i H_k g - P_i + C_{P_k} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 - (1 + \xi_{in}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0 \quad (3.8)$$

Quando o escoamento se realiza no sentido contrário (para o exterior da chaminé), devido à ação do vento ($-1 \leq U_i/U_0 \leq 0$), obtém-se a Equação 3.9:

$$\Delta \rho_i H_k g - P_i + C_{P_k} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 + F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 = 0 \quad (3.9)$$

Onde as Equações 3.10 e 3.11 permitem calcular a variável $F\left(\frac{U_i}{U_0}\right)$.

$$F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) = -1,25 \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_i}{0,8 U_0}\right) \quad \text{se} \quad -0,8 \leq U_i/U_0 \leq 0 \quad (3.10)$$

$$F\left(\frac{U_i}{U_0}\right) = 1,25 \quad \text{se} \quad -1,0 \leq U_i/U_0 \leq -0,8 \quad (3.11)$$

A equação da quantidade de movimento assume uma última forma se o escoamento for extraído da chaminé com a influência de outros fatores além da ação do vento, como, por exemplo, o uso de um ventilador. Neste caso $U_i/U_0 < -1$ e a expressão é definida pela Equação 3.12.

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i - (1 - \xi_{out}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0 \quad (3.12)$$

Nas expressões anteriores tem-se que Cp_k toma o valor de -1,15 (coeficiente de pressão à saída da chaminé) quando, eventualmente, $U_i=0$ e os coeficientes de perda de carga à saída da chaminé são 0,8, se o ar escoar para o interior da chaminé, e 1,1, caso contrário.

Como referido, ainda existe o caso de aberturas com ventilador, mas, como o estudo desse caso contribui para o desenvolvimento do ventilador inverso - que é o foco desta dissertação -, optou-se por descrever essa situação no capítulo seguinte, Capítulo 4.

MODELAÇÃO DO VENTILADOR INVERSO

4.1 Curva caraterística do ventilador

De forma a permitir que a energia do vento seja utilizada para produzir eletricidade é necessário aplicar uma conversão no funcionamento de um ventilador. Para tal, considerou-se o ventilador “VENT EF 314/I 9A/A”, cuja curva de funcionamento se observa na Figura 4.1, obtida através do catálogo do ventilador, [10].

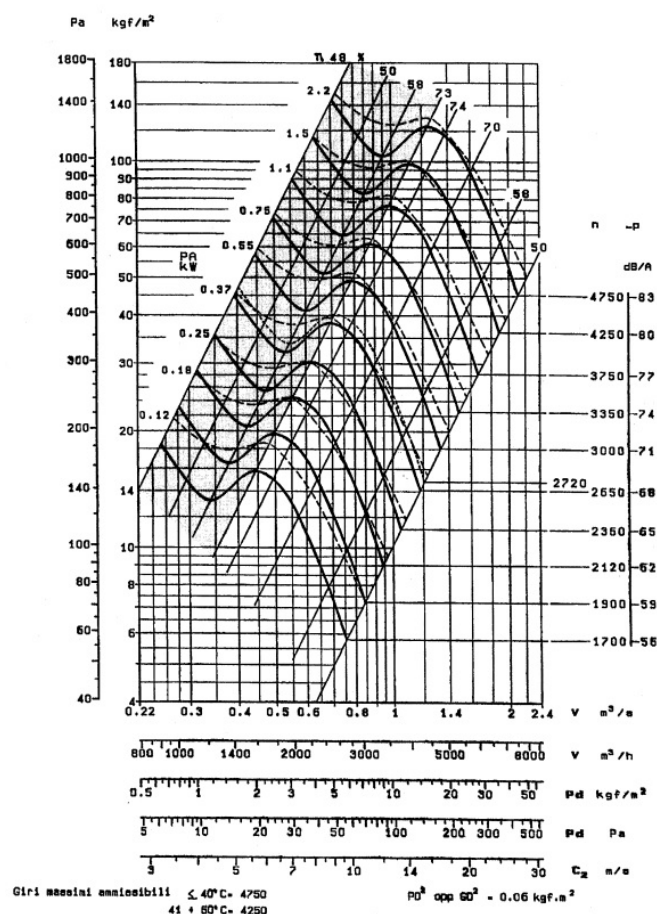


Figura 4.1: Curvas caraterísticas do ventilador “VENT EF 314/I 9A/A”, [10]

O primeiro passo é analisar apenas a zona que não está a sombreado, o que permite que as curvas resultantes fiquem resumidas a metades de parábola. De seguida, fixa-se uma velocidade de rotação e tenta-se encontrar uma aproximação da curva à respetiva velocidade. Definiu-se a velocidade de rotação de 4750 rpm e, a partir de dois pontos e com o auxílio do Excel, foi obtida a Equação 4.1, do segundo grau.

$$y = -273,47x^2 - 10^{-12}x + 1656 \quad (4.1)$$

A parcela de grau 1 não será considerada, de forma a simplificar a expressão e tendo em conta que a sua contribuição é quase nula. Resultando, assim, na expressão definida pela Equação 4.2.

$$y = -273,47x^2 + 1656 \Leftrightarrow P = -273,47Q_v^2 + 1656 \quad (4.2)$$

Em que:

- P - pressão (Pa);
- Q_v - caudal volúmico (m^3/s).

O caudal volúmico pode ser representado em função da velocidade do ar, v , por $Q_v = vA$. Tendo em conta que o valor da área, A , é constante e igual a $0,0779 \text{ m}^2$ (diâmetro = $0,315 \text{ m}$), a expressão anterior equivale à Equação 4.3.

$$P = -1,66v^2 + 1656 \quad (4.3)$$

Na Figura 4.2 observa-se o resultado da curva caraterística do ventilador, a uma rotação de 4750 rpm, obtida a partir da curva do catálogo.

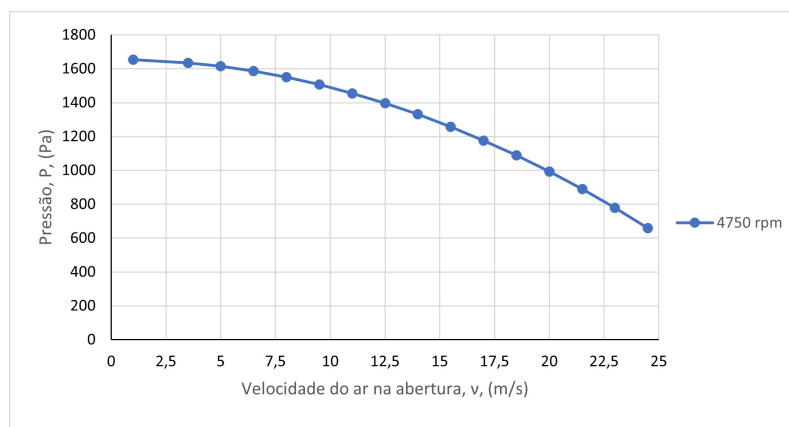


Figura 4.2: Curva caraterística resultante - velocidade de rotação = 4750 rpm

Como o ventilador tem de funcionar a diferentes velocidades de rotação é necessário realizar a análise dimensional da curva resultante, expressa na Equação 4.3. Para tal, é necessário igualar o coeficiente de caudal, comparando dois ventiladores iguais (mesmo

diâmetro) que se encontram a funcionar com velocidades de rotação diferentes. Do qual resulta a Equação 4.4.

$$\frac{Q_{v_1}}{\omega_1 D^5} = \frac{Q_{v_2}}{\omega_2 D^5} \Leftrightarrow Q_{v_1} = Q_{v_2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \Leftrightarrow v_1 = v_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \quad (4.4)$$

Onde o indicador 1 refere-se às variáveis do ventilador a funcionar a 4750 rpm, o indicador 2 remete para o ventilador a uma velocidade de rotação por definir e:

- ω - velocidade de rotação do ventilador (rpm);
- D - diâmetro do ventilador (m).

O passo seguinte é semelhante, mas com o coeficiente de altura. A Equação 4.5 descreve a igualdade entre os coeficientes.

$$\frac{gH_1}{\omega_1^2 D^2} = \frac{gH_2}{\omega_2^2 D^2} \Leftrightarrow H_1 = H_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \Leftrightarrow P_1 = P_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (4.5)$$

Substituindo a Equação 4.4 e a Equação 4.5 na Equação 4.3, e desenvolvendo o resultado obtém-se a expressão descrita pela Equação 4.6.

$$P = -1,66v^2 + 1656 \left(\frac{\omega_2}{4750} \right)^2 \quad (4.6)$$

Desta forma, é possível definir a curva caraterística do ventilador a funcionar com uma qualquer velocidade de rotação. No gráfico da Figura 4.3 estão representadas as curvas para diferentes velocidades de rotação.

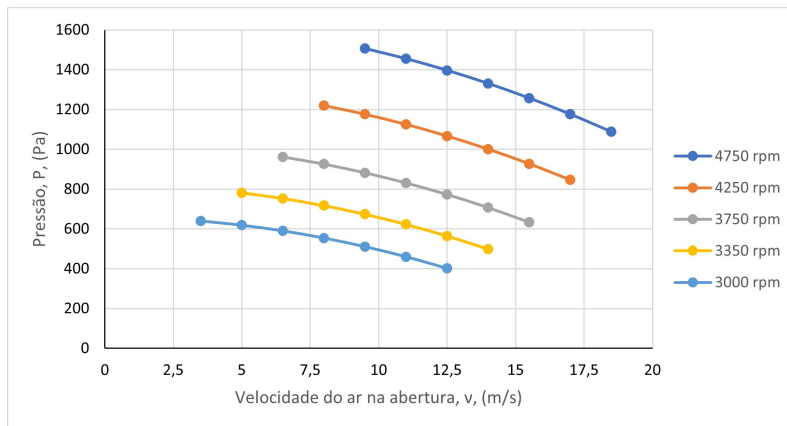


Figura 4.3: Efeito da variação da velocidade de rotação na curva caraterística do ventilador

4.2 Curva caraterística do ventilador inverso

A produção de energia elétrica é alcançada de uma forma análoga à operação de uma turbina eólica. O funcionamento da turbina eólica é realizado a partir de um gerador elétrico, o qual deve conseguir operar a uma frequência constante, independentemente

da variação da velocidade do vento, [11]. Assim sendo, é necessário definir a forma correta de aplicar o ventilador de modo a permitir a operação pretendida.

O comportamento em análise é semelhante ao existente em, por exemplo, algumas centrais hidroelétricas, nas quais é possível produzir energia elétrica, através da aplicação de uma bomba como turbina, nos momentos em que não é necessário bombear a água para montante. Um nome regularmente dado a este tipo de máquina é *Pump As Turbine*, PAT, como é referido em Chapallaz, Eichenberger e Fischer. [12]. Este manual descreve o funcionamento das bombas a funcionar como turbinas, PAT's, explorando as diferentes formas de aplicar a transformação, através de métodos teóricos que permitem prever o comportamento a operar no modo inverso.

Os métodos teóricos foram obtidos a partir de resultados experimentais, de forma a conseguir valores mais precisos, visto que os fenómenos físicos que ocorrem na interação do fluido com as pás da turbina são diferentes para os dois modos de funcionamento (bomba e turbina), [12]. As limitações na geometria da bomba no modo turbina, como, por exemplo, a ausência de pás de pré-guiamento, [13], levam a perdas hidráulicas e, consequentemente, valores menos previsíveis de altura, devido ao menor controlo do escoamento. Esta é uma das desvantagens do uso de uma bomba deste tipo, a qual dificulta também a estabilidade na velocidade de rotação quando aplicadas cargas variáveis, como é o caso da utilização da bomba como gerador para autoconsumo, [13]. No entanto, é possível contornar essa questão com o auxílio de dispositivos eletrónicos de controlo de carga, [12].

As principais vantagens de uma PAT, segundo o ponto de vista do consumidor, são, [12]:

- A boa/rápida disponibilidade para a sua aquisição e de peças suplentes;
- Menor investimento necessário e;
- Menores custos de manutenção, pois não exige mão de obra especializada ou equipamento muito específico.

