



ESTUDO EXPERIMENTAL PARA A AVALIAÇÃO DO RUÍDO, PERFORMANCE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTOVENTILADORES

IVAN NORMANO PINHO PEREIRA

setembro de 2017

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA A AVALIAÇÃO DO RUÍDO, PERFORMANCE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTOVENTILADORES

Ivan Normano Pinho Pereira

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA A AVALIAÇÃO DO RUÍDO, PERFORMANCE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTOVENTILADORES

Ivan Normano Pinho Pereira

1070560

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica - Ramo Energia, realizada sob a orientação da Professora Doutora Olga dos Remédios Sobral Castro

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor, Francisco José Gomes da Silva Professor Adjunto, ISEP

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor, Olga dos Remédios Sobral Castro

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor, Clito Félix Alves Afonso

Professor Associado, FEUP

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste capítulo acadêmico foi possível graças ao apoio da família e amigos, mas principalmente da minha mulher Vânia Ferreira e ao meu filho Dinis Adner, recém-nascido, que me deram a força necessária para avançar nos momentos mais delicados.

Um obrigado aos responsáveis da SKK que disponibilizaram as amostras e as informações necessárias para o avanço da dissertação assim como ao Eng.º Joaquim Monteiro pela sua ajuda na fase da instalação experimental.

Um agradecimento especial à Professora Doutora Olga Castro que sempre me motivou e ajudou no esclarecimento dos conteúdos e na disponibilização de informação até à conclusão do trabalho.

A todos um muito obrigado.

“Impossible is Nothing”

Muhammad Ali

PALAVRAS CHAVE

Eficiência Energética, Ruído, Motoventilador, Curva Característica, Ensaios Experimentais

RESUMO

O setor da refrigeração está atualmente a acompanhar a tendência mundial pela procura da sustentabilidade quer em aspetos relacionados com as emissões de gases com efeito de estufa devido aos fluidos frigorigéneos utilizados, quer em aspetos relacionados com o consumo da energia elétrica de diversos componentes, como compressores e motoventiladores, utilizados em evaporadores e condensadores.

Outro aspeto fundamental a ter em conta é o ruído gerado pelos equipamentos de refrigeração comercial e industrial.

Este estudo incidiu sobre os motoventiladores e à análise de desempenho dos conjuntos de motores elétricos de polos sombreados e de comutação eletrónica (ECM), com hélices de sucção de diferentes geometrias, ângulos de ataque das pás (28° e 34°) e rugosidades ($0,36\ \mu\text{m}$ e $3,36\ \mu\text{m}$). A metodologia utilizada foi a análise comparativa das curvas características e nível de ruído entre diversos modelos de motoventiladores ensaiados. Foi efetuada uma análise das incertezas experimentais dos resultados, das variáveis medidas como a potência elétrica, caudal, ruído, rotações do motor e pressão estática do motoventilador.

Verificou-se que os motores de comutação eletrónica apresentaram reduções de consumo de energia elétrica entre 57 % a 86 % quando comparados com os motores de polos sombreados.

O aumento do ângulo de ataque nas pás permitiu aumentar a capacidade de ventilação entre 2% a 29 % provocando um aumento no consumo elétrico entre 22 % a 84 % e um aumento no ruído até 3,9 dB(A) quando utilizados em conjunto com os motores ECM ensaiados.

A menor rugosidade nas hélices permitiu aumentar ligeiramente a capacidade de ventilação, entre 3 % e 4 %. Padrão este verificado em todos os motores ensaiados sem consequência ao nível do consumo elétrico tendo em conta as incertezas associadas à sua medição.

Relativamente às geometrias ensaiadas, verificou-se que nenhuma conseguiu aliar uma capacidade de ventilação superior com uma diminuição no consumo elétrico e no nível de ruído. A seleção do conjunto de motor elétrico e hélice mais eficiente depende do ponto de funcionamento do sistema.

A utilização da hélice mais adequada relativamente à hélice menos adequada, a cada um dos parâmetros, pode aumentar a capacidade de ventilação até 31 %, ou uma diminuição no consumo elétrico até 57 % na utilização de motores ECM e 8 % na utilização de motores de polos sombreados ou uma diminuição no nível de ruído até 4,8 dB(A).

KEYWORDS

Energy Efficiency, Noise, Fan Motor, Fan Characteristic Curve, Experimental Tests

ABSTRACT

The refrigeration industry is currently following the global trend towards looking for sustainability both in terms of greenhouse gas emissions due to the refrigerant fluids used and in aspects related to the consumption of electrical energy of various components such as compressors and fans used in evaporators and condensers.

Another fundamental aspect to take into account is the noise generated by commercial and industrial refrigeration equipment.

This study focused on the fan motors and the performance analysis of electric motors of shaded poles and electronic commutation (ECM), with suction propellers of different geometries, angle of attack of blades (28° and 34°) and roughness ($0,36\ \mu\text{m}$ and $3,36\ \mu\text{m}$). The methodology used was the comparative analysis of the characteristic curves and noise level among several models of motorized ventilators tested. An analysis was made of the experimental uncertainties of the measured variables such as electric power, flow, noise level, motor speed and static pressure of the fan motor.

It was verified that the electronic commutation motors presented reductions in electrical energy consumption between 57 % to 86 % when compared with the motors of shaded poles.

The increased of angle attack on the blades allowed an increase in ventilation capacity between 2 % and 29 %, resulting in an increase in maximum electric consumption between 22 % to 84 % and an increase in noise level up to 3,9 dB(A) when used in conjunction with the ECM motors tested.

The smaller roughness in the propellers allowed to increase slightly the capacity of ventilation between 3 % and 4 % in a pattern verified in all the motors tested, not being verified significant differences in the electrical consumption.

With respect to the geometries tested, none of them could combine an upper ventilation capacity with a decrease in electrical consumption and noise level. The best geometry, to form together with the motors, depended on the point of operation of the system.

The choice of the most suitable propeller compared to the propeller less suitable for each of the parameters can increase the ventilation capacity by up to 31 % or a reduction in electrical consumption up to 57 % in the use of ECM motors and 8 % in the use of shaded pole motors or a decrease in the noise level up to 4,8 dB(A).

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------|---|
| AMCA | Air Movement and Control Association |
| ASHRAE | American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers |
| AVAC | Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado |
| DL | Decreto-Lei |
| EA | European Accreditation |
| ECM | Electronic Comutation Motor (Motor de comutação eletrónica) |
| EGL | Energy Grade Line (Linha de energia) |
| HGL | Hydraulic Energy Line (Linha piezométrica) |
| ISEP | Instituto Superior de Engenharia do Porto |
| ISO | Internacional Standard Organization (Organização internacional de normalização) |
| RGR | Regulamento Geral do Ruído |
| RRAE | Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios |

Lista de Símbolos

| | |
|---------------------------------------|--|
| \dot{V} | Caudal volúmico, [m ³ /h] |
| c_{ref} | Velocidade do som de referência [m/s] |
| c^{te} | Contante para determinação da curva de instalação [kg/m ²] |
| \dot{m} | Caudal mássico [kg/s] |
| $\Delta p_{perdas,localizadas+linha}$ | Perdas de carga localizadas e em linha [Pa] |
| $\Delta p_{sistema}$ | Perdas de carga do sistema, [Pa] |
| $\Delta p_{ventilador}$ | Pressão do ventilador, [Pa] |
| μ | Viscosidade dinâmica [N.s/m ²] |
| A_i | Área de secção transversal da conduta na posição i, [m ²] |
| C_{0i} | Coefficiente de perda localizada do elemento i |
| c_i | Coefficiente de sensibilidade associada a cada grandeza de entrada i |
| D | Diâmetro do impulsor, [mm] |
| d | Diâmetro do tubo de Pitot, [mm] |
| D_i | Diâmetro interior da conduta na posição i, [m] |
| E_i | Erro máximo considerado para o equipamento i |
| f | Coefficiente de fricção |
| g | Aceleração da gravidade [m ² /s] |
| h_u | Humidade relativa [%] |
| k | Fator de expansão associada ao intervalo de confiança |

| | |
|----------------|--|
| $L_{ar,nT}$ | Nível de avaliação da pressão sonora padronizado [dB(A)] |
| L_{den} | Nível de ruído diurno-entardecer-noturno [dB(A)] |
| L_{eqA} | Nível de pressão sonora contínua equivalente com ponderação A [dB(A)] |
| $L_{eqA, amb}$ | Nível de pressão sonora contínua equivalente ambiente com ponderação A [dB(A)] |
| L_i | Comprimento da conduta i , [m] |
| L_n | Nível de ruído noturno [dB(A)] |
| L_{pA} | Nível de pressão sonora com ponderação A [dB(A)] |
| L_{pi} | Nível de pressão sonora da fonte i [dB] |
| L_{Psoma} | Nível de pressão sonora combinada [dB(A)] |
| Ma | N.º adimensional de Mach |
| n | Número de repetições para uma medição |
| p | Pressão sonora, [μ Pa] |
| p_0 | Pressão sonora de referência, [μ Pa] |
| p_{atm} | Pressão atmosférica, [mmHg] |
| P_e | Potência elétrica, [W] |
| P_e | Potência elétrica consumida pelo motoventilador [W] |
| p_i | Pressão estática na posição i , [Pa] |
| P_r | Potência do veio do motor [W] |
| p_{sat} | Pressão de saturação, [Pa] |
| p_v | Pressão de vapor, [Pa] |
| R_a | Rugosidade média [μ m] |
| Re | Número adimensional de Reynolds |
| r_i | Resolução do equipamento i |
| T | Intervalo de tempo de integração medição da pressão sonora, [s] |
| t | Tempo de medição da medição da pressão sonora, [s] |
| T_{ar} | Temperatura de bolbo seco do ar, [°C] |
| $U(Y)$ | Incerteza expandida da grandeza Y |
| u_1 | Incerteza padrão relativa à amostragem do nível sonoro [dB(A)] |
| u_2 | Incerteza padrão relativa ao uso da instrumentação para determinação do nível sonoro [dB(A)] |
| u_3 | Incerteza padrão relativa à posição do microfone [dB(A)] |
| u_i | Incerteza padrão de cada grandeza de entrada |
| V_i | Velocidade do escoamento na posição i , [m/s] |
| x_i | Estimativa do valor da grandeza |
| z_i | Altura de elevação no ponto i [m] |
| α | Ângulo de ataque das pás das hélices, [°] |
| v_{eff} | Graus de liberdade efetivos |
| v_i | Graus de liberdade da grandeza de entrada i |
| ρ_{ar} | Massa volúmica do ar, [kg/m^3] |

| | |
|------------|--|
| σ_i | Desvio padrão da grandeza i |
| ω | Velocidade de rotação, [rpm] |
| $u(y)$ | Incerteza padrão combinada da variável y |
| η | Rendimento Global, [%] |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - FUNCIONAMENTO DE UM VENTILADOR CENTRÍFUGO. [9] | 36 |
| FIGURA 2 – VENTILADOR AXIAL DE PROPULSÃO. [10] | 36 |
| FIGURA 3 – VENTILADOR AXIAL TO TIPO TUBO-AXIAL. [10] | 37 |
| FIGURA 4 – VENTILADOR AXIAL DO TIPO VANE-AXIAL. [10] | 37 |
| FIGURA 5 – FUNCIONAMENTO DE UM VENTILADOR MISTO. [11] | 37 |
| FIGURA 6 - FUNCIONAMENTO DE UM VENTILADOR TRANSVERSAL. [7] | 38 |
| FIGURA 7 – VENTILADORES COM ENVOLVENTE. [7] | 38 |
| FIGURA 8 – VENTILADOR MURAL. [7] | 38 |
| FIGURA 9 – VENTILADOR DE JATO. [12] | 39 |
| FIGURA 10 – EXEMPLO DE UM VENTILADOR INSERIDO NUMA INSTALAÇÃO [13] | 39 |
| FIGURA 11 – EXEMPLO DE UMA CURVA DE DESEMPENHO DE UM VENTILADOR. [16] | 40 |
| FIGURA 13 - CURVA CARACTERÍSTICA DE UM VENTILADOR DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VARIÁVEL [17] | 41 |
| FIGURA 12 - CURVA CARACTERÍSTICA DE UM VENTILADOR DE ÂNGULO DE ATAQUE VARIÁVEL. [14] | 41 |
| FIGURA 14 – EXEMPLO DA EVOLUÇÃO DAS PRESSÕES AO LONGO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO. [18] | 42 |
| FIGURA 15 – PONTO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA. [21] | 44 |
| FIGURA 16 – CURVAS DE DESEMPENHO. ZONAS RECOMENDADAS. [9] | 45 |
| FIGURA 17 DESEMPENHO DEFICIENTE COM O EFEITO DO SISTEMA IGNORADO. [18] | 46 |
| FIGURA 18 – EXEMPLO DO PONTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA PARA VARIAS ROTAÇÕES DO IMPULSOR. [22] | 47 |
| FIGURA 19 – CONTROLO DO CAUDAL APÓS ALTERAÇÃO DO SISTEMA [22] | 47 |
| FIGURA 20 – EXEMPLO PARA AJUSTE E ESCOLHA DE UM VENTILADOR ADEQUADO AO SISTEMA. | 48 |
| FIGURA 21 – MOTOVENTILADOR APLICADO EM RADIADOR. [23] | 48 |
| FIGURA 22 – MOTOVENTILADORES APLICADOS EM ARMÁRIOS DE REFRIGERAÇÃO COMERCIAL [24] | 48 |
| FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO DO SOM SIMPLES ATRAVÉS DA ONDA SONORA. [26] | 49 |
| FIGURA 24 – TABELA COMPARATIVA DO LIMIAR DE AUDIÇÃO HUMANA [27] | 50 |
| FIGURA 25 – GAMA AUDÍVEL PELO OUVIDO HUMANO. [25] | 51 |
| FIGURA 26 – CURVAS DE PONDERAÇÃO A E C MOSTRANDO A RESPOSTA PARA NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA. [25] | 51 |
| FIGURA 27 – EXEMPLO DE UM ESPECTRO EM BANDA DE 1/3 DE OITAVA. [25] | 52 |
| FIGURA 28 – BANCADA EXPERIMENTAL RECORRENDO A CONDUTA NORMALIZADA. CAUDAL MEDIDO COM RECURSO AO TUBO DE PITOT [4] | 59 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 29 – BANCADA EXPERIMENTAL RECORRENDO A UMA CÂMARA DE ENSAIOS NORMALIZADA. CAUDAL MEDIDO COM RECURSO À PLACA DE ORIFÍCIOS [4] | 59 |
| FIGURA 30 – CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DO PRODUTO. [32] | 61 |
| FIGURA 31- ESQUEMATIZAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS | 71 |
| FIGURA 32 – BANCADA DE ENSAIOS EXPERIMENTAL MONTADA NO LABORATÓRIO LAVAC. | 72 |
| FIGURA 33 – ESTRUTURA DE APOIO COM ESCALA PARA MEDIÇÃO DA P_{DIN} UTILIZANDO O TUBO DE PITOT | 72 |
| FIGURA 34 – UTILIZAÇÃO DO TUBO DE PITOT | 72 |
| FIGURA 35 – ACOPLAMENTO DO MOTOVENTILADOR NA ESTRUTURA DE ENSAIO. | 73 |
| FIGURA 36 – REGISTO PARA CRIAR VARIAÇÃO NA PERDA DE CARGA | 73 |
| FIGURA 37 – POSIÇÕES DE MEDIÇÃO DA $P_{DIN,j}$ UTILIZANDO O TUBO DE PITOT. [14] | 77 |
| FIGURA 38 – A) ZONA DE MEDIÇÃO; B) SONDA DO ANEMÓMETRO DE HÉLICE; C) MULTIFUNÇÕES PARA REGISTO DA VELOCIDADE | 78 |
| FIGURA 39 – A) ZONA DE MEDIÇÃO; B) SONDA DO ANEMÓMETRO DE FIO QUENTE ACOPLADO AO CONE; C) MULTIFUNÇÕES PARA REGISTO DA VELOCIDADE | 78 |
| FIGURA 40 – PERFIL DE VELOCIDADE TEÓRICO NUMA CONDUTA DE ESCOAMENTO EM REGIME TURBULENTO DE ACORDO COM O PERFIL DE POISEUILLE. [20] | 89 |
| FIGURA 41 – DETERMINAÇÃO DA PERDA LOCALIZADA DE TRANSIÇÕES. [18] | 90 |
| FIGURA 42 – TERMOHIGRÓMETRO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE T_{AR} | 91 |
| FIGURA 43 – MULTIFUNÇÕES TSI PARA DETERMINAÇÃO DA P_{ATM}/P_1 | 93 |
| FIGURA 44 – SONDA DE HUMIDADE UTILIZADA PARA MEDIÇÃO DE HR ACOPLADA ÀS MULTIFUNÇÕES DA KIMO | 93 |
| FIGURA 45 – MEDIDOR DE POTÊNCIA UTILIZADO PARA O CÁLCULO DE P_E | 103 |
| FIGURA 46 – SONDA DO TAQUÍMETRO ÓTICO A UTILIZAR EM CONJUNTO COM MULTIFUNÇÕES KIMO | 106 |
| FIGURA 47 – SONÓMETRO CESVA SC 420 UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE L_{EQA} | 108 |
| FIGURA 48 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MOTOR 1 EM ENSAIO. | 143 |
| FIGURA 49 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MOTOR 2 EM ENSAIO. | 143 |
| FIGURA 50 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MOTOR 4 EM ENSAIO. | 143 |
| FIGURA 51 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MOTOR 3 EM ENSAIO. | 143 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 – BANDAS DE FREQUÊNCIA CENTRAIS PARA UTILIZAÇÃO NO ESPECTRO SONORO OITAVAS E 1/3 DE OITAVAS. [28] | 53 |
| TABELA 2 – QUADRO-RESUMO DOS REQUISITOS DO RUÍDO AMBIENTE EXTERIOR ESTABELECIDOS NO ARTIGO 11º DO RGR | 55 |
| TABELA 3 – QUADRO RESUMO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DO RRAE PARA EQUIPAMENTOS DE FUNCIONAMENTO CONTINUO E INTERMITENTE | 56 |
| TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS HÉLICES ENSAIADAS | 67 |
| TABELA 5 – DADOS TÉCNICOS DOS MOTORES ENSAIADOS | 68 |
| TABELA 6 – COMPARAÇÕES REALIZADAS PELA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE DAS PÁS | 70 |
| TABELA 7 – COMPARAÇÕES REALIZADAS PELA RUGOSIDADE NAS HÉLICES..... | 70 |
| TABELA 8 – COMPARAÇÕES REALIZADAS PELA GEOMETRIA DAS HÉLICES..... | 70 |
| TABELA 9 – COMPARAÇÕES REALIZADAS POR TIPO DE MOTOR..... | 71 |
| TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS . | 75 |
| TABELA 11 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE \dot{V} (MÉTODO DO ANEMÓMETRO DE HÉLICE)..... | 80 |
| TABELA 12 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE \dot{V} (MÉTODO DO ANEMÓMETRO DE HÉLICE)..... | 80 |
| TABELA 13 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE \dot{V} (MÉTODO DO CONE)..... | 81 |
| TABELA 14 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE \dot{V} (MÉTODO DO CONE) | 82 |
| TABELA 15 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE \dot{V} (MÉTODO DO TUBO DE PITOT) | 84 |
| TABELA 16 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE \dot{V} (MÉTODO DO TUBO DE PITOT) | 85 |
| TABELA 17 – RESULTADOS DA MEDIÇÃO DO CAUDAL DE ACORDO COM OS 3 MÉTODOS..... | 86 |
| TABELA 18 – DIFERENÇAS DA MEDIÇÃO DE \dot{V} PELOS MÉTODOS DO TUBO DE PITOT E ANEMÓMETRO DE HÉLICE | 87 |
| TABELA 19 – DIFERENÇAS DA MEDIÇÃO DE \dot{V} PELOS MÉTODOS DO TUBO DE PITOT E MÉTODO DO CONE | 87 |
| TABELA 20 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE μ | 92 |
| TABELA 21 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO μ | 92 |
| TABELA 22 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE P_{AR} | 94 |
| TABELA 23 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO P_{AR} | 95 |
| TABELA 24 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE R_E | 96 |
| TABELA 25 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO R_E | 97 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 26 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE f | 98 |
| TABELA 27 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO f | 98 |
| TABELA 28 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE P_1 | 99 |
| TABELA 29 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO P_1 | 99 |
| TABELA 30 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE $\Delta P_{\text{VENTILADOR}}$ | 101 |
| TABELA 31 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE $\Delta P_{\text{VENTILADOR}}$ | 102 |
| TABELA 32 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE P_E | 104 |
| TABELA 33 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE P_E | 104 |
| TABELA 34 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE η | 105 |
| TABELA 35 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE η | 106 |
| TABELA 36 – ESQUEMA DAS QUANTIDADES E INCERTEZAS ASSOCIADAS À DETERMINAÇÃO DE ω | 107 |
| TABELA 37 – DETERMINAÇÃO DE K ASSOCIADO À DETERMINAÇÃO DE ω | 107 |
| TABELA 38 – EQUAÇÕES DAS CURVAS DE INSTALAÇÃO | 113 |
| TABELA 39 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 3 / B E 3 / A | 116 |
| TABELA 40 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 4 / B E 4 / A | 118 |
| TABELA 41 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 1 / C E 1 / D | 120 |
| TABELA 42 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 4 / C E 4 / D | 122 |
| TABELA 43 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 3 / C E 3 / D | 124 |
| TABELA 44 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 1 / E, 1 / F E 1 / A | 127 |
| TABELA 45 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 4 / E E 4 / F..... | 129 |
| TABELA 46 – RUÍDO EM REGIME DE ESCOAMENTO LIVRE DOS CONJUNTOS 3 / E, 3 / F..... | 131 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO 1 – PERFIL DE VELOCIDADES MEDIDAS NA SECÇÃO DE MEDIÇÃO UTILIZANDO O TUBO DE PITOT PARA P_1 IGUAL A 19 PA..... | 87 |
| GRÁFICO 2 – PERFIL DE VELOCIDADES MEDIDAS NA SECÇÃO DE MEDIÇÃO UTILIZANDO O TUBO DE PITOT PARA P_1 IGUAL A 22 PA..... | 87 |
| GRÁFICO 3 – PERFIL DE VELOCIDADES MEDIDAS NA SECÇÃO DE MEDIÇÃO UTILIZANDO O TUBO DE PITOT PARA P_1 IGUAL A 26 PA..... | 88 |
| GRÁFICO 4 – PERFIL DE VELOCIDADES MEDIDAS NA SECÇÃO DE MEDIÇÃO UTILIZANDO O TUBO DE PITOT PARA P_1 IGUAL A 28 PA..... | 88 |
| GRÁFICO 5 – PERFIL DE VELOCIDADES MEDIDAS NA SECÇÃO DE MEDIÇÃO UTILIZANDO O TUBO DE PITOT PARA P_1 IGUAL A 32 PA..... | 88 |
| GRÁFICO 6 – PERFIL DE VELOCIDADES MEDIDAS NA SECÇÃO DE MEDIÇÃO UTILIZANDO O TUBO DE PITOT PARA P_1 IGUAL A 35 PA..... | 88 |
| GRÁFICO 7 – CURVAS $\Delta p_{\text{Ventilador}} = f(\dot{V})$ | 114 |
| GRÁFICO 8 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO CAUDAL..... | 114 |
| GRÁFICO 9 – CURVAS $Pe = f(\dot{V})$ | 115 |
| GRÁFICO 10 - DIFERENÇA PERCENTUAL NA POTÊNCIA. 3 / A VS 3 / B..... | 115 |
| GRÁFICO 11 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$ | 115 |
| GRÁFICO 12 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO RUÍDO. | 115 |
| GRÁFICO 13 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$ | 116 |
| GRÁFICO 14 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO CAUDAL..... | 116 |
| GRÁFICO 15 – CURVAS $Pe = f(\dot{V})$ | 117 |
| GRÁFICO 16 - DIFERENÇA PERCENTUAL NA POTÊNCIA. 4 / A VS 4 / B..... | 117 |
| GRÁFICO 17 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$ | 117 |
| GRÁFICO 18 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO RUÍDO. | 117 |
| GRÁFICO 19 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$ | 118 |
| GRÁFICO 20 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO CAUDAL..... | 118 |
| GRÁFICO 21 – CURVAS $Pe = f(\dot{V})$ | 119 |
| GRÁFICO 22 - DIFERENÇA PERCENTUAL NA POTÊNCIA. 1 / C VS 1 / D..... | 119 |
| GRÁFICO 23 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$ | 119 |
| GRÁFICO 24 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO RUÍDO. | 119 |
| GRÁFICO 25 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$ | 120 |
| GRÁFICO 26 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO CAUDAL..... | 120 |
| GRÁFICO 27 – CURVAS $Pe = f(\dot{V})$ | 121 |
| GRÁFICO 28 - DIFERENÇA PERCENTUAL NA POTÊNCIA. 4 / C VS 4 / D..... | 121 |
| GRÁFICO 29 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$ | 121 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 30 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO RUÍDO. | 121 |
| GRÁFICO 31 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$ | 122 |
| GRÁFICO 32 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO CAUDAL..... | 122 |
| GRÁFICO 33 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$ | 123 |
| GRÁFICO 34 - DIFERENÇA PERCENTUAL NA POTÊNCIA. 3 / C VS 3 / D..... | 123 |
| GRÁFICO 35 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$ | 123 |
| GRÁFICO 36 - DIFERENÇA PERCENTUAL NO RUÍDO. | 123 |
| GRÁFICO 37 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1 / C VS 1 / A VS 1 / E VS 1 / F. | 125 |
| GRÁFICO 38 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 1 / C VS 1 / A VS 1 / E VS 1 / F. | 125 |
| GRÁFICO 39 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 1 / C VS 1 / A VS 1 / E VS 1 / F..... | 126 |
| GRÁFICO 40 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f\dot{V}$. 4/ C VS 4 / A VS 4 / E VS 4 / F..... | 127 |
| GRÁFICO 41 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 4/ C VS 4 / A VS 4 / E VS 4 / F..... | 128 |
| GRÁFICO 42 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 4/ C VS 4 / A VS 4 / E VS 4 / F..... | 128 |
| GRÁFICO 43 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 3/ C VS 3/ A VS 3 / E VS 3 / F..... | 129 |
| GRÁFICO 44 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 3 / C VS 3 / A VS 3 / E VS 3 / F..... | 130 |
| GRÁFICO 45 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 3 / C VS 3 / A VS 3 / E VS 3 / F..... | 130 |
| GRÁFICO 46 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A..... | 132 |
| GRÁFICO 47 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A..... | 133 |
| GRÁFICO 48 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A..... | 133 |
| GRÁFICO 49 – CURVAS $\eta = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A..... | 134 |
| GRÁFICO 50 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1 / C VS 4 / C VS 3 / C..... | 134 |
| GRÁFICO 51 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 1 / C VS 4 / C VS 3 / C..... | 135 |
| GRÁFICO 52 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 1 / C VS 4 / C VS 3 / C..... | 135 |
| GRÁFICO 53 – CURVAS $\eta = f(\dot{V})$. 1 / C VS 4 / C VS 3 / C..... | 136 |
| GRÁFICO 54 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E..... | 136 |
| GRÁFICO 55 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E..... | 137 |
| GRÁFICO 56 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E..... | 137 |
| GRÁFICO 57 – CURVAS $\eta = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E..... | 138 |
| GRÁFICO 58 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1/ F VS 4/ F VS 3 / F..... | 138 |
| GRÁFICO 59 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 1/ F VS 4/ F VS 3 / F..... | 139 |
| GRÁFICO 60 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 1 / F VS 4 / F VS 3 / F..... | 139 |
| GRÁFICO 61 – CURVAS $\eta = f(\dot{V})$. 1 / F VS 4 / F VS 3 / F..... | 140 |
| GRÁFICO 62 – CURVAS $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B..... | 140 |
| GRÁFICO 63 – CURVAS $P_e = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B..... | 141 |
| GRÁFICO 64 – CURVAS $Leq, A = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B..... | 141 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 65 – CURVAS $\eta = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B..... | 142 |
| GRÁFICO 66 – TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO E POUPANÇA ANUAL | 145 |
| GRÁFICO 67 – CONSUMO ELÉTRICO ANUAL. MOTOR 4 VS MOTOR 1 | 145 |

ÍNDICE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 31 |
| 1.1 | A EMPRESA SKK – MISSÃO E VISÃO | 31 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO..... | 31 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 32 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 35 |
| 2.1 | VENTILADORES | 35 |
| 2.1.1 | APLICAÇÕES..... | 35 |
| 2.1.2 | CLASSIFICAÇÃO DE VENTILADORES..... | 35 |
| 2.1.2.1 | CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO NÍVEL DE PRESSÃO..... | 35 |
| 2.1.2.2 | CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O PERCURSO DO ESCOAMENTO DE AR | 35 |
| 2.1.2.3 | CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A FUNÇÃO PRÉ-DESIGNADA | 38 |
| 2.1.3 | CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTILADORES | 39 |
| 2.1.4 | CURVA DA INSTALAÇÃO | 41 |
| 2.1.5 | PONTO DE FUNCIONAMENTO..... | 44 |
| 2.1.5.1 | ZONA DE FUNCIONAMENTO RECOMENDÁVEL | 45 |
| 2.1.5.2 | PONTO DE FUNCIONAMENTO REAL | 45 |
| 2.1.6 | CONTROLO DE CAUDAL..... | 47 |
| 2.1.7 | MOTOVENTILADORES | 48 |
| 2.2 | O SOM | 49 |
| 2.2.1 | PERCEÇÃO DO OUVIDO HUMANO E ESCALA DE MEDIÇÃO DO SOM..... | 50 |
| 2.2.2 | ESPECTRO EM BANDAS DE FREQUÊNCIA | 52 |
| 2.2.3 | NÍVEL DE PRESSÃO SONORA | 53 |
| 2.2.3.1 | NÍVEL DE PRESSÃO SONORA COMBINADA | 54 |
| 2.2.3.2 | NÍVEL DE PRESSÃO SONORA CONTINUA E EQUIVALENTE..... | 54 |
| 2.2.4 | POTÊNCIA SONORA | 55 |
| 2.2.5 | LEGISLAÇÃO – RUÍDO | 55 |
| 2.2.5.1 | RUÍDO AMBIENTAL | 55 |
| 2.2.5.2 | RUÍDO EM EDIFÍCIOS..... | 56 |
| 2.2.5.3 | REGULAMENTO ECODESING REG (EU) 2016/2281 | 57 |
| 2.2.5.4 | REGULAMENTO ECODESING REG (EU) 2015/1095 | 57 |
| 2.2.6 | RUÍDO EM VENTILADORES | 57 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.2.7 | ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE EM SISTEMAS DE VENTILAÇÃO | 58 |
| 2.3 | ENSAIOS NORMALIZADOS | 58 |
| 2.3.1 | ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA | 58 |
| 2.3.2 | ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RUÍDO | 60 |
| 2.4 | INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES | 60 |
| 2.4.1 | AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA ÀS GRANDEZAS CONSIDERADAS [32] [33] 61 | |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 67 |
| 3.1 | CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS | 67 |
| 3.1.1 | HÉLICES | 67 |
| 3.1.2 | MOTORES | 68 |
| 3.2 | CONJUNTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO | 69 |
| 3.3 | DESCRIÇÃO GERAL DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL | 71 |
| 3.3.1 | BANCADA DE ENSAIOS | 71 |
| 3.3.2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 74 |
| 3.3.3 | DESVIOS RELATIVAMENTE ÀS NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE DESEMPENHO 75 | |
| 3.3.4 | EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO | 75 |
| 3.3.5 | AVALIAÇÃO DO CAUDAL, \dot{V} | 76 |
| 3.3.5.1 | MEDIÇÕES E INCERTEZAS DE \dot{V} , OBTIDO PELO MÉTODO DO ANEMÓMETRO DE HÉLICE | 79 |
| 3.3.5.2 | MEDIÇÕES E INCERTEZAS DE \dot{V} , OBTIDO PELO MÉTODO DO CONE | 81 |
| 3.3.5.3 | MEDIÇÕES E INCERTEZAS DE \dot{V} , OBTIDO PELO MÉTODO DO TUBO DE PITOT | 82 |
| 3.3.5.4 | ESCOLHA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE CAUDAL, \dot{V} | 85 |
| 3.3.6 | AVALIAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA DE ELEVAÇÃO DO MOTOVENTILADOR, $\Delta p_{\text{ventilador}}$ | 89 |
| 3.3.6.1 | DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA Á ENTRADA DO VENTILADOR | 89 |
| 3.3.6.2 | INCERTEZAS NA MEDIÇÃO de $\Delta p_{\text{ventilador}}$ | 91 |
| 3.3.7 | AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA ELECTRICA, P_e | 103 |
| 3.3.7.1 | INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE P_e | 103 |
| 3.3.8 | AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO GLOBAL, η | 104 |
| 3.3.8.1 | INCERTEZAS DO CÁLCULO DE η | 105 |
| 3.3.9 | AVALIAÇÃO DAS ROTAÇÕES DO MOTOR, ω | 106 |
| 3.3.9.1 | INCERTEZAS DO CÁLCULO DE ω | 106 |
| 3.3.10 | AVALIAÇÃO DO RUÍDO | 108 |
| 3.3.10.1 | DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO SONORA | 108 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.3.10.2 | INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DO RUÍDO..... | 108 |
| 4 | RESULTADOS | 113 |
| 4.1 | ANÁLISE DO IMPACTO DO ÂNGULO DE ATAQUE NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES | 114 |
| 4.2 | ANÁLISE DO IMPACTO DA RUGOSIDADE DAS HÉLICES NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES .. | 118 |
| 4.3 | ANÁLISE DO IMPACTO DA GEOMETRIA DAS HÉLICES NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES ... | 125 |
| 4.4 | ANÁLISE DO IMPACTO DOS MOTORES UTILIZADOS NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES | 132 |
| 4.5 | ANÁLISE ECONÓMICA | 144 |
| 4.5.1 | TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO | 144 |
| 4.5.2 | ESTIMATIVA DA POUPANÇA ENERGÉTICA ANUAL RESULTANTE DA TROCA DE MOTORES .. | 145 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 149 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA..... | 153 |
| 7 | ANEXOS..... | 157 |
| 7.1 | MEMÓRIA DE CÁLCULO | 157 |
| 7.1.1 | CAUDAL – ANEMÓMETRO DE HÉLICE | 157 |
| 7.1.2 | ROTAÇÕES DO MOTOR..... | 159 |
| 7.1.3 | PRESSÕES ESTÁTICAS DO MOTOVENTILADOR | 160 |
| 7.1.4 | POTÊNCIA ELÉTRICA | 169 |
| 7.1.5 | RENDIMENTO | 170 |
| 7.1.6 | RUÍDO..... | 171 |
| 7.2 | TABELAS COM OS VALORES MEDIDOS/CALCULADOS DE TODOS OS CONJUNTO | 172 |
| 7.3 | EQUAÇÕES DAS CURVAS CARACTERISTICAS DOS VENTILADORES OBTIDAS POR LINHAS DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE GRAU 6..... | 180 |
| 7.4 | VALORES RESULTANTES DAS INTERCEPÇÕES DAS CURVAS CARACTERISTICAS COMS AS CURVAS TEÓRICAS DE INSTALAÇÃO..... | 183 |

INTRODUÇÃO

- 1.1 A EMPRESA SKK – MISSÃO E VISÃO**
- 1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO**
- 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

1 INTRODUÇÃO

1.1 A EMPRESA SKK – MISSÃO E VISÃO

A empresa SKK – Refrigeração e climatização, Lda, atua na distribuição de equipamentos para sistemas de refrigeração e ar condicionado apoiando os seus clientes ativamente na procura das melhores soluções técnicas que satisfaçam os seus requisitos, compromissos e/ou obrigações legais.