As principais desvantagens são, [12]:

- A ausência de dispositivo de controlo do escoamento;
- A menor eficiência no ponto de maior rendimento, também referido como *best efficiency point*, bep, e;
- O decréscimo abrupto do rendimento para pontos fora do bep.

O comportamento variável do vento a passar pelo ventilador implica que seja conhecida a curva completa do ventilador a funcionar de forma inversa. Segundo Chapallaz, Eichenberger e Fischer. [12], existem vários procedimentos para prever o comportamento da PAT, como, por exemplo, Stepanoff (1957), Kittredge (1961), McClaskey and Lundqvist

(1976), Buse (1981), Yedediah (1983), Lewinski-Kesslitz (1987), entre outros. No entanto, existe apenas um método prático que permite definir a curva completa, o método Chapallaz (1992), que tem como base resultados experimentais obtidos a partir de testes realizados em mais de 80 bombas, reduzindo, assim, o erro na previsão, [12].

Na Figura 4.4 observa-se o comportamento típico da curva da bomba e da curva da turbina, assim como o efeito causado pela variação da velocidade de rotação.

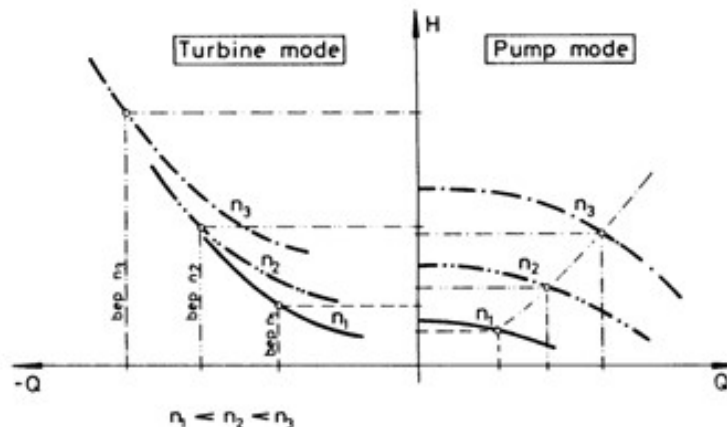


Figura 4.4: Comportamento típico das curvas características da bomba a funcionar em modo bomba e em modo turbina, [12]

Os termos apresentados na Figura 4.4 são:

- Pump mode - modo bomba;
- Turbine mode - modo turbina;
- Q - caudal volúmico;
- H - altura/pressão;
- n - velocidade de rotação;
- bep - *best efficiency point*;

Contudo, este procedimento aplica-se, especificamente, nos casos em que se pretende utilizar uma bomba de forma a produzir energia, ou seja, como turbina. A principal diferença entre os dois modos é o sentido do escoamento. Na bomba dá-se de jusante para montante e na turbina precisamente o oposto. Porém, estas não são as únicas formas de funcionamento destes sistemas. Na Figura 4.5 está representado o diagrama com as características totais da máquina, assim como os diferentes modos de funcionamento, segundo Chapallaz, Eichenberger e Fischer. [12]: bomba, turbina, bomba inversa e travagem.

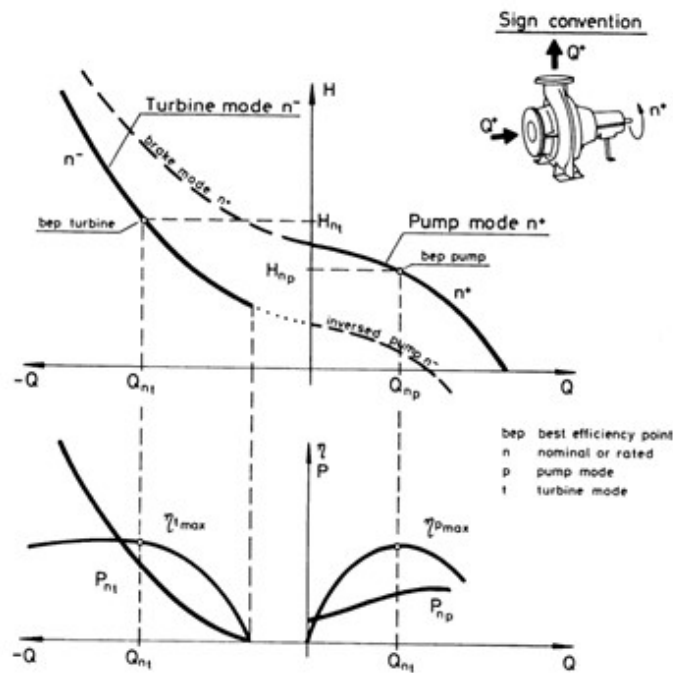


Figura 4.5: Comportamento típico das curvas características totais da bomba para uma velocidade de rotação constante, [12]

Os novos termos observados nesta ilustração, Figura 4.5, são:

- Sign convention - convenção do sinal;
- Brake mode - modo "travão";
- Inversed pump - bomba inversa;
- p - modo bomba;
- t - modo turbina;
- η - rendimento;

De forma a simplificar e a garantir a coerência, os diferentes modos, do ponto de vista do ventilador, são: ventilador (bomba), turbina, ventilador inverso (bomba inversa) e travagem.

O modo que se pretende implementar ao ventilador para permitir a produção de energia elétrica não é o de turbina, mas sim o de ventilador inverso. Isto porque o sentido do escoamento é o mesmo que aquele que é executado no funcionamento como ventilador, invertendo apenas o sentido de rotação das pás. Esta inversão impõe uma perda de carga na passagem pelo rotor (confirmando que funciona de forma contrária ao ventilador), o que permite concluir que a curva característica do funcionamento como ventilador inverso (bomba inversa segundo a Figura 4.5) está representada com a perda de carga, ou seja, a altura (H na figura) em módulo. Logo, a definição mais adequada da curva, em

4.2. CURVA CARATERÍSTICA DO VENTILADOR INVERSO

conformidade com os fenómenos físicos e um referencial comum, deve ser idêntica, mas com simetria segundo o eixo das abcissas.

Tendo em conta a simplificação descrita e seguindo uma abordagem análoga ao comportamento delineado na Figura 4.5, obteve-se uma aproximação da curva caraterística do ventilador inverso. Observou-se que a relação entre as ordenadas das curvas do ventilador e do ventilador inverso não é uma constante comum a todos os pontos, esta vai variando ao longo da curva. Assim, considerou-se impor na ordenada na origem da curva caraterística do ventilador a uma velocidade de rotação de 4750 rpm uma relação de 40%, o que resulta numa diferença de 993,6 Pa. No ponto seguinte, 0,3 m³/s, subtrai-se também a constante (993,6) e, de seguida, soma-se 5 Pa. O procedimento segue a seguinte fórmula, Equação 4.7:

$$y_{2i}(x_i) = y_{1i}(x_i) - 993,6 + a_i \quad \text{quando } i \geq 2 \quad (4.7)$$

$$\text{se } i = 2, \quad a_i = 5$$

$$\text{se } i > 2, \quad a_i = 2 \times a_{i-1} + 5$$

O incremento das abcissas de cada ponto, x_i , é de 0,3 Pa e inicia-se para $x_i=0$ Pa.

O resultado, à velocidade de rotação de 4750 rpm, é o observado na Figura 4.6 e descrito na Equação 4.8.

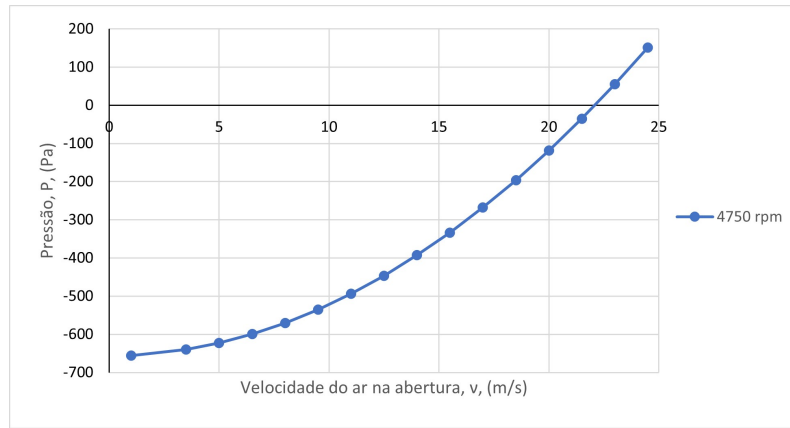


Figura 4.6: Curva caraterística do ventilador inverso - velocidade de rotação = 4750 rpm

$$P = 1,345v^2 - 656,63 \quad (4.8)$$

As curvas caraterísticas do ventilador inverso a funcionar com diferentes velocidades de rotação, que foram alcançadas a partir da expressão da Equação 4.9, estão representadas na Figura 4.7.

$$P = 1,345v^2 - 656,63 \left(\frac{\omega_2}{4750} \right)^2 \quad (4.9)$$

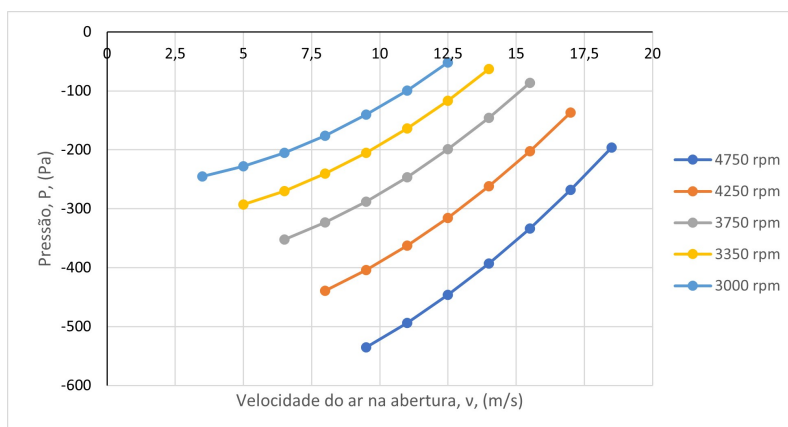


Figura 4.7: Efeito da variação da velocidade de rotação na curva característica do ventilador inverso

A Figura 4.8 apresenta, em simultâneo, as curvas do ventilador e do ventilador inverso.

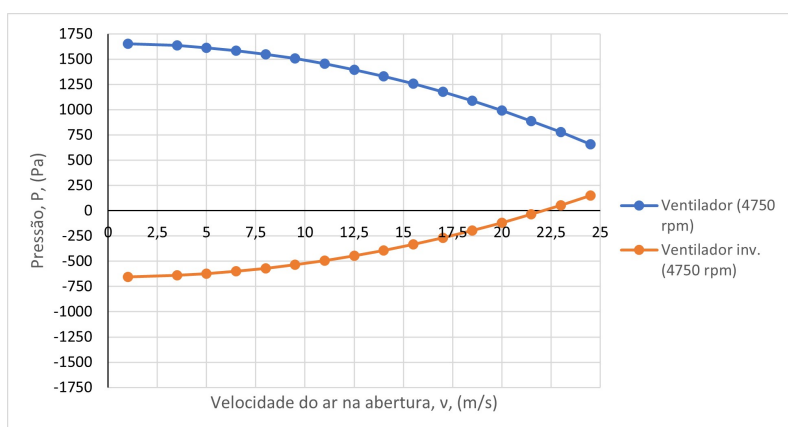


Figura 4.8: Curvas características do ventilador e do ventilador inverso – velocidade de rotação = 4750 rpm

Estão, assim, reunidas as condições para pôr em prática a etapa que se segue, na qual é explicada a forma de executar o programa de forma a simular o comportamento pretendido, como ventilador e como ventilador inverso.

4.3 Implementação da curva característica do ventilador inverso no programa

Neste capítulo é explorada a implementação da curva característica do ventilador inverso no código do programa *Vent3*, a partir de *NONLIN*, permitindo representar o comportamento do escoamento e os principais parâmetros ligados ao problema de ventilação natural no interior de um espaço.

4.3. IMPLEMENTAÇÃO DA CURVA CARATERÍSTICA DO VENTILADOR INVERSO NO PROGRAMA

Em primeiro lugar, é necessário clarificar as condições impostas para descrever o funcionamento como ventilador. Para tal, como exemplo, considera-se um edifício constituído por dois espaços, 1 e 2, representado na Figura 4.9. O primeiro tem uma abertura exterior (A) e outra interior (B), que comunica com o espaço 2. Este segundo espaço inclui também outra abertura exterior (C). O ventilador é colocada na abertura B e considerando que o sentido do escoamento se realiza da esquerda para a direita (sentido positivo), ou seja, do espaço 1 para o 2, então o ventilador tem um caráter de exaustor para o espaço 1 e insuflador para o espaço 2, o que leva a um aumento de pressão na última divisão.

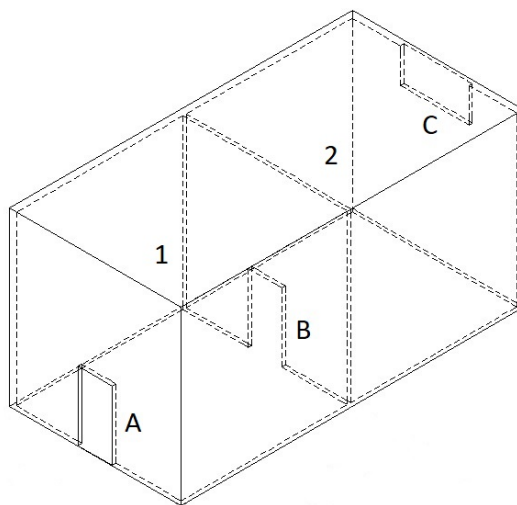


Figura 4.9: Representação do edifício exemplo

O exercício do ventilador acontece em conformidade com determinadas condições de diferença de pressão. Na primeira fração o ventilador funciona como exaustor se a pressão no espaço 1 a subtrair pela perda de carga associada à rotação do rotor é inferior à pressão do espaço 2 – visto que sem a ação do ventilador estas circunstâncias levariam à inversão do sentido do escoamento (da direita para a esquerda). De forma semelhante, para a máquina funcionar como insuflador para o espaço 2 a pressão no espaço 2 somada com o aumento da pressão causada pela rotação do ventilador tem de ser superior à pressão existente no espaço 1 – o que garante a circulação do ar no sentido pretendido, da esquerda para a direita. A programação que define as condições anteriores é incorporada no código *NONLIN* e é apresentada no Anexo I.

É importante referir que estes requisitos são específicos para o ventilador colocado numa abertura interna. Caso se tratasse de uma abertura em contacto com o exterior estes seriam diferentes, apesar de seguirem a mesma lógica.

O ventilador inverso rege-se de uma forma parecida à do ventilador convencional. O objetivo principal da implementação do dispositivo neste modo é de permitir a produção

de energia elétrica, garantindo o mesmo sentido de escoamento que é praticado no modo ventilador, com base num número mínimo de renovações (devido à qualidade do ar exigida para o espaço em questão e o número de ocupantes), alterando apenas o sentido de rotação da ventoinha.

Tendo em conta o mesmo exemplo utilizado na explicação do código para o programa do ventilador normal, tem-se o ventilador a funcionar como exaustor inverso, na primeira divisão, se a pressão no espaço 1 a subtrair pela perda de carga associada à rotação do rotor é superior à pressão do espaço 2 – o que garante que o escoamento seja no sentido positivo. Para o dispositivo executar o modo insuflador inverso para o espaço 2, a pressão nesse espaço somada com o aumento da pressão causada pela rotação do ventilador tem de ser inferior à pressão da fração 1 – isto permite que a circulação do ar se dê no sentido pretendido, da esquerda para a direita. Estas imposições são incluídas em *NONLIN* da mesma forma que na situação do ventilador convencional e são descritas em Anexo I.

CASOS DE ESTUDO E RESULTADOS

Antes de estudar o caso final, é importante analisar o fenómeno da ventilação natural, de forma a verificar alguns comportamentos das variáveis no interior do espaço. Para tal, serve de exemplo o caso que será retratado no subcapítulo seguinte. Após a análise dos resultados desse caso será apresentado o desenvolvimento do caso final.

5.1 Caso 1: paredes adiabáticas - com e sem geração de calor

Neste subcapítulo pretende-se observar o efeito da velocidade do vento, U_0 , e da impulsão térmica no interior de um espaço interno.

O espaço considerado para este estudo tem uma forma cúbica, como ilustrado na Figura 5.1, e possui duas aberturas em contacto com o exterior. A abertura 1, situada na fachada principal, encontra-se ao nível do solo e tem uma área de $2 \times 1 \text{ m}^2$. A abertura 2, na fachada oposta, situa-se junto ao teto, com $1 \times 2 \text{ m}^2$. A fração autónoma possui uma área em planta de 25 m^2 e uma fonte de calor.

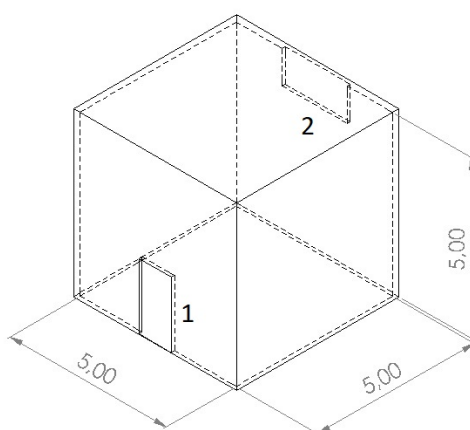


Figura 5.1: Representação do edifício do Caso 1 e dimensões (em metros)

A direção do vento é perpendicular à fachada principal e quando incide frontalmente sobre esta considera-se positivo. Ao contrário, toma sinal negativo.

Para o valor do coeficiente de perda de carga, ξ , admitiu-se 2,5 e o coeficiente de pressão toma um valor unitário (constante), sendo positivo na situação em que o ar entra para o interior do edifício e, caso contrário, negativo.

Com o intuito de facilitar a observação da variação dos resultados, considerou-se que todas as paredes, o que inclui a cobertura, são adiabáticas e estudou-se o caso de ausência de calor interior e 4 casos diferentes com geração de calor - 5 kW, 10 kW, 15 kW e, finalmente, 20 kW. As variáveis analisadas foram a velocidade do ar na abertura 1, as variações de pressão, massa volúmica e temperatura no interior do espaço, o número de renovações do ar interior por hora e o coeficiente de pressão. Nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, encontram-se os resultados.

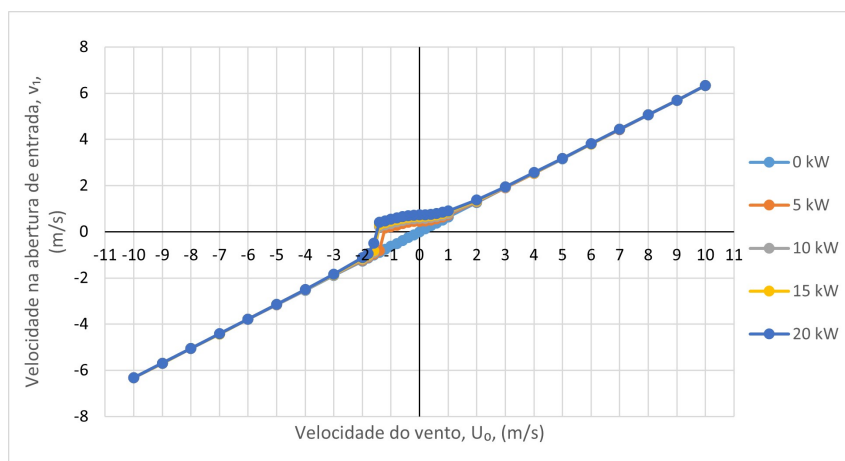


Figura 5.2: Velocidade do ar na abertura de entrada, v_1 , em função da velocidade do vento, U_0

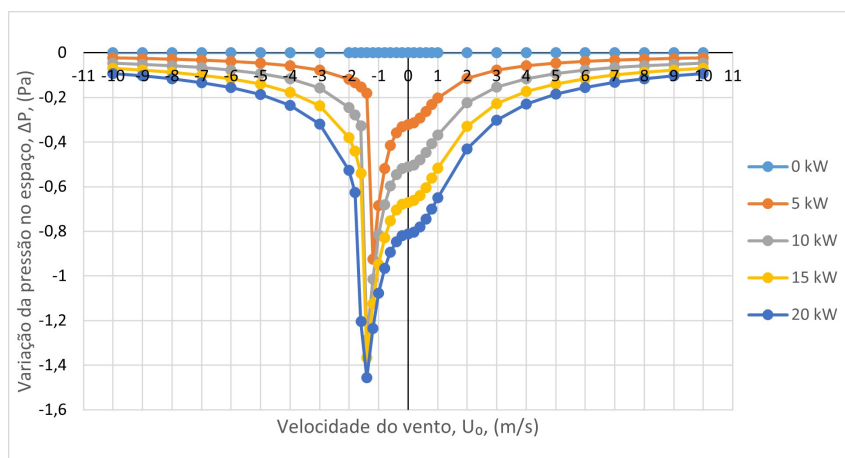


Figura 5.3: Variação da pressão no espaço, ΔP , em função da velocidade do vento, U_0

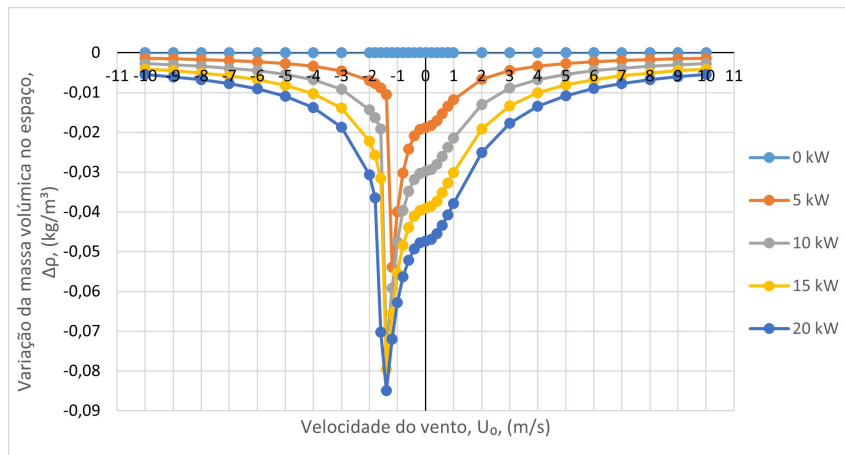


Figura 5.4: Variação da massa volúmica no espaço, $\Delta\rho$, em função da velocidade do vento, U_0

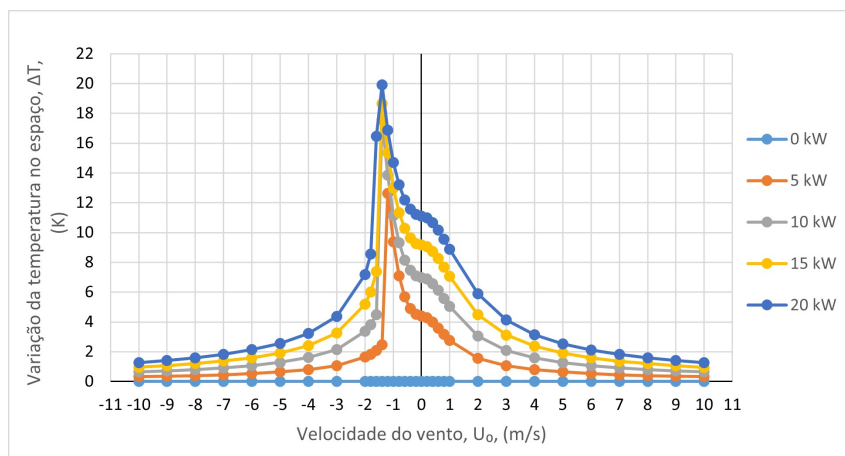


Figura 5.5: Variação da temperatura no espaço, ΔT , em função da velocidade do vento, U_0

Após a análise dos resultados é possível concluir que o sentido do escoamento é dependente da direção do vento e que para uma determinada gama de valores, entre -2 e -1,5 m/s, o efeito da impulsão térmica - originada pela existência de gradientes de temperatura - adquire um papel preponderante, podendo promover a movimentação do ar e, conseqüentemente, aumentar o número de renovações por hora, NRPH, no interior do espaço. A partir de uma determinada velocidade do vento o valor de NRPH é suficiente para garantir as necessidades no interior do edifício, sendo possível, eventualmente, ter de fechar as aberturas do mesmo. Caso estes fenómenos não assegurem as condições exigidas pelo espaço interno é necessário recorrer à ventilação mecânica.