A procura da inovação, solidez e fiabilidade de equipamentos e produtos comercializados é uma prioridade constante assim como a implementação da eficiência energética dos mesmos, que considera como pontos críticos na apresentação de soluções técnicas nas áreas de refrigeração, transferência de calor e ar condicionado.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

Os motoventiladores comercializados pela SKK, são amplamente utilizados como parte integrante de condensadores e evaporadores utilizados em equipamentos de refrigeração comercial, mas também como parte integrante de sistemas de aquecimento e arrefecimento do ar assim como sistemas de ventilação.

A preocupação da empresa com a sustentabilidade e com o consumo de energia elétrica dos equipamentos e ruído provocado pelos seus equipamentos vem ganhando destaque nos últimos anos e vai de encontro com as preocupações da União Europeia (EU) que vem criando e aplicando medidas e políticas europeias para minimizar o consumo elétrico visando a produção de equipamentos mais eficientes.

Recentemente a EU publicou regulamentos que dão execução à Diretiva 2009/125/EC [1], para o cumprimento de requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia e sua etiquetagem energética, entre os quais estão inseridos os equipamentos de refrigeração profissional (REG (UE) 2015/1095 [2] e REG (UE) 2015/1094 [3]) e sistemas de aquecimento e arrefecimento do ar (REG (UE) 2016/2281 [4]) na qual podem fazer parte integrante os motoventiladores.

Relativamente ao ruído, aos equipamentos de refrigeração comercial de acordo com [1] não são impostos requisitos. No que diz respeito aos sistemas de aquecimento e arrefecimento do ar de acordo com [2], apesar do regulamento não impor requisito máximo o valor da potência sonora L_{WA} medida nas condições regulamentadas está limitada relativamente ao valor declarado.

Para projetos de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, AVAC, o Ministério das Obras Públicas, através da Portaria n.º 701-H2008 [5] impõem através do artigo 44, alínea h) que deve haver uma “Discriminação e especificação detalhada das medidas de acondicionamento

acústico com análise prospetiva de desempenho”. O Decreto lei n.º 96/2008 [6], com o Regulamento dos Requisitos Acústicos em Edifícios, RRAE, impõem níveis de avaliação acústica máxima quer para edifícios habitacionais ou mistos, quer para edifícios de serviço.

Com vista a fornecer soluções mais eficientes a empresa pretende alterar e substituir os motores de polos sombreados por motores teoricamente mais eficientes do tipo *Electronic Comutation Motor* (ECM).

Como tal a pretende comparar o desempenho dos motores de polos sombreados e ECM que comercializa assim como avaliar o impacto da utilização destes motores com a utilização de hélices de sucção de diferentes geometrias, ângulos de ataque das pás e rugosidades de modo a encontrar a solução mais eficiente.

O desempenho dos conjuntos será avaliado comparando a capacidade de ventilação, rendimento global, consumo elétrico e ruído provocado, analisando curvas características determinadas por ensaios experimentais. Além do desempenho será realizada uma análise económica estimando a poupança no consumo elétrico e o retorno de investimento com a troca do tipo de motores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos incluindo um capítulo introdutório, bibliografia e anexos.

O capítulo 1 serve de introdução ao tema e aos objetivos do trabalho.

No capítulo 2 serão abordados conceitos teóricos relacionados com o princípio de funcionamento dos ventiladores, propagação e controlo do ruído. Serão apresentadas metodologias para determinação das curvas características e ruído de funcionamento dos motoventiladores.

No terceiro capítulos será realizado a descrição dos produtos a ensaiar, os equipamentos utilizados nos ensaios, procedimento experimental adotado para a determinação das curvas características e do ruído de funcionamento dos motoventiladores e o método de comparação/ avaliação dos resultados. Associado aos ensaios realizados, serão descritas as fontes de incerteza a metodologias de cálculo adotadas.

No quarto capítulo será apresentada a análise dos resultados experimentais e a análise económica.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais baseadas nos ensaios experimentais realizados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VENTILADORES

- 2.1.1 APLICAÇÕES
- 2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DE VENTILADORES
- 2.1.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTILADORES
- 2.1.4 CURVA DA INSTALAÇÃO
- 2.1.5 PONTO DE FUNCIONAMENTO
- 2.1.6 CONTROLO DE CAUDAL
- 2.1.7 MOTOVENTILADORES

2.2 O SOM

- 2.2.1 PERCEPÇÃO DO OUVIDO HUMANO E ESCALA DE MEDIÇÃO DO SOM
- 2.2.2 ESPECTRO EM BANDAS DE FREQUÊNCIA
- 2.2.3 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA
- 2.2.4 POTÊNCIA SONORA
- 2.2.5 LEGISLAÇÃO – RUÍDO
- 2.2.6 RUÍDO EM VENTILADORES
- 2.2.7 ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE EM SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

2.3 ENSAIOS NORMALIZADOS

- 2.3.1 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA
- 2.3.2 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RUÍDO

2.4 INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES

- 2.4.1 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA ÀS GRANDEZAS CONSIDERADAS [32] [33]

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VENTILADORES

Ventiladores são turbomáquinas utilizadas para adicionar energia ao ar. Essa energia é proveniente, da rotação do impulsor que transfere energia estática e cinética, em diferentes proporções dependendo do tipo de ventilador.

O aumento dessa energia é sentida por um aumento da pressão do fluido, permitindo o escoamento de ar e proporcionando um caudal desejável tendo em conta a finalidade do sistema de ventilação.

2.1.1 APLICAÇÕES

A aplicação dos ventiladores é vasta. Pode-se encontra-los em sistemas de ventilação em edifícios de comércio, serviços e residenciais, em sistemas de exaustão, armazéns, garagens e muitos outros casos. Geralmente os ventiladores funcionam em conjunto com outros componentes como sejam filtros, baterias de aquecimento, arrefecimento fazendo parte integrante de unidades de tratamento de ar utilizadas na climatização. São também muito aplicados em equipamentos industriais e domésticos. Como exemplos relacionados com a indústria é de salientar a refrigeração de produtos alimentares em que quase todos os condensadores e evaporadores utilizam ventiladores.

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DE VENTILADORES

Os ventiladores podem ser classificados de várias formas, sendo que para um mesmo tipo de ventilador pode-se encaixa-lo em mais do que uma denominação [7].

2.1.2.1 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO NÍVEL DE PRESSÃO

- **Baixa pressão:** equipamentos com capacidade de atuação até 70 Pa;
- **Média pressão:** equipamentos com capacidade para atuar na gama entre 70 Pa e 3000 Pa;
- **Alta pressão:** equipamentos com capacidade de atuar acima de 3000 Pa.

2.1.2.2 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O PERCURSO DO ESCOAMENTO DE AR

De acordo com [8], pode-se classificar os ventiladores, segundo o percurso do ar como:

- **Centrífugos:** o escoamento de ar entra axialmente através do flange de entrada da carcaça do equipamento produzindo uma pressão, conforme Figura 1, resultante da força centrífuga criada pela rotação da coluna de ar contida entre as pás do impulsor, e energia cinética transmitida ao ar pela velocidade do impulsor. As pás do rotor podem estar curvadas para a frente, para trás ou serem radiais;
- **Axiais:** a entrada e saída do escoamento de ar é axial. Produz pressão pela mudança de velocidade do ar quando passa pelas pás do impulsor. Dentro dos ventiladores axiais podem ser classificados como ventiladores de propulsão, tubo-axial e vane-axial.

O ventilador de propulsão, Figura 2, é um ventilador simples constituído pelas hélices e o próprio motor.

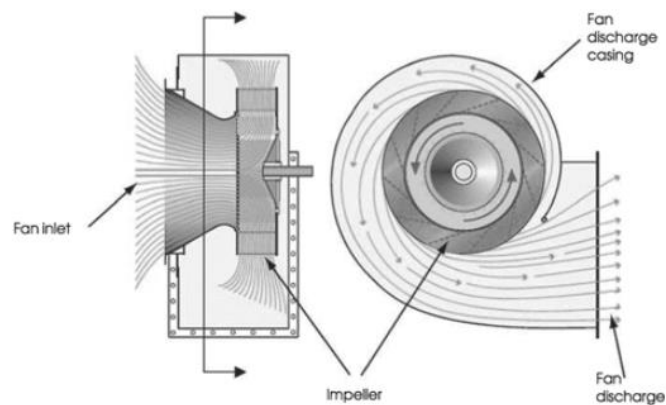


Figura 1 - Funcionamento de um ventilador centrífugo. [9]



Figura 2 – Ventilador axial de propulsão. [10]

O ventilador tubo-axial, Figura 3, resulta de um ventilador onde o impulsor é colocado dentro de um tubo para facilmente se interligar com condutas.



Figura 3 – Ventilador axial do tipo tubo-axial. [10]

O ventilador vane-axial, Figura 4, difere do tubo-axial por ter após o impulsor lâminas retificadas de escoamento de ar.

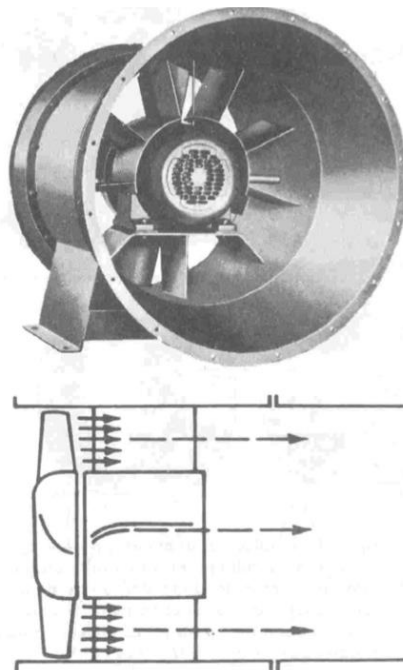


Figura 4 – Ventilador axial do tipo vane-axial. [10]

- **Mistos:** combina as características axiais e centrifugas, conforme Figura 5. Utilizado em aplicações onde a entrada ou a saída do escoamento de ser axial;

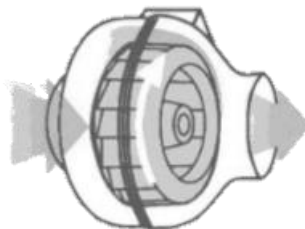


Figura 5 – Funcionamento de um ventilador misto. [11]

- **Tangenciais:** o escoamento de ar entra e sai radialmente pelo equipamento conforme Figura 6.

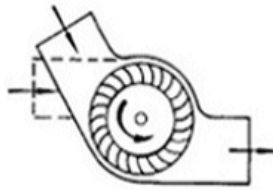


Figura 6 - Funcionamento de um ventilador transversal. [7]

2.1.2.3 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A FUNÇÃO PRÉ-DESIGNADA

- **Ventiladores com envolvente:** Ventiladores acoplados geralmente em condutas, conforme Figura 7, podendo ser do tipo:
 - Sopradores, quando a entrada é livre e a saída é tubular (Tipo B);
 - Extrator, quando a entrada é tubular e a saída é livre (Tipo C);
 - Soprador e extrator quando ambas as extremidades têm acopladas tubos de circulação (Tipo D).

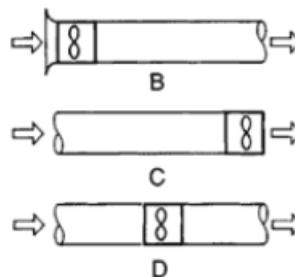


Figura 7 – Ventiladores com envolvente. [7]

- **Ventiladores murais:** quando têm a capacidade de serem acoplados geralmente a paredes sendo que a sua função é retirar fluxo de uma divisão para outra, conforme Figura 8;

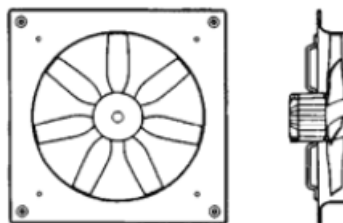


Figura 8 – Ventilador mural. [7]

- **Ventiladores de jato:** quando o objetivo é apenas fazer circular o ar pelo local fazê-lo incidir num determinado objeto conforme Figura 9.



Figura 9 – Ventilador de jato. [12]

2.1.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTILADORES

Geralmente um ventilador não atua isoladamente, mas como parte integrante de um sistema ou instalação cujo funcionamento assegura.

A Figura 10, exemplifica uma utilização de um ventilador num sistema de transporte de ar. O ventilador tem como função transferir ar desde o ponto 1, que se encontra a uma pressão estática, P_1 , até ao ponto 2, que se encontra a uma pressão estática P_2 , tendo que vencer as perdas de carga e a altura de elevação entre os pontos 1 e 2.

As exigências de projeto podem variar nomeadamente ao que toca no controlo do caudal volúmico que é necessário transportar ou no controlo da pressão estática dos locais.

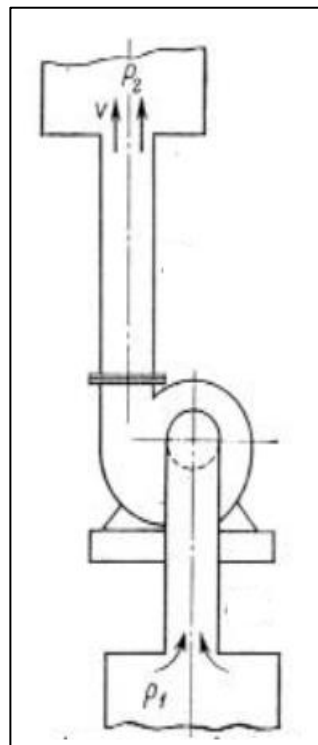


Figura 10 – Exemplo de um ventilador inserido numa instalação [13]

O comportamento dos ventiladores é variável e depende de várias grandezas. Uma adequada combinação das variáveis permite a escolha do ventilador adequado às condições estabelecidas em projeto. As variáveis que caracterizam o funcionamento dos ventiladores são as seguintes:

- Velocidade de rotação, ω , do impulsor;
- Caudal volúmico, \dot{V} ;
- Potência do veio, P_r , do motor;
- Elevação da pressão, $\Delta_{p,\text{ventilador}}$, disponível;
- Rendimento Global, η ;
- Diâmetro do impulsor, D ;
- Ângulo de ataque, α , das pás;

O único indicador real do desempenho dos ventiladores encontra-se em ensaios realizados segundo por exemplo, as normas ISO 5801 [14] ou AMCA 210 [15], que definem procedimentos e metodologias experimentais para a obtenção das curvas características.

Na Figura 11 está representada uma curva característica de um ventilador que representa, para uma determinada velocidade de rotação, ω , diâmetro do impulsor, e ângulo de ataque das pás, α , a percentagem de variação de $\Delta_{p,\text{ventilador}}$, P_r e η com a percentagem do caudal, \dot{V} .

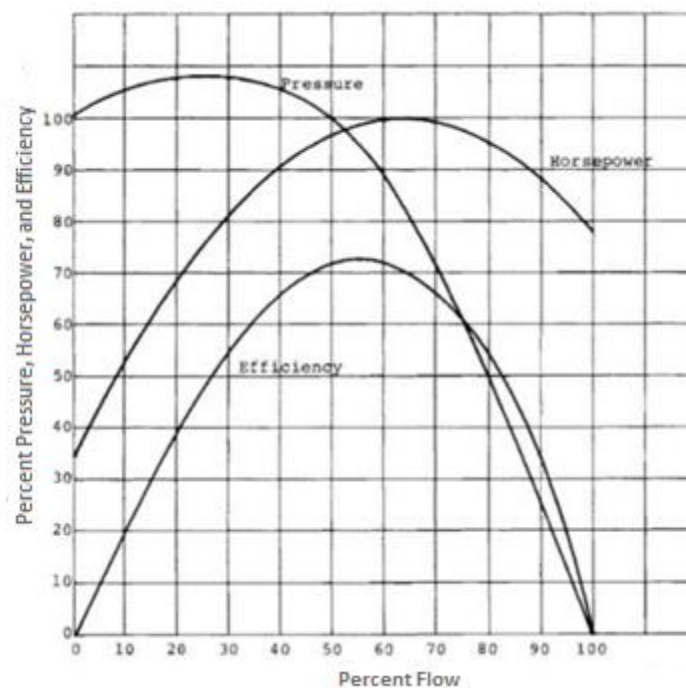


Figura 11 – Exemplo de uma curva de desempenho de um ventilador. [16]

Analisando as curvas da Figura 11, verifica-se o seguinte:

- Para um fornecimento livre ($\Delta p_{ventilador} = 0$), o caudal, \dot{V} , fornecido é máximo. As condições de fornecimento livre podem ser atingidas quando na instalação não há perda de carga na entrada ou saída;
- Para o caudal de ar nulo ($\dot{V} = 0$), $\Delta p_{ventilador}$ corresponde à carga de fecho que pode ou não corresponder ao seu valor máximo. A queda da pressão verificada nesta zona, relativamente ao valor máximo verificado, é resultado de instabilidade do ventilador não sendo recomendado a sua utilização nesta zona;
- O rendimento, η , é nulo nas condições de caudal nulo e máximo.

Outros gráficos podem ser fornecidos pelos fabricantes quando o ventilador tem capacidade de ajustar as velocidades de rotação e/ou ângulos de ataque das pás conforme Figuras 12 e 13.

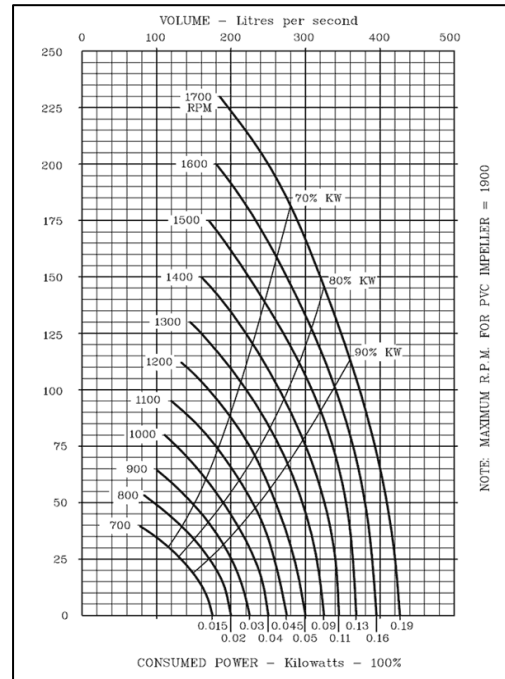
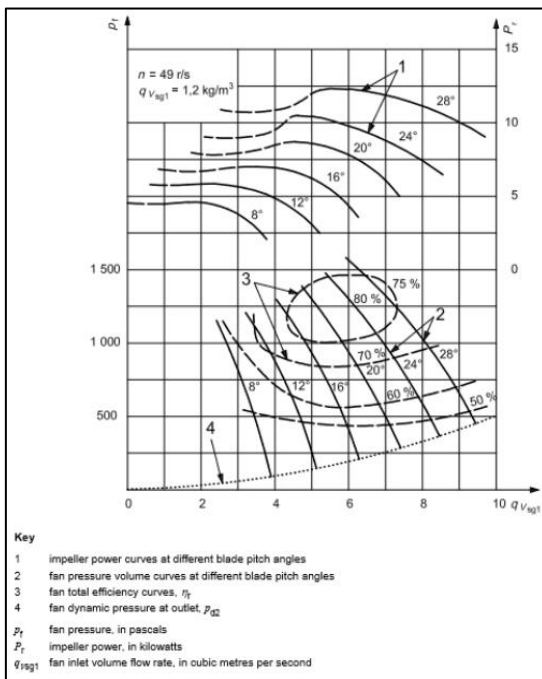


Figura 13 - Curva característica de um ventilador de ângulo de ataque variável. [14]

Figura 12 - Curva característica de um ventilador de velocidade de rotação variável [17]

2.1.4 CURVA DA INSTALAÇÃO

Num sistema de ventilação, ao ventilador geralmente são acoplados tubos e acessórios para conseguir escoar ar de um local para outro, com um caudal desejado. Todos estes elementos provocam resistência à passagem do escoamento. À medida que o ar escoar pelo sistema a sua linha energética diminui. Para que o escoamento possa ser realizado nas condições pretendidas

é necessário que o sistema receba essa energia dissipada. O ventilador é o responsável para equilibrar o sistema.

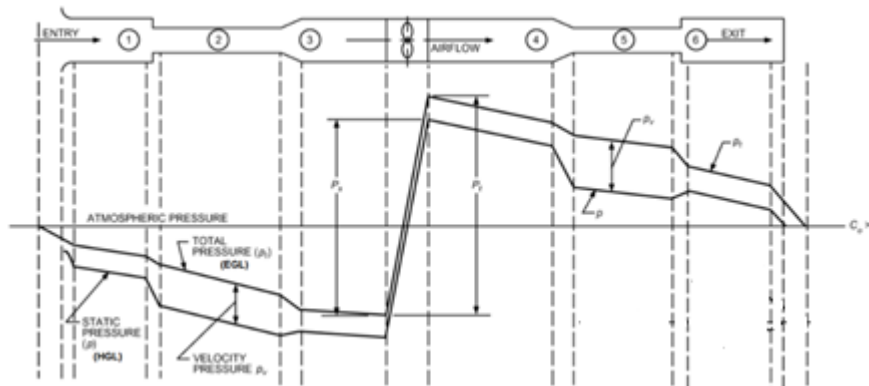


Figura 14 – Exemplo da evolução das pressões ao longo de um sistema de ventilação. [18]

A evolução das perdas e dos ganhos do sistema pode ser analisado pela evolução da linha de energia, *EGL*, e a linha piezométrica, *HGL*, como por exemplo a Figura 14.

É útil traçar uma curva de instalação, que forneça a evolução da mesma em função perdas de carga do sistema do caudal que se pretende.

Utilizando a equação da energia na análise da Figura 14, admitindo escoamento permanente, incompressível, turbulento e com a utilização de um dispositivo de geração de trabalho mecânico (ventilador), e aplicando a equação genérica entre o ponto 2 e o ponto 5 obtém-se a seguinte equação [19], [20]:

$$\begin{aligned}
 p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot V_2^2 + z_2 \cdot \rho \cdot g + \Delta p_{ventilador} &= p_5 + \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot V_5^2 + z_5 \cdot \rho_{ar} \cdot g + \Delta p_{perdas\ localizadas+linha} \\
 &\Leftrightarrow \Delta p_{ventilador} = \\
 (p_5 - p_2) + (z_5 - z_2) \cdot \rho_{ar} \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot (V_5^2 - V_2^2) + \sum_{i=0}^n \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2 \cdot \left(f_i \cdot \frac{L_i}{D_i} + C_{0i} \right) \right] & \quad (1)
 \end{aligned}$$

Onde,

p_2 – pressão estática no ponto 2, [Pa];

p_5 – pressão estática no ponto 5, [Pa];

ρ_{ar} – massa volúmica do ar [kg/m³];

V_2 – velocidade média do escoamento no ponto 2, [m/s];

V_5 – velocidade média do escoamento no ponto 5, [m/s];

z_2 – altura de elevação do ponto 2, [m];

z_5 – altura de elevação do ponto 5, [m];

f_i – fator de fricção associado à conduta i ;

L_i – comprimento da conduta i , [m];

D_i – diâmetro interior da conduta i , [m];

C_{0i} – coeficiente de perda localizada do acessório i

V_i – velocidade do ar na conduta i , [m/s];

g – aceleração da gravidade [9,81 m/s²].

Definindo-se para o sistema, um volume de controlo com os pontos 2 e 5, considerando dimensões da conduta iguais então V_2 e V_5 são iguais.

Atendendo à conservação de massa aplicada ao escoamento do ar, admitindo um sistema sem transferência de energia por calor:

$$\dot{m} = \int \rho \cdot V \cdot dA = \text{constante} \quad [kg/s] \quad (2)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (3)$$

\dot{m} – caudal mássico

ρ – massa volúmica do fluido [kg/m³];

V – velocidade média do fluido na direção normal [m/s];

A – área da secção transversal da conduta [m²].

Admitindo-se a incompressibilidade do ar, correspondendo a n.º de Mach inferior a 0,15 [14]:

$$Ma = \frac{V}{c_{ref}} \quad (4)$$

Onde:

c_{ref} – velocidade do som, correspondente a 343,3 [m/s]

Então ρ é contante, de modo que:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_5 = \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = A \cdot V \quad [m^3/s] \quad (5)$$

Logo pode-se reescrever a velocidade em qualquer ponto como:

$$V_i = \frac{\dot{V}}{A_i} = \frac{\dot{V}}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot D_i\right)^2} \quad [m/s] \quad (6)$$

Substituindo a equação (6) em (1):

$$\Delta p_{ventilador} = (p_5 - p_2) + (z_2 - z_1) \cdot \rho \cdot g + \sum_{i=0}^N \left[1/2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_i^2} \right)^2 \cdot \left(f_i \cdot \frac{L_i}{D_i} + C_{0i} \right) \right] \quad (7)$$

Reescrevendo a equação (7) em função de \dot{V} obtém-se:

$$\Delta p_{\text{ventilador}} = \underbrace{(p_5 - p_2) + (z_5 - z_2) \cdot \rho \cdot g}_{p_s} + \sum_{i=0}^n \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{\frac{\pi}{4} D_i^2} \right)^2 \cdot \left(f_i \cdot \frac{L_i}{D_i} + C_{0i} \right) \right] \cdot \dot{V}^2 \quad (8)$$

A variação da pressão no ventilador, $\Delta p_{\text{ventilador}}$, corresponde às perdas de carga totais do sistema, $\Delta p_{\text{sistema}}$, (ver secção 2.1.5) e tendo em conta que a maioria dos escoamentos de interesse prático ocorre em regime turbulento para condições em que o coeficiente de atrito, f , varia pouco com Re_d , calculada de acordo com equação (59), pode-se definir a equação (8) como uma evolução parabólica:

$$\Delta p_{\text{sistema}} = p_s + c^{te} \cdot \dot{V}^2 \quad (9)$$

Onde p_s representa a pressão estática que é necessário vencer para que o escoamento possa ser iniciado.

No caso dos pontos 2 e 5 estarem situados à mesma elevação e ambos estarem à mesma pressão estática o valor de p_s é nulo.

2.1.5 PONTO DE FUNCIONAMENTO

O ponto de funcionamento do sistema é encontrando intercetando a curva característica do ventilador ($\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$), com a curva da instalação ($\Delta p_{\text{sistema}} = f(\dot{V})$).

Este ponto irá caracterizar os valores de \dot{V} e $\Delta p_{\text{ventilador}}$ com os quais o ventilador associado à instalação irá funcionar. O rendimento e a potência de funcionamento correspondem ao ponto de interceção das suas curvas com uma reta perpendicular que passa pelo caudal de funcionamento.

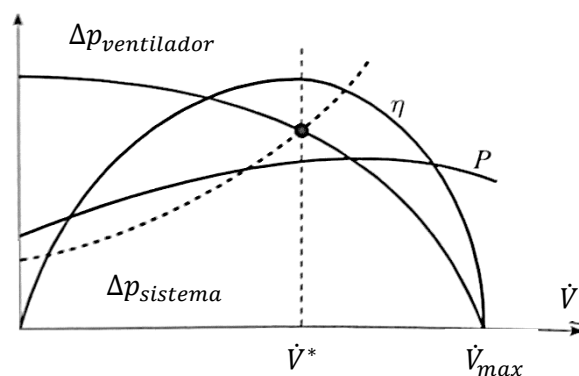


Figura 15 – Ponto de funcionamento do sistema. [21]

O ponto de funcionamento apresentado na Figura 15 representa o ponto de eficiência máxima, $\eta = \eta_{\text{máximo}}$ é para este ponto que o sistema deve ser projetado.

É desejável que a curva de rendimento seja o mais plana possível próximo do $\eta_{\text{máximo}}$ para que uma ampla gama de operação perto da eficiência máxima seja obtida [22].

2.1.5.1 ZONA DE FUNCIONAMENTO RECOMENDÁVEL

Nem sempre os sistemas funcionam para um único ponto de operação. Dependendo das características de instalação a escolha do ventilador deve prever se este tem capacidade para operar em vários pontos.

As curvas de desempenho dos ventiladores não são todas idênticas. Na Figura 16 observa-se o desenvolvimento genérico das curvas de desempenho para diferentes tipos de ventilador.

Conforme o tipo de ventilador, existe uma zona recomendável de utilização.

Fora dessa zona, o consumo elétrico aumenta drasticamente reduzindo o rendimento global, aumentando consideravelmente o ruído e produzindo zonas de recirculação no escoamento do ar.

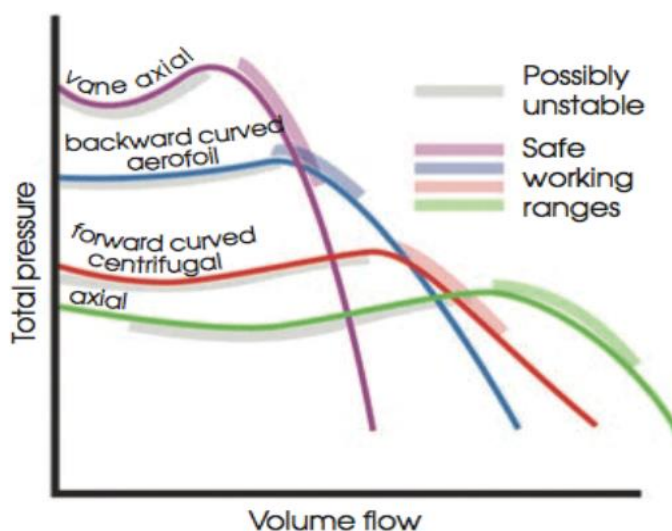


Figura 16 – Curvas de desempenho. Zonas recomendadas. [9]

As zonas de inflexão, correspondendo às zonas de inversão na curvatura das curvas são zonas não recomendadas de operação visto serem zonas onde se verifica o descolamento do ar nas hélices (“*Stall*”) causando pequenos turbilhões e diminuindo a aerodinâmica das pás provocando instabilidade no funcionamento do ventilador [8].

2.1.5.2 PONTO DE FUNCIONAMENTO REAL

Apesar da curva da instalação e da curva do desempenho do ventilador estarem definidas, verifica-se que a performance, medida em condições reais, baixa relativamente às curvas experimentais disponibilizadas pelo fabricante conforme Figura 17. As causas mais comuns para

a verificação do deficiente desempenho da combinação do ventilador/sistema são as conexões de saídas impróprias, escoamento não uniforme no sistema e a vorticidade do escoamento na entrada do ventilador. Estas condições alteram a aerodinâmica característica do ventilador de modo a que o desempenho seja menor.

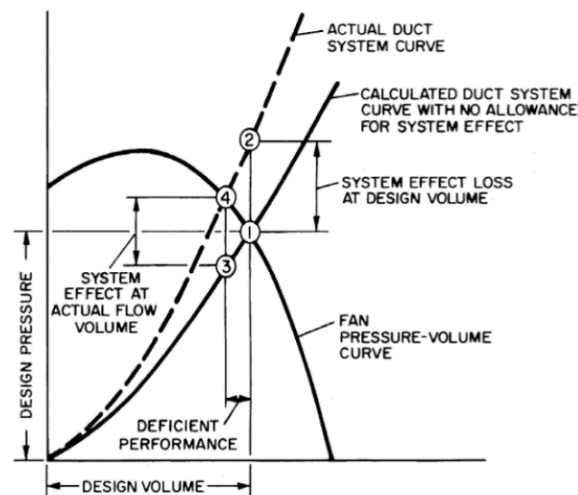


Figura 17 Desempenho deficiente com o efeito do sistema ignorado. [18]

Esta perda de desempenho foi formulada e a magnitude foi determinada experimentalmente. Estes efeitos foram convertidos como coeficientes de perda localizada e devem ser considerados, apesar de serem valores aproximados e os ventiladores reagirem de forma diferente entre fabricantes ou serem minimizados de acordo com as seguintes situações [18]:

- **Condições à saída do ventilador:**

- Devem ser acoplados às saídas do ventilador condutas com comprimento suficiente para que o perfil de velocidade seja recuperado;
- Para o caso de ventiladores centrifugos a descarga de ar não deve ser feita de forma abrupta para a atmosfera. Deve ser acoplado ao ventilador um difusor.

- **Condições de entrada do ventilador:**

- Para o desempenho considerado, o ar deve entrar uniformemente pela entrada na direção axial sem pré-rotação;
- Condutas planas com comprimento adequado devem ser acopladas entre acessórios, caso existam, e o ventilador para eliminar turbulência gerada pelo acessório;
- Ventiladores sem plenums ou em proximidade com paredes devem estar localizados em zonas onde o escoamento não seja obstruído.

2.1.6 CONTROLO DE CAUDAL

Por vezes é necessário alterar os parâmetros iniciais de projeto, nomeadamente ao aumento ou diminuição do caudal necessário a circular pelo sistema. Para tal pode-se variar a velocidade de rotação do impulsor e deste modo, seguindo a interceção das curvas de desempenho e da instalação, obter caudais superiores conforme demonstrado na Figura 18.

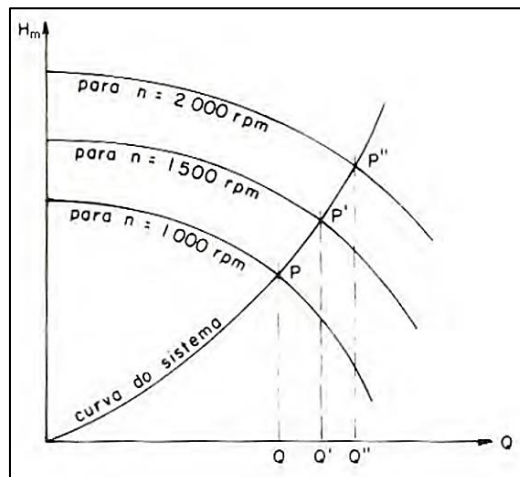


Figura 18 – Exemplo do ponto de operação do sistema para varias rotações do impulsor. [22]

No caso de haver necessidade de alteração do sistema, com um aumento das perdas de carga (curva de instalação S_2), conforme Figura 19, verifica-se uma diminuição do caudal ($Q_2 < Q_1$). Para manter as condições iniciais de fornecimento, Q_1 , é necessário aumentar a velocidade de rotação do rotor.

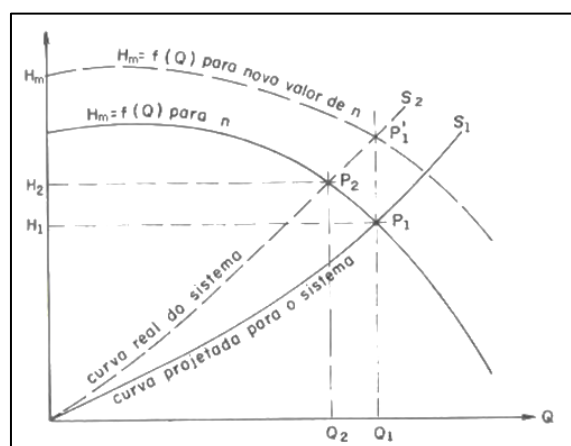


Figura 19 – Controlo do caudal após alteração do sistema [22]

Por vezes os ventiladores não permitem realizar o ajuste da rotação do impulsor e nem sempre existem ventiladores comercializados exatamente com a curva de desempenho ideal para as características que se deseja para o projeto.

Normalmente ao sistema é adicionado um registo de caudal, que permite restringir o escoamento de ar por aumento da perda de carga do sistema. Desta forma é possível realizar ajustes à curva da instalação para que o ponto de operação seja alcançado.

No exemplo da Figura 20, o caudal desejado para o projeto é identificado com o símbolo Q . Observamos que ao intercepar a curva da instalação com a curva de desempenho do ventilador A o caudal obtido, Q' , é inferior ao desejado. Neste caso a escolha terá de recair pelo ventilador B. Apesar do ponto de operação oferecer um caudal superior, ao aplicar um estrangulamento do escoamento com o fecho adequado do registo consegue-se alterar a curva da instalação devido à perda de carga causada, de modo a alcançar o caudal Q .