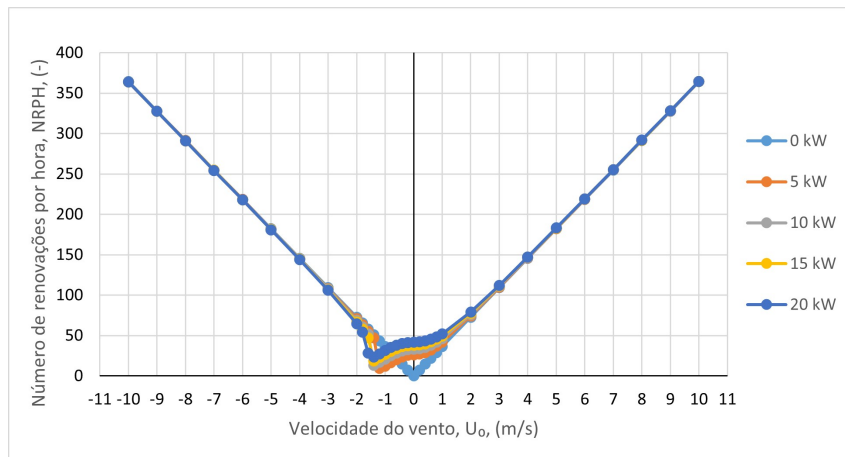


Figura 5.6: Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0

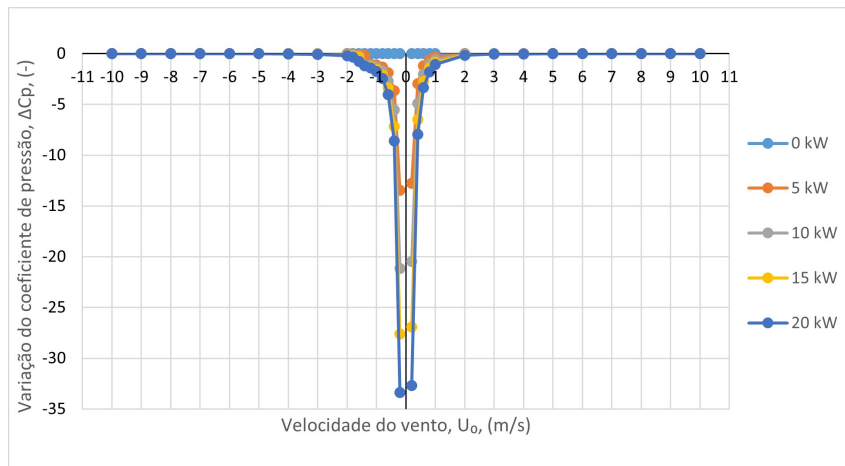


Figura 5.7: Variação do coeficiente de pressão, ΔC_p , em função da velocidade do vento, U_0

5.2 Descrição da geometria do espaço em estudo

O propósito desta dissertação é de verificar a viabilidade da aplicação de um dispositivo de ventilação mecânica num modo que permita o aproveitamento da intensidade do vento para geração de energia elétrica. Por conseguinte, é necessário definir o espaço que permita analisar a situação pretendida.

A geometria é composta por um espaço interno e uma chaminé. O espaço interior é cúbico, tem uma planta de 25 m^2 e 5 m de altura e contém uma abertura para o exterior com 1 m de largura e 2 m de altura. A chaminé está disposta a meio do telhado e o seu diâmetro está em concordância com o diâmetro do ventilador, 0,315 m, de forma a simplificar ao máximo o caso e tirar o maior proveito do potencial energético do vento. A altura da chaminé é de 2,5 m e a meio da mesma encontra-se o ventilador. A geometria e as respetivas dimensões estão representadas na Figura 5.8.

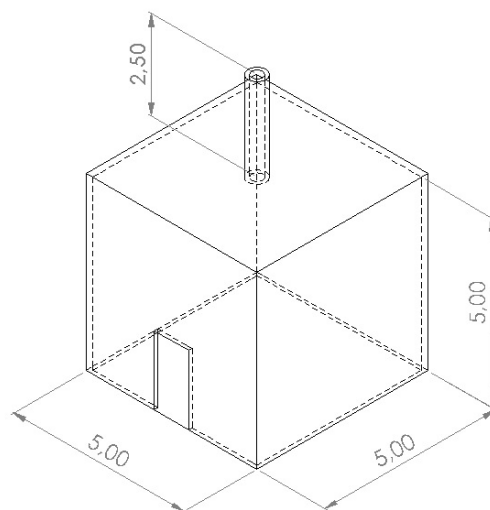


Figura 5.8: Representação do edifício em estudo e dimensões (em metros)

Pretende-se que o escoamento se realize num único sentido, partindo da abertura exterior e saindo através da chaminé, e que o caso seja independente da direção e sentido do vento. Para tal, foi escolhida a forma cúbica e considerou-se que o edifício tem uma abertura como a referida, de 1×2 m, em cada uma das 4 paredes, mantendo apenas aberta aquela que estiver disposta da melhor forma para a entrada do vento, isto é, a abertura na fachada se encontrará sempre orientada na direção do vento - o que garante um C_p positivo à entrada e negativo na chaminé. Esta simplificação garante sempre o mesmo sentido de escoamento e é também importante para o caso de existir alguma fonte de poluição próxima ao edifício, estando representada na ilustração seguinte, Figura 5.9.

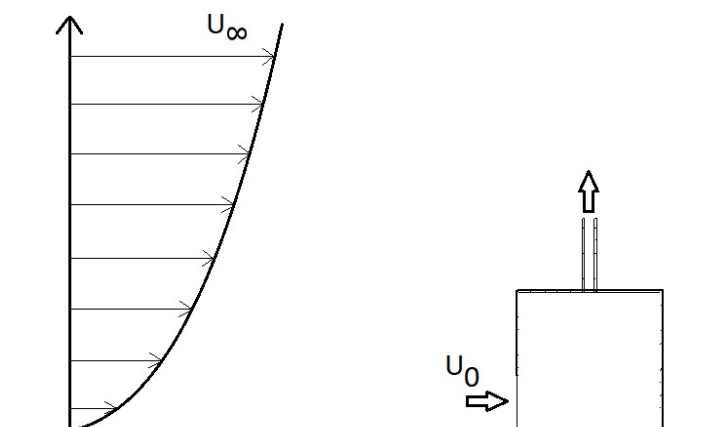


Figura 5.9: Representação do edifício e do perfil de velocidade do vento

5.3 Condições no interior do espaço em estudo

Em qualquer fração autónoma são exigidas determinadas condições mínimas que permitam garantir a qualidade do ar no interior desse espaço. Para este estudo o fator a respeitar é o número de renovações por hora, cujo valor é calculado a partir dos caudais mínimos de ar novo estipulados no Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios, RSECE, [14]. Os caudais mínimos de ar novo dependem do tipo de atividade praticada no interior do espaço e podem ser apresentados de duas formas distintas: $\text{m}^3/(\text{h.ocupante})$ – que depende do número de ocupantes; $\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$ – que depende da área em planta.

Com vista a zelar pela saúde e bem-estar dos ocupantes do espaço, é crucial cumprir com rigor a taxa mínima de renovação do ar. O edifício é uma representação de um local de natureza comercial, mais especificamente, uma área de armazenamento. Para esse tipo de situação o valor de caudal mínimo de ar novo é $5 \text{ m}^3/(\text{h.ocupante})$, [14].

Obtido o caudal mínimo de ar novo definido é possível determinar o valor de renovações de ar por hora que deve ser respeitado no espaço, NRPH, através do cálculo apresentado no Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios, RSECE, [14]. O que resulta em 1 NRPH.

Este valor deve ser sempre cumprido, sendo necessário um cuidado reforçado quando se aplica o ventilador no modo inverso, pois a perda de pressão associada ao mesmo pode ser suficiente para não satisfazer o requisito mínimo do número de renovações de ar por hora.

5.4 Caso 2 - ventilação natural (sem ação do ventilador)

A simulação do comportamento do escoamento do ar e os principais parâmetros ligados ao problema de ventilação natural no interior de um espaço é realizada para uma gama de valores de velocidade do vento positiva, compreendida entre 0 m/s e 15 m/s. Isto deve-se ao facto de se ter considerado que a abertura para a entrada do ar é a que estiver disposta de forma a facilitar a entrada do vento e a garantir a deslocação do ar no sentido desejado – da abertura exterior para a chaminé. No entanto, no ficheiro de dados o caso é retratado como se só existisse a abertura pela qual está a entrar o ar, assim como se se tratasse de 3 espaços internos – o espaço 1, de armazenamento, juntamente com outros dois espaços, 2 e 3, de igual geometria, originados pela divisão feita a meio da chaminé para a colocação do ventilador. Estas considerações são necessárias para realizar a simulação corretamente.

Considerou-se um valor de perda de carga de 2,5 para a abertura exterior da fração e coeficientes de pressão unitários - positivo na fração de incidência do vento e negativo nos restantes lados. O espaço não tem geração de calor - situação comum aos casos retratados nos capítulos seguintes.

Na Figura 5.10 é possível observar a evolução do número de renovações do ar por hora na divisão apenas com o auxílio da ventilação natural (linha a azul).

5.5. CASO 3 - APLICAÇÃO DO VENTILADOR A FUNCIONAR CONTINUAMENTE

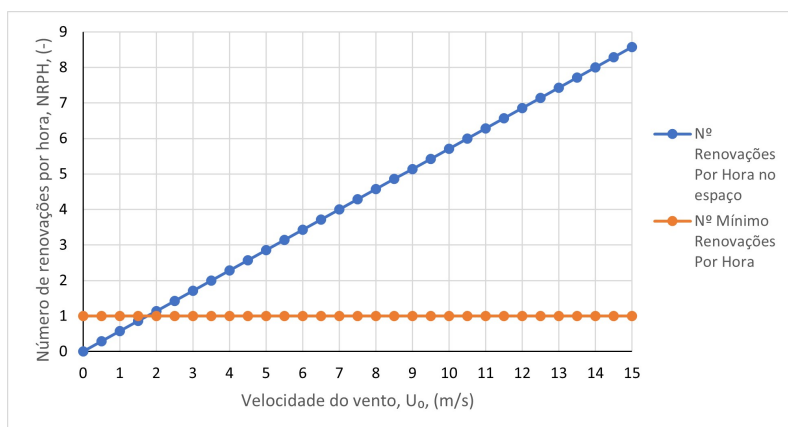


Figura 5.10: Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 - ventilação natural

No gráfico está incluída uma linha horizontal (de cor laranja) com o valor da taxa de renovações do ar exigido pelo espaço, 1 NRPH, de forma a identificar o instante em que o valor é assegurado. Esse momento dá-se para uma velocidade do vento de, aproximadamente, 1,8 m/s. Isto significa que até atingir essa velocidade o espaço precisa da ação do ventilador para garantir 1 NRPH e que a partir desta é possível aplicar o ventilador no modo inverso para aproveitamento energético.

5.5 Caso 3 - aplicação do ventilador a funcionar continuamente

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados do estudo do comportamento do espaço com o ventilador a funcionar continuamente. A velocidade de rotação do ventilador é a que serviu de base para obter as equações das curvas características para o ventilador e para o ventilador inverso, 4750 rpm. Os coeficientes de perda de carga e de pressão são os mesmos que foram aplicados no subcapítulo anterior, Subcapítulo 5.4.

A evolução do valor da velocidade do ar na abertura de entrada, em função da intensidade e direção do vento, é o descrito na Figura 5.11 e o comportamento do número de renovações do ar por hora é representado na Figura 5.12.