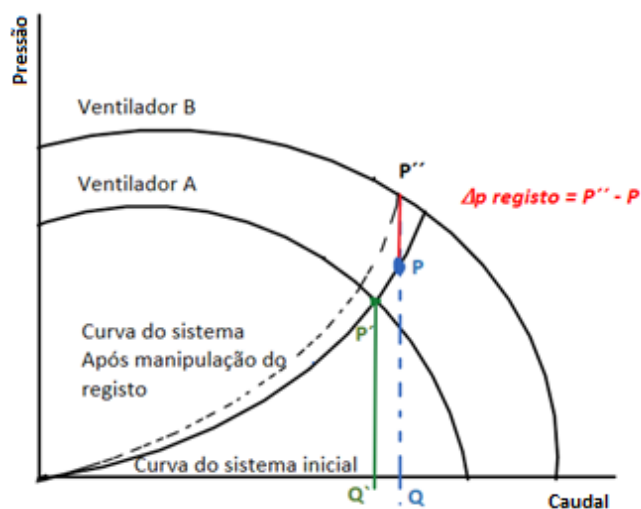


Figura 20 – Exemplo para ajuste e escolha de um ventilador adequado ao sistema.

2.1.7 MOTOVENTILADORES

Motoventiladores são um grupo de ventiladores caracterizados por terem o motor acoplado diretamente à hélice. São ventiladores axiais utilizados sobretudo para movimentar grandes quantidades de ar a pressões relativamente baixas [8].

São amplamente utilizados em equipamentos de sistemas de refrigeração, radiadores (Figura 21), na refrigeração comercial (Figura 22), condensadores, evaporadores, em alguns equipamentos de ventilação ou em equipamentos que necessitem de realizar apenas circulação de ar.



Figura 21 – Motoventilador aplicado em radiador. [23]



Figura 22 – Motoventiladores aplicados em armários de refrigeração comercial [24]

2.2 O SOM

O som pode ser descrito como uma sensação auditiva produzida por oscilação da pressão que atua no ouvido, ou por uma vibração mecânica dos ossos cranianos a frequências de áudio.

As vibrações transmitidas ao meio de propagação provocam zonas de maior e menor compressão das partículas que compõem o meio originando ondas sonoras.

O ruído pode definir-se como todo o som que não é desejável. O som indesejável pode perturbar a concentração, interferir com a comunicação, com o descanso e se muito elevado poder causar perdas de audição breves ou permanentes. [25]

O som necessita de um meio líquido, gasoso ou sólido para se propagar. No vácuo não existe propagação do som.

As vibrações causadas pela fonte sonora excitam as partículas do meio mais próximas provocando choque. Esta vibração é comunicada às partículas seguintes através do choque entre elas. A alteração da posição das partículas provoca a zonas de compressão (onde as partículas se encontram mais próximas do que o normal) e zonas de rarefação (onde as partículas se encontram mais distantes do que o normal). [26]

O movimento oscilatório das partículas vai criar variações da pressão no meio de propagação originando a onda sonora conforme representado na Figura 23.

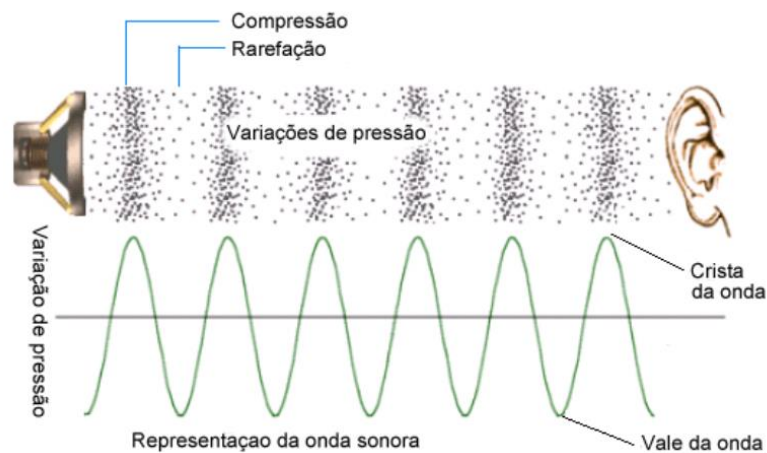


Figura 23 – Representação do som simples através da onda sonora. [26]

O ruído produzido por uma fonte é independente do meio por onde se propaga a energia sonora. E pode ser caracterizado pela potência sonora, L_w , ou de forma mais prática pelo nível de pressão sonora, L_p .

A propagação do ruído depende do tipo da fonte que se observa.

Existem 2 tipos de fonte propagação ideal:

- Propagação segundo fonte esférica: a transferência da energia às partículas do meio é realizada de forma radial, por ondas esféricas. Caracteriza-se pela diminuição da pressão sonora com o aumento da distância à fonte;
- Propagação segundo fonte plana: A frente da onda apresenta uma área constante com o aumento da distância à fonte, resultado num nível sonoro idêntico independente da distância.

Na realidade não existem propagações das fontes ideais e para além das distâncias à fonte existem outros fatores que condicionam a propagação do ruído [25]:

- Atrito do ar;
- Condições climatéricas,
- Velocidade do vento;
- Proximidade com elementos da envolvente e outros obstáculos e as suas características de absorção e difusão sonora.

2.2.1 PERCEÇÃO DO OUVIDO HUMANO E ESCALA DE MEDIÇÃO DO SOM

O ouvido humano é sensível às frequências de oscilação na gama entre 20 Hz e os 20 kHz e em amplitude a uma pressão mínima de 20 μ Pa (limiar da audição) até cerca de 100 Pa (limiar da dor), [27]. Na Figura 24 está representada uma tabela comparativa para a audição humana.

| Efeito | Pressão Sonora (Pa) | Nível Sonoro (dB) | Origem |
|--------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|
| | Limiar da dor | 100 | |
| Ardamente Lesivo | 10 | 140 | Avião a jacto |
| | | 130 | Máquina Rebitadora |
| Lesivo | | 120 | Avião a Hélice |
| | 1 | 110 | Moto-serra |
| Risco | | 100 | Oficina metalo-mecânica |
| | | 90 | Camião pesado |
| Interfere na conversação | 10^{-1} | 80 | Rua com muito trânsito |
| | | 70 | Carro de passageiros |
| Incomodativo | 10^{-2} | 60 | Conversa normal |
| | | 50 | Conversa em tom baixo |
| | 10^{-3} | 40 | Música suave |
| | 10^{-4} | 30 | Murmúrio |
| | 10^{-5} | 20 | Apartamento urbano silencioso |
| | Limiar da audição | 0 | Folhas de árvore a cair |

Figura 24 – Tabela comparativa do limiar de audição humana [27]

Tendo em conta a gama de amplitudes entre os limites da audição humana, uma representação linear da pressão sonora ou de outra variável sonora é pouco prática e não é representativa da resposta do ouvido humano. É usual recorrer-se a uma escala logarítmica para a representação das magnitudes das propriedades físicas do som, L_i , em que a unidade utilizada para a representação do nível sonoro é o decibel, dB, [28]:

$$L_i = 10 \cdot \log \left(\frac{A}{A_{ref}} \right) \quad (10)$$

Onde:

A – magnitude da propriedade física medida;

A_{ref} – magnitude do valor de referência associado.

A resposta do ouvido humano às frequências audíveis não é constante em toda a sua gama verificando-se baixa sensibilidade às frequências menores conforme demonstrado na Figura 25.

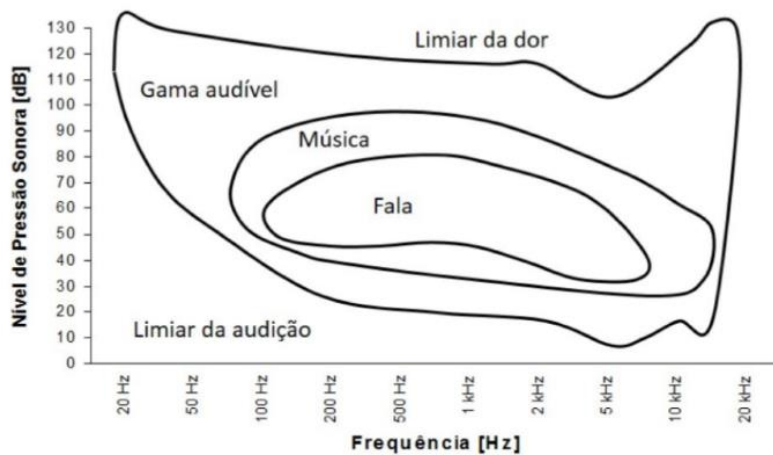


Figura 25 – Gama audível pelo ouvido humano. [25]

Na tentativa de aproximar as medições do ruído à resposta do ouvido humano utilizam-se curvas de ponderação para aplicar correções a cada banda de frequência do espectro conforme Figura 26.

A curva mais utilizada é a curva de ponderação A, sendo a curva que mais se adequa a sensibilidade do ouvido humano para a gama de frequências audíveis.

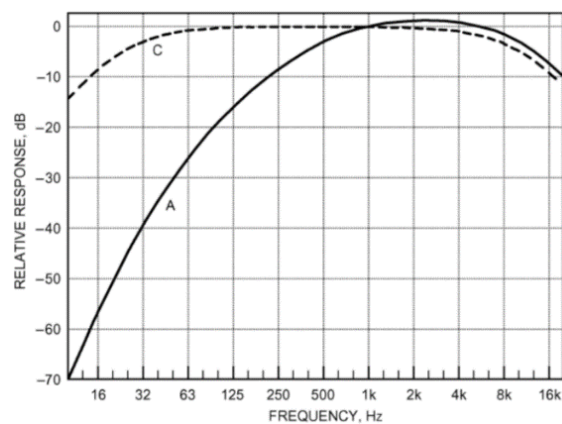


Figura 26 – Curvas de Ponderação A e C mostrando a resposta para níveis de pressão sonora. [25]

2.2.2 ESPECTRO EM BANDAS DE FREQUÊNCIA

O valor global do som medido em dB(A) é uma forma conveniente de designar num só valor a percepção da intensidade sonora. Contudo para estudar soluções de controlo de ruído é essencial o conhecimento espectral do som. [25].

Os sons reais são mais complexos do que um som puro onde toda a energia está contida numa frequência.

Um som real emite pressão sonora em várias frequências, cobrindo geralmente toda a gama de frequências audíveis. O som pode ser representado por cada frequência da gama ou serem representados por bandas de oitava ou 1/3 de oitava (mais usuais em medições de sistemas de ventilação). Nas bandas por oitava, o limite superior de cada banda de frequência é cerca do dobro da frequência do respetivo limite inferior onde o valor associado à banda corresponde ao valor central correspondente à raiz quadrada do produto dos limites inferior e superior da respetiva banda.

Cada banda de oitava pode ser dividida por 3 dando origem a 3 bandas de 1/3 de oitava conforme Figura 27.

A análise espectral permite caracterizar o ruído verificando se estamos perante um ruído rico em baixas (sons graves), médias ou altas (sons agudos) frequências ou se apresentam características tonais (bandas estreitas pronunciadas relativamente às adjacentes de valor igual ou superior a 5 dB(A)).

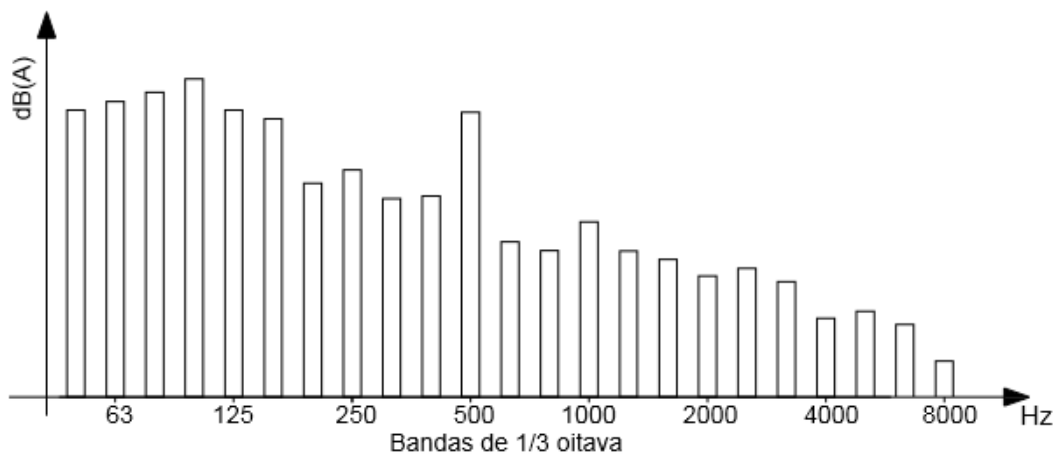


Figura 27 – Exemplo de um espectro em banda de 1/3 de Oitava. [25]

Na análise do ruído utilizam-se, em geral, bandas de oitava e 1/3 de oitava centradas nos valores apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Bandas de frequência centrais para utilização no espectro sonoro oitavas e 1/3 de oitavas. [28]

| Bandas de oitava, Hz | Bandas 1/3 de oitava, Hz |
|----------------------|--------------------------|
| 16 | 12,5 |
| | 16 |
| | 20 |
| 31,5 | 25 |
| | 31,5 |
| | 40 |
| 63 | 50 |
| | 63 |
| | 80 |
| 125 | 100 |
| | 125 |
| | 160 |
| 250 | 200 |
| | 250 |
| | 315 |
| 500 | 400 |
| | 500 |
| | 630 |
| 1000 | 800 |
| | 1000 |
| | 1250 |
| 2000 | 1600 |
| | 2000 |
| | 2500 |
| 4000 | 3150 |
| | 4000 |
| | 5000 |
| 8000 | 6300 |
| | 8000 |
| | 10000 |
| 16000 | 12500 |
| | 16000 |
| | 20000 |

2.2.3 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

A pressão sonora, sendo caracterizada por variações de pressão acima e abaixo da pressão atmosférica é medida em pascal, Pa.

Com a transformação para escala logarítmica de decibel, obtém-se o nível de pressão sonora, L_p , correspondendo à seguinte Equação 11 [28]:

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \quad [dB] \quad (11)$$

Onde,

p – pressão sonora sentida, [μPa];

p_{ref} – pressão de referência para o limiar de audição correspondendo a 20 μPa .

Na análise com nível de ponderação A (adequado para a resposta do ouvido humano às baixas frequências) a equação passa a ser representada da seguinte forma:

$$L_{p_A} = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \quad [dB(A)] \quad (12)$$

O nível de pressão sonora medida relativamente a uma fonte não é constante. Depende de vários fatores como demonstrado na secção 2.2.3. Deste modo, distâncias à fonte diferentes, medições realizadas em campo aberto ou dentro de uma sala levam a valores de medição diferentes. Como tal deve ser registado o local de medição e todas as variáveis dependentes.

2.2.3.1 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA COMBINADA

Para estimar o nível de pressão sonora global de fontes múltiplas, as intensidades podem ser somadas, mas não os níveis.

Deste modo os níveis devem ser convertidos para as intensidades conforme Equação 13. As intensidades devem ser somadas e serem em seguida convertido para o nível novamente conforme equação (14) [28].

$$L_{p_i} = 20 \cdot \log\left(\frac{p_i}{p_{ref}}\right) \Leftrightarrow L_{p_i} = 10 \cdot \log\left(\frac{p_i^2}{p_{ref}^2}\right) \Leftrightarrow \frac{p_i^2}{p_{ref}^2} = 10^{L_{p_i}/10} \quad (13)$$

$$L_{p_{soma}} = 10 \cdot \log\left(\sum_i 10^{L_{p_i}/10}\right) \quad (14)$$

A formulação é válida para a obtenção do nível de pressão sonora global obtida pela soma dos níveis de pressão de caba banda de frequência.

2.2.3.2 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA CONTINUA E EQUIVALENTE

Grande parte dos sons não são constantes. A pressão sonora varia de momento para momento pelo que o nível de pressão sonora pode variar muito rápido ou muito lentamente.

É definida então o nível de pressão sonora equivalente, L_{eq} , que é o nível médio temporal do quadrado da pressão. [28]

$$L_{eq} = 10 \cdot \log\left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_{ref}^2} dt\right] \quad (15)$$

Onde T corresponde ao intervalo de tempo de integração e t o tempo de medição.

2.2.4 POTÊNCIA SONORA

Tendo em conta que a dependência da medição do nível de pressão sonora, as fontes devem ser caracterizadas pelo nível de potência sonora, L_w , para que comparações entre equipamentos possam ser realizados usando apenas uma referência sem variáveis dependentes.

Ao contrário do nível de pressão sonora, o nível de potência sonora não pode ser medido diretamente. Em vez, é calculado por várias medições de pressão sonora criada pela fonte num ou vários ambientes de ensaio [25].

2.2.5 LEGISLAÇÃO – RUÍDO

O ruído deve ser controlado em níveis que garantam o conforto e em alguns casos que salvaguardem a saúde das pessoas.

A legislação através de decretos leis, portarias e diretivas e regulamentos, impõe obrigações e requisitos quanto ao nível do ruído provocado. Tendo em conta o objeto de estudo dos motoventiladores podemos destacar as situações descritas nas subsecções seguintes.

2.2.5.1 RUÍDO AMBIENTAL

A legislação portuguesa através do DL n.º 9/2007 de 17 de Janeiro [29] aprovou o Regulamento Geral do Ruído, RGR, para a prevenção do ruído e controlo da poluição sonora ambiental, visando o bem estar da população e a saúde humana.

É aplicado às atividades ruidosas permanentes e temporárias suscetíveis de causar incomodo critérios acústicos que devem cumprir os valores limite de exposição em função do indicador de nível de ruído diurno-entardecer-noturno, L_{den} , e em função do indicador do ruído noturno, L_n , referentes no artigo 11º do presente regulamento conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Quadro-resumo dos requisitos do ruído ambiente exterior estabelecidos no artigo 11º do RGR

| Tipo de Zona | L_{den} [dB(A)] | L_n [dB(A)] |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Zona Mista | ≤ 65 ^{a)} | ≤ 55 ^{a)} |
| Zona sensível | ≤ 55 ^{a)} | ≤ 45 ^{a)} |
| Zona Sensível com uma grande infraestrutura de transporte em exploração na proximidade | ≤ 65 | ≤ 55 |
| Zona Sensível com uma grande infraestrutura de transporte aéreo projetada para a proximidade | ≤ 65 | ≤ 55 |
| Zona Sensível com uma grande infraestrutura de transporte que não aéreo projetada para a proximidade | ≤ 60 | ≤ 50 |
| Zona não classificada | ≤ 63 ^{b)} | ≤ 53 ^{b)} |

a) Os municípios podem estabelecer em espaços delimitados, designadamente em centros históricos, valores inferiores a 5 dB(A);

b) Valores limites a aplicar aos recetores sensíveis (edifício habitacional, escolar, hospitalar ou similar ou espaço de lazer com utilização humana).

2.2.5.2 RUÍDO EM EDIFÍCIOS

Relativamente aos critérios de avaliação do ruído no interior de edifícios, o Decreto [6] republica o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, RRAE, aprovado pelo DL n.º 129/2002 de 11 de Maio.

O RRAE estabelece requisitos acústicos dos edifícios com vista a melhorar as condições de qualidade acústica dos mesmos.

Os requisitos aplicam-se aos seguintes tipos de edifícios, em função do uso destinado pelos mesmos:

- Edifícios habitacionais e mistos;
- Edifícios comerciais, industriais e de serviços;
- Edifícios escolares e de investigação;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros.

Na Tabela 3 estão apresentados os requisitos do ruído em função do tipo de edifícios para a avaliação particular de equipamentos coletivos com funcionamento contínuo e intermitente dos edifícios.

Tabela 3 – Quadro resumo dos requisitos acústicos do RRAE para equipamentos de funcionamento contínuo e intermitente

| Tipo de edifício/Utilização | Regime de funcionamento do equipamento | |
|--|--|----------------------|
| | Contínuo [dB(A)] | Intermitente [dB(A)] |
| Edifícios habitacionais e mistos; Unidades Hoteleiras | $L_{ar,nT} \leq 27$ | $L_{ar,nT} \leq 32$ |
| Edifícios comerciais e de serviços; Partes similares em edifícios industriais | $L_{ar,nT} \leq 37$ | $L_{ar,nT} \leq 42$ |
| Edifícios escolares e similares ou de investigação | | |
| Biblioteca | $L_{ar,nT} \leq 30$ | $L_{ar,nT} \leq 35$ |
| Salas de aula (incluindo educação musical), de professores, administrativas, bibliotecas, gabinetes médicos, salas polivalentes, berçários | $L_{ar,nT} \leq 35$ | $L_{ar,nT} \leq 40$ |
| Edifícios hospitalares e similares | | |
| Enfermarias, refeitórios, átrios e salas de espera | $L_{ar,nT} \leq 30$ | $L_{ar,nT} \leq 35$ |

A avaliação dos requisitos são realizados pelo nível de avaliação padronizado, $L_{ar,nT}$, correspondendo ao nível sonoro equivalente com ponderação A, $L_{eq A}$, durante um intervalo de tempo especificado, adicionando uma correção (na presença de características tonais) e corrigido devido à influências das condições de reverberação.

A avaliação acústica onde mostre o cumprimento do RRAE é obrigatório para a obtenção da licença de utilização do edifício. [25]

Relativamente aos equipamentos e sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, AVAC, a portaria [5] obriga a apresentação de projetos de execução de obras públicas onde deve estar discriminado e especificado as medidas de condicionamento acústico e a análise do desempenho com indicação do nível da emissão sonora.

2.2.5.3 REGULAMENTO ECODESIGN REG (EU) 2016/2281

Para produtos de aquecimento do ar, sistemas de arrefecimento, refrigeradores de processo de alta temperatura e ventiloconvectores, ao abrigo do regulamento [4] não é imposto requisito quanto ao nível máximo de potência sonora, L_w . Contudo o valor medido não deve ser superior a 2 dB relativamente ao valor declarado.

2.2.5.4 REGULAMENTO ECODESIGN REG (EU) 2015/1095

Para armários refrigerados para armazenagem de uso profissional, armários de congelação/refrigeração rápida a jato de ar, unidades de condensação e refrigeradores industriais o regulamento [2] não impõe requisitos quanto ao nível de ruído.

2.2.6 RUÍDO EM VENTILADORES

Os ruídos dos sistemas de ventilação provêm de diversas fontes inumeradas em seguida [30]:

- Provenientes do ventilador;
- Provenientes das condutas;
- Provenientes de difusores e grelhas;
- Provenientes das vibrações resultantes das oscilações dos elementos rotativos;

Relativamente os ventiladores o ruído é causado devido às seguintes situações [31]:

- **Descolamento do ar nas pás (“Vortex shedding”):** fonte de ruído provocada pela separação do ar da superfície da pá das arestas de fuga. Esta fonte de ruído pode ser reduzida com uma boa escolha da geometria das lâminas, um ângulo de ataque adequado e utilização nas arestas de fuga de formas dentadas;
- **Turbulência causada pelo escoamento de ar;**
- **Velocidade de rotação dos motores;**
- **Carga do ventilador (“Fan Load”):** o ruído varia conforme a carga do sistema varia. A variação é imprevisível e depende do próprio ventilador. Contudo os ventiladores quando operados perto do seu ponto de eficiência máxima tende a ser menos ruidoso;
- **Vibração da estrutura:** provocado por desequilíbrios residuais dos componentes que compõem o ventilador nomeadamente o acoplamento do equipamento ao sistema de condutas a excentricidade do rotor ou rolamentos internos do motor.

2.2.7 ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE EM SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Ao selecionar ventiladores ou outros equipamentos para formar um sistema de ventilação deve-se ter em conta as seguintes considerações [30]:

- Minimizar perdas de carga no sistema de ventilação projetado. Perdas de carga elevadas aumentam a pressão do ventilador que resulta num maior ruído gerado pelo ventilador;
- Selecionar um ventilador para operar nas condições de eficiência máxima. Geralmente o ruído gerado perto do melhor ponto de operação do ventilador gera menor ruído;
- Acoplar condutas tanto na entrada como na saída do ventilador de modo a criar um escoamento axial e uniforme. A turbulência e a separação do escoamento nas hélices do ventilador aumentam o ruído. As palhetas giratórias acopladas à saída do ventilador também aumentam o ruído gerado especialmente se o escoamento não é uniforme;
- Utilizar na medida do possível silenciadores de conduta de modo a minimizar a regeneração do ruído;
- Minimizar a geração de ruído pelas condutas curvas ou derivações sempre que possível distanciando os elementos pelo menos 5 vezes o diâmetro da conduta. Utilizar favos para uniformizar o escoamento nas condutas de entrada;
- Manter a velocidade de escoamento dentro das condutas baixa, aumentando o tamanho da conduta;
- Se necessário utilizar transições tentando que o ângulo da expansão não seja superior a 15° para evitar separação no escoamento aumentando o ruído;
- Utilizar palhetas giratórias nas condutas curvas retangulares de 90° ou em derivações de modo a uniformizar e direcionar o escoamento;
- Colocar registos, difusores, situados em zonas ocupadas longe de condutas curvas ou derivações;
- Utilizar condutas constituídas por material com maior coeficiente de absorção sonora;
- Tentar isolar a vibração de todo o equipamento rotativo.

2.3 ENSAIOS NORMALIZADOS

2.3.1 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

As curvas características dos ventiladores industriais podem ser determinadas recorrendo por exemplo, à norma ISO 5801 [14] ou a AMCA 210 [15].

Ambas as normas especificam técnicas, equipamentos de medição e montagens pré-definidas para avaliar a performance dos ventiladores.

As normas suprarreferidas permitem avaliar a performance dos ventiladores segundo 4 instalações predefinidas de acordo com a categoria da instalação e funcionamento equipamento sendo elas:

- A - Entrada e saída livre;
- B - Entrada livre e saída com tubagem;
- C - Entrada com tubagem e saída livre;
- D – Entrada e saída com tubagem.

A escolha da instalação de ensaio deve ter em conta a categoria de instalação sobre a qual o ventilador vai ser instalado.

Métodos de medição e cálculo de caudais, pressões de ensaio e eficiência dos ventiladores são especificados considerando condições de compressibilidade e métodos mais simplificados quando a compressibilidade é desprezável (número de Mach inferior a 0,15 e/ou pressões de ensaio inferiores a 2000 Pa).

Os ensaios podem ser realizados com o ventilador montado em conduta normalizada como exemplo da Figura 28, onde estão montados os equipamentos de medição ou através da montagem em câmara de ensaios, sobretudo para ventiladores a funcionar segundo a categoria A, como o exemplo da Figura 29.

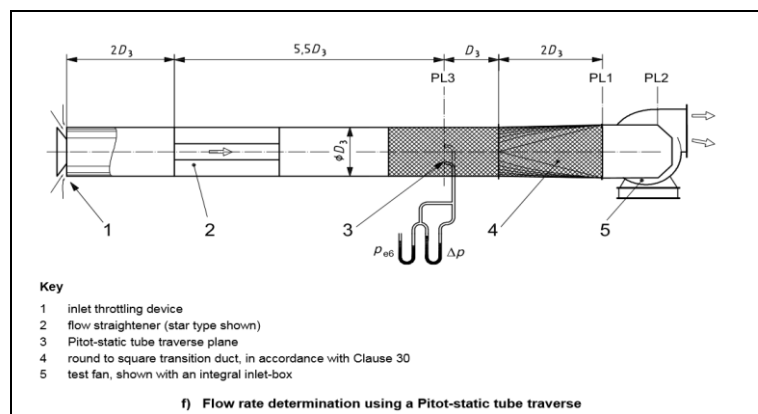


Figura 28 – Bancada experimental recorrendo a conduta normalizada. Caudal medido com recurso ao tubo de Pitot [4]

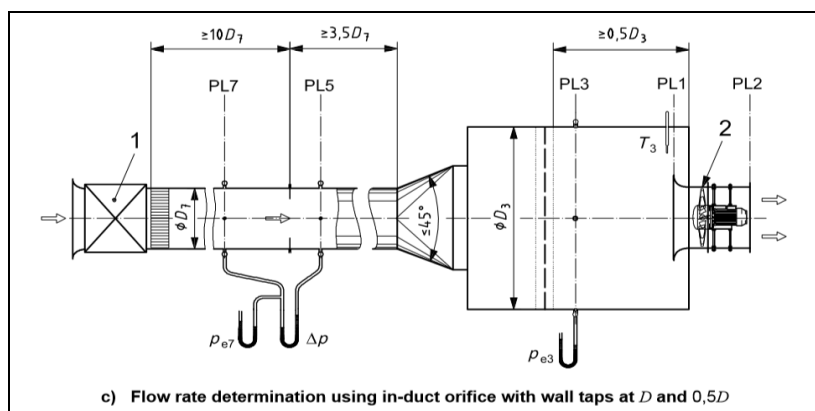


Figura 29 – Bancada experimental recorrendo a uma câmara de ensaios normalizada. Caudal medido com recurso à placa de orifícios [4]

2.3.2 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RUÍDO

A ASHRAE HANDBOOKS FUNDAMENTALS 2009 [28] especifica 4 métodos mais utilizados para a sua determinação:

- **Método de campo livre:**
 - Um campo livre é um local onde os efeitos de qualquer obstáculo são praticamente nulos para a gama de frequências de interesse. A condição ideal será não haver qualquer obstáculo. As condições de campo livre podem ser aproximadas nas chamadas **salas anecoicas** onde o local tem as paredes, teto e chão com materiais com coeficientes de absorção sonora elevados. No campo livre são realizadas medições de pressão sonora em vários pontos sobre um plano imaginário esférico onde a fonte se encontra centrada. Como as superfícies não refletem o som proveniente da fonte todo o som que a fonte reflete é escoado até aos pontos de medição.
- **Método em sala reverberante:**
 - Sala criada com materiais de baixo nível de absorção acústica e desenhada para refletir todo o som refletido por paredes tetos e chão para produzir uma difusão do som onde a potência sonora total pode ser medida.
- **Método da onda progressiva (em conduta):**
 - Acoplando um ventilador a uma extremidade da conduta, a energia sonora é confinada a um progressivo campo de onda na conduta. A potência sonora pode ser determinada, estimando a intensidade sonora através de medições da pressão sonora e multiplicando-a pela área de secção transversal. Método pouco utilizado devido a dificuldades na construção da banca de ensaios e por a presença do microfone influenciar o caudal e o ruído gerado durante a medição.
- **Método da intensidade sonora:**
 - A potência sonora emitida pela fonte é determinada por medição da intensidade sonora medidas num plano imaginário esférico ou semiesférico que circunda a fonte.

2.4 INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES

Ao realizar uma medição, utilizando o melhor equipamento e com condições ambientais bastante controlados os resultados podem ser afetados por diversos outros erros. [32]

Não existem medições perfeitas pelo que em qualquer tipo de ensaio experimental devem ser identificadas e quantificadas as fontes de incerteza.

A incerteza não é mais do que o desvio do valor medido.

A incerteza é um fator importante, nomeadamente quando uma medição tem por objetivo verificar o valor medido relativamente a um valor limite.

Se a incerteza não for determinada ou não englobar todas as fontes que influenciam o resultado pode-se estar a reprovar/ aprovar o cumprimento de um requisito podendo haver consequências ao nível económico, judiciais ou médicas. [32]

Da análise da Figura 30, verifica-se que a medição resultante do produto A é o único que considerando a incerteza associada cumpre com o requisito. Os produtos B a D, encontram-se numa zona de indefinição pois, baseado nas incertezas consideradas, pode-se estar perante um cumprimento ou incumprimento do requisito. Já o produto E está fora do requisito e não existe indefinição quanto à sua conformidade com o requisito.

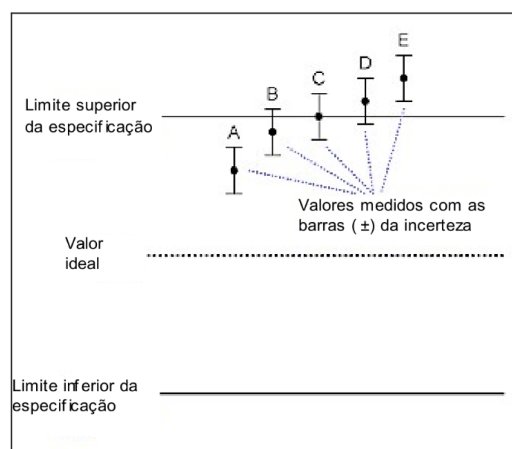


Figura 30 – Critério de aceitação do produto. [32]

2.4.1 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA ÀS GRANDEZAS CONSIDERADAS [32] [33]

Sendo que a incerteza é uma estimativa para caracterizar um intervalo de valores onde se encontra o valor verdadeiro, a grandeza, y , a medir é função de um conjunto de grandezas de entrada, x_i .

A incerteza padrão da grandeza de entrada $u(x_i)$ pode ser determinada pelo método de avaliação tipo A ou tipo B.

As incertezas do tipo A são utilizadas quando existem várias observações da mesma grandeza, sob condições idênticas.

A avaliação de $u(x_i)$, segundo o tipo A, resulta de uma análise estatística de uma série de observações segundo uma distribuição normal.

Numa repetição de medições da grandeza x_i , calcula-se a incerteza padrão da grandeza de entrada $u(x_i)$, como:

$$u(x_i) = \frac{\sigma_{xi}}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n - 1}} \quad (17)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (18)$$

Onde:

σ_{xi} – desvio padrão da média das medições da grandeza x_i ;

n – número de repetições da medição da grandeza x_i ;

\bar{x}_i – média das medições da grandeza x_i .

A avaliação de $u(x_i)$ segundo o tipo B, resulta da utilização de outros métodos que não a análise estatística de uma série de observações.

Podem ser por exemplo:

- Medições nominais;
- Especificações técnicas do fabricante do equipamento de medição;
- Dados de um certificado de calibração;
- Incertezas referenciadas por referencia datadas ou livros;
- Experiencia do utilizador ou conhecimento do comportamento de instrumentos de medida e produto a medir.

Portanto, as incertezas do tipo B são utilizadas quando existem valores estimados da grandeza de entrada.

Dentro das incertezas do tipo B, pode-se classifica-las como B-N, B-R e B-T.

As incertezas padrão do tipo B-N, normalmente são utilizadas quando é conhecido o valor da incerteza expandida $U(y)$ e o fator de expansão k e calcula-se de acordo com:

$$u(xi) = \frac{U(y)}{k} \quad (19)$$

Normalmente é um tipo de incerteza associada à utilização de certificados de calibração de equipamentos.

As incertezas do tipo B-R são utilizadas quando apenas se conhece ou se estima os limites superior, a^+ , e o limite inferior, a^- , e admite-se uma probabilidade de ocorrência uniforme entre os limites. Neste caso admite-se uma distribuição retangular com a incerteza padrão a ser calculada como:

$$u(xi) = \frac{2a}{\sqrt{12}} \quad (20)$$

Este tipo de incerteza é associada a utilização de especificações do fabricante onde são conhecidos os erros típicos dos equipamentos, à resolução do indicador do equipamento e a tolerâncias de normas.

As incertezas do tipo B-T são utilizadas quando apenas se conhece ou se estima os limites superior, a^+ , e o limite inferior, a^- , admitindo uma probabilidade de ocorrência maior no valor central. Neste caso admite-se uma distribuição triangular com a incerteza padrão a ser calculada como:

$$u(xi) = \frac{2a}{\sqrt{6}} \quad (21)$$

Após cálculo das grandezas das incertezas padrão das grandezas de entrada. Calcula-se a incerteza padrão combinada, $u(y)$, de acordo com a equação:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u(xi) \cdot ci)^2} \quad (22)$$

Onde ci representa o coeficiente de sensibilidade da grandeza xi e indica o “peso” que essa grandeza tem na expressão final. Também permite que a unidade das grandezas de todas as variáveis seja igual de modo a ser possível realizar a soma das mesmas.

ci é definido como a derivada parcial da função f em ordem à variável xi :

$$ci = \frac{df}{dxi} \quad (23)$$

À incerteza combinada $u(y)$ admite-se uma distribuição normal, correspondendo a um intervalo de confiança de 68,3 %.