Nas Figuras 5.11 e 5.12 observa-se uma evolução quase linear e horizontal no valor da velocidade do ar na abertura de entrada, assim como no número de renovações por hora. O que permite concluir que o sentido do escoamento no interior do edifício é independente do sentido do deslocamento do vento e que a taxa de renovações é garantida - em ambos os gráficos optou-se por representar os dois quadrantes (abscissas negativas e positivas com ordenadas positivas) de forma a reforçar os resultados obtidos. O facto do ventilador garantir um número de renovações por hora quase constante torna esta uma solução geralmente adotada para assegurar a ventilação dos edifícios. No entanto, esta opção apresenta-se desvantajosa do ponto de vista económico, devido aos gastos energéticos associados. O elevado valor observado na taxa de renovações confirma que o caso está

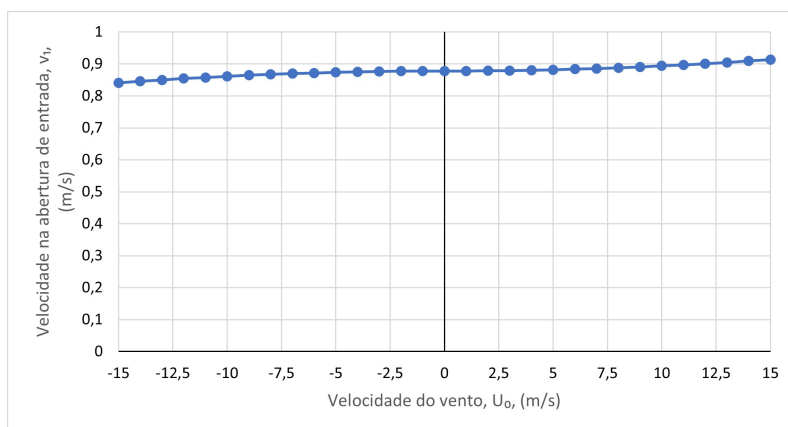


Figura 5.11: Velocidade do ar na abertura de entrada, v_1 , em função da velocidade do vento, U_0 - ventilador contínuo

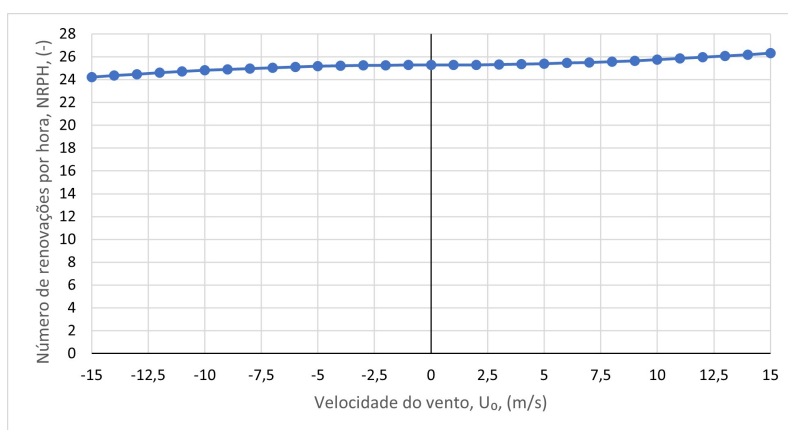


Figura 5.12: Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 - ventilador contínuo

sobredimensionado, pois se trata de um ventilador de média pressão.

Como referido, é comum ter o ventilador a funcionar continuamente para salvaguardar a exigência na taxa mínima de renovações, portanto, é importante estudar o que acontece nesse caso, permitindo também obter os gastos energéticos associados ao uso do ventilador. Posto isto, verifica-se para que velocidade de rotação do ventilador é possível assegurar o valor mínimo de renovações por hora, qualquer que seja a velocidade do vento. Para esta análise, é apenas pertinente verificar o comportamento no primeiro quadrante – sentido da velocidade do vento em concordância com o sentido pretendido para o escoamento no interior do espaço. As características de perda de carga e do coeficiente de pressão mantêm-se as mesmas.

Os resultados obtidos estão descritos nas figuras que se seguem, Figura 5.13 e Figura 5.14.

5.6. CASO 4 - APLICAÇÃO DO VENTILADOR PARA GARANTIR O NÚMERO MÍNIMO DE RENOVAÇÕES DO AR POR HORA

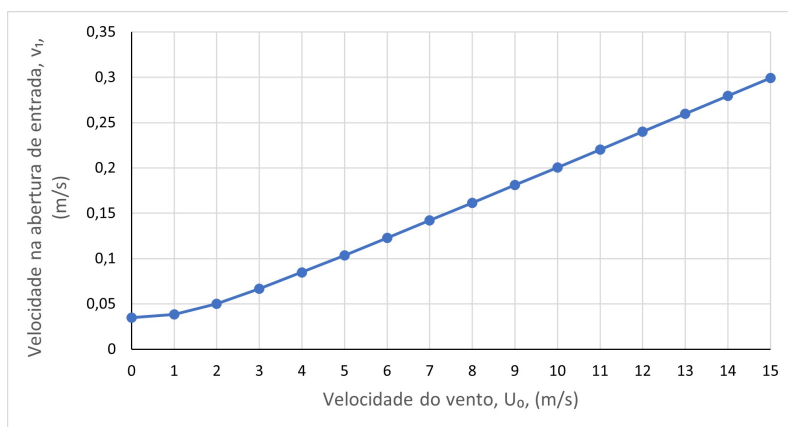


Figura 5.13: Velocidade do ar na abertura de entrada, v_1 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador contínuo

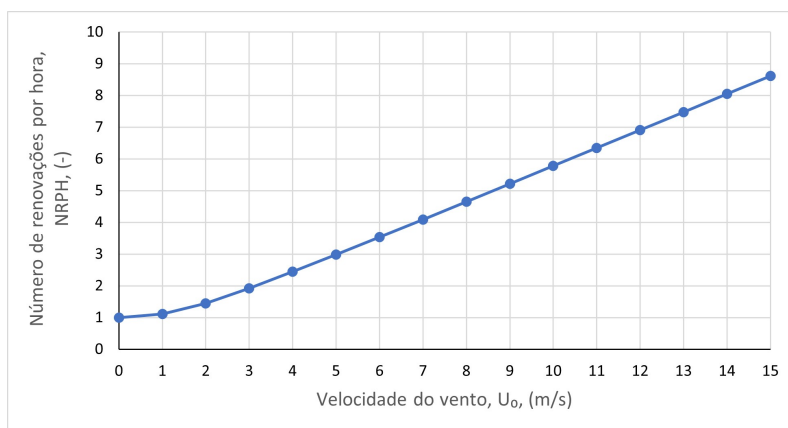


Figura 5.14: Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador contínuo

Pela observação das Figuras 5.13 e 5.14, observa-se que para este caso, em que o ventilador se encontra a funcionar a uma velocidade de rotação de 188 rpm, a velocidade do ar na abertura de entrada e o número de renovações apresentam variações superiores às observadas no caso anterior. Isto acontece porque a uma velocidade de rotação mais baixa estas variáveis demonstram uma dependência maior na velocidade do vento. Estes resultados permitem também concluir que a partir de uma velocidade do vento relativamente baixa, 1 m/s, tem-se um excesso crescentemente significativo no número de renovações por hora e, por isso, torna-se desnecessária e desvantajosa a utilização do ventilador.

5.6 Caso 4 - aplicação do ventilador para garantir o número mínimo de renovações do ar por hora

Antes de se analisar os resultados do ventilador a funcionar de forma inversa é estudada a situação apenas com o ventilador. De forma a garantir o valor mínimo do número de

renovações do ar por hora no interior do espaço, 1 NRPH, pode ser necessário forçar a deslocação do ar através de ventilação mecânica nos momentos em que a intensidade do vento assume valores mais próximos de zero, como observado no Subcapítulo 5.4. Esta situação requer que a velocidade de rotação do ventilador seja variável, em conformidade com a necessidade do espaço. Na Figura 5.15 estão ilustrados os respectivos resultados.

As características das aberturas do edifício (coeficientes de perda de carga e coeficientes de pressão) permanecem as mesmas que foram consideradas nos Subcapítulos 5.4 e 5.5.

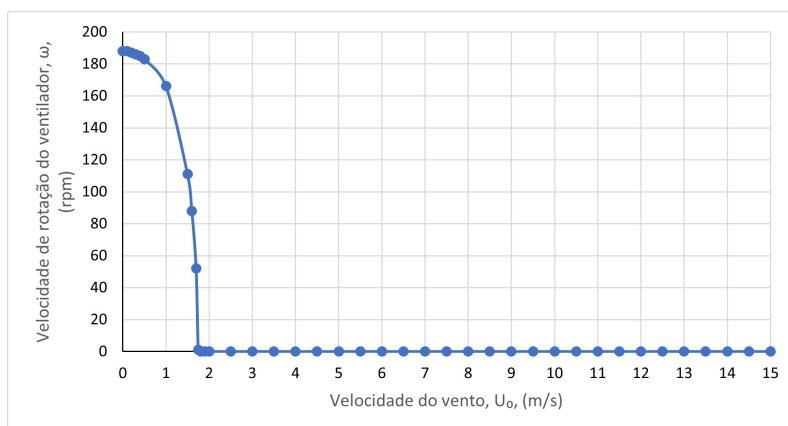


Figura 5.15: Velocidade de rotação do ventilador, ω , em função da velocidade do vento, U_0 , de modo a garantir 1 NRPH – ventilador convencional

A partir do gráfico da Figura 5.15 verifica-se a existência de um intervalo de valores para o qual é necessário ligar o ventilador - o mesmo intervalo que tinha sido observado no Subcapítulo 5.4 -, apresentando a velocidade de rotação mínima a que o mesmo tem de funcionar para garantir o requisito mínimo de renovações do ar (1 NRPH). Como previsto, a situação acontece para valores de velocidade do vento mais baixos, mais precisamente, de 0 m/s até 1,8 m/s (para este caso). Fora desta gama o ventilador é desligado e observa-se um comportamento linear e crescente no número de renovações por hora, diretamente proporcional ao aumento da velocidade do vento, o qual é ilustrado na Figura 5.16. O valor da taxa de renovação é crescente (para velocidades do vento superiores a 1,8 m/s), mas pretende-se que seja, aproximadamente constante e igual a 1 NRPH, o que é conseguido através de duas soluções: o fecho de aberturas - o qual não foi realizado -, ou a aplicação do ventilador no modo inverso para aproveitar a energia e, consequentemente, reduzir as renovações do ar - esta foi a solução adotada e os resultados são apresentados nas secções seguintes, Subcapítulos 5.7 e 5.8.

5.7. CASO 5 - APLICAÇÃO DO VENTILADOR NO MODO INVERSO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

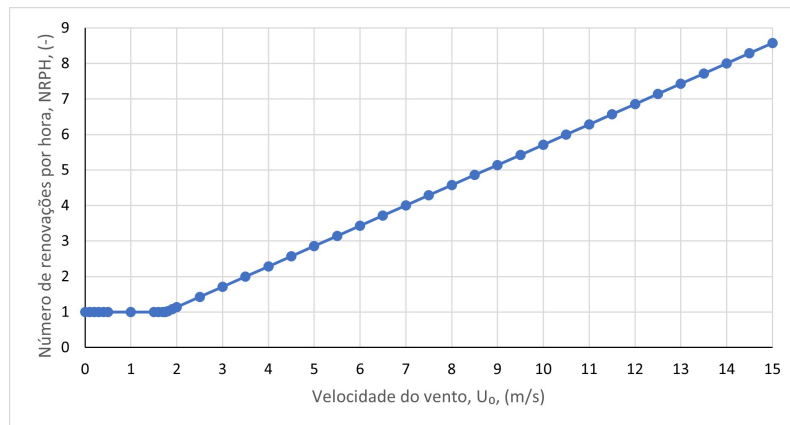


Figura 5.16: Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional

No gráfico seguinte, Figura 5.17, é possível observar o comportamento da velocidade do ar no ventilador.

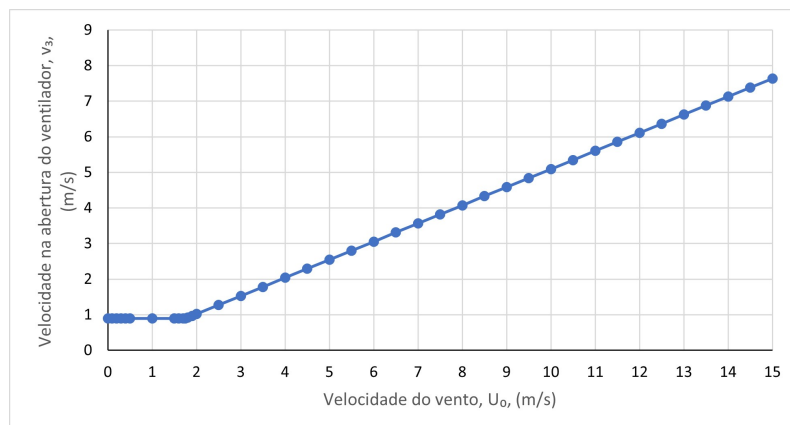


Figura 5.17: Velocidade do ar na abertura do ventilador, v_3 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional

A Figura 5.16 descreve o comportamento do número de renovações por hora em função da velocidade do vento. A partir de uma intensidade do vento igual a 1,8 m/s observa-se um aumento linear nas renovações do ar, o que permite aplicar o dispositivo de forma inversa, como pretendido, para aproveitar a energia da passagem do ar no ventilador, tendo sempre em conta o cumprimento da taxa mínima de renovação do ar.

5.7 Caso 5 - aplicação do ventilador no modo inverso para aproveitamento energético

Neste subcapítulo é realizada a análise do funcionamento do ventilador em modo inverso, o que permite não só aproveitar a energia da passagem do ar para produzir energia

elétrica, como também regular o valor do número de renovações por hora.

Assim como nos subcapítulos anteriores, Subcapítulos 5.4, 5.5 e 5.6, considerou-se um valor de perda de carga de 2,5 na abertura exterior (de entrada) da fração e coeficientes de pressão unitários - positivo na fração de incidência do vento e negativo nos restantes lados.

O resultado da aplicação do ventilador no sentido inverso é descrito na figura que se segue, Figura 5.18.

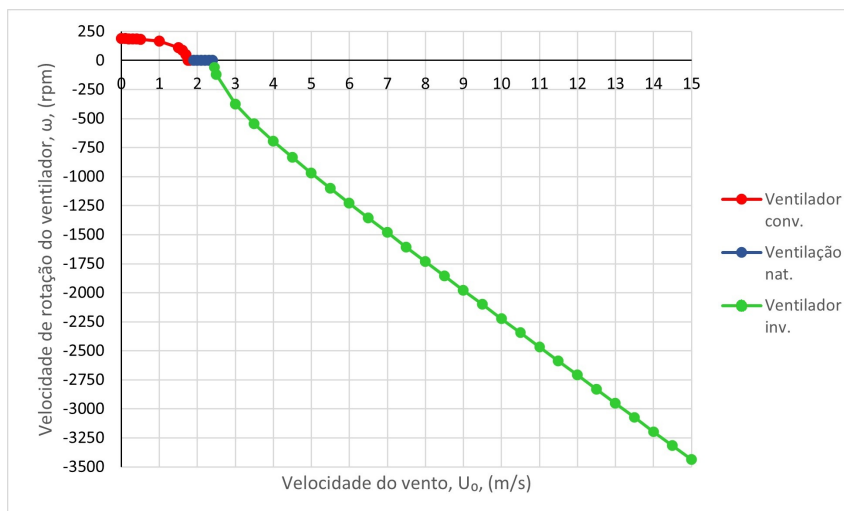


Figura 5.18: Velocidade de rotação do ventilador, ω , em função da velocidade do vento, U_0 , de modo a garantir 1 NRPH – ventilador convencional e ventilador inverso

No gráfico da Figura 5.18 a velocidade de rotação do ventilador é positiva quando o aparelho funciona no modo convencional - representado a vermelho - e negativa quando se trata do caso do ventilador inverso - zona a verde. Observa-se que para os valores de velocidade do vento compreendidos entre 1,8 m/s e 2,4 m/s não é possível ligar o ventilador inverso, estando o número de renovações por hora dependente apenas da ventilação natural - pontos de cor azul. Isto acontece porque a perda de carga associada ao funcionamento do ventilador, mesmo que a baixas velocidades de rotação, é suficiente para não ser possível garantir o número de renovações por hora no interior do espaço. O último é analisado na Figura 5.19.

No intervalo referido, de 1,8 m/s a 2,4 m/s, verifica-se um aumento linear do número de renovações do ar por hora, visto que nessa gama o dispositivo está desligado e, por isso, o caudal depende apenas da intensidade do vento.

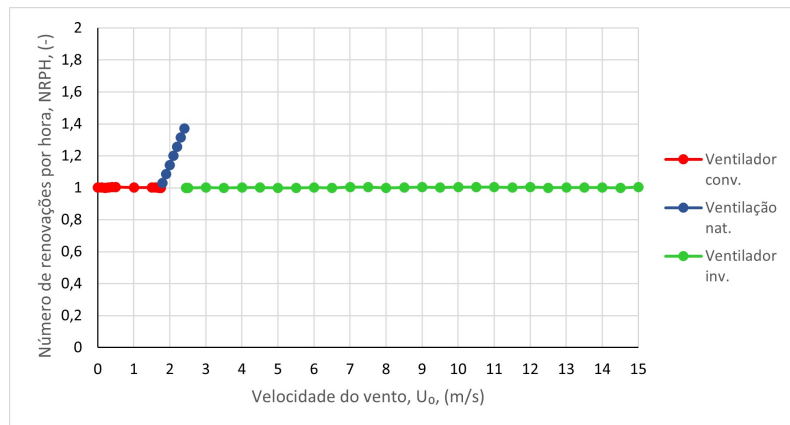


Figura 5.19: Número de renovações por hora, NRPH, em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso

Quando o dispositivo se encontra a funcionar em modo inverso a velocidade na abertura do ventilador será aproximadamente constante, de forma a respeitar o requisito exigido no que toca à renovação do ar. O resultado é semelhante ao da Figura 5.19 e é descrito na Figura 5.20.

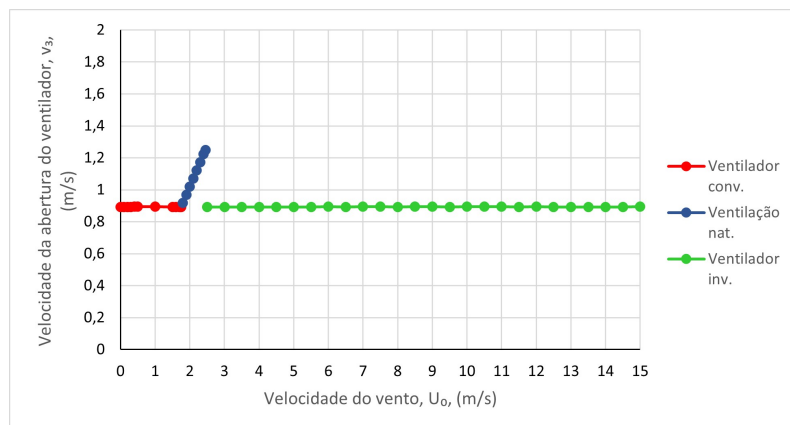


Figura 5.20: Velocidade do ar na abertura do ventilador, v_3 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso

5.8 Aproveitamento energético

Como observado no subcapítulo anterior, Subcapítulo 5.7, a partir de uma determinada intensidade do vento verifica-se um excedente no número mínimo de renovações por hora no interior do espaço. Esse excedente acontece para uma velocidade do vento igual ou superior a 2,4 m/s e permite a atuação do ventilador no modo inverso para aproveitar a energia associada ao respetivo excesso.

Para quantificar o aproveitamento energético do vento é estudada a potência que, teoricamente, resulta da passagem do ar na abertura onde está colocado o ventilador.

Como se trata de um sistema aberto, o caso dever ser aprofundado do ponto de vista de um volume de controlo definido na zona onde está colocado o ventilador, [15]. A fronteira real é definida pela parede da chaminé e as fronteiras imaginárias tratam-se de duas superfícies transversais, de igual área, e perpendiculares ao eixo longitudinal da chaminé. Uma das superfícies representa a entrada para a região do volume de controlo e a outra a saída, e ambas estão sujeitas a diferentes valores de pressão. Isto origina uma diferença de pressão no sistema que permite calcular uma força, F [N], quando multiplicada pela área da superfície de entrada (ou saída), [15], como é descrito na Equação 5.1.

$$F = \Delta P \times A \quad (5.1)$$

A potência, Pot [W], obtém-se a partir da multiplicação da força resultante pela velocidade do ar na abertura onde se encontra o ventilador, como indica a expressão definida pela Equação 5.2.

$$Pot = F \times v \quad (5.2)$$

A variação de pressão que está incluída na Equação 5.1 é definida a partir da variação de pressão nos espaços definidos como 2 e 3 - que dividem a chaminé a meio, devido à existência do ventilador.

Combinando as Equações 5.1 e 5.2 obtém-se a potência que é possível aproveitar para cada valor da velocidade do vento, quando o ventilador está a funcionar no modo inverso.

De forma a conseguir analisar o aproveitamento da energia da passagem do ar no ventilador de uma forma mais precisa, é necessário conhecer a disponibilidade da energia anual para o local onde se encontra o edifício. O comportamento dos ventos depende de vários fatores, como a altura em relação ao solo, a rugosidade da zona, a orografia, a presença de obstáculos na envolvente, a direção do vento, entre outros, e obtém-se através de um gráfico de distribuição de Weibull, cuja curva é o resultado da expressão descrita na Equação 5.3, [16].

$$P^*(U_0) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{U_0}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{U_0}{c}\right)^k} \quad (5.3)$$

- P^* – probabilidade de ocorrência de determinada velocidade do vento, U_0 ;
- k – fator de forma;
- c – fator de escala (m/s).

O local de implantação é o município de Lisboa e, portanto, os valores dos fatores k e c são retirados dos mapas das Subfiguras 5.21(a) e 5.21(b), respetivamente.

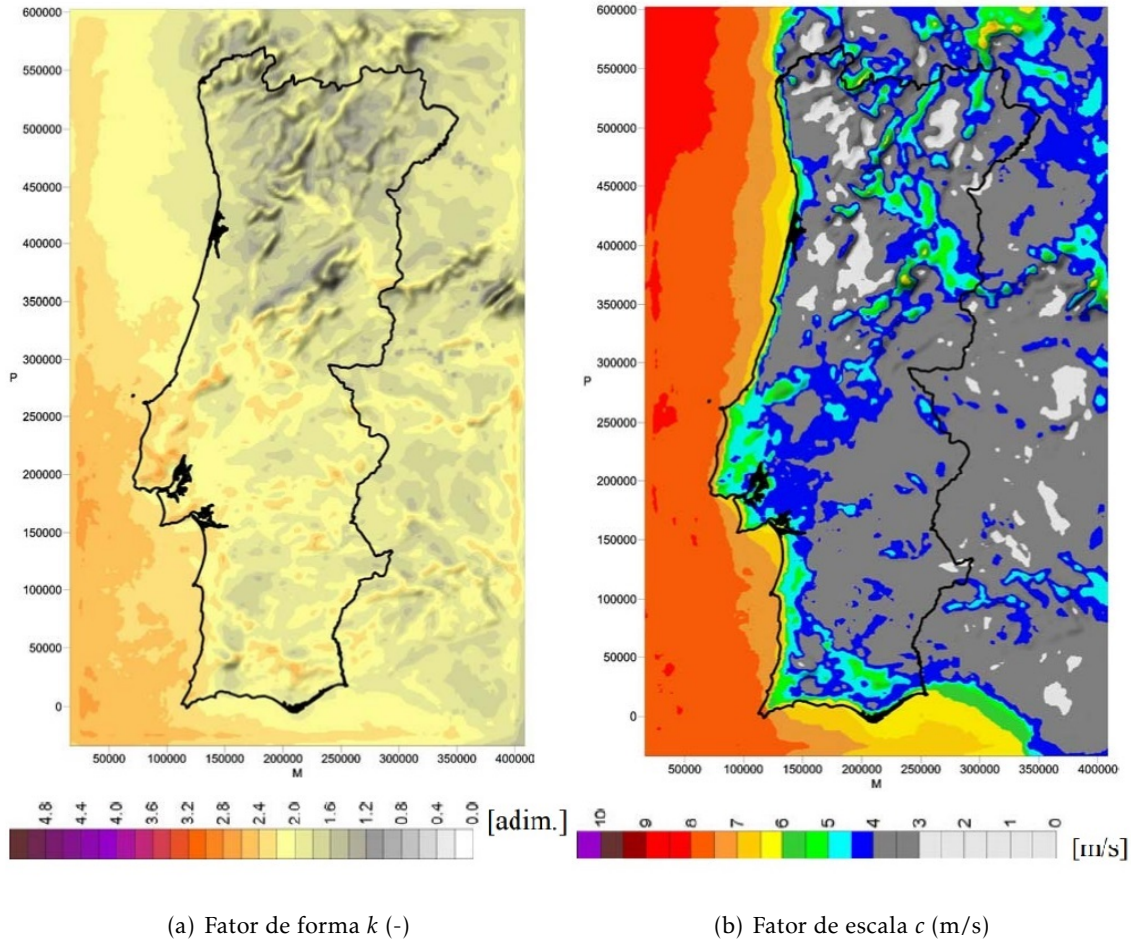


Figura 5.21: Mapas médios simulados dos fatores de escala da distribuição de Weibull – 10m, [17]

A localização definida é caracterizada pelos seguintes fatores:

- Fator de forma (k) = 2,4;
- Fator e escala (c) = 4,5 m/s.