Para aumentar o intervalo de confiança é utilizado a fórmula de *Welch-Satterthwaite* para calcular os graus de liberdade efetivos v_{eff} de acordo com:

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i)^4}{v_i}} \quad (24)$$

Onde v_i corresponde aos graus de liberdade de grandeza x_i .

Para incertezas do tipo A,

$$v_i = n - 1 \quad (25)$$

Para as incertezas do tipo B, v_i , pode-se admitir qualquer valor dependendo da confiança para a valor admitido da grandeza.

Para grandezas mais confiáveis, v_i tende para infinito. Para grandezas pouco confiáveis, v_i para 1.

Após determinar v_{eff} , e consultando as tabelas T-Student [34], para um intervalo de confiança de 95,5%, determina-se o valor de expansão k . No caso de v_{eff} tender para infinito então $k=2$. Deste modo podemos definir a incerteza expandida $U(y)$ como:

$$U(y) = \pm k \cdot u(y) \quad (26)$$

DESENVOLVIMENTO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.1 HÉLICES

3.1.2 MOTORES

3.2 CONJUNTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

3.3 DESCRIÇÃO GERAL DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.3.1 BANCADA DE ENSAIOS

3.3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3.3 DESVIOS RELATIVAMENTE ÀS NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE DESEMPENHO

3.3.4 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

3.3.5 AVALIAÇÃO DO CAUDAL, V

3.3.6 AVALIAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA DE ELEVAÇÃO DO MOTOVENTILADOR, $\Delta p_{\text{ventilador}}$

3.3.7 AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉCTRICA, P_e

3.3.8 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO GLOBAL, η

3.3.9 AVALIAÇÃO DAS ROTAÇÕES DO MOTOR, ω

3.3.10 AVALIAÇÃO DO RUÍDO

3 DESENVOLVIMENTO

O trabalho experimental desenvolvido neste estudo foi realizado no Laboratório de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, LAVAC, situado no edifício F do ISEP, a fim de determinar as curvas características dos diferentes conjuntos de motoventiladores fornecidos pela SKK, assim como a medição, do ruído provocado, concluindo com uma avaliação do desempenho relativa aos vários modelos e uma análise económica.

Neste capítulo, estão descritos, pormenorizadamente, o procedimento experimental, as condições em que se realizaram os ensaios, a bancada de trabalho com o qual foi possível obter os resultados experimentais e os cálculos realizados para a determinação das curvas características.

As incertezas dos parâmetros medidos e calculados foram baseadas na metodologia de cálculo de [32] e [33].

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.1 HÉLICES

Para a realização dos ensaios foram disponibilizadas 6 hélices com diâmetro de 200 mm com variações no ângulo de ataque das pás, α , tipo de material, geometria e rugosidade de modo a avaliar o impacto de cada uma das variáveis especificadas por comparação entre amostras pelos dados obtidos nos ensaios experimentais.

Na Tabela 4 estão descritas as principais características das amostras.

Tabela 4 – Características principais das hélices ensaiadas



| Referência ensaio | A | B | C | D | E | F |
|-------------------------------|----------|----------|----------|---------------|-------|----------|
| Identificação | AL_28 | AL_34 | ELCO A | ELCO B | PVC C | ALT-EFIC |
| Número de pás | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Diâmetro exterior hélice [mm] | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Ângulo de ataque das pás [°] | 28 | 34 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| Material | Alumínio | Alumínio | PP ou PE | PS/ derivados | PVC | PU |
| Rugosidade, Ra [μ m] | 0,38 | 0,38 | 0,36 | 3,37 | --- | 3,28 |
| Tensão de rotura [MPa] | 170,8 | 170,8 | 24,2 | 22,3 | --- | 25,9 |
| Dureza [ShD] | --- | --- | 64,2 | 70,8 | --- | 75,4 |

As dimensões nominais e o ângulo de ataque das pás, α , são valores especificados por parte do catálogo técnico da empresa [35]. O tipo de material e as características de resistência mecânica apresentadas foram determinados no âmbito da tese de mestrado “Caracterização de materiais para hélices de motoventiladores”. [36]

3.1.2 MOTORES

Os motores utilizados para a realização do ensaio e comercializados pela SKK, são motores de polos sombreados e ECM.

Os motores de polo sombreados, são motores tradicionais monofásicos compostos por 4 polos operando a uma tensão de 220-240 V e a frequência de 50–60 Hz e funcionando sobre o princípio do eletromagnetismo. Os motores ECM recorrem à recente tecnologia de controlo eletrónico mantendo a sua forma externa semelhante ao motor tradicional

Para os ensaios foram disponibilizados 4 motores, 2 de polos sombreados e 2 do tipo ECM e foi avaliado o consumo e desempenho, de cada um deles, quando acoplados, às hélices especificadas no ponto 3.1.1 nas combinações identificadas na secção 3.2.

As características principais dos motores fornecidos estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados Técnicos dos motores ensaiados













| Referência Ensaio | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Marca/ Modelo | SKK/ YZF5-13 | Ebmpapast/ M4Q045-CA03- 51 | ELCO/ ECM 12-15 | SKK / ECM7108AAA2Daxxx |
| Identificação | M33W | M36W | ELCO | SMART |
| Tipo | Polos Sombreados | Polos Sombreados | ECM | ECM |
| Tensão nominal [V] | 220 | 220 | 220 | 220 |
| Frequência [Hz] | 50 | 50 | 50 | 50 |
| RPM declarado | 1300 | 1300 | 1400 | 1300 |
| Potência de entrada [W] | 33 | 36 | 14 | 7 |
| Potência de Saída [W] | 5 | 10 | 9 | 5 |

3.2 CONJUNTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Para a avaliação das performances e consumos elétricos foram conjugados os diferentes motores (identificados de 1 a 4) pelas diversas hélices (identificadas de A a F). Foram ensaiados no total 18 conjuntos “motor / hélice”, conforme Tabela 6, num total de 24 combinações possíveis.

Tabela 6 – Combinações motor / hélice utilizadas para a avaliação do desempenho

| | | MOTOR | | | |
|--------|--|--|--|---|--|
| | |  1 |  2 |  3 |  4 |
| HÉLICE |  A | • | | • | • |
| |  B | • | • | • | |
| |  C | • | | • | • |
| |  D | • | | • | • |
| |  E | • | | • | • |
| |  F | • | | • | • |

Entendeu-se que as 18 combinações utilizadas (marcadas com “•”) são suficientes para avaliar o impacto do ângulo de ataque, rugosidade e das geometrias das hélices no desempenho dos

motoventiladores assim como as diferenças de performance e consumo elétrico na utilização dos motores de polos sombreados e ECM.

Para cada avaliação, foram utilizados os seguintes conjuntos:

- **Influência do ângulo de ataque das pás, α (28° e 34°)**

Foi comparado o desempenho das hélices A e B acopladas aos motores 3 e 4. Estas hélices apresentam materiais e geometrias das pás idênticas variando apenas o seu ângulo de ataque conforme Tabela 7. Utilizaram-se as hélices acopladas aos motores 3 e 4 para avaliar o padrão de desempenho na utilização em motores diferentes.

Tabela 7 – Comparações realizadas pela influência do ângulo de ataque das pás

| Conjunto 1 | VS | Conjunto 2 |
|------------|----|------------|
| 3 / A | VS | 3 / B |
| 4 / A | VS | 4 / B |

- **Influência da rugosidade nas hélices (R_a de 0,36 μm e R_a de 3,36 μm)**

Foi comparado o desempenho das hélices C e D acopladas aos motores 1, 3 e 4. Estas hélices apresentam geometrias, ângulo de ataque das pás e materiais com características semelhantes e diferenças na rugosidade, conforme Tabela 8. Utilizaram-se as hélices acopladas aos motores 1, 3 e 4 para avaliar o padrão de desempenho na utilização em motores diferentes.

Tabela 8 – Comparações realizadas pela rugosidade nas hélices

| Conjunto 1 | VS | Conjunto 2 |
|------------|----|------------|
| 1 / C | VS | 1 / D |
| 3 / C | VS | 3 / D |
| 4 / C | VS | 4 / D |

- **Influência das geometrias**

Foi comparado o desempenho das hélices A, C, E e F acopladas aos motores 1, 3 e 4. Estas hélices apresentam ângulo de ataque das pás semelhantes com diferenças na geometria das pás conforme Tabela 9. Utilizaram-se as hélices acopladas aos motores 1, 3 e 4 para avaliar o padrão de desempenho na utilização de motores diferentes.

Tabela 9 – Comparações realizadas pela geometria das hélices

| Conjunto 1 | VS | Conjunto 2 | VS | Conjunto 3 | VS | Conjunto 4 |
|------------|----|------------|----|------------|----|------------|
| 1 / A | VS | 1 / C | VS | 1 / E | VS | 1 / F |
| 3 / A | VS | 3 / C | VS | 3 / E | VS | 3 / F |
| 4 / A | VS | 4 / C | VS | 4 / E | VS | 4 / F |

- **Influência da escolha do motor**

Foram comparados os motores 1, 2 e 3 e 4 utilizando as hélices A, B, C, E e F conforme Tabela 10 para avaliar e verificar padrões de desempenho na utilização de hélices de com geometrias diferentes.

Tabela 10 – Comparações realizadas por tipo de motor

| Conjunto 2 | VS | Conjunto 2 | VS | Conjunto 3 |
|------------|----|------------|----|------------|
| 1 / A | VS | 3 / A | VS | 4 / A |
| 1 / C | VS | 3 / C | VS | 4 / C |
| 1 / E | VS | 3 / E | VS | 4 / E |
| 1 / F | VS | 3 / F | VS | 4 / F |
| 2 / B | VS | 3 / B | VS | 4 / B |

3.3 DESCRIÇÃO GERAL DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.3.1 BANCADA DE ENSAIOS

Na Figura 31 está esquematizada a bancada de ensaios para a determinação das curvas de desempenho e do ruído provocado pelos conjuntos.

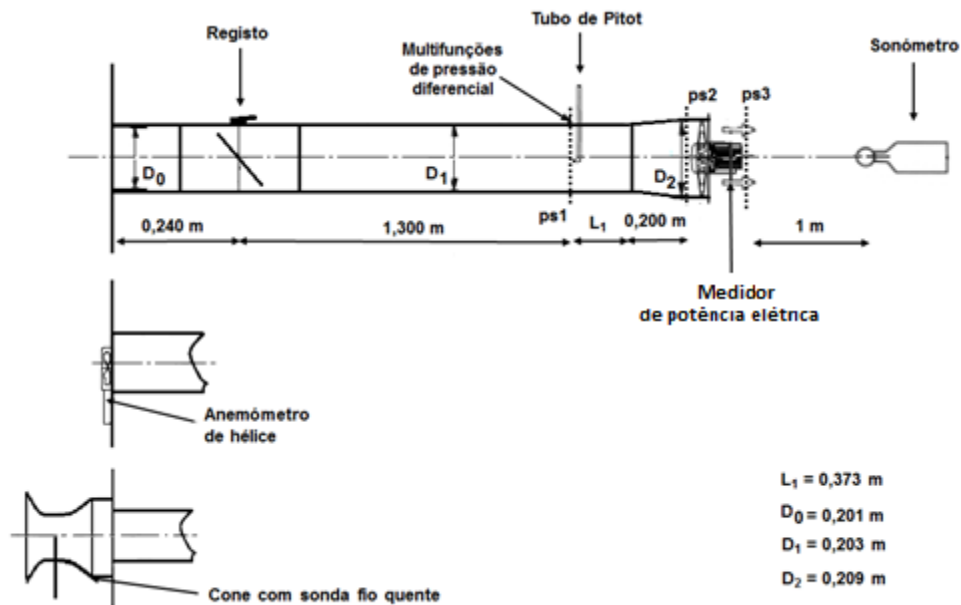


Figura 31- Esquematização da bancada de ensaios

Conforme observado, a bancada tem possibilidade para realizar a determinação do caudal, \dot{V} , com recurso ao tubo de Pitot, anemômetro de hélice e com o cone acoplado com sonda de fio quente tendo em conta a avaliação descrita na secção 3.3.5.

Na Figura 32 está apresentada a instalação geral.



Figura 32 – Bancada de ensaios experimental montada no laboratório LAVAC.

Nas Figuras 33 e 34, observa-se a estrutura e o local de utilização do tubo de Pitot que permitiu a medição de pressões dinâmicas, p_{din} , ao longo da secção com espaçamentos em conformidade com [14] e explicada em mais detalhe na secção 3.3.5.



Figura 33 – Estrutura de apoio com escala para medição da p_{din} utilizando o tubo de Pitot



Figura 34 – Utilização do tubo de Pitot

Na Figura 35 observa-se a zona de aplicação do motoventilador. Consegue-se visualizar com detalhe a aplicação de uma sonda para controlo da temperatura do motor durante o

funcionamento e aplicação do autocolante, necessário para a avaliação das rotações do ventilador, ω , com recurso à sonda de taquímetro ótico.

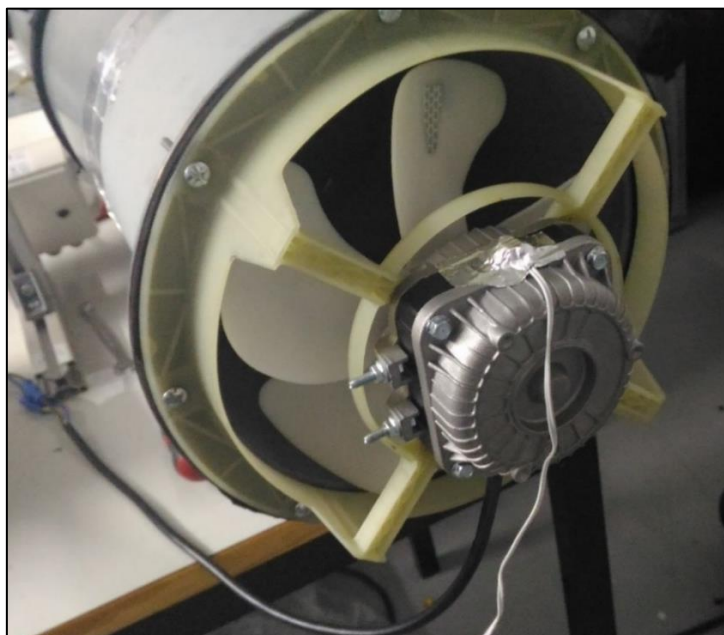


Figura 35 – Acoplamento do motoventilador na estrutura de ensaio.

Na Figura 36 observa-se o interior do registo de caudal, utilizado para fazer variar a perda de carga do sistema e determinar a curva característica dos conjuntos.



Figura 36 – Registo para criar variação na perda de carga

3.3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a obtenção das curvas características de cada conjunto e do ruído provocado pelos mesmos seguiu-se a seguinte metodologia de ensaio:

- 1) Montar a hélice e o motor no aro, conforme conjunto a ensaiar;
- 2) Aplicar fita adesiva na traseira de uma hélice para posterior medição das rotações, ω , do conjunto;
- 3) Acoplar o conjunto à bancada de ensaios;
- 4) Verificar erro do sonómetro utilizando o calibrador;
- 5) Verificar se o valor de medido corresponde a 93,9 dB. Caso observado valor diferente realizar ajuste ao equipamento segundo instruções do fabricante;
- 6) Medir o ruído ambiente, $L_{eq,amb}$, com medição de pelo menos 20 s;
- 7) Ligar o conjunto à rede elétrica;
- 8) Posicionar a manípulo do registo de modo a que a abertura seja de 100 %;
- 9) Medir a velocidade de escoamento, V ;
- 10) Medir a potência do motor, P_e (5 medições);
- 11) Medir a pressão estática no ponto 1, P_{s1} , (5 medições);
- 12) Medir a pressão atmosférica, p_{atm} ;
- 13) Medir a temperatura ambiente, T_{ar} , e a humidade relativa do ar, hu ;
- 14) Medir as rotações do motor, ω , (5 medições);
- 15) Realizar 3 medições do ruído para determinação do $L_{eq,A}$, com tempo de medição igual ou superior a 20 s;
- 16) Repetir os passos 10) a 16) novamente para outras posições de registo. Realizar medições para pelo menos 10 posições de registo;
- 17) Desligar a amostra da rede elétrica;
- 18) Determinar o ruído ambiente, $L_{eq,amb}$;
- 19) Retirar o conjunto da bancada e realizar 3 medições do ruído do conjunto desacoplado a uma distância de 1 m do sonómetro e altura coincidente com o eixo do sonómetro.
- 20) Realizar a verificação do erro do sonómetro utilizando o calibrador. Verificar se o valor difere do valor inicial em 0,3 dB. Se for este o caso o ensaio do ruído não é válido.

Notas:

- 1- P_1 e P_e foram determinadas simultaneamente com a medição de V devido à perda de carga que o posicionamento do aparelho causa no sistema;
- 2 – Adicionalmente, ao procedimento experimental, registou-se em alguns conjuntos as temperaturas dos motores, em funcionamento, para avaliar possíveis perdas de rendimento por geração de calor com recurso a uma câmara termográfica.

3.3.3 DESVIOS RELATIVAMENTE ÀS NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE DESEMPENHO

Os ensaios para a determinação das curvas de desempenho das amostras basearam-se nas montagens do tipo C (ventilador montado a uma conduta de insuflação e saída livre) de acordo com a norma ISO 5801 [14], conforme Figura 28, considerando os seguintes desvios:

- 1) Não se utilizou o favo para uniformização do fluido. A utilização deste elemento implicava o aumento da perda de carga do sistema. Tendo em conta que a altura de elevação do conjunto é reduzida a extensão da curva de desempenho determinada iria ser menor;
- 2) O controlo da perda de carga foi assegurado pelas aberturas de um registo e não de um bocal tendo em conta a disponibilidade de equipamentos do laboratório de ensaios;
- 3) O caudal foi medido com o auxílio de um anemómetro de hélice, após considerações de acordo com secção 3.3.5.4.

3.3.4 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Na Tabela 11 estão descritos todos os equipamentos utilizados para a obtenção dos resultados.

Tabela 11 – Características dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios

| Equipamento | Marca/ Modelo | Nº Série | Refª Equip. | Resolução, r | Crítérios de calibração | Data do certificado de calibração | Certificado de calibração |
|---|------------------|----------|----------------|---------------------------|---|---|------------------------------|
| Multifunções pressão diferencial, KIMO | KIMO AMI 301 | 02100120 | IMMF04 | 1 Pa | 0,5% da leitura \pm 1 Pa | 15-03-2013 | NEM1300412 |
| Sonda Anemómetro de hélice Ø100 mm | KIMO AMI 301 | 02110202 | IMSA01 | 0,1 m/s [3,1 a 35 m/s] | 2% de leitura \pm 0,2 m/s (r = 0,1 m/s) | 18-03-2013 | NEM1300412 |
| | | | | 0,01 m/s [0,2 a 3 m/s] | 2% de leitura \pm 0,06 m/s (r=0,01 m/s) | | |
| Sonda Anemómetro fio Quente | KIMO AMI 301 | 02100482 | IMSA02 | 0,1 m/s [3,1 a 30 m/s] | 3% de leitura \pm 0,1 m/s (r = 0,1 m/s) | 18-03-2013 | NEM1300412 |
| | | | | 0,01 m/s [0 a 3 m/s] | 3% de leitura \pm 0,03 m/s (r=0,01 m/s) | | |
| Sonda Taquímetro ótico | KIMO AMI 301 | 02110159 | IMTQ01 | 1 rpm | 0,5% da leitura \pm 1 RPM | 18-03-2013 | NEM1300412 |
| Tubo de Pitot | KIMO AMI 301 | --- | --- | --- | K=1,015 | --- | --- |
| Sonda Termohigrómetro | KIMO AMI 301 | 02110498 | IMSH01 | 0,1% HR | 1% da leitura \pm 1,5% (HR) | 14-03-2013 | NEM1300412 |

Tabela 11 - Características dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios (Continuação)

| Equipamento | Marca/Modelo | Nº Série | Refª Equip. | Resolução, r | Critérios de calibração | Data do certificado de calibração | Certificado de calibração |
|--|--------------------|---------------|-------------|--------------|---|-----------------------------------|---------------------------|
| Cone | KIMO K75 | --- | IMCN01 | --- | K=50 | --- | --- |
| Multifunções Pressão diferencial, TSI | TSI 9565-P | 9565P155 1032 | IMMF07 | 0,1 Pa | 1% da leitura ± 1Pa | 15-01-2016 | CERT_GEN_W CC_TM |
| Multifunções Pressão barométrica, TSI | TSI 9565-P | 9565P155 1032 | IMMF07 | 0,1 mmHg | 2% da leitura | 15-01-2016 | CERT_GEN_W CC_TM |
| Paquímetro | Mitotoyo | --- | 87.500.23 | 0,05 mm | E: 0,00 mm K: 2,00 l: ± 0,016 mm | 12-05-2016 | 20165005226 /10 |
| Fita-métrica | STANLEY 30-457 | --- | 4.332.1 1 | 1 mm | E: 0 mm K: 2,00 l: ± 0,03 mm | 16-11-2015 | 18388/15 REV.1 |
| Termohigrómetro | --- | --- | 4.18407 | 0,1 °C | ± 1°C | 10-05-2015 | 20155004238/10 |
| Medidor de Potência | GW INSTEK GPM-8212 | --- | IMMU0 2 | 0,01 W | 0,2% da leitura ± 0,2% of FS (51,20W-160mA; 102,4W-320mA) | --- | --- |
| Sonómetro | CESVA S420 | T241688 | IMSN01 | 0,1 dB | ± 0,7 dB | --- | --- |
| Câmara Termográfica | FLIR E30 | --- | --- | 0,1 °C | 2% da Leitura | --- | --- |

3.3.5 AVALIAÇÃO DO CAUDAL, \dot{V}

Tendo em consideração o equipamento disponível no laboratório, o método para medição do caudal, obedecendo às alternativas recomendadas da ISO 5801 [14] e AMCA 201 [15], é a utilização do tubo de Pitot.

Apesar de ser um método recomendado pelas normas descritas, o tempo para a medição do caudal é considerável visto que para cada posição do registo seria necessário medir 24 pontos de pressão dinâmica média, $\overline{p_{din,j}}$, ao longo da secção transversal do tubo de acordo com Figura 37, sendo que a sua média é determinada pelo registo de 5 a 10 medições.

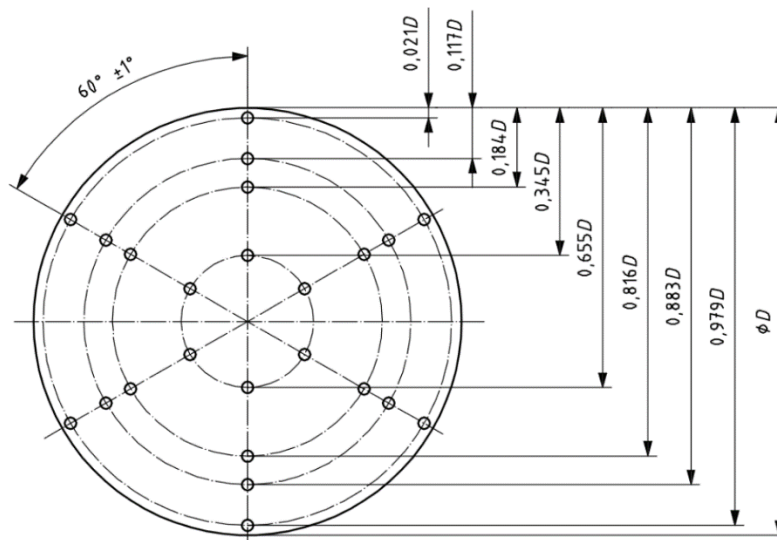


Figura 37 – Posições de medição da $p_{din,j}$ utilizando o tubo de Pitot. [14]

Por outro lado, a documentação técnica das multifunções TSI [37] não recomenda a utilização do equipamento para medição de velocidades, com o tubo de Pitot, inferiores a 5 m/s, sendo que a partir dos 2 m/s não conseguimos obter leituras estáveis.

A norma, AMCA 210 [15], sugere a utilização do tubo de Pitot para altas velocidades e altas pressões garantindo que para escoamento livre a velocidade do escoamento deve ser pelo menos de 12 m/s (valor não alcançado tendo em conta as amostras ensaiadas).

A ISO 5801 [14] não recomenda a utilização do tubo de Pitot se o rácio entre o diâmetro da conduta, D_1 com o diâmetro exterior do tubo de Pitot, d , não for superior a 48. Tendo em conta as dimensões da conduta e equipamento ($D_1 = 202,80$ mm e $d = 6$ mm) o rácio não é respeitado ($D_1/d=33,8$).

Com todas as recomendações referidas e o tempo considerável para realizar a medição, optou-se por avaliar a possibilidade de realizar a medição do caudal segundo métodos alternativos comparando os seus valores com os valores calculados com a utilização do tubo de Pitot.

Utilizou-se o conjunto 2 / B para determinar o caudal usando simultâneo outros equipamentos como o anemómetro de hélice e o cone acoplado à sonda de fio quente.

O caudal, utilizando o tubo de Pitot, foi determinado de acordo com a equação (35). Simultaneamente ao cálculo do caudal para diferentes aberturas do registo foram determinadas as velocidades para cada ponto de medição para traçar o seu perfil e perceber se na secção de medição o escoamento se encontra desenvolvido e uniforme.

No método do anemómetro de hélice, o caudal calculou-se de acordo com a equação (27). A velocidade foi determinada como a média de 5 medições realizadas na entrada de insuflação da tubagem, conforme Figura 38, (uma medição no eixo da conduta e 4 medições nas extremidades da conduta desfasadas a 90°).

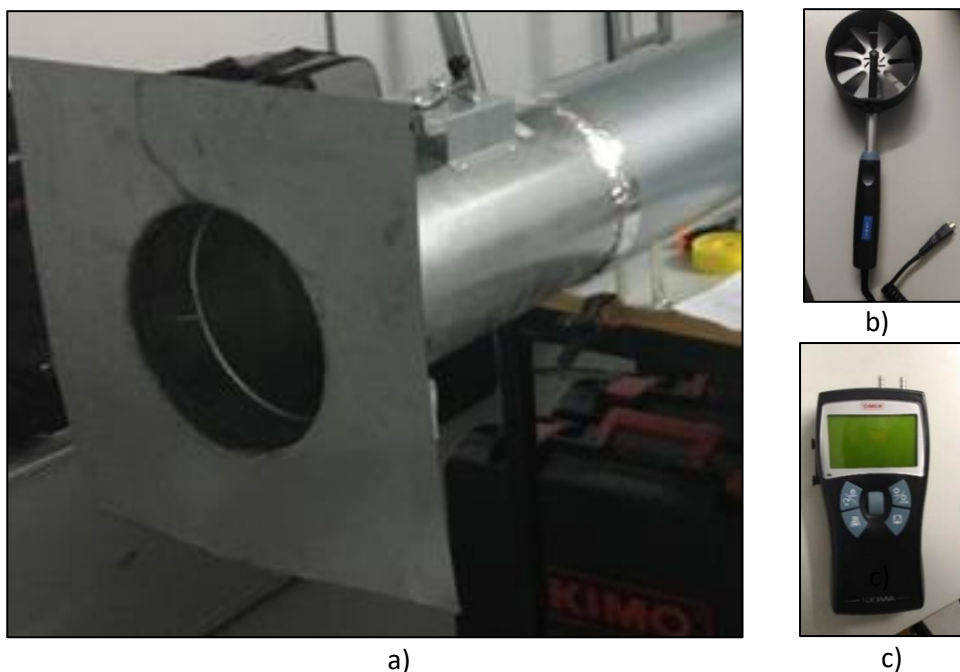


Figura 38 – a) Zona de medição; b) Sonda do Anemómetro de hélice; c) Multifunções para registo da velocidade

Assim como no método do anemómetro, no método do cone a medição realizou-se na entrada da conduta de insuflação, acoplando o cone à base quadrada conforme Figura 39, e registou-se a velocidade lida, no eixo da conduta, com o auxílio do anemómetro de fio quente. A velocidade média foi registada e o caudal foi determinado de acordo com a equação (32)

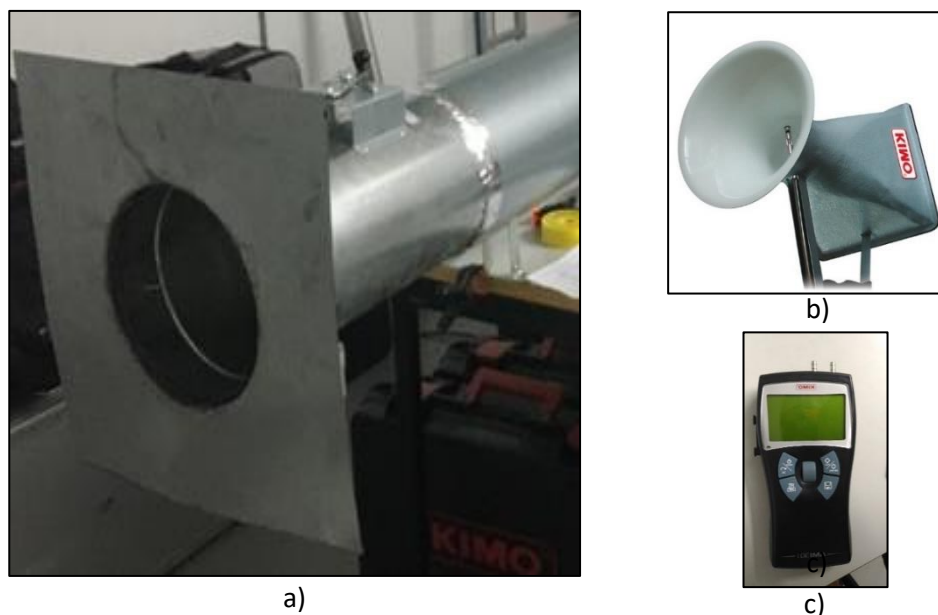


Figura 39 – a) Zona de medição; b) Sonda do Anemómetro de fio quente acoplado ao cone; c) Multifunções para registo da velocidade

3.3.5.1 MEDIÇÕES E INCERTEZAS DE \dot{V} , OBTIDO PELO MÉTODO DO ANEMÓMETRO DE HÉLICE

O caudal, \dot{V} , calculou-se de acordo com a seguinte equação:

$$\dot{V} = \bar{V}_0 \cdot A_0 = \bar{V}_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\bar{D}_0}{1000}\right)^2 \quad [m^3/s] \quad (27)$$

Onde \bar{V}_0 , corresponde à velocidade média de 5 medições do escoamento calculada de acordo com a equação (28), na posição 0:

$$\bar{V}_0 = \frac{\sum_{i=1}^5 V_{0i}}{5} \quad [m/s] \quad (28)$$

O diâmetro da tubagem \bar{D}_0 resultou da média de 3 medições realizadas ao tubo na zona de medição:

$$\bar{D}_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 D_{0i}}{3} \quad [mm] \quad (29)$$

Os coeficientes de sensibilidade das variáveis dependentes são foram determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial V} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\bar{D}_0}{1000}\right)^2 \quad (30)$$

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0} = \frac{\bar{D}_0 \cdot \bar{V} \cdot \pi}{2 \times 10^6} \quad (31)$$

Tendo em conta que \dot{V} é função das variáveis V_0 e D_0 , consideraram-se as seguintes fontes de incerteza:

- Média das medições da velocidade utilizando o anemómetro de hélices;
- Erro máximo do anemómetro de hélices declarado pelo fabricante, $E_{max,anem}$;
- Resolução do anemómetro, r_{anem} ;
- Média das medições do diâmetro da tubagem, \bar{D}_0 ;
- Resolução do paquímetro, r_{paq} ;
- Incerteza expandida do paquímetro, $U(paq)$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\dot{V})$ está apresentada na Tabela 12. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 13.

Tabela 12 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de \dot{V} (Método do anemómetro de hélice)

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\dot{V})$ |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|--|---|
| \bar{V}_0 | $\frac{\sum_{i=1}^5 V_{0i}}{5}$ | $\frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{5}}$ | A | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial V}$ | $\left(\frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{5}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $E_{max,anem}$ | --- | $\frac{E_{max,anem}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial V}$ | $\left(\frac{E_{max,anem}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^2$ | |
| r_{anem} | --- | $\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial V}$ | $\left(\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^2$ | |
| \bar{D}_0 | $\frac{\sum_{i=1}^3 D_{0i}}{3}$ | $\frac{\sigma_{D_0}}{\sqrt{3}}$ | A | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}$ | $\left(\frac{\sigma_{D_0}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}\right)^2$ | |
| $U(paq)$ | --- | $\frac{U(paq)}{K}$ | B Normal | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}$ | $\left(\frac{U(paq)}{k} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}\right)^2$ | |
| r_{paq} | ---- | $\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}$ | $\left(\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}\right)^2$ | |

Tabela 13 – Determinação de k associado à determinação de \dot{V} (Método do anemómetro de hélice)

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(\dot{V})$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|---|--|--|
| \bar{V} | 4 | $\left(\frac{\sigma_V \cdot \partial \dot{V}}{\sqrt{5} \partial V}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(\dot{V})}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $K' = f(v_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| $E_{max,anem}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,anem}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^4$ | | | |
| r_{anem} | ∞ | $\left(\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^4$ | | | |
| \bar{D}_0 | 2 | $\left(\frac{\sigma_{D_0}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}\right)^4$ | | | |
| $u(paq)$ | 50 | $\left(\frac{u(paq)}{k} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}\right)^4$ | | | |
| r_{paq} | ∞ | $\left(\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_0}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(\dot{V})$, resultante da utilização do anemómetro de hélice, calculou-se de acordo com a Equação (26).

3.3.5.2 MEDIÇÕES E INCERTEZAS DE \dot{V} , OBTIDO PELO MÉTODO DO CONE

O caudal medido, obtido pelo método do cone resultou da seguinte equação:

$$\dot{V} = K \cdot \bar{V} \quad [m^3/h] \quad (32)$$

Onde K corresponde a uma constante definida pelo fabricante para a geometria utilizada.

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^{10} V_i}{10} \quad [m/s] \quad (33)$$

O coeficiente de sensibilidade calculou-se de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial V} = K = 50 \quad (34)$$

Tendo em conta que \dot{V} é função de V, consideraram-se seguintes fontes de incerteza:

- Média das velocidades medidas pela sonda de anemómetro de fio quente acoplado ao cone:
- Erro máximo da sonda de anemómetro de fio quente declarado pelo fabricante, $E_{max,hotwire}$:
- Resolução do anemómetro de fio quente, $r_{hotwire}$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\dot{V})$ está apresentada na Tabela 14. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 15.

Tabela 14 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de \dot{V} (Método do cone)

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\dot{V})$ |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| \bar{V} | $\frac{\sum_{i=1}^{10} V_i}{10}$ | $\frac{\sigma_V}{\sqrt{10}}$ | A | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial V}$ | $\left(\frac{\sigma_V}{\sqrt{10}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $E_{max,hotwire}$ | --- | $\frac{E_{max,anem}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial V}$ | $\left(\frac{E_{max,hotwire}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^2$ | |
| $r_{hotwire}$ | --- | $\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial V}$ | $\left(\frac{r_{hotwire}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^2$ | |

Tabela 15 – Determinação de k associado à determinação de \dot{V} (Método do cone)

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(\dot{V})$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|-------------------|----------------------------|---|---|--|---|
| \bar{V} | 9 | $\left(\frac{\sigma_v \cdot \partial \dot{V}}{\sqrt{10} \partial V}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,hotwire}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,hotwire}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(\dot{V})}{\sum \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(\nu_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| $r_{hotwire}$ | ∞ | $\left(\frac{r_{hotwire}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(\dot{V})$, resultante da utilização do cone com a sonda de fio quente calculou-se de acordo com a e Equação (26).