O resultado da equação que descreve a distribuição de Weibull encontra-se na expressão da Equação 5.4.

$$P^*(U_0) = \left(\frac{2,4}{4,5}\right) \times \left(\frac{U_0}{4,5}\right)^{2,4-1} \times e^{-\left(\frac{U_0}{4,5}\right)^{2,4}} \Leftrightarrow P^*(U_0) = 0,0649 \times U_0^{1,4} \times e^{-0,0271 \times U_0^{2,4}} \quad (5.4)$$

Depois de implementar a expressão anterior obtém-se o comportamento do vento na zona de Lisboa, que é representado pela distribuição de Weibull que está na Figura 5.22.

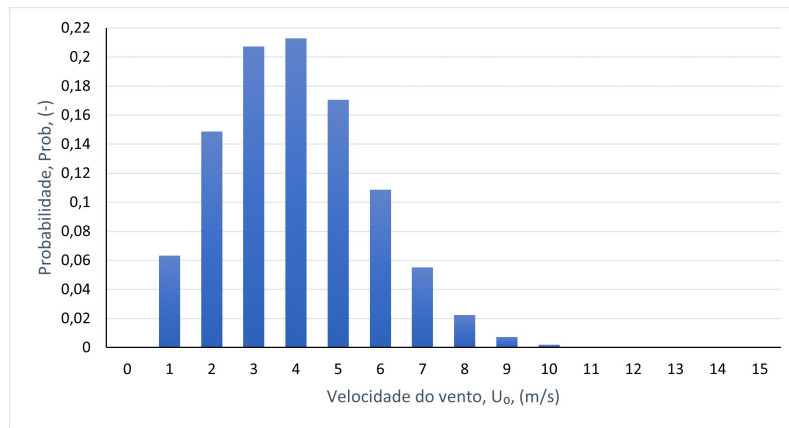


Figura 5.22: Distribuição de Weibull da zona de Lisboa – 10m

Depois do cálculo do aproveitamento energético tem que ser analisada a carga energética que é exigida pelo funcionamento do ventilador quando é necessário forçar a ventilação, isto é, nos momentos em que a intensidade do vento não cumpre os requisitos mínimos de renovação do ar na divisão. Como foi concluído previamente, esses casos acontecem para valores de velocidade do vento compreendidos entre 0 m/s e 1,8 m/s. A análise da energia é calculada de forma análoga ao aproveitamento energético.

5.9 Resultados

Seguindo a explicação teórica explicada no subcapítulo anterior, Subcapítulo 5.8, e aplicando o procedimento descrito calcula-se a energia que é possível obter com o ventilador no modo inverso.

Nas Figuras 5.23 e 5.24 observa-se a variação da pressão no interior da divisão 2 e da divisão 3, respetivamente, para o ventilador convencional - de 0 a 1,8 m/s, a vermelho - e para o ventilador inverso - de 2,4 a 15 m/s, a verde.

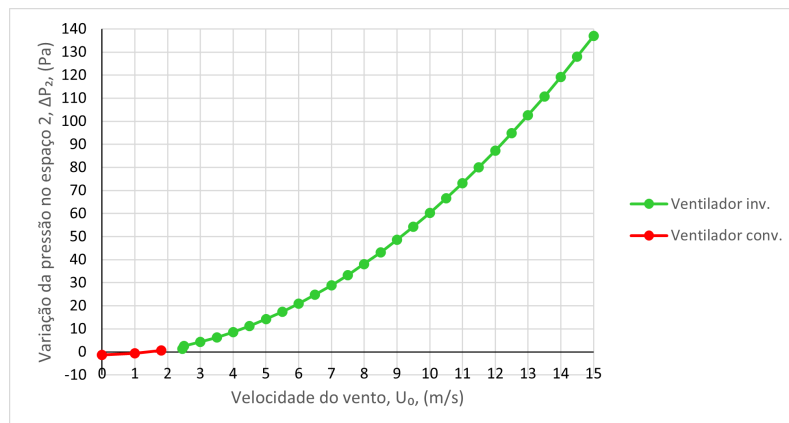


Figura 5.23: Variação da pressão no espaço 2, ΔP_2 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso

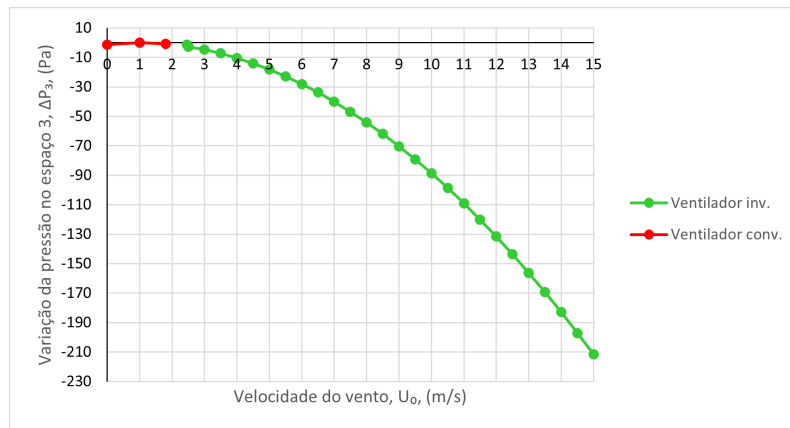


Figura 5.24: Variação da pressão no espaço 3, ΔP_3 , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso

Aplicando as equações do Subcapítulo 5.8, Equação 5.1 e 5.2, obtêm-se os resultados que estão apresentados na Figura 5.25.

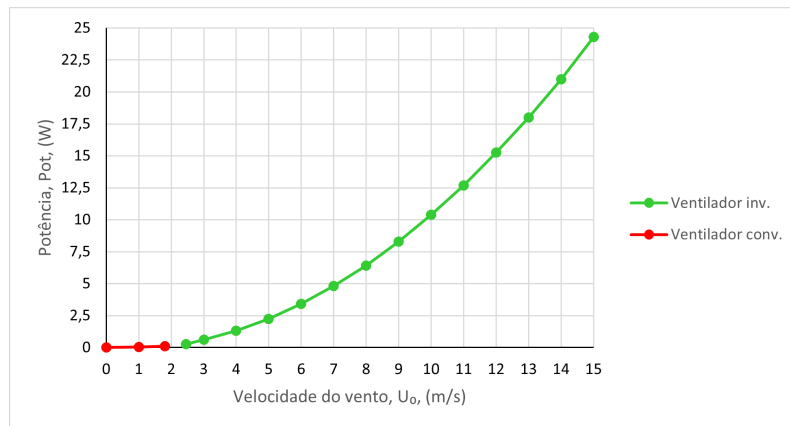


Figura 5.25: Potência, Pot , em função da velocidade do vento, U_0 – ventilador convencional e ventilador inverso

Depois de chegar ao resultado observado na Figura 5.25 combinam-se os valores de potência adquiridos com a distribuição de Weibull apresentada no Subcapítulo 5.8, na Figura 5.22. Assim, é possível saber o valor da potência tendo em conta a frequência da sua ocorrência, o que representa a potência útil - no caso do ventilador inverso -, em função da velocidade do vento e a potência gasta - que alimenta o ventilador convencional.

Desta forma, é possível estudar a energia teoricamente aproveitável ao longo de um dia, somando a porção da potência útil associada a cada valor de velocidade do vento e multiplicando o resultado por 24 horas. Tendo em conta este cálculo, conclui-se que a aplicação do ventilador no modo inverso permite produzir, aproximadamente, 39,73 Wh de energia elétrica.

O valor de energia consumida diariamente pelo ventilador convencional é calculado

da mesma forma que o valor da energia aproveitada e o resultado é 0,56 Wh. Após comparação com o aproveitamento alcançado com o mecanismo inverso, 39,74 Wh, conclui-se que o equipamento escolhido está sobredimensionado para o caso em estudo, garantindo com facilidade a renovação do ar no espaço, pois apresenta pouca dependência da ventilação mecanicamente forçada e permite, assim, uma maior capacidade de aproveitamento energético da movimentação do ar.

Estes resultados apresentam-se favoráveis à implementação do ventilador inverso no espaço em análise, mas, simultaneamente, inconclusivos no que toca ao alcance dos benefícios associados ao mesmo.

Assim, para determinar os valores de energia anuais foi consultado o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, [14], onde se encontram os padrões de referência da utilização de vários tipos de edifício, que permitem realizar o estudo do comportamento energético do espaço. O perfil correspondente ao edifício em estudo determina um número de horas de funcionamento de 3260. Assim, os gastos energéticos anuais resultam em 76,20 Wh. No entanto, para calcular o valor dos ganhos energéticos anuais adquiridos com o ventilador inverso considerou-se uma utilização contínua ao longo do ano, $365 \times 24 = 8760$ h, resultando em 14505,10 Wh, o que representa um aproveitamento energético de 14428,90 Wh (aproximadamente, 14,43 kWh).

Com esta redução no consumo de energia, que pode compensar outros gastos energéticos do edifício como, por exemplo, iluminação, equipamentos, entre outros, é possível concluir que esta solução é vantajosa, tornando-se clara a utilidade da aplicação da turbomáquina no modo inverso. No entanto, existem outros fatores a analisar para poder verificar a verdadeira potencialidade deste sistema, nomeadamente, o custo da adaptação e implementação do ventilador no funcionamento inverso, a eficácia do mecanismo e a execução prática do mesmo, com as considerações que levaram a estes resultados.

No gráfico da Figura 5.26 estão ilustrados os resultados dos gastos e ganhos energéticos anuais do espaço estudado.

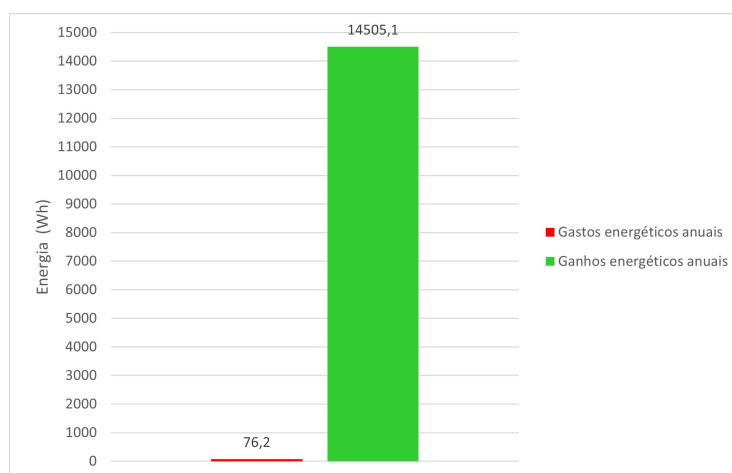


Figura 5.26: Gastos energéticos anuais VS Ganhos energéticos anuais

A observação do gráfico permite comparar o peso dos ganhos energéticos com os gastos do espaço e esclarecer a contribuição bastante significativa dos respectivos ganhos.