3.3.5.3 MEDIÇÕES E INCERTEZAS DE \dot{V} , OBTIDO PELO MÉTODO DO TUBO DE PITOT

O caudal, determinado através do método do tubo de Pitot, calculou-se utilizando a seguinte equação:

$$\dot{V} = V \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_1}{1000}\right)^2 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (35)$$

V resultou da utilização da expressão declarada pelo fabricante e utilizada em [14]:

$$V = K \cdot \sqrt{\frac{574,2T_{ar} + 156842,77}{133,32p_{atm}}} \cdot \sqrt{\overline{p_{din}}} \quad [\text{m/s}] \quad (36)$$

Onde:

K – constante do tubo de Pitot utilizado. Para efeitos de cálculo utilizou-se $K=1,015$ (valor declarado pelo fabricante);

$\overline{p_{din}}$ – pressão dinâmica média resultante das pressões dinâmicas locais, $p_{din,j}$ medidas no ponto 1 [14] ao longo da secção de acordo com Figura 37 onde:

$$\overline{p_{din}} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{24} \sqrt{p_{din,j}}}{24}\right)^2 \quad [Pa] \quad (37)$$

$$p_{din,j} = \frac{\sum_{i=1}^{10} p_{din,j,i}}{10} \quad [Pa] \quad (38)$$

O diâmetro da tubagem obteve-se como resultado da média de 3 medições de D_1 .

$$\overline{D_1} = \frac{\sum_{i=1}^3 D_{1i}}{3} \quad [mm] \quad (39)$$

Os coeficientes de sensibilidade calcularam-se de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial T_{ar}} = \frac{1,03766 \sqrt{\overline{p_{din}}} \cdot K}{p_{atm} \cdot \sqrt{\frac{T_{ar} + 273,15}{p_{atm}}}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_1}{1000}\right)^2 \quad (40)$$

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}} = \frac{\sqrt{\frac{574,2T_{ar} + 156842,77}{133,32p_{atm}}} \cdot 0,020833 \cdot (\sum_{j=1}^{24} \sqrt{p_{din,j}})}{\sqrt{p_{din,j}} \cdot (\sum_{j=1}^{24} \sqrt{p_{din,j}})} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_1}{1000}\right)^2 \quad (41)$$

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}} = \frac{-1,03766 \sqrt{\overline{p_{din}}} \cdot K \cdot (T_{ar} + 273,15)}{\sqrt{\frac{T_{ar} + 273,15}{p_{atm}} + p_{atm}^2}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_1}{1000}\right)^2 \quad (42)$$

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1} = \sqrt{\frac{574,2T_{ar} + 156842,77}{133,32p_{atm}}} \cdot \sqrt{\overline{p_{din}}} \cdot \frac{\pi}{2 \times 10^6} \cdot D_1 \quad (43)$$

Tendo em conta que \dot{V} é função de $p_{din,j}$, p_{atm} , T_{ar} e D_1 consideraram-se as seguintes fontes de incerteza:

- Média das pressões dinâmicas medidas em no ponto j da secção 1, $p_{din,j}$;
- Erro máximo de leitura de pressões dinâmicas declaradas pelo fabricante, $E_{max,p_{din,j}}$;
- Resolução do multifunções TSI para a determinação de $p_{din,j}$, $r_{p_{din,j}}$;
- Erro máximo do multifunções TSI para a determinação p_{atm} , $E_{max,TSIpb}$;
- Resolução do multifunções TSI para a determinação de p_{atm} , r_{TSIpb} ;
- Erro máximo admissível para o termohigrómetro, $E_{max,thi}$;
- Resolução do termohigrómetro, r_{thi} ;
- Média das medições de D_1 ;
- Incerteza do paquímetro, $U(paq)$;
- Resolução do paquímetro, r_{paq}

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\dot{V})$ está apresentada na Tabela 16. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 17.

Tabela 16 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de \dot{V} (Método do tubo de Pitot)

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\dot{V})$ |
|---------------------|--|--|---------------------------------------|---|---|---|
| $p_{din,j}$ | $\frac{\sum_{i=1}^{10} p_{din,i}}{10}$ | $\frac{\sigma_{p_{din,j}}}{\sqrt{10}}$ | A | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}$ | $\left(\frac{\sigma_{p_{din,j}}}{\sqrt{10}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $E_{max,p_{din,j}}$ | --- | $\frac{E_{max,p_{din,j}}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}$ | $\left(\frac{E_{max,p_{din,j}}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}\right)^2$ | |
| $r_{p_{din,j}}$ | --- | $\frac{r_{p_{din,j}}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}$ | $\left(\frac{r_{p_{din,j}}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}\right)^2$ | |
| $E_{max,TSIpb}$ | --- | $\frac{E_{max,TSIpb}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}$ | $\left(\frac{E_{max,TSIpb}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^2$ | |
| r_{TSIpb} | --- | $\frac{r_{TSIpb}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}$ | $\left(\frac{r_{TSIpb}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^2$ | |
| $E_{max,th}$ | --- | $\frac{E_{max,th}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial T}$ | $\left(\frac{E_{max,th}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^2$ | |
| r_{th} | --- | $\frac{r_{th}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial T}$ | $\left(\frac{r_{th}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^2$ | |
| $\overline{D_1}$ | $\frac{\sum_{i=1}^3 D_{1,i}}{3}$ | $\frac{\sigma_{D_1}}{\sqrt{3}}$ | A | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}$ | $\left(\frac{\sigma_{D_1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}\right)^2$ | |
| $U(paq)$ | --- | $\frac{U(paq)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}$ | $\left(\frac{U(paq)}{k} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}\right)^2$ | |
| r_{paq} | ---- | $\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}$ | $\left(\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}\right)^2$ | |

Tabela 17 – Determinação de k associado à determinação de \dot{V} (Método do tubo de Pitot)

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(\dot{V})$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|---------------------|----------------------------|---|---|--|--|
| $p_{din,j}$ | 9 | $\left(\frac{\sigma_{p_{din,j}}}{\sqrt{10}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(\dot{V})}{\sum \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(\nu_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| $E_{max,p_{din,j}}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,p_{din,j}}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}\right)^4$ | | | |
| $r_{p_{din,j}}$ | ∞ | $\left(\frac{r_{p_{din,j}}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{din,j}}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,TSIpb}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,TSIpb}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^4$ | | | |
| r_{TSIpb} | ∞ | $\left(\frac{r_{TSIpb}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,th}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,th}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^4$ | | | |
| r_{th} | ∞ | $\left(\frac{r_{th}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial p_{atm}}\right)^4$ | | | |
| \bar{D}_1 | 2 | $\left(\frac{\sigma_{D_1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}\right)^4$ | | | |
| $u(paq)$ | 50 | $\left(\frac{u(paq)}{k} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}\right)^4$ | | | |
| r_{paq} | ∞ | $\left(\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \dot{V}}{\partial D_1}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(\dot{V})$, resultante da utilização do tubo de Pitot, calculou-se de acordo com a Equação (26).

3.3.5.4 ESCOLHA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE CAUDAL, \dot{V}

Nas Tabela 18 são apresentados os resultados dos valores obtidos para pressões estáticas semelhantes medidas no ponto 1, p_1 , de acordo com Figura 31.

Tabela 18 – Resultados da medição do caudal de acordo com os 3 métodos

| P_1 [Pa] | $\dot{V}_{\text{tubo de pitot}}$ [m ³ /h] | U ($\dot{V}_{\text{tubo de pitot}}$) | $\dot{V}_{\text{anemómetro}}$ [m ³ /h] | U ($\dot{V}_{\text{anemómetro}}$) | \dot{V}_{cone} [m ³ /h] | U (\dot{V}_{cone}) |
|---------------|---|--|--|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| 19 | 477,5 | ± 15,1 m ³ /h (± 3%) | 530,2 | ± 42,5 m ³ /h (± 8%) | --- | --- |
| 22 | 425,5 | ± 13,9 m ³ /h (± 3%) | 466,4 | ± 41,9 m ³ /h (± 9%) | --- | --- |
| 26 | 347,0 | ± 12,7 m ³ /h (± 4%) | 357,2 | ± 39,4 m ³ /h (± 11%) | 315,0 | ± 17,4 m ³ /h (± 6%) |
| 28 | 325,8 | ± 6,1 m ³ /h (± 4%) | 341,3 | ± 22,9 m ³ /h (± 7%) | Não realizado | --- |
| 32 | 294,4 | ± 12,6 m ³ /h (± 4%) | 288,7 | ± 22,0 m ³ /h (± 8%) | Não realizado | --- |
| 35 | 269,3 | ± 12,9 m ³ /h (± 5%) | 253,0 | ± 21,8 m ³ /h (± 9%) | Não realizado | --- |

A utilização do cone para a medição do caudal implicou um aumento de perda de carga considerável ao sistema pelo que não se conseguiu realizar medições abaixo dos 26 Pa para a amostra ensaiada, de tal forma que ter-se-ia uma curva muito restrita para posterior avaliação dos resultados. O caudal calculado foi inferior aos restantes métodos. Relativamente ao tubo de Pitot verificou-se uma redução na leitura de 10,2% (Tabela 20).

Sentiu-se dificuldade em garantir a vedação entre o contacto do cone com a estrutura plana acoplada à tubagem. Situação esta que pode ter influenciado a medição da velocidade. O valor K é um valor adimensional fornecido na ficha técnica do fabricante. Ficha esta que não identifica a incerteza e/ou erro associado a esta variável.

Comparando a utilização do tubo de Pitot e o anemómetro de hélice, observou-se que as incertezas expandidas, com a utilização do tubo de Pitot em função das grandezas consideradas, foram menores.

Até p_1 de 28 Pa o caudal medido com o tubo de Pitot foi inferior ao obtido pelo método do anemómetro de hélice.

Para pressões estáticas superiores verificou-se o oposto, conforme Tabela 19.

A zona escolhida para a medição da velocidade do anemómetro de hélice pode introduzir erros nas medições devido à direção não linear do escoamento com o eixo da conduta em toda a secção transversal com o eixo de rotação das hélices do equipamento e à redução da secção livre devido à introdução do equipamento parcialmente na conduta que origina um aumento de velocidade pontual local. Estes erros podem estar na origem das diferenças observadas sobretudo aos 19 e 22 Pa (9,9 % e 8,7 % respetivamente) onde a velocidade é maior.

À medida que se fechou o registo, o caudal diminuiu, como consequência do aumento da perda de carga do sistema, tornando o escoamento menos turbulento. O perfil de velocidades tornou-se mais uniforme e as diferenças das leituras comparativamente com método do anemómetro de hélice foram menores, atingindo um valor máximo de 6,3 % quando o registo ficou praticamente na posição fechada conforme na Tabela 19.

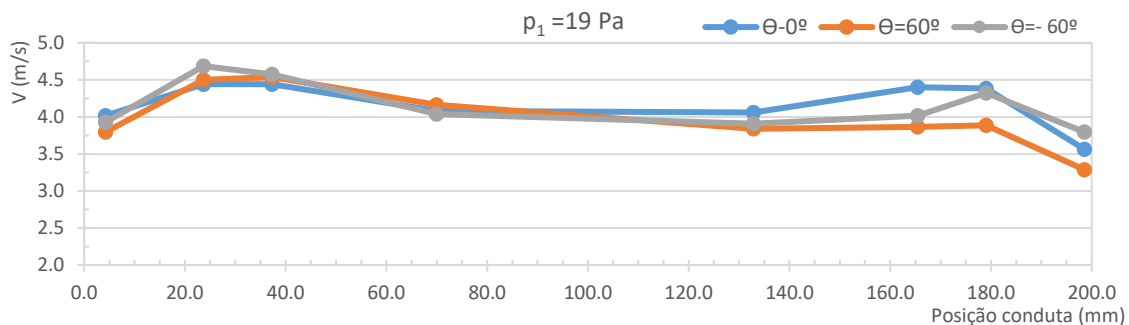
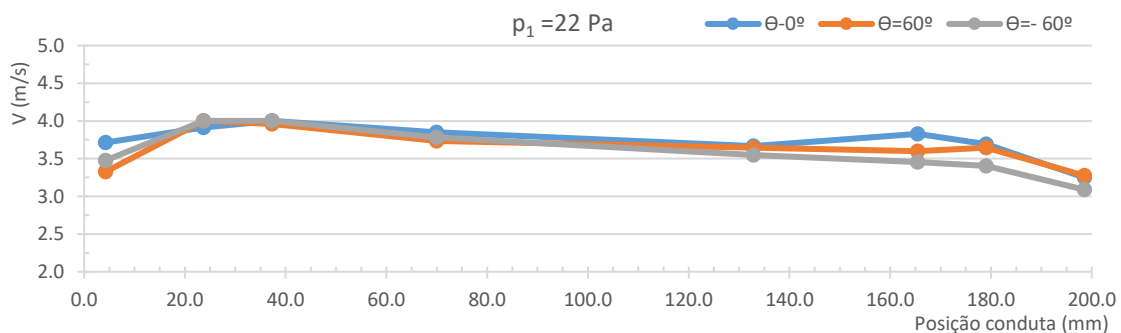
Tabela 19 – Diferenças da medição de \dot{V} pelos métodos do tubo de Pitot e Anemómetro de hélice

| p_1 | $\dot{V}_{Tubo\ de\ pitot} - \dot{V}_{anemómetro}$ | $\frac{(\dot{V}_{Tubo\ de\ pitot} - \dot{V}_{anemómetro})}{\dot{V}_{anemómetro}} \times 100$ |
|-------|--|--|
| [Pa] | [m ³ /h] | [%] |
| 19 | -52,7 | -9,9 |
| 22 | -40,9 | -8,7 |
| 26 | -10,2 | -2,5 |
| 28 | -15,5 | -4,5 |
| 32 | 5,7 | 2,1 |
| 35 | 16,3 | 6,3 |

Tabela 20 – Diferenças da medição de \dot{V} pelos métodos do tubo de Pitot e método do Cone

| p_1 | $\dot{V}_{Tubo\ de\ pitot} - \dot{V}_{cone}$ | $\frac{(\dot{V}_{Tubo\ de\ pitot} - \dot{V}_{cone})}{\dot{V}_{cone}} \times 100$ |
|-------|--|--|
| [Pa] | [m ³ /h] | [%] |
| 26 | 32,0 | 10,2 |

O perfil de velocidades, registado na medição do caudal utilizando o tubo de Pitot, estão apresentados nos Gráficos 1 a 6.

Gráfico 1 – Perfil de velocidades medidas na secção de medição utilizando o Tubo de Pitot para p_1 igual a 19 PaGráfico 2 – Perfil de velocidades medidas na secção de medição utilizando o Tubo de Pitot para p_1 igual a 22 Pa

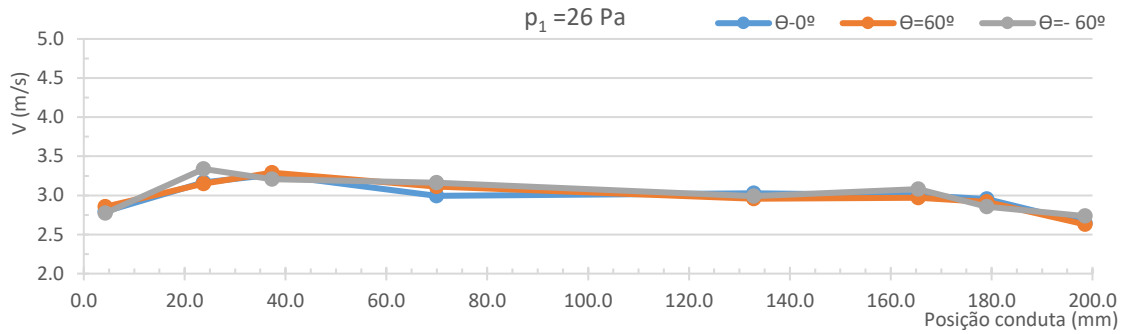


Gráfico 3 – Perfil de velocidades medidas na secção de medição utilizando o Tubo de Pitot para p_1 igual a 26 Pa

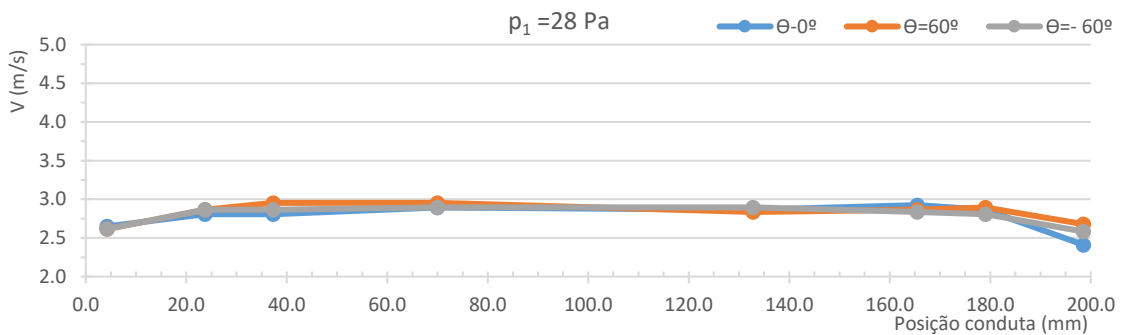


Gráfico 4 – Perfil de velocidades medidas na secção de medição utilizando o Tubo de Pitot para p_1 igual a 28 Pa

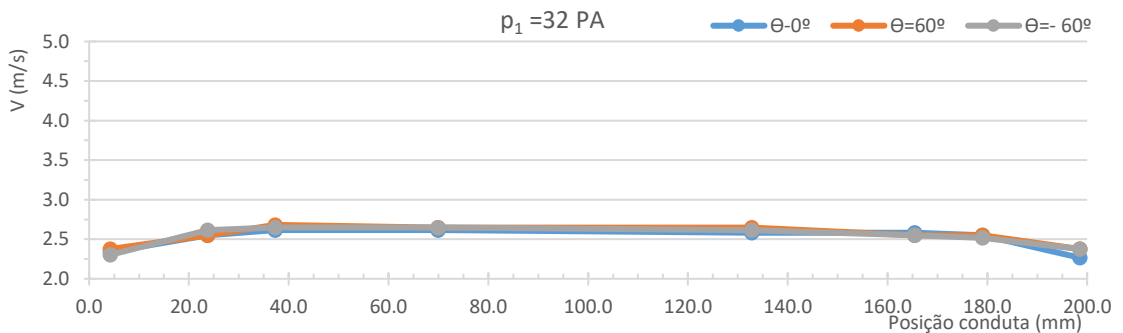


Gráfico 5 – Perfil de velocidades medidas na secção de medição utilizando o Tubo de Pitot para p_1 igual a 32 Pa

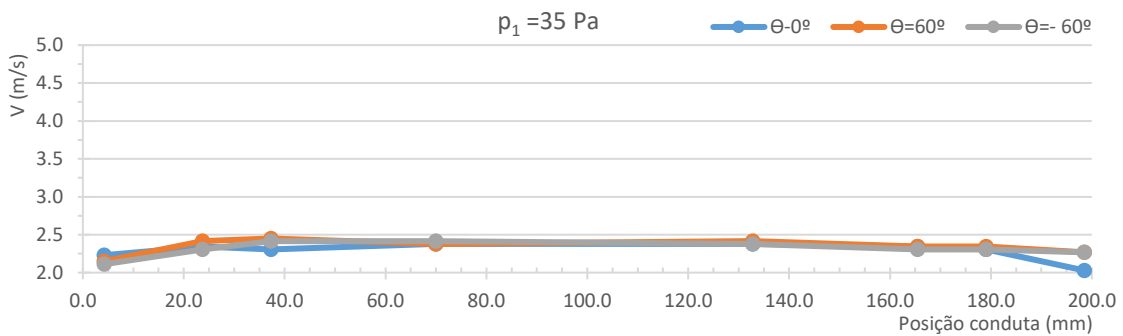


Gráfico 6 – Perfil de velocidades medidas na secção de medição utilizando o Tubo de Pitot para p_1 igual a 35 Pa

Da análise dos Gráficos 1 a 6 observou-se o seguinte:

A medição do caudal com o tubo de Pitot proporcionou incertezas nas medições mais baixas relativamente aos outros métodos, favorecidas pela quantidade de medições efetuadas. Analisando as velocidades obtidas em cada ponto de medição, medidas ao longo da secção transversal, os perfis de velocidades assemelharam-se ao perfil de Poiseuille [20] para escoamentos turbulentos conforme Figura 40.

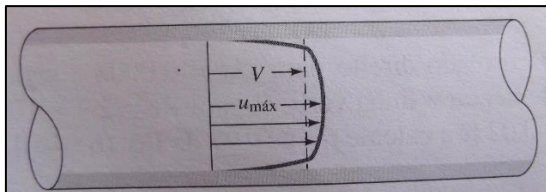


Figura 40 – Perfil de velocidade teórico numa conduta de escoamento em regime turbulento de acordo com o perfil de Poiseuille. [20]

As diferenças para o perfil teórico baseiam-se na não uniformidade do escoamento do fluido assim como nos vórtices que ainda se propagam ao longo da conduta caracterizado pelo aumento local da velocidade pertos das extremidades da conduta verificado principalmente para p_1 até 26 Pa. Um maior comprimento da conduta de insuflação ou a adição um favo de acordo com o previsto pelas normas [14] e [15] permitiria dissipar a energia dos turbilhões.

Apesar do método do tubo de Pitot apresentar incertezas mais baixas, optou-se por realizar as medições recorrendo ao anemómetro de hélice. A utilização do anemómetro permite obter as medições de forma mais rápida e a dificuldade para alterar o posicionamento do equipamento é substancialmente menor.

3.3.6 AVALIAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA DE ELEVAÇÃO DO MOTOVENTILADOR, $\Delta p_{\text{ventilador}}$

3.3.6.1 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA Á ENTRADA DO VENTILADOR

A pressão do ventilador corresponde à queda/aumento de pressão verificada entre os pontos 2 e 3 do sistema de acordo com Figura 31.

$$\Delta p_{\text{ventilador}} = p_3 - p_2 \quad (44)$$

No ponto 3 a saída é livre e encontra-se à pressão atmosférica de modo que:

$$p_3 = 0 \quad (45)$$

Logo,

$$\Delta p_{\text{ventilador}} = -p_2 \quad (46)$$

O registo da pressão estática realizou-se no ponto 1 através do multifunções TSI (Figura 43). Aplicando a equação de energia [38] entre o ponto 1 e 2 obtém-se a seguinte equação genérica:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + z_1 \cdot \rho \cdot g = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + z_2 \cdot \rho \cdot g + \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \cdot \left(f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} + C_0 \right) \right] \quad (47)$$

Onde,

$$z_1 = z_2 \quad (48)$$

Aplicando a lei da conservação de massa de acordo com Equação (6) pode-se reescrever a Equação (47) como:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot \left(\left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_1}{1000} \right)^2} \right)^2 - \left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_2}{1000} \right)^2} \right)^2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_1}{1000} \right)^2} \right)^2 \cdot \left(f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} + C_0 \right) = p_2 \quad (49)$$

$\overline{D_1}$, $\overline{D_2}$ e L_1 são valores apresentados em mm.

f_1 calculou-se de acordo com Equação (64). ρ_{ar} calcula-se de acordo com Equação (59).

C_0 corresponde às perdas associadas à passagem do escoamento na transição e obteve-se em função dos diâmetros de entrada e saída do elemento e do ângulo de expansão [18].

O valor obteve-se por interpolação na tabela ED4-1 (Figura 41):

$$C_{0\text{transição}} = f\left(\frac{A_1}{A_2}, \theta\right) = 0,01$$

Com,

$$A_1 = 0,0323 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 0,0342 \text{ mm}^2$$

$$\theta = 1,7^\circ$$

Nota: A_1 refere-se ao valor A_0 da Figura 41. A_2 refere-se ao valor A_1 da Figura 41

| ED4-1 Transition, Round to Round, Exhaust/Return Systems | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A_0/A_1 | C_0 Values | | | | | | | | | | | | | |
| | θ | 0 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| 0.063 | 0.0 | 0.18 | 0.18 | 0.20 | 0.29 | 0.38 | 0.60 | 0.84 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 |
| 0.10 | 0.0 | 0.20 | 0.18 | 0.20 | 0.27 | 0.38 | 0.59 | 0.76 | 0.80 | 0.83 | 0.84 | 0.83 | 0.83 | 0.83 |
| 0.167 | 0.0 | 0.18 | 0.17 | 0.18 | 0.25 | 0.33 | 0.48 | 0.66 | 0.77 | 0.74 | 0.73 | 0.73 | 0.72 | 0.72 |
| 0.25 | 0.0 | 0.20 | 0.17 | 0.16 | 0.21 | 0.30 | 0.46 | 0.61 | 0.68 | 0.64 | 0.63 | 0.62 | 0.62 | 0.62 |
| 0.50 | 0.0 | 0.15 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.19 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | 0.32 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| 1.00 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2.00 | 0.0 | 0.30 | 0.26 | 0.21 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.23 | 0.27 | 0.51 | 0.73 | 0.90 | 0.95 | 0.95 |
| 4.00 | 0.0 | 1.60 | 1.14 | 0.75 | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.90 | 1.09 | 2.78 | 4.29 | 5.63 | 6.53 | 6.53 |
| 6.00 | 0.0 | 3.89 | 3.02 | 1.73 | 1.58 | 1.58 | 1.58 | 2.12 | 2.66 | 6.62 | 10.01 | 13.03 | 15.12 | 15.12 |
| 10.00 | 0.0 | 11.80 | 9.30 | 5.30 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 6.45 | 7.90 | 19.00 | 28.50 | 36.70 | 42.70 | 42.70 |

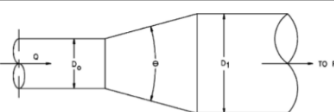


Figura 41 – Determinação da perda localizada de transições. [18]

As incertezas associadas à determinação do $\Delta p_{\text{ventilador}}$ estão apresentadas no ponto 3.3.6.2.

A quantidade de variáveis dependentes é considerável pelo que para facilitar a determinação da incerteza calculou-se individualmente as incertezas associadas à viscosidade dinâmica, μ , número de Reynolds, R_e , fator de fricção, f , massa volúmica do ar, ρ_{ar} e a pressão estática determinada no ponto 1, p_1 . Na determinação de $\Delta p_{ventilador}$, todas as incertezas das variáveis calculadas individualmente consideraram-se como incertezas do tipo B-N.

3.3.6.2 INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DE $\Delta P_{VENTILADOR}$

- **Incerteza μ**

A viscosidade dinâmica, μ , calculou-se de acordo com a seguinte equação [15]:

$$\mu = (17,10 + 0,048 T_{ar}) \times 10^{-6} \quad [N \cdot s/m^2] \quad (50)$$

Tendo em conta que μ é função da temperatura ambiente, T_{ar} , determinada recorrendo ao termohigrómetro representado na Figura 42, consideraram-se as seguintes fontes de incerteza:

- **Erro máximo do termohigrómetro, $E_{max TH}$;**
- **Resolução do termohigrómetro, r_{TH} .**



Figura 42 – Termohigrómetro utilizado para medição de T_{ar}

O coeficiente de sensibilidade calculou-se de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\partial \mu}{\partial T_{ar}} = 0,048 \times 10^{-6} \quad (51)$$

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\mu)$ está apresentada na Tabela 21. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 22.

Tabela 21 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de μ

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\mu)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| r_{TH} | --- | 0,029 | B Retangular | $0,048 \times 10^6$ | $1,92 \times 10^{-18}$ | $2,77 \times 10^{-8}$ |
| $E_{max TH}$ | --- | 0,577 | B Retangular | $0,048 \times 10^6$ | $7,68 \times 10^{-16}$ | |

Tabela 22 – Determinação de k associado à determinação μ

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(\mu)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|---|---|-----------------------|
| r_{TH} | ∞ | $3,69 \times 10^{-36}$ | $2,70 \times 10^{-32}$ | 51,2 | 2,05 |
| $E_{max TH}$ | 50 | $1,63 \times 10^{-16}$ | | | |

• Incerteza ρ_{ar}

A massa volúmica do ar, ρ_{ar} , calculou-se de acordo com a seguinte equação [14]:

$$\rho_{ar} = \frac{(133,32 p_{atm}) - 0,378 p_v}{287 (273,15 + T_{ar})} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (52)$$

Onde a pressão de vapor, p_v , obteve-se pela expressão que correlaciona a humidade relativa do ar, hu , com a pressão de saturação, p_{sat} à temperatura do ar ambiente, T_{ar} :

$$p_v = \frac{hu}{100} (p_{sat})_{T_{ar}} \quad [Pa] \quad (53)$$

$$P_{sat} = e^{\left(\frac{17,438 T_{ar}}{239,78 + T_{ar}} + 6,4147\right)} \quad [Pa] \quad (54)$$

Substituindo a Equação (53) e (54) na (52),

$$\rho_{ar} = \frac{(133,32p_{atm}) - 0,378 \cdot \left(\frac{hu}{100} \cdot e^{\left(\frac{17,438T_{ar}}{239,78+T_{ar}} + 6,4147 \right)} \right)}{287(273,15 + T_{ar})} \quad (55)$$

A T_{ar} em °C mediu-se com o equipamento da Figura 42. A hu mediu-se com recurso a sonda de humidade, em %, da Figura 44 e a p_{atm} mediu-se em mmHg com recurso ao multifunções da TSI da Figura 43.



Figura 43 – Multifunções TSI para determinação da Patm/P₁



Figura 44 – Sonda de humidade utilizada para medição de HR acoplada às multifunções da KIMO

Os coeficientes de sensibilidade das variáveis dependentes determinaram-se de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}} = \frac{0,46453}{T_{ar} + 273,15} \quad (56)$$

$$\frac{\partial p_{ar}}{\partial hu} = \frac{-8,65093 \times 10^{-3}}{T_{ar} + 273,1} \quad (57)$$

$$\frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}} = \frac{8,65093 \times 10^{-3} \cdot (hu - 53,697075 p_{atm})}{(T_{ar} + 273,15)^2} \quad (58)$$

As fontes de incerteza consideradas para a determinação de p_{ar} foram as seguintes:

- Resolução do termohigrómetro, r_{TH} ;
- Erro máximo do termohigrómetro, $E_{max,TH}$;
- Resolução da Sonda termohigrómetro, r_H ;
- Erro máximo da sonda termohigrómetro declarada pelo fabricante, $E_{max,H}$;
- Resolução do multifunções TSI para leitura da pressão barométrica, r_{PB} ;
- Erro máximo do multifunções TSI declarado pelo fabricante para leituras de pressão barométrica, $E_{max,PB}$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\rho_{ar})$, está apresentada na Tabela 23. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 24.

Tabela 23 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de p_{ar}

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\rho_{ar})$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|---|
| r_{TH} | --- | $\frac{r_{TH}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}}$ | $\left(\frac{r_{TH}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $E_{max,TH}$ | --- | $\frac{E_{max,TH}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}}$ | $\left(\frac{E_{max,TH}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}}\right)^2$ | |
| r_H | --- | $\frac{r_H}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial p_{ar}}{\partial HR}$ | $\left(\frac{r_H}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial hu}\right)^2$ | |
| $E_{max,H}$ | --- | $\frac{E_{max,H}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial p_{ar}}{\partial HR}$ | $\left(\frac{E_{max,H}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial hu}\right)^2$ | |
| r_{PB} | --- | $\frac{r_{PB}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}}$ | $\left(\frac{r_{PB}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}}\right)^2$ | |
| $E_{max,PB}$ | --- | $\frac{E_{max,PB}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}}$ | $\left(\frac{E_{max,PB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}}\right)^2$ | |

Tabela 24 – Determinação de k associado à determinação p_{ar}

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(p_{ar})$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|---------------------|-------------------------------|---|---|---|---|
| r_{TH} | ∞ | $\left(\frac{r_{TH}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(p_{ar})}{\sum \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(\nu_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| $E_{max,TH}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,TH}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial T_{ar}}\right)^4$ | | | |
| r_H | ∞ | $\left(\frac{r_H}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial hu}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,H}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,H}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial hu}\right)^4$ | | | |
| r_{PB} | ∞ | $\left(\frac{r_{PB}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,PB}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,PB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial p_{ar}}{\partial p_{atm}}\right)^4$ | | | |

- **Incerteza R_e**

O número adimensional de Reynolds, R_e , indica-nos se o escoamento é turbulento ($R_e > 2300$) ou laminar ($R_e < 2300$) e calculou-se de acordo com a equação seguinte:

$$Re = \frac{D_0 \cdot V_0 \cdot \rho_{ar}}{\mu} \quad (59)$$

Os coeficientes de sensibilidade das variáveis dependentes determinaram-se de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{\partial Re}{\partial V_0} = \frac{D_0 \cdot \rho_{ar}}{\mu} \quad (60)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial D_0} = \frac{V_0 \cdot \rho_{ar}}{\mu} \quad (61)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \rho_{ar}} = \frac{D_0 \cdot V_0}{\mu} \quad (62)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \mu} = -\frac{D_0 \cdot \rho_{ar} \cdot V_0}{\mu^2} \quad (63)$$

As fontes de incerteza consideradas para a determinação de ρ_{ar} foram as seguintes:

- Incerteza expandida do cálculo de μ , $U(\mu)$;
- Incerteza expandida do cálculo de ρ_{ar} , $U(\rho_{ar})$;
- Média das medições da velocidade no ponto 0, \overline{V}_0 ;
- Resolução do anemómetro de hélice, r_{anem} ;
- Erro máximo do anemómetro de hélice declarado pelo fabricante, $E_{max, anem}$;
- Média das medições do diâmetro da tubagem no ponto 0, \overline{D}_0 .

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(R_e)$, está apresentada na Tabela 25. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 26.

Tabela 25 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de R_e

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(R_e)$ |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| $U(\mu)$ | μ | $\frac{U(\mu)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial Re}{\partial \mu}$ | $\left(\frac{U(\mu)}{k} \cdot \frac{\partial Re}{\partial \mu}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $U(\rho_{ar})$ | ρ_{ar} | $\frac{U(\rho_{ar})}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial Re}{\partial \rho_{ar}}$ | $\left(\frac{U(\rho_{ar})}{k} \cdot \frac{\partial Re}{\partial \rho_{ar}}\right)^2$ | |
| \overline{V}_0 | $\frac{\sum_{i=1}^5 V_{0i}}{5}$ | $\frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{5}}$ | A | $\frac{\partial Re}{\partial V_0}$ | $\left(\frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{5}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial V_0}\right)^2$ | |
| r_{anem} | ---- | $\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial Re}{\partial V_0}$ | $\left(\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial V_0}\right)^2$ | |
| $E_{max, anem}$ | --- | $\frac{E_{max, anem}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial Re}{\partial V_0}$ | $\left(\frac{E_{max, anem}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial V_0}\right)^2$ | |
| \overline{D}_0 | $\frac{\sum_{i=1}^3 D_{0i}}{3}$ | $\frac{\sigma_{D_0}}{\sqrt{3}}$ | A | $\frac{\partial Re}{\partial D_0}$ | $\left(\frac{\sigma_{D_0}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial D_0}\right)^2$ | |
| r_{paq} | --- | $\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial Re}{\partial D_0}$ | $\left(\frac{r_{paq}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial D_0}\right)^2$ | |
| $U(pa q)$ | --- | $\frac{U(pa q)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial Re}{\partial D_0}$ | $\left(\frac{U(pa q)}{k} \cdot \frac{\partial Re}{\partial D_0}\right)^2$ | |

Tabela 26 – Determinação de k associado à determinação Re

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i, elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(Re)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|---------------------|-------------------------------|--|---|---|---|
| $U(\mu)$ | ∞ | $\left(\frac{U(\mu)}{k} \cdot \frac{\partial Re}{\partial \mu}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(Re)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(\nu_{eff}; P_{95,45})$ |
| $U(\rho_{ar})$ | ∞ | $\left(\frac{U(\rho_{ar})}{k} \cdot \frac{\partial Re}{\partial \rho_{ar}}\right)^4$ | | | |
| $\overline{V_0}$ | 4 | $\left(\frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{5}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial V_0}\right)^4$ | | | |
| r_{anem} | ∞ | $\left(\frac{r_{anem}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial V_0}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,anem}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,anem}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial V_0}\right)^4$ | | | |
| $\overline{D_0}$ | 2 | $\left(\frac{\sigma_{D_0}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial Re}{\partial D_0}\right)^4$ | | | |
| r_{paq} | ∞ | $\left(\frac{U(pa q)}{k} \cdot \frac{\partial Re}{\partial D_0}\right)^4$ | | | |
| $U(pa q)$ | ∞ | $\left(\frac{U(pa q)}{k}\right)^4$ | | | |

- Incerteza f

O fator de fricção, f , calculou-se de acordo com a seguinte equação [15]:

$$f = \frac{0,14}{Re^{0,17}} \quad (64)$$

O coeficiente de sensibilidade da variável dependente determinou-se de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\partial f}{\partial Re} = -\frac{2,38 \times 10^{-2}}{Re^{1,17}} \quad (65)$$

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(f)$, está apresentada na Tabela 27. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 28.

Tabela 27 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de f

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(f)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|
| $U(Re)$ | --- | $\frac{U(Re)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial f}{\partial Re}$ | $\left(\frac{U(Re)}{k} \cdot \frac{\partial f}{\partial Re}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |

Tabela 28 – Determinação de k associado à determinação f

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(f)$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|---|---|---|
| $U(Re)$ | ∞ | $\left(\frac{U(Re)}{k} \cdot \frac{\partial f}{\partial Re}\right)^4$ | $(\sqrt{u_i^2(y)})^4$ | $\frac{u^4(f) \cdot v}{\left(\frac{U(Re)}{k}\right)^4}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(v_{eff}; P_{95,45\%})$ |

- **Incerteza p_1**

A pressão estática medida no ponto 1, p_1 , foi determinada com diretamente com recurso ao multifunções da TSI para medição de pressão diferencial representado na Figura 43.

Como tal o coeficiente de sensibilidade é igual a 1.

As fontes de incerteza consideradas para a determinação de p_1 foram as seguintes:

- Média das medições da pressão estática, $\overline{p_1}$;
- Resolução do multifunções TSI para medição de pressão diferencial, r_{TSI} ;
- Erro máximo do multifunções TSI declarado pelo fabricante para leituras de pressão diferencial, $E_{\max TSI}$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(p_1)$, está apresentada na Tabela 29. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 30.

Tabela 29 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de p_1

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(p_1)$ |
|------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| r_{TSI} | --- | $\frac{r_{TSI}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | 1 | $\left(\frac{r_{TSI}}{\sqrt{12}}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $E_{max\ TSI}$ | --- | $\frac{E_{max,TSI}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | 1 | $\left(\frac{E_{max\ TSI}}{\sqrt{3}}\right)^2$ | |
| \bar{P}_1 | $\frac{\sum_{i=1}^5 p_1}{5}$ | $\frac{\sigma_{p_1}}{\sqrt{5}}$ | A | 1 | $\left(\frac{\sigma_{p_1}}{\sqrt{5}}\right)^2$ | |

Tabela 30 – Determinação de k associado à determinação p_1

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(p_1)$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|---|--|---|
| r_{TSI} | ∞ | $\left(\frac{r_{TSI}}{\sqrt{12}}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(p_{S_1})}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(v_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| $E_{max,TSI}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,TSI}}{\sqrt{3}}\right)^4$ | | | |
| \bar{P}_1 | 4 | $\left(\frac{\sigma_{p_1}}{\sqrt{5}}\right)^4$ | | | |

- **Incerteza $\Delta p_{ventilador}$**

Os coeficientes de sensibilidade determinaram-se de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{\partial \Delta p_{ventilador}}{\partial \rho_{ar}} = - \frac{8,1056947 \times 10^{11} \cdot (D_1^5 + D_1 \cdot D_2^4 \cdot (C_0 - 1) + D_2^4 \cdot f \cdot L) \cdot \dot{V}^2}{D_1^5 \cdot D_2^4} \quad (66)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{ventilador}}{\partial \dot{V}} = - \frac{1,6211389 \times 10^{12} \cdot \dot{V} \cdot \rho_{ar} \cdot (D_1^5 + D_1 \cdot D_2^4 \cdot (C_0 - 1) + D_2^4 \cdot f \cdot L)}{D_1^5 \cdot D_2^4} \quad (67)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{ventilador}}{\partial D_1} = \frac{3,2422779 \times 10^{12} \cdot (D_1(C_0 - 1) + 1,25f \cdot L) \cdot \rho_{ar} \cdot \dot{V}^2}{D_1^6} \quad (68)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2} = \frac{3,2422779 \times 10^{12} \cdot \rho_{ar} \cdot \dot{V}^2}{D_2^5} \quad (69)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f} = - \frac{8,10569947 \times 10^{11} \cdot L \cdot \dot{V}^2 \cdot \rho_{ar}}{D_1^5} \quad (70)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial C_0} = - \frac{8,10569947 \times 10^{11} \cdot \dot{V}^2 \cdot \rho_{ar}}{D_1^4} \quad (71)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial p_1} = -1 \quad (72)$$

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L} = - \frac{8,10569947 \times 10^{11} \cdot f \cdot \dot{V}^2 \cdot \rho_{ar}}{D_1^5} \quad (73)$$

As fontes de incerteza consideradas para o cálculo de incertezas foram as seguintes:

- Incerteza expandida da densidade volúmica do ar, $U(\rho_{ar})$;
- Incerteza expandida do caudal determinado, $U(\dot{V})$;
- Incerteza expandida do coeficiente de fricção, $U(f)$;
- Incerteza expandida de P1 determinado, $U(p_1)$;
- Incerteza do paquímetro para a medição de D_1 e D_2 , $U(\text{paq})_{D_i}$;
- Resolução do paquímetro para a medição de D_1 e D_2 , r_{paq, D_i} ;
- Média das medições de D_1 e D_2 ;
- Incerteza da fita métrica para a medição de L_1 , $U(\text{FM})_L$;
- Resolução da fita métrica para a medição de L_1 , $r_{\text{FM}, L}$;
- Erro da utilização da fórmula para a determinação de f : considerou-se $\pm 15\%$ do valor determinado. As equações resultam de ensaios experimentais em situações controladas e tendem a descrever a variação de f com a variação de outras variáveis e, portanto, não deve ser interpretado como valor exato, [38].
- Erro da utilização do coeficiente de perla localizada, C_0 , tabelado: considerou-se $\pm 20\%$ do valor determinado. Assim como para a determinação de f , C_0 foi determinado recorrendo a ensaios experimentais controlados. São valores aceites como referência para os acessórios a utilizar, mas não devem ser interpretados como valores exatos.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\Delta p_{\text{ventilador}})$, está apresentada na Tabela 31. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 32.

Tabela 31 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de $\Delta p_{\text{ventilador}}$

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\Delta p_{\text{ventilador}})$ |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|
| $U(\rho_{ar})$ | --- | $\frac{U(\rho_{ar})}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial \rho_{ar}}$ | $\left(\frac{U(\rho_{ar})}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial \rho_{ar}}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $U(\dot{V})$ | --- | $\frac{U(f)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial \dot{V}}$ | $\left(\frac{U(f)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial \dot{V}}\right)^2$ | |
| $U(f)$ | --- | $\frac{U(f)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f}$ | $\left(\frac{U(f)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f}\right)^2$ | |
| $E_{\text{formula } f}$ | --- | $\frac{0,15 \cdot f}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f}$ | $\left(\frac{0,15 \cdot f}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f}\right)^2$ | |
| $U(p_1)$ | --- | $\frac{U(p_1)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial p_1}$ | $\left(\frac{U(p_1)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial p_1}\right)^2$ | |
| $\overline{D_1}$ | $\frac{\sum_{i=1}^3 D_1}{3}$ | $\frac{\sigma_{D_1}}{\sqrt{3}}$ | Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}$ | $\left(\frac{\sigma_{D_1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}\right)^2$ | |
| $r_{paq_{D_1}}$ | --- | $\frac{r_{paq_{D_1}}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}$ | $\left(\frac{r_{paq_{D_1}}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}\right)^2$ | |
| $U(pa q)_{D_1}$ | --- | $\frac{U(pa q)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}$ | $\left(\frac{U(pa q)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}\right)^2$ | |
| $\overline{D_2}$ | $\frac{\sum_{i=1}^3 D_2}{3}$ | $\frac{\sigma_{D_2}}{\sqrt{3}}$ | Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}$ | $\left(\frac{\sigma_{D_2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}\right)^2$ | |
| $r_{paq_{D_2}}$ | --- | $\frac{r_{paq_{D_2}}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}$ | $\left(\frac{r_{paq_{D_2}}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}\right)^2$ | |
| $U(pa q)_{D_2}$ | --- | $\frac{U(pa q)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}$ | $\left(\frac{U(pa q)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}\right)^2$ | |
| $E_{\text{tabela } C_0}$ | --- | $\frac{0,20 \cdot C_0}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial C_0}$ | $\left(\frac{0,20 \cdot C_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial C_0}\right)^2$ | |
| r_{FM_L} | --- | $\frac{r_{FM_L}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L}$ | $\left(\frac{r_{FM_L}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L}\right)^2$ | |
| $U(FM)_L$ | --- | $\frac{U(FM)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L}$ | $\left(\frac{U(FM)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L}\right)^2$ | |

Tabela 32 – Determinação de k associado à determinação de $\Delta p_{\text{ventilador}}$

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i, elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(\Delta p_{\text{ventilador}})$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|--------------------------|----------------------------------|---|--|---|---|
| $U(\rho_{ar})$ | ∞ | $\left(\frac{U(\rho_{ar})}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial \rho_{ar}}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(\Delta p_{\text{ventilador}})}{\sum \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student k $= f(\nu_{\text{eff}}; P_{95,45\%})$ |
| $U(\dot{V})$ | ∞ | $\left(\frac{U(f)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial \dot{V}}\right)^4$ | | | |
| $U(f)$ | ∞ | $\left(\frac{U(f)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f}\right)^4$ | | | |
| $E_{\text{formula } f}$ | 50 | $\left(\frac{0,15 \cdot f}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial f}\right)^4$ | | | |
| $U(p_1)$ | ∞ | $\left(\frac{U(p_1)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial p_1}\right)^4$ | | | |
| $\overline{D_1}$ | 2 | $\left(\frac{\sigma_{D_1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}\right)^4$ | | | |
| $r_{\text{paq } D_1}$ | ∞ | $\left(\frac{r_{\text{paq } D_1}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}\right)^4$ | | | |
| $U(\text{paq})_{D_1}$ | ∞ | $\left(\frac{U(\text{paq})}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_1}\right)^4$ | | | |
| $\overline{D_2}$ | 2 | $\left(\frac{\sigma_{D_2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}\right)^4$ | | | |
| $r_{\text{paq } D_2}$ | ∞ | $\left(\frac{r_{\text{paq } D_2}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}\right)^4$ | | | |
| $U(\text{paq})_{D_2}$ | ∞ | $\left(\frac{U(\text{paq})}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial D_2}\right)^4$ | | | |
| $E_{\text{tabela } C_0}$ | 50 | $\left(\frac{0,20 \cdot C_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial C_0}\right)^4$ | | | |
| r_{FM_L} | ∞ | $\left(\frac{r_{FM_L}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L}\right)^4$ | | | |
| $U(FM)_L$ | ∞ | $\left(\frac{U(FM)}{k} \cdot \frac{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}{\partial L}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(\Delta p_{\text{ventilador}})$, calculou-se de acordo com a Equação (26), alcançado valores entre $\pm 2,2$ Pa e os $\pm 3,0$ Pa.

3.3.7 AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉCTRICA, P_e

A potência eléctrica, P_e , foi determinada diretamente pela utilização do medidor de potência recorrendo ao equipamento da Figura 45.

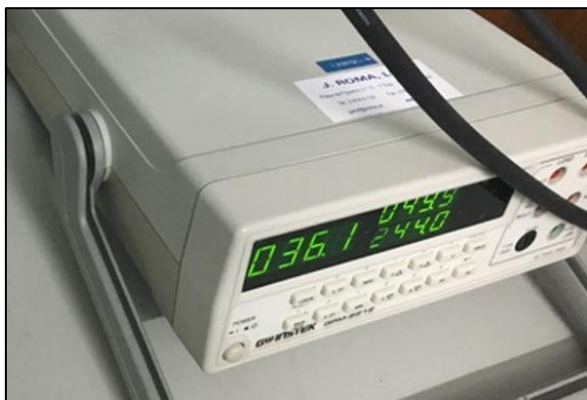


Figura 45 – Medidor de potência utilizado para o cálculo de P_e

3.3.7.1 INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE P_e

O valor considerado para cada ponto da curva resultou da média de 5 medições.

$$\frac{\sum_{i=1}^5 P_{e_i}}{5} \quad [W] \quad (74)$$

O coeficiente de sensibilidade assumiu valor unitário por se tratar de uma medição direta.

As fontes de incerteza associadas à determinação de P_e foram:

- Média das medições em cada ponto, $\overline{P_e}$;
- Resolução do equipamento, r_{pot} ;
- Erro máximo declarado pelo fabricante: $E_{max,pot}$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(P_e)$, está apresentada na Tabela 33. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 34.

Tabela 33 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de P_e

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(P_e)$ |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| $\overline{P_e}$ | $\frac{\sum_{i=1}^5 P_{e_i}}{5}$ | $\frac{\sigma_{P_e}}{\sqrt{5}}$ | Normal | 1 | $\left(\frac{\sigma_{P_e}}{\sqrt{5}}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| r_{Pot} | --- | $\frac{r_{Pot}}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | 1 | $\left(\frac{r_{Pot}}{\sqrt{12}}\right)^2$ | |
| $E_{max,pot}$ | --- | $\frac{E_{max,pot}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | 1 | $\left(\frac{E_{max,pot}}{\sqrt{3}}\right)^2$ | |

Tabela 34 – Determinação de k associado à determinação de P_e

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(P_e)$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|---|--|---|
| $\overline{P_e}$ | 4 | $\left(\frac{\sigma_{P_e}}{\sqrt{5}}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(P_e)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(v_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| r_{Pot} | ∞ | $\left(\frac{r_{Pot}}{\sqrt{12}}\right)^4$ | | | |
| $E_{max,pot}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max,pot}}{\sqrt{3}}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(P_e)$, calculada de acordo com a Equação (26), alcançado valores entre os $\pm 0,38$ W e os $\pm 1,44$ W na utilização dos motores do tipo ECM e $\pm 1,47$ W e os $\pm 1,75$ W na utilização dos motores de polos sombreados.

3.3.8 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO GLOBAL, η

O rendimento global, η , resultou do rácio da potência efetivamente aproveitada no escoamento, pela potência elétrica disponibilizada.

Obteve-se de acordo com a seguinte equação [14]:

$$\eta = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{\text{ventilador}}}{P_e} \cdot 100 \quad [\%] \quad (75)$$

3.3.8.1 INCERTEZAS DO CÁLCULO DE η

Os coeficientes de sensibilidade determinaram-se de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \dot{V}} = \frac{\Delta p_{\text{ventilador}}}{P_e} \cdot 100 \quad (76)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}} = \frac{\dot{V}}{P_e} \cdot 100 \quad (77)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_e} = - \frac{100 \cdot \dot{V} \cdot \Delta p_{\text{ventilador}}}{P_e^2} \quad (78)$$

As fontes de incerteza associadas à determinação de η foram:

- Incerteza expandida da determinação da potência elétrica, $U(P_e)$;
- Incerteza expandida para a determinação do caudal, $U(\dot{V})$;
- Incerteza expandida para a determinação da pressão estática de elevação do motoventilador, $U(\Delta p_{\text{ventilador}})$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\eta)$, está apresentada na Tabela 35. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 36.

Tabela 35 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de η

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\eta)$ |
|-----------------------------------|--------------------|---|---------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| $U(P_e)$ | --- | $\frac{U(P_e)}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \eta}{\partial P_e}$ | $\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_e} \cdot \frac{U(P_e)}{k}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| $U(\dot{V})$ | --- | $\frac{U(\dot{V})}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \eta}{\partial \dot{V}}$ | $\left(\frac{\partial \eta}{\partial \dot{V}} \cdot \frac{U(\dot{V})}{k}\right)^2$ | |
| $U(\Delta p_{\text{ventilador}})$ | --- | $\frac{U(\Delta p_{\text{ventilador}})}{k}$ | B Normal | $\frac{\partial \eta}{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}}$ | $\left(\frac{\partial \eta}{\partial \Delta p_{\text{ventilador}}} \cdot \frac{U(\Delta p_{\text{ventilador}})}{k}\right)^2$ | |

Tabela 36 – Determinação de k associado à determinação de η

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i, elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(\eta)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|----------------------------|----------------------------|--|---|---|---|
| $U(P_e)$ | ∞ | $\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_e} \cdot \frac{U(P_e)}{k}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4 \frac{u^4(\eta)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ | k | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $= f(\nu_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| $U(\dot{V})$ | ∞ | $\left(\frac{\partial \eta}{\partial \dot{V}} \cdot \frac{U(\dot{V})}{k}\right)^4$ | | | |
| $U(\Delta p_{ventilador})$ | ∞ | $\left(\frac{\partial \eta}{\partial \Delta p_{ventilador}} \cdot \frac{U(\Delta p_{ventilador})}{k}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(\eta)$, calculou-se acordo com a Equação (26), alcançado valores entre os $\pm 0,3\%$ e os $\pm 7,8\%$.

3.3.9 AVALIAÇÃO DAS ROTAÇÕES DO MOTOR, ω

As rotações do motoventilador, ω , determinou-se diretamente pela utilização do taquímetro ótico representado na Figura 46.



Figura 46 – Sonda do taquímetro ótico a utilizar em conjunto com multifunções KIMO

3.3.9.1 INCERTEZAS DO CÁLCULO DE ω

O valor considerado para cada ponto da curva resultou da média de 5 medições de acordo com:

$$\frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i}{5} \quad [rpm] \quad (79)$$

O coeficiente de sensibilidade tem valor unitário por se tratar de uma medição direta.

As fontes de incerteza associadas à determinação de ω foram:

- Média das medições em cada ponto, $\bar{\omega}$;
- Resolução do equipamento, r_{taq} ;
- Erro máximo declarado pelo fabricante: $E_{max,taq}$.

A metodologia para a determinação da incerteza padrão combinada, $u(\omega)$, está apresentada na Tabela 37. A metodologia para a determinação do fator de expansão, k , associada à incerteza padrão combinada está apresentada na Tabela 38.

Tabela 37 – Esquema das quantidades e incertezas associadas à determinação de ω

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\omega)$ |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| $\bar{\omega}$ | $\frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i}{5}$ | $\frac{\sigma_\omega}{\sqrt{5}}$ | Normal | 1 | $\left(\frac{\sigma_\omega}{\sqrt{5}}\right)^2$ | $\sqrt{\sum u_i^2(y)}$ |
| r_{taq} | --- | $\frac{1}{\sqrt{12}}$ | B Retangular | 1 | $\left(\frac{1}{\sqrt{12}}\right)^2$ | |
| $E_{max\ taq}$ | --- | $\frac{E_{max\ taq}}{\sqrt{3}}$ | B Retangular | 1 | $\left(\frac{E_{max\ taq}}{\sqrt{3}}\right)^2$ | |

Tabela 38 – Determinação de k associado à determinação de ω

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(\omega)$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|--|---|---|
| $\bar{\omega}$ | 4 | $\left(\frac{\sigma_\omega}{\sqrt{5}}\right)^4$ | $\left(\sqrt{\sum u_i^2(y)}\right)^4$ | $\frac{u^4(\omega)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$ | Obtido recorrendo à tabela de distribuição T-Student $k = f(v_{eff}; P_{95,45\%})$ |
| r_{taq} | ∞ | $\left(\frac{1}{\sqrt{12}}\right)^4$ | | | |
| $E_{max\ taq}$ | 50 | $\left(\frac{E_{max\ taq}}{\sqrt{3}}\right)^4$ | | | |

A incerteza expandida $U(\omega)$, calculou-se de acordo com a Equação (26), alcançado valores entre os ± 9 rpm e os ± 44 rpm.

3.3.10 AVALIAÇÃO DO RUÍDO

O ruído foi determinado para cada ponto da curva e resulta na pressão sonora, L_{eqA} , determinada a 1 m de acordo com recomendações de [39] do motoventilador conforme Figura 31 recorrendo ao equipamento da Figura 47.



Figura 47 – Sonómetro CESVA SC 420 utilizado para medição de L_{eqA}

3.3.10.1 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO SONORA

A pressão sonora determinada resultou da média de 3 medições realizadas com o recurso do sonómetro, considerando um tempo de medição de pelo menos 20 s.

A média das medições determinou-se de acordo com a equação:

$$\overline{L_{eq,A}} = 10 \cdot \log \left(\frac{10^{0,1L_{eq,A1}} + 10^{0,1L_{eq,A2}} + 10^{0,1L_{eq,A3}}}{3} \right) \quad [dB(A)] \quad (80)$$

Não foi realizada nenhuma correção devido ao ruído de fundo (ambiente) devido ao ruído ambiente pelo facto de todas em todas as medições realizadas a diferença entre o ruído com o motoventilador ligado e desligado ser sempre superior a 15 dB(A). [39]

3.3.10.2 INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DO RUÍDO

O cálculo da incerteza baseou-se no Guia RELACRE 22 [40] relativamente à determinação do ruído laboral, considerando as seguintes variáveis:

- Incerteza padrão relativa à repetibilidade das medições de pressão sonora $L_{eq,A}$:

$$u1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^N (L_{eq,Aj} - \overline{L_{eq,A}})^2}}{\sqrt{n}} \quad (81)$$

- Incerteza padrão relativa ao uso da instrumentação para a caracterização do nível sonoro:

$$u2 = 0,7 \text{ dB}(A) \text{ (para equipamento classe 1)}$$

- Incerteza padrão relativa à posição do microfone:

$$u3 = 1 \text{ dB}(A)$$

Os coeficientes de sensibilidade assumiram valores unitários.

A incerteza combinada $u(L_{eqA})$ foi calculada de acordo com:

$$u(L_{eqA}) = \sqrt{u1^2 + u2^2 + u3^2} \quad (82)$$

A incerteza expandida $U(L_{eqA})$ foi calculada com

$$U(L_{eqA}) = \pm 1,65 \cdot u(L_{eqA}) \quad (83)$$

Para as medições realizadas a incerteza expandida, $U(L_{eqA})$, alcançou valores entre os $\pm 2,0 \text{ dB}(A)$ e os $\pm 2,1 \text{ dB}(A)$.

RESULTADOS

- 4.1 ANÁLISE DO IMPACTO DO ÂNGULO DE ATAQUE NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES**
- 4.2 ANÁLISE DO IMPACTO DA RUGOSIDADE DAS HÉLICES NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES**
- 4.3 ANÁLISE DO IMPACTO DA GEOMETRIA DAS HÉLICES NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES**
- 4.4 ANÁLISE DO IMPACTO DOS MOTORES UTILIZADOS NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES**
- 4.5 ANÁLISE ECONÓMICA**
 - 4.5.1 TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO
 - 4.5.2 ESTIMATIVA DA POUPANÇA ENERGÉTICA ANUAL RESULTANTE DA TROCA DE MOTORES

4 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios foram realizados comparando as curvas características dos motoventiladores, traçados por linhas de tendência polinomial de ordem 6, por ser a esta a que permitiu um coeficiente de correlação quadrática R^2 mais próximo da unidade e mais ajustada aos pontos de medição. As linhas de tendência e os gráficos apresentados foram realizados com recurso ao software Microsoft Excel™. Os valores medidos/calculados associados aos pontos de medição estão apresentados na secção 7.2.

As comparações entre conjuntos realizaram-se por interceção das suas curvas experimentais (quantificadas na secção 7.3) com curvas teóricas de instalação baseadas na equação (9). Traçaram-se 11 curvas de instalação considerando as constantes da Tabela 39.

Tabela 39 – Equações das curvas de instalação

| N.º da curva de instalação | c^{te} [kg/m ⁷] | Equação da curva de instalação |
|----------------------------|----------------------------------|--|
| 1 | 4,730E-05 | $\Delta p_{sistema} = 4,730E^{-5} \dot{V}^2$ |
| 2 | 5,302E-05 | $\Delta p_{sistema} = 5,302E^{-5} \cdot \dot{V}^2$ |
| 3 | 6,754E-05 | $\Delta p_{sistema} = 6,754E^{-5} \cdot \dot{V}^2$ |
| 4 | 9,035E-05 | $\Delta p_{sistema} = 9,035E^{-5} \cdot \dot{V}^2$ |
| 5 | 1,253E-04 | $\Delta p_{sistema} = 1,253E^{-4} \cdot \dot{V}^2$ |
| 6 | 2,009E-04 | $\Delta p_{sistema} = 2,009E^{-4} \cdot \dot{V}^2$ |
| 7 | 2,806E-04 | $\Delta p_{sistema} = 2,806E^{-4} \cdot \dot{V}^2$ |
| 8 | 4,687E-04 | $\Delta p_{sistema} = 4,687E^{-4} \cdot \dot{V}^2$ |
| 9 | 6,195E-04 | $\Delta p_{sistema} = 6,195E^{-4} \cdot \dot{V}^2$ |
| 10 | 8,103E-04 | $\Delta p_{sistema} = 8,103E^{-4} \cdot \dot{V}^2$ |
| 11 | 1,238E-03 | $\Delta p_{sistema} = 1,238E^{-3} \cdot \dot{V}^2$ |

O aumento do número da curva de instalação corresponde à simulação do aumento da perda de carga do sistema. A curva n.º 1 é semelhante à utilização da bancada de ensaios com o registo 100 % aberto (estrangulamento do escoamento do ar menor) enquanto que a curva n.º 11 corresponde a uma situação em que o registo de caudal está praticamente fechado (estrangulamento do escoamento do ar maior).

Os valores das constantes resultaram da interceção das equações das curvas de instalação teórica com as linhas de tendência da curva característica do conjunto 4 / F.

Os valores resultantes das interceções das curvas estão apresentados na secção 7.4.

4.1 ANÁLISE DO IMPACTO DO ÂNGULO DE ATAQUE NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES

- **Conjunto 3 / A VS Conjunto 3 / B (1400 rpm)**

Legenda:

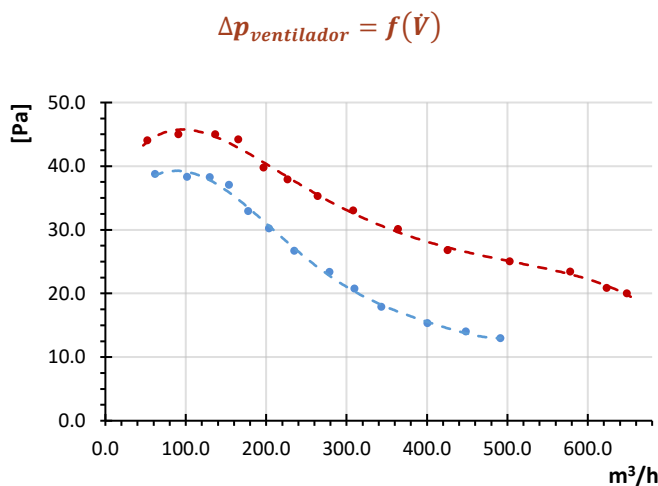
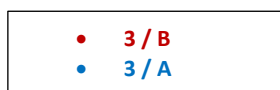


Gráfico 7 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$.
3 / A VS 3 / B

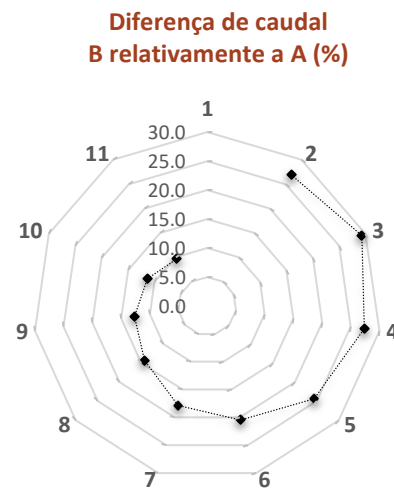


Gráfico 8 - Diferença percentual no caudal.
3 / A VS 3 / B

A capacidade de ventilação do conjunto 3 / B foi superior em toda a extensão da curva experimental relativamente ao conjunto 3 / A de acordo com Gráfico 7. A diferença maior situou-se na interceção da curva teórica n.º 3 com 29 % (131,9 m³/h). Com o aumento das perdas de carga do sistema as diferenças diminuíram, atingindo na curva n.º 11 uma diferença de 10 % (16,2 m³/h) conforme Gráfico 8.

O conjunto 3 / B permite trabalhar com uma gama de caudais superiores relativamente ao conjunto 3 / A.

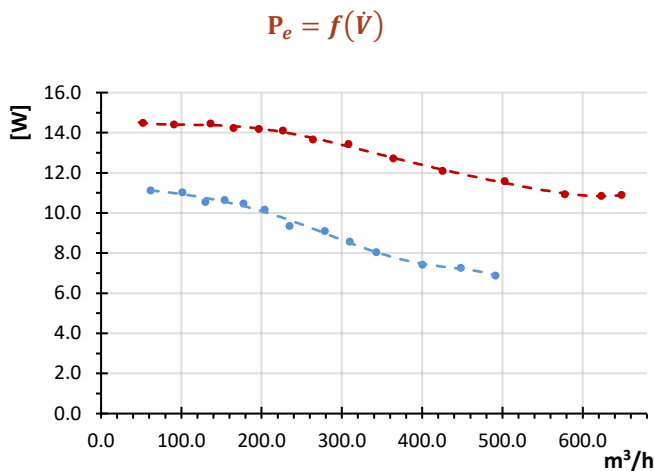


Gráfico 9 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$.
3 / A e 3 / B

Diferença de potência consumida B relativamente a A (%)

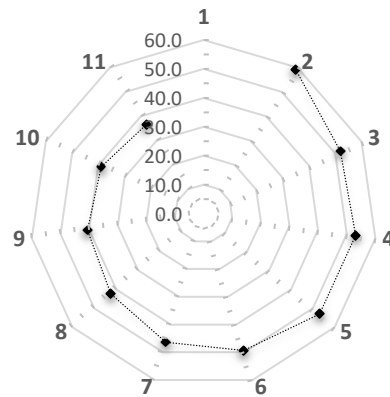


Gráfico 10 - Diferença percentual na potência.
3 / A VS 3 / B

Relativamente à potência elétrica, verificou-se, no conjunto 3 / B, um consumo superior em toda a extensão da curva, conforme observação do Gráfico 9. AS diferenças no consumo situaram-se entre os 37 % a 59 % (3,8 W a 4,2 W), de acordo com Gráfico 10.

Em ambos os conjuntos a potência elétrica aumentou com o aumento das perdas de carga do sistema implicando um maior esforço do motor para tentar manter as rotações nominais.

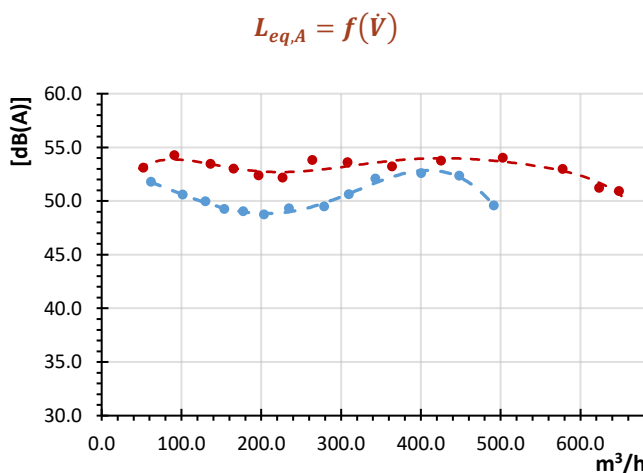


Gráfico 11 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$.
3 / A VS 3 / B

Diferença de ruído B relativamente a A (%)

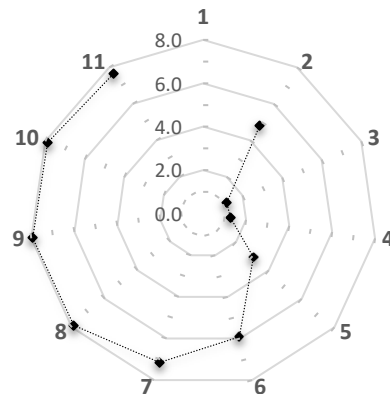


Gráfico 12 - Diferença percentual no ruído.
3 / A VS 3 / B.

Ao nível do ruído, de acordo com Gráfico 11, verificou-se que o conjunto 3 / B apresentou um nível de pressão sonora superior em toda a extensão relativamente ao conjunto 3 / A. As diferenças variaram entre 1 % (1,4 dB(A)) a 8 % (3,9 dB(A)) de acordo com Gráfico 12.

Em regime de escoamento livre, conforme Tabela 40, verificou-se que o conjunto 3 / B apresentou um valor ligeiramente superior em 2,3 dB(A) (cerca de 5 %) do que o conjunto 3 / A.

Tabela 40 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 3 / B e 3 / A

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] |
|----------|---|
| 3 / B | 45,7 ± 2,0 |
| 3 / A | 43,4 ± 2,0 |

• **Conjunto 4 / A VS Conjunto 4 / B (1300 rpm)**

Legenda:

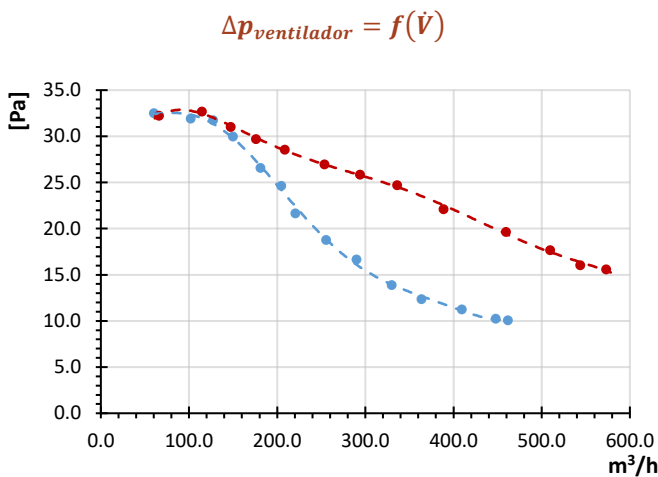
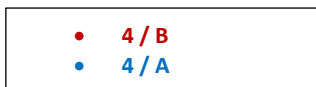


Gráfico 13 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$.
4 / A VS 4 / B.

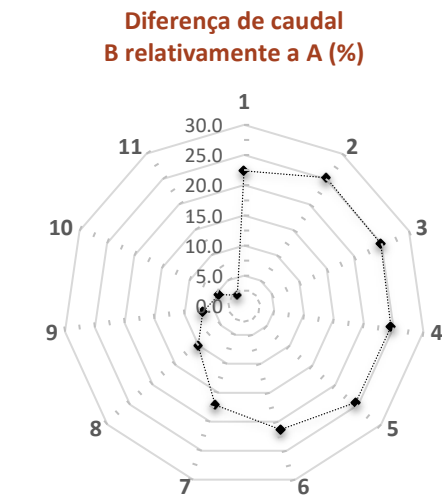


Gráfico 14 - Diferença percentual no caudal.
4 / A VS 4 / B.

A capacidade de ventilação do conjunto 4 / B foi superior em toda a extensão da curva experimental relativamente ao conjunto 4 / A de acordo com o Gráfico 13. A maior diferença situou-se na interceção da curva teórica n.º 2 com 25 % (111,0 m³/h) de acordo com o Gráfico 14. Com o aumento das perdas de carga do sistema as diferenças diminuíram, igualando-se praticamente após os 100 m³/h. A aproximação das curvas para caudais menores pode estar relacionada com a redução das rotações do impulsor em cerca de 9 % no conjunto 4 / B causado pelo esforço do motor em fazer girar a hélice.