Os ganhos obtidos representam uma poupança considerável na despesa associada à energia elétrica - é importante deixar claro que essa conclusão depende do caso em questão e dos gastos energéticos totais do mesmo - e refletem, também, uma redução nas emissões de gases com efeito de estufa que possam provir da produção de eletricidade, mais precisamente, emissões de CO₂ equivalente. Esta conclusão é de grande importância para o problema explicado na introdução (o qual motivou este estudo), o consumo excessivo de energia nos edifícios das cidades dos países desenvolvidos, visto que, assim, é possível reduzir o respectivo consumo energético do espaço, contribuindo para uma menor dependência de energia, facilitada pela ventilação natural.

CONCLUSÕES

6.1 Conclusão

Os ganhos energéticos anuais obtidos com a aplicação do ventilador em funcionamento inverso, 14505,10 Wh, representam uma poupança bastante significativa em relação aos gastos energéticos associados à utilização do ventilador no espaço, 76,20 Wh - o que resulta num aproveitamento energético de 14428,90 Wh.

Os resultados conseguidos surgem a partir de uma análise conceptual e aproximada do comportamento do ventilador a trabalhar como gerador, cuja implementação se apresenta vantajosa do ponto de vista económico, reduzindo os custos associados à energia elétrica, e ambiental, sendo uma alternativa mais sustentável, devido à diminuição do uso do ventilador e, conseqüentemente, dos consumo energéticos. Este aproveitamento da ventilação natural reduz a dependência elétrica e as eventuais emissões de CO₂ equivalente geradas na produção de energia - que pode ter origem numa fonte de energia fóssil -, o que o torna, aparentemente, numa alternativa com potencial, tendo em conta o paradigma climático atual. No entanto, este mecanismo deve ser explorado com mais detalhe, de forma a poder concluir a verdadeira potencialidade do mesmo. Primeiro, é pertinente realizar ensaios experimentais para poder validar a curva do ventilador inverso e explorar outros comportamentos como a curva da potência e o rendimento do mecanismo - devendo-se utilizar um ventilador dimensionado de maneira apropriada para o espaço considerado. No Subcapítulo 6.2, que se segue, é apresentada uma possível configuração de um sistema que permita a realização dos respetivos ensaios experimentais. É também interessante analisar a viabilidade prática das considerações feitas ao longo deste estudo, assim como a influência das mesmas nos resultados. Para completar o estudo do impacto financeiro e avaliar com mais rigor o benefício proveniente da aplicação do mecanismo, devem ser calculados os custos associados à implementação do dispositivo a funcionar neste modo e os indicadores financeiros como, por exemplo, o retorno de investimento. Seria também proveitoso averiguar o caso numa localização onde o vento se apresentasse mais frequente para valores de velocidade mais elevados e, por fim, experimentar outros ventiladores ou configurações, como diferentes geometrias ou ventiladores em série e/ou

paralelo.

6.2 Trabalhos futuros

Os resultados do estudo do aproveitamento da energia proveniente da passagem do ar na abertura onde está colocado o ventilador devem ser confirmados de forma prática, através de ensaios experimentais, com o objetivo de validar a potencialidade dos mesmos e poder concluir, com clareza, os benefícios do ventilador a funcionar no modo inverso. Por esta razão, considera-se essencial continuar a análise deste caso, sendo, portanto, necessário definir o procedimento que permite alcançar os resultados que se pretendem.

O primeiro passo resume-se a identificar a montagem correta do sistema que permite realizar os ensaios experimentais. Como o ventilador se trata de um dispositivo semelhante a uma bomba, diferenciando-se significativamente apenas no fluido do escoamento, é possível aplicar um método, e instrumentação, análogo ao que se utiliza nas bombas para definir o comportamento e os parâmetros que as caracterizam.

A montagem inclui dois ventiladores, o primeiro, ligado a um motor elétrico que é controlado por um variador de velocidade para manipular a velocidade de rotação, destina-se ao controlo da velocidade do escoamento, [18]. O segundo, a funcionar no modo inverso e ligado a outro motor elétrico, permite a obtenção dos parâmetros relevantes ao estudo, [18]. Na zona do ventilador inverso são colocados dois manómetros (ou apenas um manómetro diferencial), um a montante e outro a jusante, o que possibilita monitorizar a pressão, [18]. Inclui-se também um caudalímetro, de forma a analisar o caudal volumétrico, um tacómetro, para conhecer a velocidade de rotação do ventilador, e um dinamómetro que permite medir o binário, [18]. Este último é obtido multiplicando a força determinada pelo dinamómetro pelo valor do braço – raio determinado pelo eixo do veio e o dispositivo de medida. Reúnem-se, assim, as condições para calcular a potência, Pot , seguindo a Equação 6.1, [18].

$$Pot = F \times \frac{2 \times \pi \times \omega \times B}{f} \quad (6.1)$$

Onde:

- F – força (N);
- ω – velocidade de rotação (rpm);
- B – braço (m);
- f – frequência (Hz).

O gerador, segundo a configuração definida, opera a 60 Hz, que corresponde à frequência da rede elétrica. A conjugação de um conversor estático, com funcionamento do tipo “stall”, permite variar a frequência e, consequentemente, regular a velocidade de rotação

do ventilador inverso, [19]. Desta forma, é possível maximizar a potência ou limitar a velocidade de rotação para situações de intensidade do vento elevadas, [19].

O sistema configurado permite determinar a curva característica $H(Q_v)$ do ventilador inverso. Primeiro, deve-se fixar a velocidade de rotação do motor, de seguida, determina-se o fluxo do escoamento com o primeiro ventilador (ventilador convencional), o que define também a curva da instalação, que depende das perdas de carga ao longo do troço a montante do ventilador inverso, [20]. O caudalímetro calcula o caudal volúmico e com o auxílio dos manómetros obtêm-se os valores de pressão. Regista-se o ponto de funcionamento para essa curva de instalação e procede-se da mesma forma, variando o escoamento definido pelo ventilador convencional (e a curva da instalação). Os vários pontos de funcionamento obtidos definem a curva do ventilador inverso para a velocidade de rotação fixada, [20].

A curva da potência é construída por meio da expressão da Equação 6.1, a qual permite conhecer a curva do rendimento, que é calculado, para cada ponto, com a seguinte equação:

$$\eta = \frac{\rho \times g \times Q_v \times H}{P_{ot}} \quad (6.2)$$

As variáveis da Equação 6.2 são:

- ρ – massa volúmica (kg/m^3);
- g – aceleração gravítica (m/s^2);
- Q_v – caudal volúmico (m^3/s);
- H – altura (m).

O procedimento descrito trata-se apenas de um exemplo de ponto de partida para a realização de ensaios experimentais que permitam definir com mais clareza os resultados obtidos nesta dissertação e, assim, validar a potencialidade dos mesmos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Allard e C. Ghiaus. *Natural ventilation in the urban environment: assessment and design*. 2005^a ed. London: Sterling, Earthscan. ISBN: 9781787284395.
- [2] Y. Jiang e Q. Chen. “Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89.13 (2001), pp. 1155–1178. ISSN: 01676105. DOI: 10.1016/S0167-6105(01)00106-4.
- [3] L. M. B. Marques. *Ventilação Natural em Edifícios Com Utilização de Chaminés Térmicas*. Rel. téc. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2019.
- [4] F. M. Silva. *Ventilação natural: ação do vento*. Rel. téc. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017. DOI: 10.5151/9788580391589.
- [5] Projeteee. *Ventilação Natural*. URL: <http://projeteee.mma.gov.br/estrategia/ventilacao-natural/> (acedido em 21/02/2021).
- [6] NP-EN-1991-1-4. “Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-4 : Acções gerais”. Em: *Communities* 4 (2010), pp. 1–162.
- [7] J. F. A. Dias Delgado, A. R. Janeiro Borges e J. M. Paixão Conde. “Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney”. Em: 6105.97 (1996).
- [8] R. F. M. Guerreiro. *Aproveitamento energético da ventilação natural*. Rel. téc. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [9] J. F. B. N. L. Teixeira. *Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada*. Rel. téc. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [10] Ferrari Industrial fan technology. *Axial fans series - low, middle pressure*.

- [11] F. Runcos et al. “Geração de energia eólica – tecnologias atuais e futuras”. Em: *Revista Eletricidade Moderna* figura 1 (2005), pp. 1–15. URL: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-geracao-de-energia-eolica-tecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>.
- [12] J.-M. Chapallaz, P. Eichenberger e G. Fischer. *Manual on pumps used as turbines*. 1992.
- [13] L. Gil. *Máquinas Hidráulicas 4 . 1 Teoria elementar turbomáquinas*.
- [14] Diário da República. “Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)”. Em: *Diário da República* N.º 67, I série-A (2006), 2416–2468, Lisboa, Portugal (in Portuguese).
- [15] D. Vaz. *Dinâmica - Equações Integrais*.
- [16] D. Vaz. *Potência disponível no vento*. 2019.
- [17] P. Alexandre. *Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental*. Rel. téc. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2015.
- [18] R. Furtado. *Determinação de curvas NPSH em Bombas Centrífugas*. Rel. téc. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2019.
- [19] K. Freire da Silva. “Controle e integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados”. Tese de doutoramento. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- [20] T. Barreto. *Desenvolvimento da instrumentação de um banco de ensaio de bombas*. Rel. téc. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.

ANEXO 1 - INCORPORAÇÃO DAS CONDIÇÕES NO CÓDIGO *NONLIN*

Neste anexo são apresentadas as condições implementadas no código do programa *Vent3* (*NONLIN*) que permitem simular o comportamento do ventilador, Figura I.1, e do ventilador inverso, Figura I.2.

```
% VENTILADOR INTERNO
% INSUFLADOR
if(IAB(J) == 35)
    ROTV = 4750.;
    if((X(ICPCO(J))+1656.0*(ROTV/4750.)^2-X(JBF(K)+1)) < 0.0)
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))+1656.0*(ROTV/4750.)^2-0.5*RO0*10*X(J)*abs(X(J));
    else
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))-1.66*X(J)*abs(X(J))+1656.0*(ROTV/4750.)^2;
    end
end
% EXAUSTOR
if(IAB(J) == 36)
    ROTV = 4750.;
    if((X(ICPCO(J))-1656.0*(ROTV/4750.)^2-X(JBF(K)+1)) > 0.0)
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))-1656.0*(ROTV/4750.)^2-0.5*RO0*10*X(J)*abs(X(J));
    else
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))-1.66*X(J)*abs(X(J))-1656.0*(ROTV/4750.)^2;
    end
end
```

Figura I.1: Incorporação das condições do ventilador no código *NONLIN*

```

% VENTILADOR INVERSO INTERNO
% INSUFLADOR INVERSO
if(IAB(J) == 35)
    ROTV = 4750.;
    if((X(ICPCO(J))+656.63*(ROTV/4750.)^2-X(JBF(K)+1)) > 0.0)
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))-656.63*(ROTV/4750.)^2-0.5*RO0*10*X(J)*abs(X(J));
    else
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))+1.345*X(J)*abs(X(J))-656.63*(ROTV/4750.)^2;
    end
end
% EXAUSTOR INVERSO
if(IAB(J) == 36)
    ROTV = 4750.;
    if((X(ICPCO(J))-656.63*(ROTV/4750.)^2-X(JBF(K)+1)) < 0.0)
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))+656.63*(ROTV/4750.)^2-0.5*RO0*10*X(J)*abs(X(J));
    else
        F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-...
            X(JBF(K)+1))+1.345*X(J)*abs(X(J))+656.63*(ROTV/4750.)^2;
    end
end
end

```

Figura I.2: Incorporação das condições do ventilador inverso no código *NONLIN*