O conjunto 3 / B permite trabalhar com uma gama de caudais superiores relativamente ao conjunto 3 / A.

$$P_e = f(\dot{V})$$

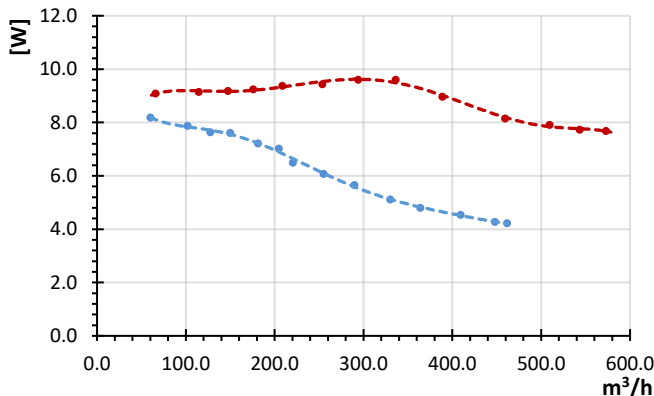


Gráfico 15 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$.
4 / A e 4 / B.

Diferença de potência consumida B relativamente a A (%)

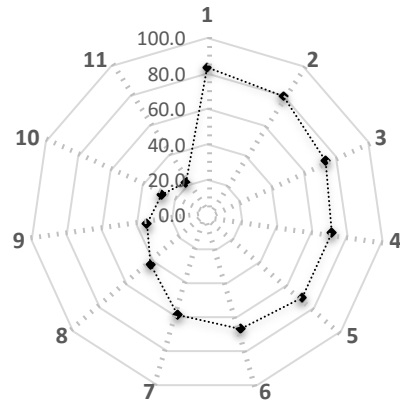


Gráfico 16 - Diferença percentual na potência.
4 / A VS 4 / B.

Relativamente à potência elétrica, verificou-se que o conjunto 4 / B tem um consumo superior em toda a sua extensão, de acordo com Gráfico 15, entre 1,7 W a 3,8 W. Em termos percentuais as diferenças situam-se entre os 22 % (interceção com curva n.º 11) a 83 % (interceção com a curva n.º 1) de acordo com Gráfico 16.

Em ambos os conjuntos a potência consumida aumentou com o aumento das perdas de carga do sistema, o que implicou um maior esforço do motor para tentar manter as rotações nominais.

$$L_{eq,A} = f(\dot{V})$$

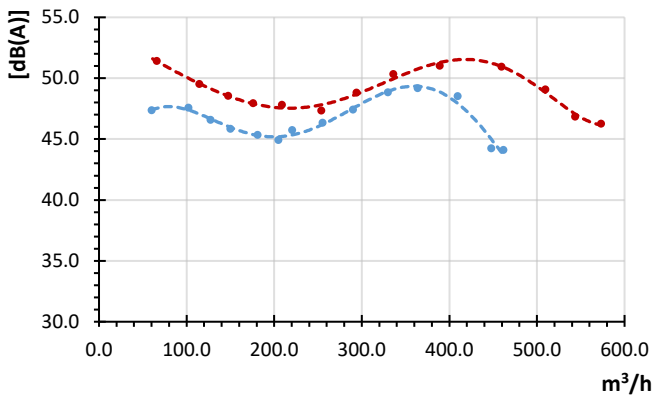


Gráfico 17 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$.
4 / A VS 4 / B.

Diferença de ruído B relativamente a A (%)

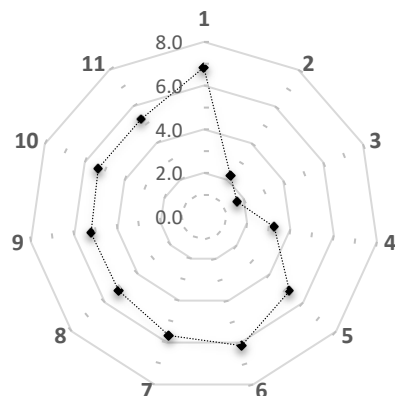


Gráfico 18 - Diferença percentual no ruído.
4 / A VS 4 / B.

Ao nível do ruído, o conjunto 4 / B apresentou um nível de pressão sonora superior em toda a extensão relativamente ao conjunto 4 / A de acordo com Gráfico 17. As diferenças variaram entre 2 % (0,8 dB(A)) e os 7 % (3,0 dB(A)).

Em regime de escoamento livre conforme Tabela 41, verificou-se que o conjunto 4 / B apresentou um valor superior em 3,2 dB(A) (cerca de 7 %) do que o conjunto 3 / A para o motoventilador acoplado ao aro e ligeiramente superior em 1,5 dB(A) (cerca de 4 %) para a medição realizada unicamente no motoventilador

Tabela 41 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 4 / B e 4 / A

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] | $L_{eq,A}$ do motoventilador [dB(A)] |
|----------|---|--|
| 4 / B | 45,0 ± 2,0 | 41,3 ± 2,0 |
| 4 / A | 41,8 ± 2,0 | 39,8 ± 2,0 |

COMENTÁRIOS GERAIS

A utilização de hélice com ângulo de ataque das pás, α , superior (hélice B), permitiu que o motoventilador trabalhasse com caudais superiores para perdas de carga de sistemas maiores. Contudo, tendo em conta o seu acoplamento aos motores testados, a consumo elétrico aumentou porque o esforço do motor aumentou, tendo em conta a maior capacidade de transportar ar por cada rotação do impulsor. Essa maior capacidade traduziu-se num aumento do ruído em toda a extensão das curvas.

4.2 ANÁLISE DO IMPACTO DA RUGOSIDADE DAS HÉLICES NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES

- **Conjunto 1 / C VS Conjunto 1 / D (1300 rpm)**

Legenda:

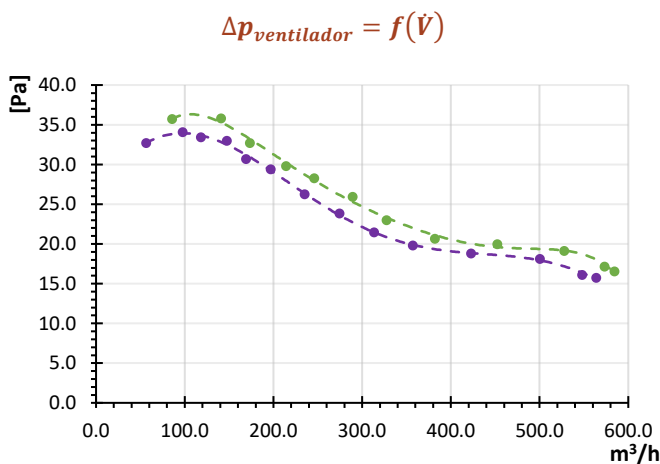


Gráfico 19 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$.
1 / C VS 1 / D.

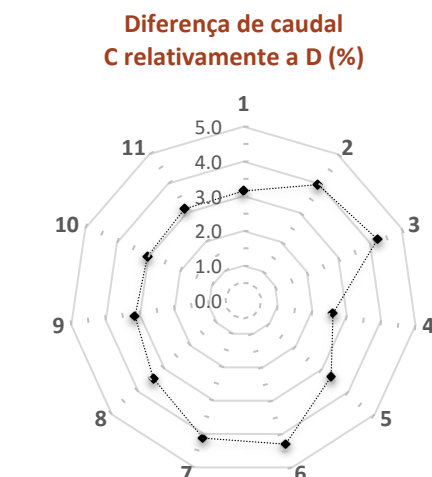


Gráfico 20 - Diferença percentual no caudal.
1 / C VS 1 / D.

A capacidade de ventilação do conjunto 1 / C foi ligeiramente superior ao conjunto 1 / D em toda a extensão das curvas experimentais de acordo com o Gráfico 19. As diferenças situaram-se entre os 3 % a 4 % (5,0 m³/h a 21,9 m³/h) de acordo com Gráfico 20.

$$P_e = f(\dot{V})$$

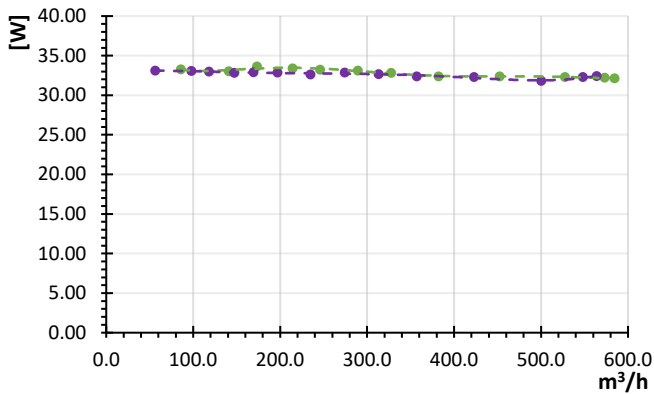


Gráfico 21 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$.
1 / C VS 1 / D.

Diferença de potência consumida
C relativamente a D (%)

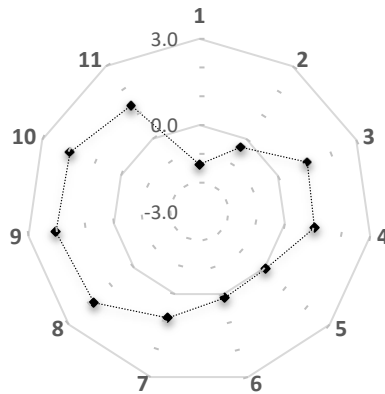


Gráfico 22 - Diferença percentual na potência.
1 / C VS 1 / D.

Relativamente à potência elétrica verificou-se uma a variação ao longo da curva na ordem dos 2 W de acordo com Gráfico 21. As diferenças no consumo entre os conjuntos, apresentaram uma variação máxima de $\pm 2 \%$ ($\pm 0,67 \text{ W}$) de acordo com Gráfico 22. Variação esta não significativa tendo em conta que as incertezas associadas para a medição da potência elétrica variaram entre $\pm 1,5 \text{ W}$ e os $\pm 1,6 \text{ W}$.

$$L_{eq,A} = f(\dot{V})$$

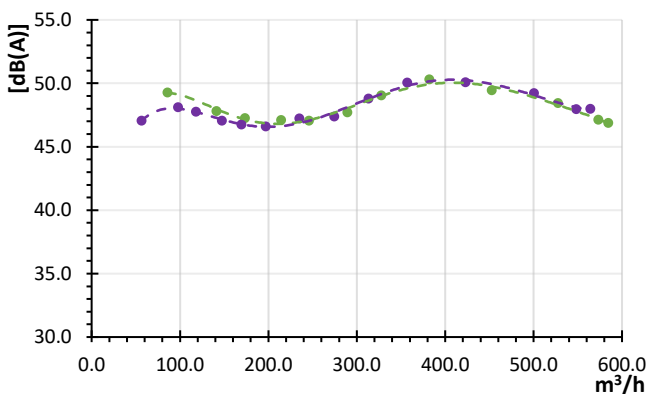


Gráfico 23 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$.
1 / C VS 1 / D.

Diferença de ruído
C relativamente a D (%)

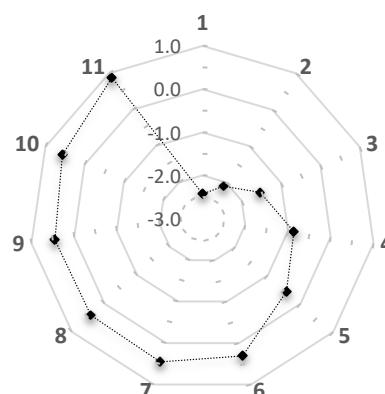


Gráfico 24 - Diferença percentual no ruído.
1 / C VS 1 / D.

As diferenças no ruído medido não foram significativas. As medições variaram entre os 46,7 dB(A) e os 52,2 dB(A) de acordo com Gráfico 23. A maior diferença entre o conjunto 1 / C relativamente ao conjunto 1 / D ocorreu na interceção da curva n.º 1 com -2% ($-1,1 \text{ dB(A)}$) de acordo com Gráfico 24.

Da medição realizada em regime de escoamento livre, de acordo com Tabela 42, ambos os conjuntos apresentaram medições iguais.

Tabela 42 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 1 / C e 1 / D

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] |
|----------|---|
| 1 / C | 45,7 ± 2,0 |
| 1 / D | 45,7 ± 2,0 |

• **Conjunto 4 / C VS Conjunto 4 / D (1300 rpm)**

Legenda:

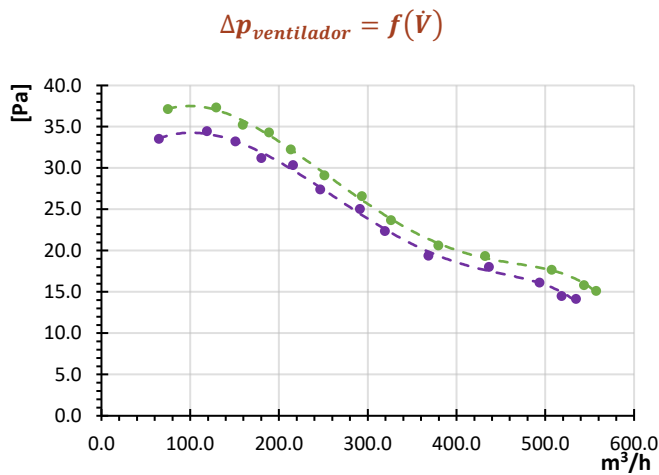


Gráfico 25 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$.
4 / C VS 4 / D.

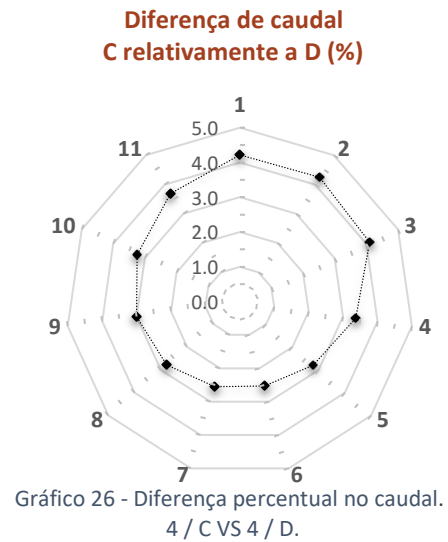


Gráfico 26 - Diferença percentual no caudal.
4 / C VS 4 / D.

A capacidade de ventilação do conjunto 4 / C foi ligeiramente superior ao conjunto 4 / D em toda a extensão das curvas experimentais conforme Gráfico 25. As diferenças situaram-se entre os 3 % e os 4 % (6,0 m³/h a 22,6 m³/h) conforme Gráfico 26.

$$P_e = f(\dot{V})$$

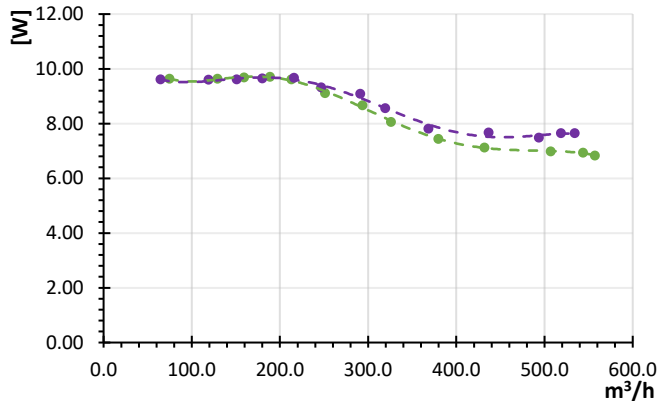


Gráfico 27 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$.
4 / C VS 1 / D.

Diferença de potência consumida
C relativamente a D (%)

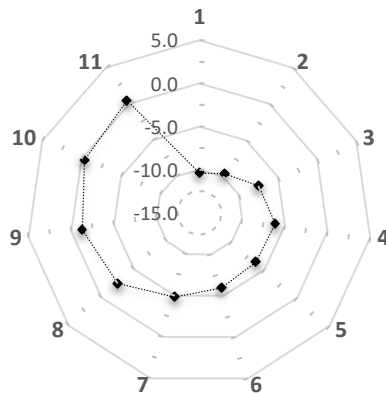


Gráfico 28 - Diferença percentual na potência.
4 / C VS 4 / D.

Relativamente à potência elétrica verificou-se uma variação ao longo da curva na ordem dos 3 W aproximadamente conforme Gráfico 27. As diferenças no consumo entre os conjuntos diminuíram à medida que se aumentou a perda de carga do sistema.

A máxima variação ocorreu na intersecção da curva n.º 1 com a potência consumida do conjunto 4 / C alcançar -10 % (0, 66 W) relativamente ao conjunto 4 / D, conforme Gráfico 28. Contudo as variações são pouco significativas tendo em conta que a incerteza associada à medição, se situa entre os $\pm 0,5$ W a $\pm 0,6$ W.

$$L_{eq,A} = f(\dot{V})$$

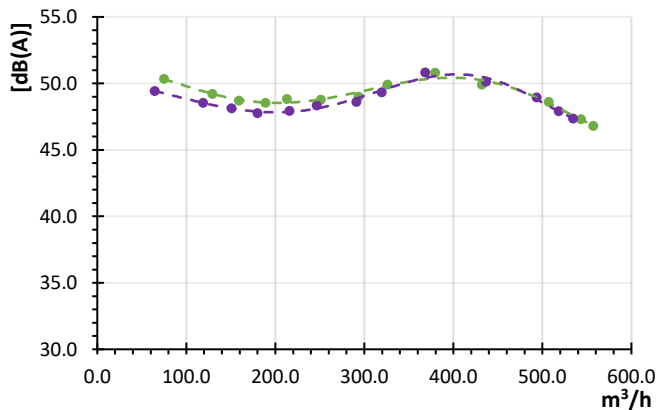


Gráfico 29 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$.
4 / C VS 4 / D.

Diferença de ruído
C relativamente a D (%)

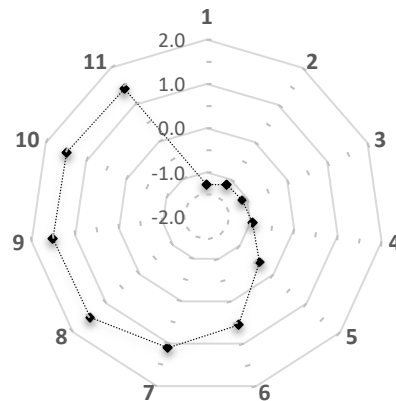


Gráfico 30 - Diferença percentual no ruído.
4 / C VS 4 / D.

As medições do ruído variaram entre os 46,8 dB(A) a 50,6 dB(A) de acordo com Gráfico 29. As diferenças dos valores medidos não foram significativas. Variaram entre os -1 % (-0,6 dB(A)) e os 2 % (0,7 dB(A)) conforme Gráfico 30.

Da medição realizada em regime de escoamento livre, de acordo com Tabela 43, ambos os conjuntos apresentaram diferenças não significativas de -0,7 dB(A) no motoventilador acoplado ao aro e de -0,5 dB(A) do próprio motoventilador entre o conjunto 4 / C relativamente ao conjunto 4 / D.

Tabela 43 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 4 / C e 4 / D

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] | $L_{eq,A}$ do motoventilador [dB(A)] |
|----------|--|--------------------------------------|
| 4 / C | 45,0 ± 2,0 | 42,5 ± 2,0 |
| 4 / D | 44,3 ± 2,0 | 43,0 ± 2,0 |

• **Conjunto 3 / C VS Conjunto 3 / D (1400 rpm)**

Legenda:

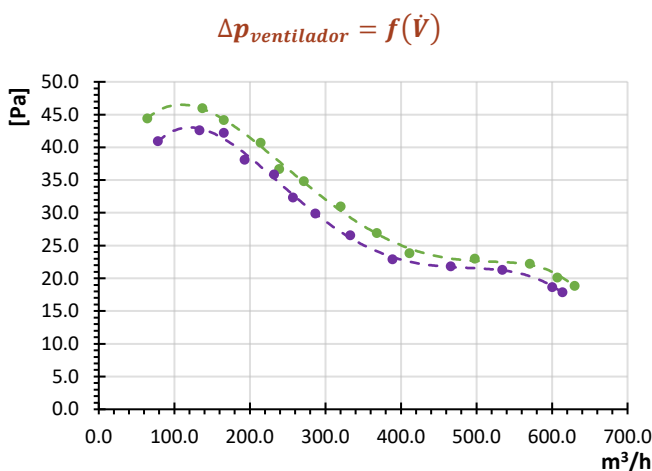
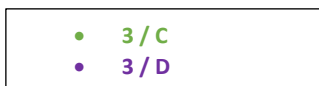


Gráfico 31 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$.
3 / C VS 4 / D.

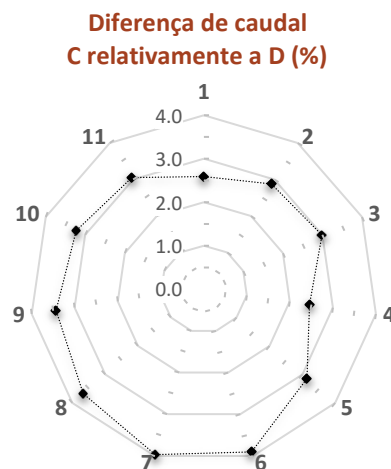


Gráfico 32 - Diferença percentual no caudal.
3 / C VS 4 / D.

A capacidade de ventilação do conjunto 3 / C foi ligeiramente superior ao conjunto 3 / D em toda a extensão das curvas experimentais de acordo com Gráfico 31. As diferenças situaram-se entre os 3 % e os 4 % (5,5 m³/h a 17,2 m³/h) conforme Gráfico 32.

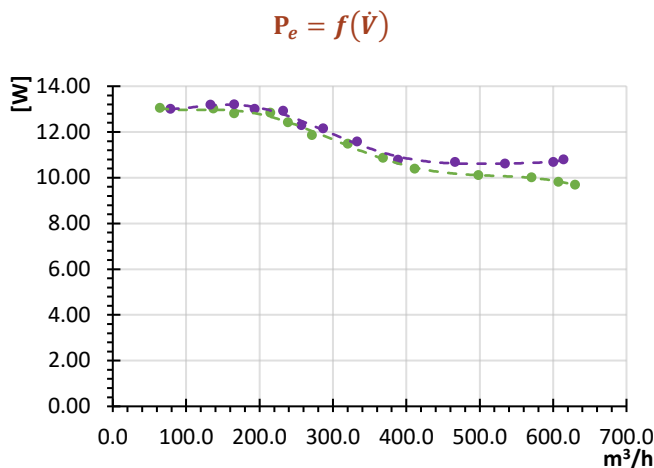


Gráfico 33 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$.
3 / C VS 3 / D.

Diferença de potência consumida
C relativamente a D (%)

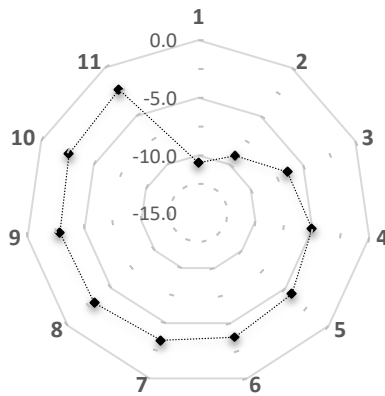


Gráfico 34 - Diferença percentual na potência. 3 /
C VS 3 / D.

Relativamente à potência elétrica verificou-se uma variação ao longo da curva na ordem dos 3 W de acordo com Gráfico 33. As diferenças no consumo entre os conjuntos diminuiram com o aumento das perdas de carga do sistema.

A máxima variação ocorreu com a interceção da curva de instalação teórica n.º 1. Nesta situação a potência consumida do conjunto 3 / C foi inferior em 11 % (1,16 W) relativamente ao conjunto 3 / D de acordo com Gráfico 34. Contudo são variações pouco significativas tendo em conta que a incerteza associada à medição se situou entre os $\pm 0,6$ W e os $\pm 0,8$ W.

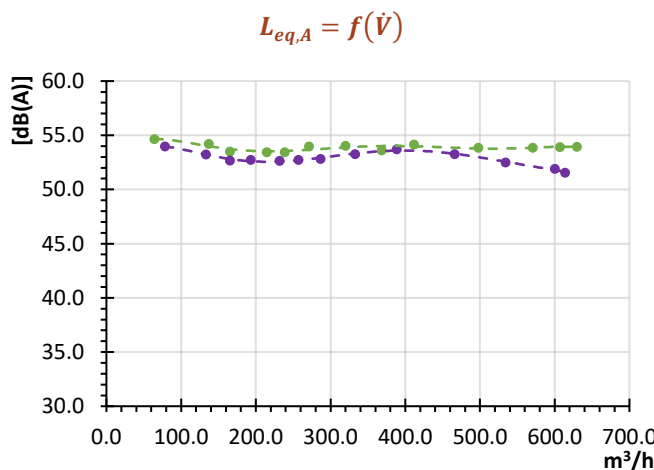


Gráfico 35 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$.
3 / C VS 3 / D.

Diferença de ruído
C relativamente a D (%)

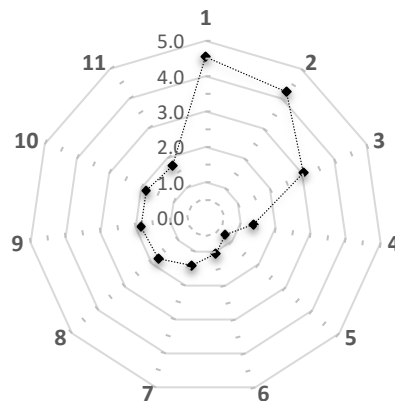


Gráfico 36 - Diferença percentual no ruído.
3 / C VS 3 / D.

As medições do ruído variaram entre os 51,6 dB(A) e os 54,0 dB(A) de acordo com Gráfico 35. O conjunto 3 / C apresentou variações entre os 0 % a 5 % (2,3 dB(A)) relativamente ao conjunto 3 / D de acordo com Gráfico 36. A variação máxima ocorreu na interceção da curva de instalação teórica n.º 1.

Da medição realizada em regime de escoamento livre, de acordo com Tabela 44, ambos os conjuntos apresentaram diferenças não significativas de 0,7 dB(A) no motoventilador acoplado ao aro entre o conjunto 3 / C relativamente ao conjunto 3 / D.

Tabela 44 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 3 / C e 3 / D

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] |
|----------|---|
| 3 / C | 49,1 ± 2,0 |
| 3 / D | 48,4 ± 2,0 |

- **COMENTÁRIOS GERAIS**

A diminuição da rugosidade das hélices contribuiu para um aumento ligeiro na capacidade de ventilação dos motoventiladores (variações entre 3 % a 4 %).

Apesar das diferenças pouco significativas, tendo em conta que a incerteza expandia para a medição do caudal que variou entre os 6 % a 11 %, verificou-se um padrão semelhante na análise da utilização das hélices com os motores 1, 3 e 4.

Relativamente à potência elétrica, verificou-se uma diminuição pouco significativa com a diminuição da rugosidade na utilização dos 3 e 4. A variação máxima ocorreu com a interceção da curva de instalação teórica n.º 1 (-11 %) e foi diminuindo até à n.º 11 num padrão de variação semelhante. A utilização das hélices com o motor 1 não seguiu o mesmo padrão, apresentando valores superiores ou inferiores relativamente à hélice mais rugosa (hélice D) numa variação de ± 2 %, apesar destas diferenças não serem significativas.

Para o ruído, analisando a utilização das hélices C e D com os motores 1 e 4, o padrão da variação dos valores foi semelhante e pouco significativo. Para um sistema com perda de carga menor, a hélice menos rugosa apresentou valores de ruído inferiores. Com o aumento da perda de carga do sistema verificou-se uma inversão de posição e obteve-se medições com ruído superiores (-2 % a 1 % com a utilização do motor 1 e de -1 % a 2 % com a utilização do motor 4). Da utilização das hélices com o motor 3 verificou-se que os valores obtidos com a hélice menos rugosa (hélice C) apresentou valores de ruído ligeiramente superiores em toda a extensão nomeadamente entre as interceções com as curvas de instalação teóricas n.º 1, 2 e 3 (máximo de 2,3 dB(A) relativamente à utilização da hélice D na curva n.º 1). A diferença do nível de ruído na medição em escoamento livre apresentou uma diferença menor e pouco significativa. Esta diferença, na utilização com o motor 3, pode estar influenciada pelo ruído do próprio motor e à maior velocidade de rotação (que originou escoamentos com maior velocidade e maior vibração na bancada de ensaios), relativamente aos restantes motores ensaiados, que têm uma maior influência do que a própria rugosidade das hélices.

4.3 ANÁLISE DO IMPACTO DA GEOMETRIA DAS HÉLICES NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES

- **Conjunto 1 / C VS Conjunto 1 / A VS Conjunto 1 / E VS Conjunto 1 / F (1300 rpm)**

Legenda:

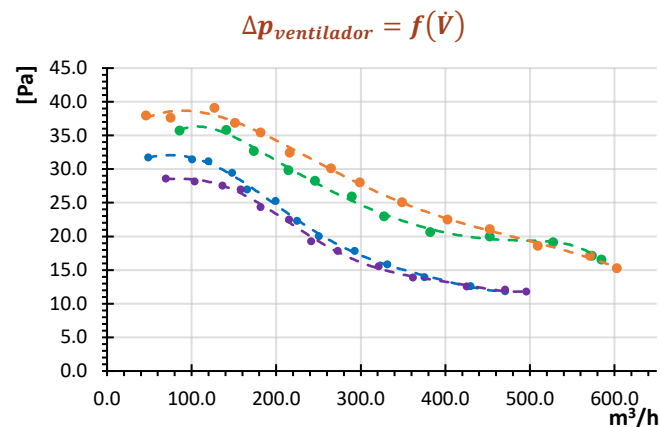
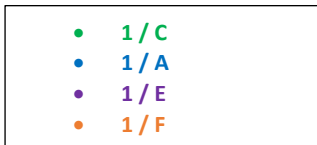


Gráfico 37 – Curvas $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1 / C VS 1 / A VS 1 / E VS 1 / F.

Na análise do Gráfico 37 verificou-se que a capacidade de ventilação da utilização do motor 1 com as hélices F e C foram semelhantes com variações entre os -3 % a 4 % (-12,2 m³/h a 13,1 m³/h) em toda a extensão. A mesma semelhança ocorreu entre as hélices A e E com diferenças entre -1 % a 3 % (-2,4 m³/h a 6,3 m³/h).

A diferença entre a utilização do motor com a hélice de F relativamente à utilização da hélice de A situou-se entre os 12 % a 22 % (18,2 m³/h a 94,1 m³/h).

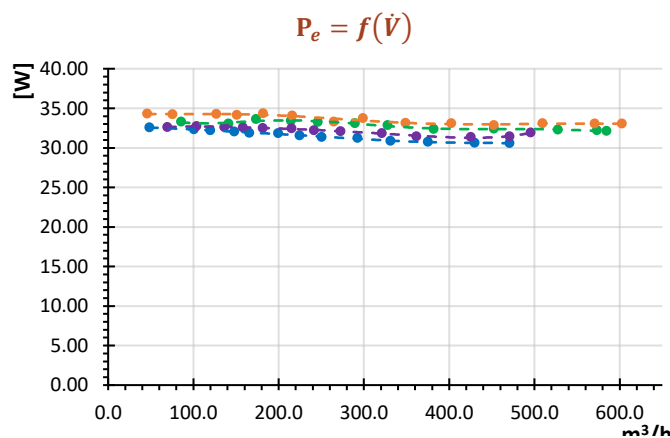


Gráfico 38 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 1 / C VS 1 / A VS 1 / E VS 1 / F.

As variações da potência consumida, de acordo com o Gráfico 38, entre hélice F relativamente à C foram pouco significativas, situando-se entre os 1 % a 3 % (0,4 W a 1,0 W). Entre a hélice A relativamente a E verificou-se variações entre os -3 % a -2 % (-0,6 W a -0,9 W).

A utilização da hélice de F provocou um consumo ligeiramente superior relativamente à hélice A verificando-se diferenças entre 6 % a 8 % (2,0 W a 2,5 W).

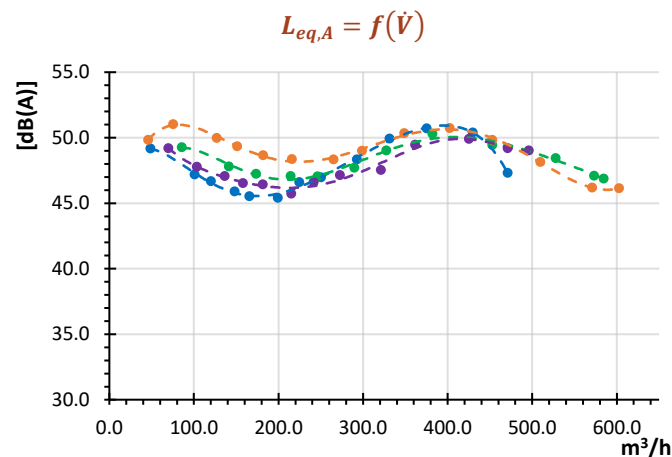


Gráfico 39 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 1 / C VS 1 / A VS 1 / E VS 1 / F.

Relativamente ao ruído não se identificou uma hélice que em toda a extensão apresentasse valores inferiores aos restantes conforme observação do Gráfico 39. Até à interceção da curva teórica n.º 4 a utilização da hélice de F apresentou medições de ruído inferiores com uma diferença máxima de -3,1 dB(A) para a hélice de E (na interceção com a curva de instalação teórica n.º 1) e -2,8 dB(A) para hélice de A. A partir da curva n.º 5 a hélice F apresentou pior desempenho tendo-se verificado diferenças de 3,0 dB(A) na curva n.º 6 relativamente à hélice E e 3,1 dB(A) na curva n.º 11 para a hélice A.

Comparando os níveis de ruído das Tabelas 42 e 45 para regimes de escoamento livre, verificou-se que a utilização da hélice A produziu um ruído inferior relativamente aos restantes.

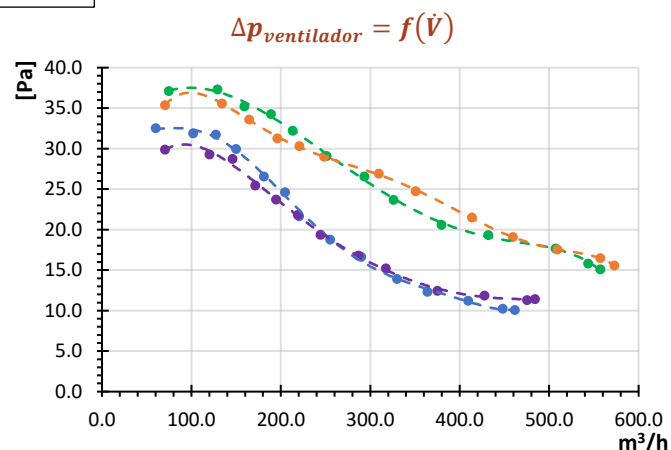
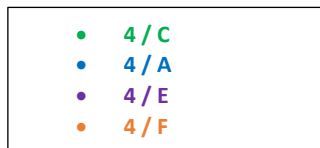
A utilização da hélice F apresentou níveis de ruído ligeiramente inferiores em 1,4 dB(A) relativamente à hélice C, que ambos tiveram uma capacidade de ventilação semelhante, e em 1,8 dB(A) relativamente à E, que teve a pior capacidade de ventilação.

Tabela 45 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 1 / E, 1 / F e 1 / A

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] |
|----------|---|
| 1 / E | 46,1 ± 2,0 |
| 1 / F | 44,3 ± 2,0 |
| 1 / A | 43,4 ± 2,0 |

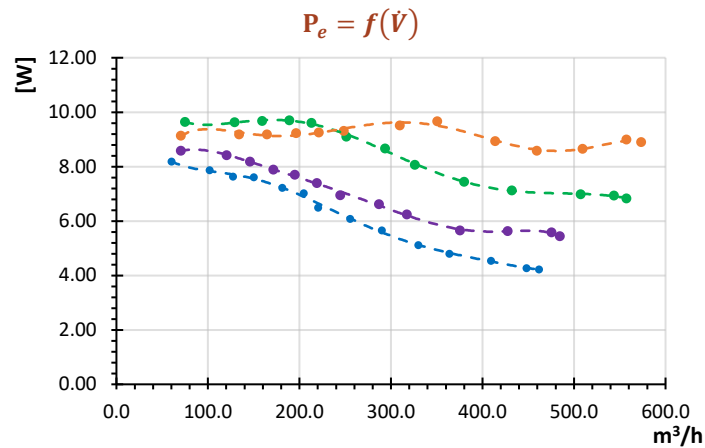
- **Conjunto 4 / C VS Conjunto 4 / A VS Conjunto 4 / E VS Conjunto 4 / F (1300 rpm)**

Legenda:

Gráfico 40 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$. 4 / C VS 4 / A VS 4 / E VS 4 / F

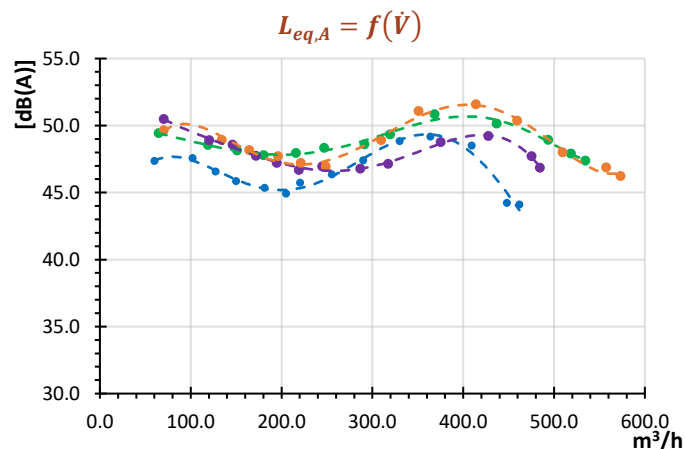
Na análise do Gráfico 40 verificou-se que a capacidade de ventilação da utilização do motor 4 com as hélices F e C foram semelhantes com variações entre -3 % a 4 % (-12,2 m³/h a 13,1 m³/h) em toda a extensão. A mesma semelhança ocorreu entre as hélices A e E com variações entre -5 % a 3 % (-24,5 m³/h a 4,7 m³/h).

As diferenças entre a utilização do motor com a hélice de F relativamente à utilização da hélice de A situaram-se entre os 7 % a 26 % (10,4 m³/h a 115,1 m³/h).

Gráfico 41 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 4/ C VS 4 / A VS 4 / E VS 4 / F

A potência elétrica do motor 4 com a utilização da hélice F foi superior às restantes até à interseção da curva de instalação n.º 8, a partir do qual o consumo foi superior na utilização da hélice C de acordo com Gráfico 41.

Até à interseção da curva n.º 8 verificou-se um consumo com diferença máxima, na interseção da curva n.º 1, em 32 % (2,2 W) relativamente à hélice C, de 114 % (4,8 W) relativamente à hélice A e 68 % (3,7 W) relativamente à hélice E.

Gráfico 42 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 4/ C VS 4 / A VS 4 / E VS 4 / F

Observando o Gráfico 42, não se apresentou uma curva que garantisse um menor ruído em toda a sua extensão.

A hélice A, excetuando nas interseções com as curvas de instalação 4 a 6, apresentou níveis de ruído inferiores às restantes. As maiores diferenças situaram-se na gama entre -2,6 dB(A) a -3,8 dB(A) relativamente à hélice C (pior desempenho na extensão identificada).

Na interseção com as curvas n.º 4 a 6, a hélice que com menor nível de ruído foi a hélice E que apresentou variações de -3,9 dB(A) a -1,9 dB(A) perante a hélice F (pior desempenho na extensão identificada).

Comparando os níveis de ruído das Tabelas 41, 43 e 46 para regimes de escoamento livre verificou-se que a utilização da hélice A produziu um ruído inferior relativamente aos restantes. A utilização da hélice F apresentou níveis de ruído semelhante à hélice C (-0,1 dB(A)) para motoventilador acoplado ao aro e 0,5 dB(A) para o motoventilador. Observamos, em paralelo, uma semelhança da hélice F com a hélice de E apesar das diferenças na capacidade de ventilação verificada.

Tabela 46 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 4 / E e 4 / F

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] | $L_{eq,A}$ do motoventilador [dB(A)] |
|----------|---|--|
| 4 / E | 44,5 ± 2,0 | 43,4 ± 2,0 |
| 4 / F | 44,9 ± 2,0 | 43,0 ± 2,0 |

- **Conjunto 3 / C VS Conjunto 3 / A VS Conjunto 3 / E VS Conjunto 3 / F (1400 rpm)**

Legenda:

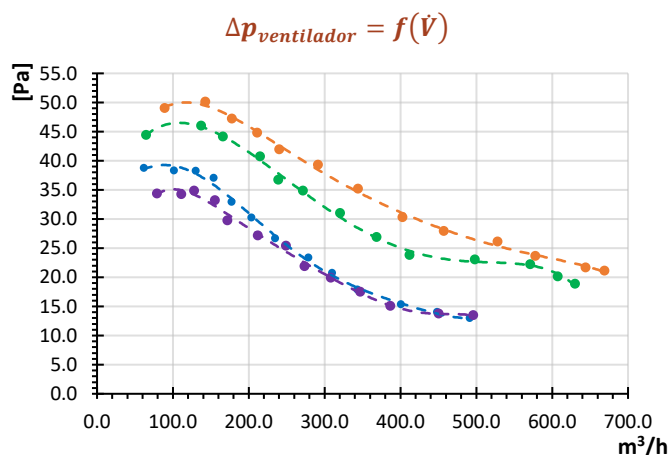
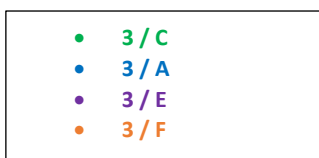


Gráfico 43 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$. 3 / C VS 3 / A VS 3 / E VS 3 / F

A capacidade de ventilação, de acordo com o Gráfico 43, foi superior em toda a extensão da curva com a utilização da hélice F, que apresentou variações ligeiramente superiores, mas pouco significativas relativamente à hélice C de 3 % a 8 % (7,8 m³/h a 36,1 m³/h).

As hélices A e E apresentaram capacidades semelhantes. A variação do caudal, na utilização da hélice A relativamente à hélice E, situou-se entre os 0 % e os 4 % (0,2 m³/h a 6,8 m³/h).

A hélice F comparativamente à hélice A apresentou variações no caudal entre os 16 % e 31 % (26,4 m³/h a 139,0 m³/h).

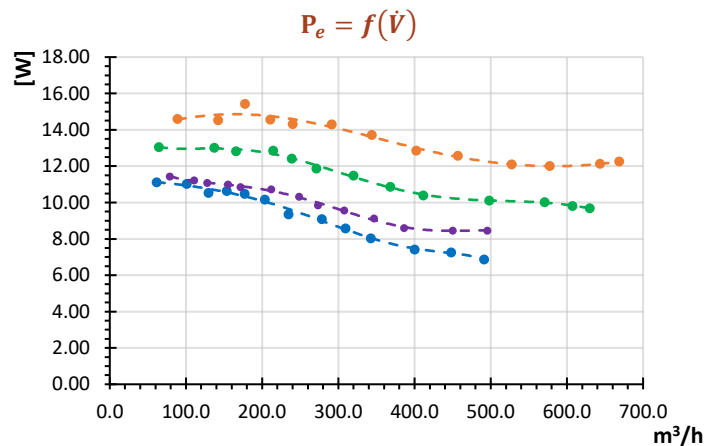


Gráfico 44 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 3 / C VS 3 / A VS 3 / E VS 3 / F

Apesar de apresentar uma capacidade de ventilação superior às restantes, a hélice F apresentou consumo superiores relativamente às restantes conforme observado no Gráfico 44. As diferenças para a hélice C situaram-se entre os 15 % e os 26 % (2,0 W a 2,5 W) e para a que apresenta menor consumo (hélice A) situaram-se entre os 42 % e os 78 % (4,4 W a 5,3 W).

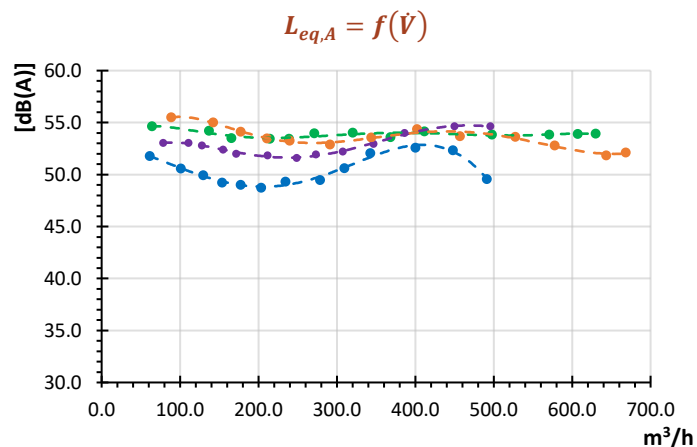


Gráfico 45 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 3 / C VS 3 / A VS 3 / E VS 3 / F

Relativamente à pressão sonora medida, a utilização da hélice A, permitiu níveis de ruído inferiores às restantes hélices, podendo chegar a diferenças máximas de -4,7 dB(A) (na interceção da curva n.º 10) relativamente à hélice C, de -3,1 dB(A) (na interceção da curva n.º 6) relativamente à hélice de F e -2,5 dB(A) (na interceção da curva n.º 3) relativamente à hélice E de acordo com Gráfico 45.

No ruído provocado pelos conjuntos acoplados ao aro em regime de escoamento livre, de acordo com Tabelas 40, 44 e 47 verificou-se que mantiveram um nível inferior com a utilização

da hélice de A. A hélice E apesar de alcançar uma capacidade de ventilação inferior apresentou valores semelhantes às hélices C e F que foram as hélices com capacidade superior.

Tabela 47 – Ruído em regime de escoamento livre dos conjuntos 3 / E, 3 / F

| Conjunto | $L_{eq,A}$ do motoventilador acoplado ao aro [dB(A)] |
|----------|---|
| 3 / E | 49,2 ± 2,0 |
| 3 / F | 48,4 ± 2,0 |

COMENTÁRIOS GERAIS

As hélices C e F apresentaram capacidades de ventilação semelhantes, apesar de valores ligeiramente superiores verificadas pela hélice F em grande parte da extensão das curvas, tendo em conta as suas variações e as incertezas associadas na ordem dos 6 % a 11 % dos valores medidos. Contudo apresentaram capacidades superiores às hélices A e E.

Relativamente à potência elétrica, a hélice F provocou, na utilização de todos os motores, um maior consumo em praticamente todas as curvas com variações máximas de cerca de 2 W para a hélice C na utilização dos motores 3 e 1 W para a utilização do motor 1 (pouco significativo). A utilização da hélice A permitiu uma redução da potência elétrica consumida visto ser aquela que apresentou um menor consumo com todos os motores.

Nos níveis de ruído, não se verificou nenhum padrão relativamente à utilização das hélices com os vários motores. Dependendo da zona de funcionamento do sistema cada hélice apresentou níveis inferiores ou superiores. A exceção foi a utilização da hélice A no motor 3 que comparativamente com as outras hélices utilizadas no mesmo motor apresentou níveis de ruído inferiores.

Para regimes de escoamento livre a utilização da hélice A permitiu níveis de ruído ligeiramente inferiores com a utilização de todos os motores ao contrário da hélice E que com uma capacidade de ventilação semelhante à hélice A e inferior às hélices C e F teve níveis de ruído semelhantes com estes 2 últimos.

4.4 ANÁLISE DO IMPACTO DOS MOTORES UTILIZADOS NA PERFORMANCE DOS VENTILADORES

- **Conjunto 1 / A VS Conjunto 4 / A VS Conjunto 3 / A**

Legenda:

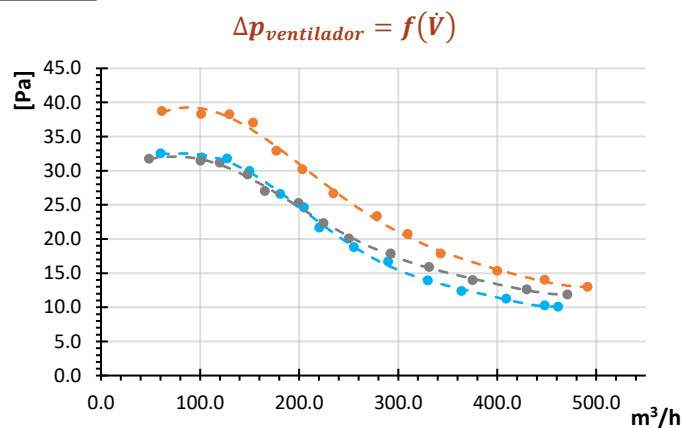
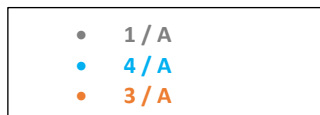
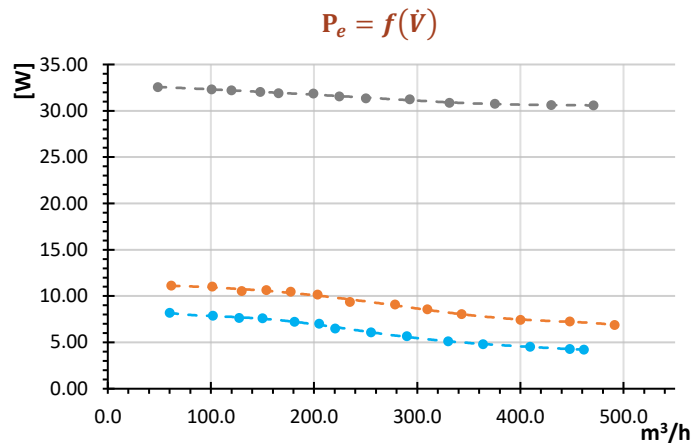


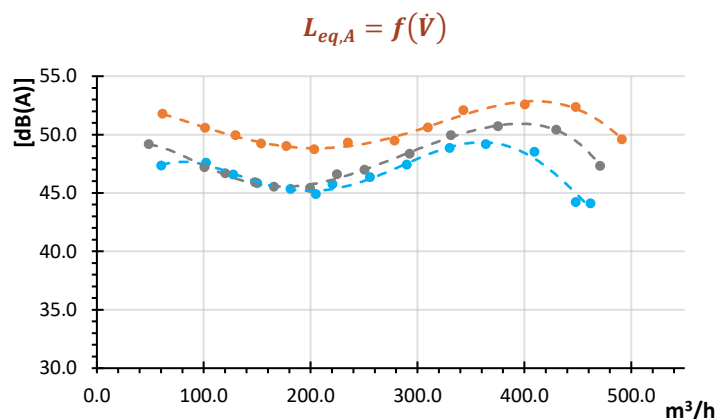
Gráfico 46 – Curvas $\Delta p_{\text{ventilador}} = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A

Analisando o Gráfico 46, verificou-se que o desempenho dos motores 1 e 4 foram semelhantes, relativamente à capacidade de ventilação. O ligeiro aumento da capacidade de ventilação verificada, até cerca de metade da extensão da curva, está relacionado com a variação das rotações reais do impulsor. Enquanto que na fase inicial o motor 1 girou a 1384 ± 13 rpm o motor 4 girou a 1320 ± 9 rpm. Estas diferenças de rotações entre motores foram sendo cada vez menores até que, aproximadamente na interseção com a curva de instalação n.º 9, se igualaram (com cerca de 1320 rpm) do mesmo modo que se igualaram as capacidades de ventilação. A diferença máxima ocorreu na zona de menor perda e carga do sistema onde a utilização do motor 1, relativamente ao motor 4 apresentou uma capacidade de ventilação superior em 7 % ($32,5 \text{ m}^3/\text{h}$).

Relativamente à utilização do motor 3, verificou-se uma capacidade de ventilação superior às restantes devido à diferença de rotação do impulsor que se manteve constante em toda a extensão com 1476 ± 44 rpm evidenciando que não se encontra em esforço ao contrário dos restantes motores. Como as diferenças nas rotações aumentaram relativamente ao motor 1 a diferença na capacidade de ventilação também aumentou de 5 % para 10 % entre as interseções com as curvas de instalação n.º 1 e n.º 11 respetivamente.

Gráfico 47 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A

Na potência elétrica verificou-se um aumento considerável na utilização do motor 1 (polos sombreados) relativamente aos restantes do tipo ECM de acordo com Gráfico 47. As diferenças do motor 1 para os motores 3 e 4 foram superiores entre 207 % e 349 % (21,7 W a 23,8 W) e entre 326 % a 607 % (24,6 W a 26,3 W) respetivamente.

Gráfico 48 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 1 / A VS 4 / A VS 3 / A

Relativamente à pressão sonora, de acordo com Gráfico 48, a utilização do motor 3 provocou níveis de ruído superiores em toda a sua extensão estando relacionada também com o maior número de rotações do impulsor e da maior capacidade de ventilação.

Os motores 1 e 3 apresentaram níveis de ruído semelhantes em quase toda a extensão com uma diferença máxima, pouco significativa, na interceção com a curva de instalação teórica n.º 2 de 1,4 dB(A).

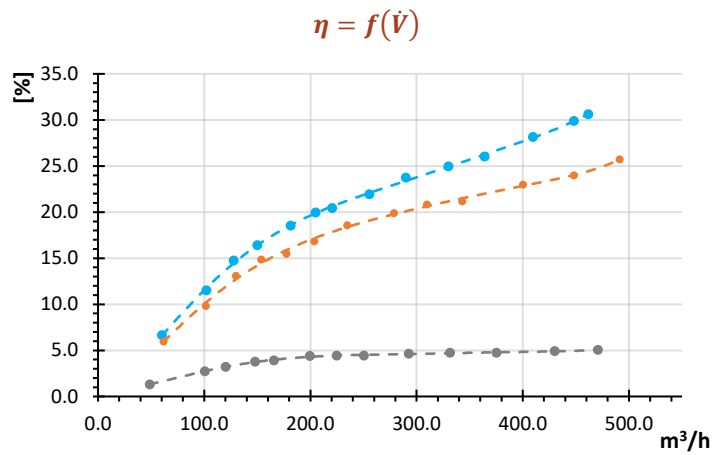


Gráfico 49 – Curvas $\eta = f(\dot{V})$. 1/ A VS 4/ A VS 3 / A

A utilização do motor 4 apresentou um maior rendimento quando comparado com os restantes em toda a extensão da curva, de acordo com Gráfico 49.

A utilização dos motores do tipo ECM (motor 3 e 4) apresentaram um rendimento de utilização superior ao motor de polos sombreados (motor 1) em grande parte devido à diferença no consumo elétrico por parte dos conjuntos de acordo com Gráfico 48.

Na gama de medições realizadas não permitiu identificar se o rendimento máximo dos conjuntos foi atingido.

- Conjunto 1 / C VS Conjunto 4 / C VS Conjunto 3 / C

Legenda:

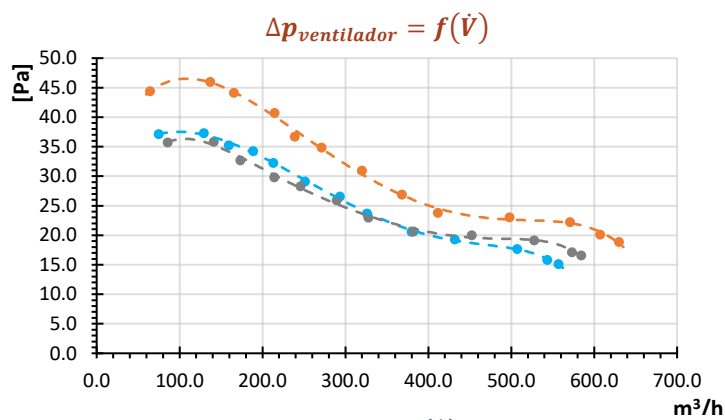
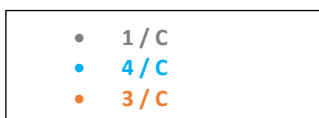


Gráfico 50 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$. 1 / C VS 4 / C VS 3 / C

De acordo com o gráfico 50, a capacidade de ventilação, na utilização dos motores 1 e 4, foi semelhante com uma variação máxima de 5 % (26,9 m³/h).

A utilização do motor 3 aumentou a capacidade de ventilação que relativamente ao motor 4, apresentando diferenças de 8 % a 13 % (17,0 m³/h a 69,9 m³/h). Esta maior capacidade de ventilação explica-se pela maior capacidade de rotação do impulsor relativamente aos restantes motores.

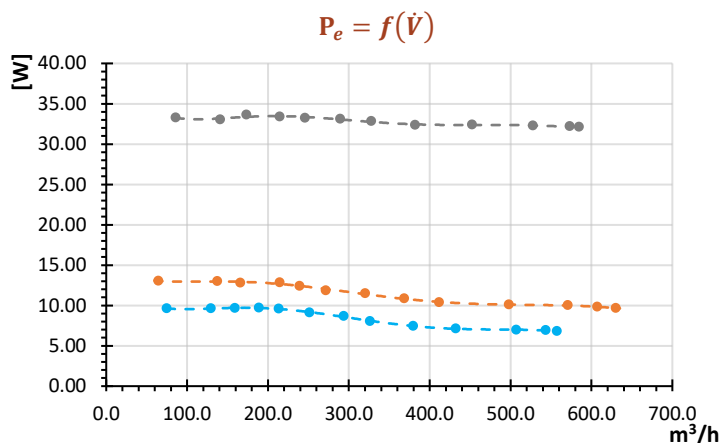


Gráfico 51 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 1/ C VS 4/ C VS 3 / C

Na potência consumida verificou-se um aumento considerável na utilização do motor 1 (polos sombreados) relativamente aos restantes do tipo ECM (motor 3 e 4) de acordo com Gráfico 51. As diferenças do motor 1 para os motores 3 e 4 foram superiores entre 159 % e 231 % (20,5 W a 22,4 W) e entre 243 % e 371 % (23,6 W a 25,3 W) respetivamente.

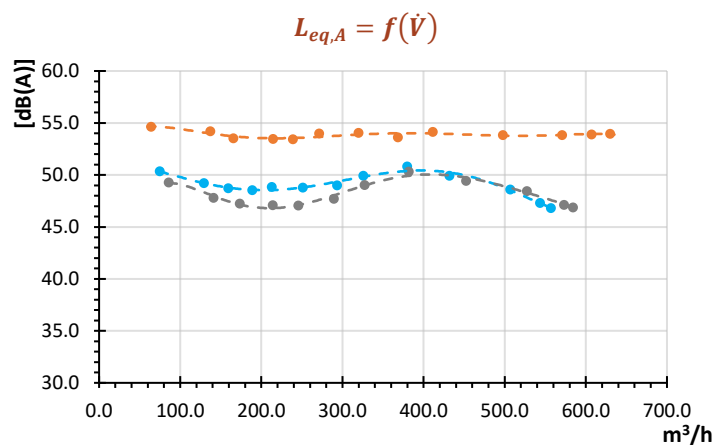


Gráfico 52 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 1/ C VS 4/ C VS 3 / C

Relativamente à pressão sonora, de acordo com Gráfico 52, a utilização do motor 3 provocou níveis de ruído superiores em toda a sua extensão relacionando-se também com o maior número de rotações do impulsor e da maior capacidade de ventilação.

Os motores 1 e 4 apresentaram níveis de ruído semelhantes em quase toda a extensão da curva, com uma diferença máxima, não significativa, na interceção com a curva de instalação teórica n.º 9 de 1,8 dB(A).

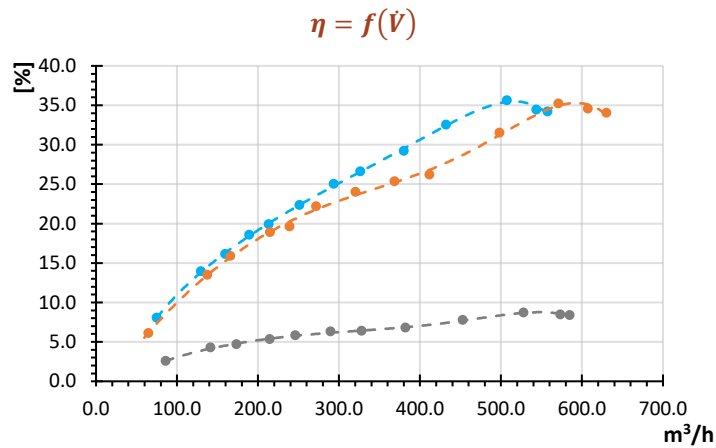


Gráfico 53 – Curvas $\eta = f(\dot{V})$. 1 / C VS 4 / C VS 3 / C

A utilização do motor 4 apresentou um rendimento semelhante ao motor 3 em toda a extensão da curva, de acordo com gráfico 53.

A utilização dos motores do tipo ECM (motor 3 e 4) exibiram um rendimento de utilização superior ao motor de polos sombreados (motor 1) em grande parte devido à diferença verificada no consumo elétrico por parte dos conjuntos de acordo com Gráfico 52.

Os conjuntos devem funcionar em sistemas com o perfil semelhante às curvas de instalação teórica n.º 1 a n.º 3 que garantam a utilização no local de maior rendimento.

- **Conjunto 1 / E VS Conjunto 4 / E VS Conjunto 3 / E**

Legenda:

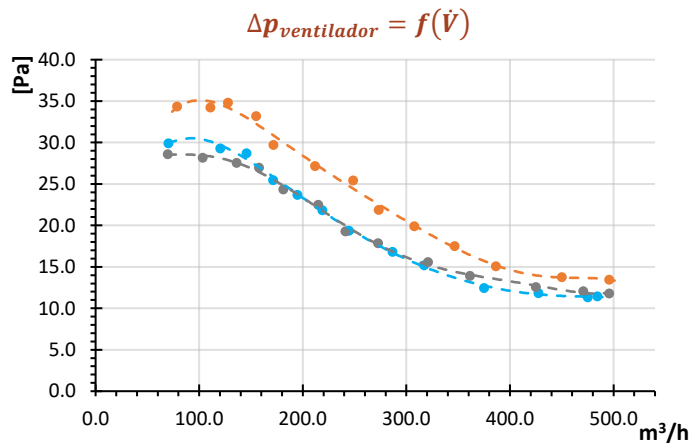


Gráfico 54 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E

A capacidade de ventilação da utilização dos motores 1 e 4 foram semelhantes com diferenças não significativas máximas de 3 % (13,9 m³/h) de acordo com Gráfico 54.

A maior capacidade de ventilação foi conseguida com a utilização do motor 3 com diferenças para o motor 4 em toda a extensão de 7 % a 9 % (10,7 m³/h a 31,8 m³/h).

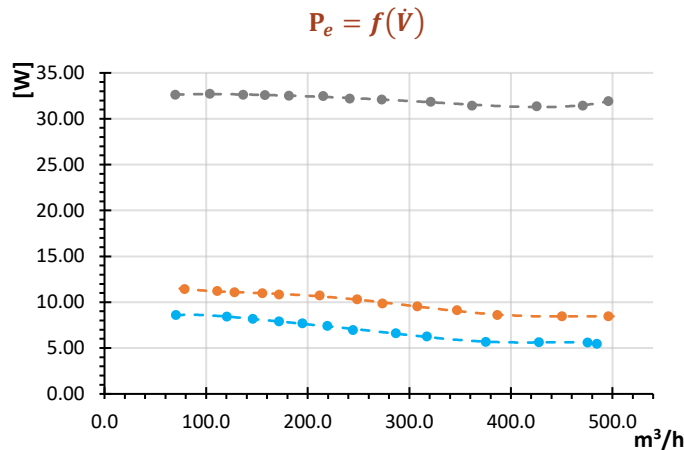


Gráfico 55 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E

Na potência consumida verificou-se um aumento considerável na utilização do motor 1 (polos sombreados) relativamente aos restantes do tipo ECM, de acordo com Gráfico 55. As diferenças do motor 1 para os motores 3 e 4 foram superiores entre 198 % e 271 % (21,7 W a 22,8 W) e entre 301 % e 462 % (24,5 W a 25,9 W) respetivamente.

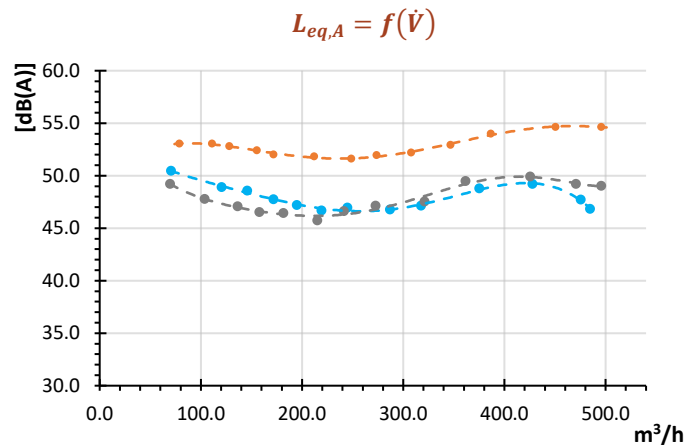


Gráfico 56 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E

Relativamente à pressão sonora, de acordo com Gráfico 56, a utilização do motor 3 provocou níveis de ruído superiores em toda a sua extensão relacionando-se o maior número de rotações do impulsor e da maior capacidade de ventilação.

Os motores 1 e 4 apresentaram níveis de ruído semelhantes em quase toda a extensão apresentado diferenças não significativas excetuando quando intercetados pela curva de instalação teórica n.º 1 onde a variação foi de 2,8 dB(A).

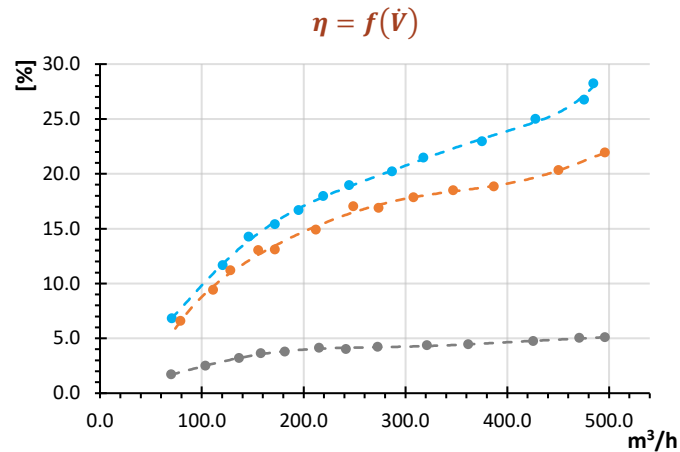


Gráfico 57 – Curvas $\eta = f(\dot{V})$. 1 / E VS 4 / E VS 3 / E

A utilização do motor 4 apresentou um maior rendimento do que os restantes em toda a extensão da curva.

A utilização dos motores do tipo ECM apresentaram um rendimento de utilização superior ao motor de polos sombreados em grande parte devido à diferença no consumo elétrico por parte dos conjuntos de acordo com Gráfico 57.

A gama de medições realizadas, não permitiu identificar se o rendimento máximo dos conjuntos foi atingido.

- **Conjunto 1 / F VS Conjunto 4 / F VS Conjunto 3 / F**

Legenda:

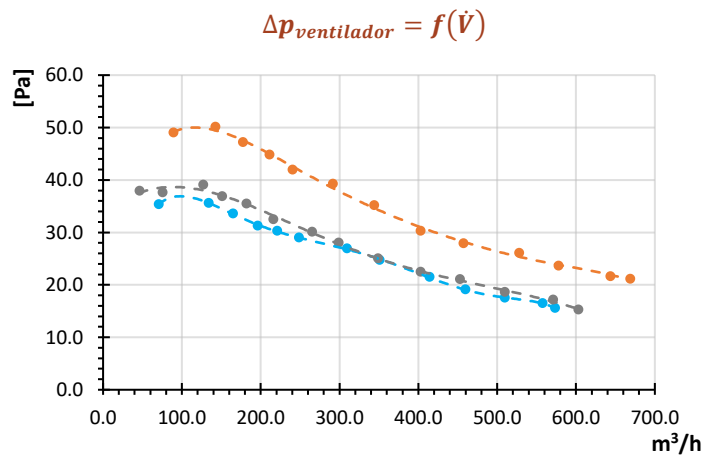
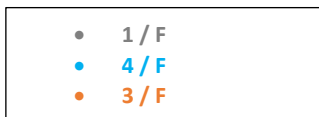


Gráfico 58 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$. 1 / F VS 4 / F VS 3 / F

De acordo com Gráfico 58, a capacidade de ventilação, da utilização dos motores 1 e 4 foram semelhantes com diferenças, não significativas, máximas de 4 % (15,1 m³/h).

A maior capacidade de ventilação foi conseguida com a utilização do motor 3 com diferenças para o motor 4 em toda a extensão de 12 % a 18 % (29,0 m³/h a 93,8 m³/h).

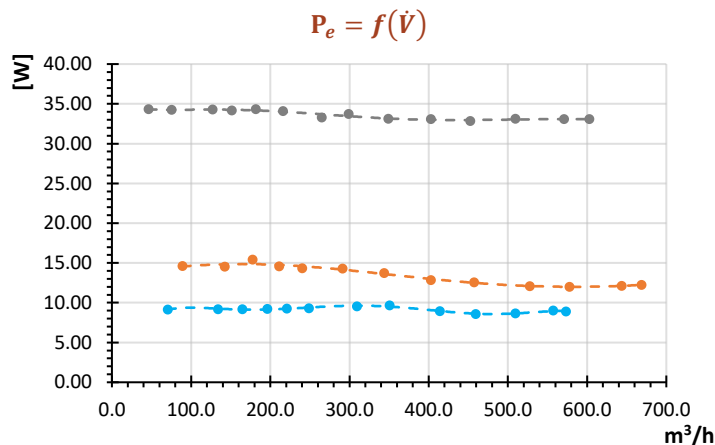


Gráfico 59 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 1 / F VS 4 / F VS 3 / F

Na potência elétrica verificou-se um aumento de consumo considerável com a utilização do motor 1 (polos sombreados) relativamente aos restantes do tipo ECM de acordo com Gráfico 59. As diferenças do motor 1 para o motor 3 e 4 foram superiores entre 131 % e 171 % (19,4 W a 20,9 W) e entre 267 % a 274 % (23,6 W a 25,1 W) respetivamente.

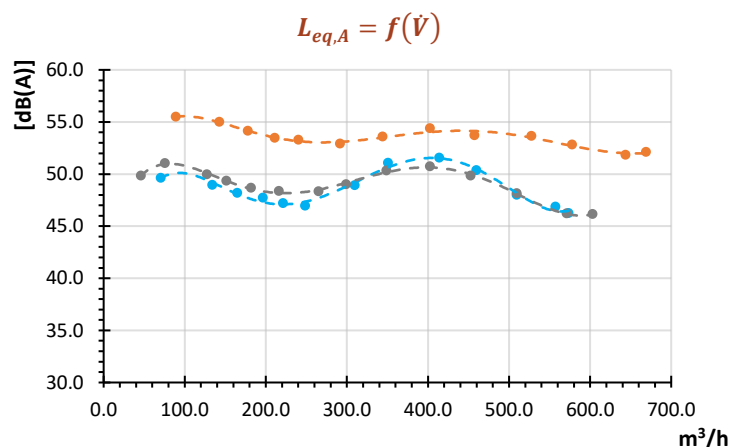


Gráfico 60 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 1 / F VS 4 / F VS 3 / F

Relativamente à pressão sonora, de acordo com o Gráfico 60, a utilização do motor 3 provocou níveis de ruído superiores em toda a sua extensão estando relacionada com o maior número de rotações do impulsor e da maior capacidade de ventilação.

Os motores 1 e 4 foram semelhantes, nos níveis de ruído, em quase toda a extensão apresentando uma diferença máxima não significativa na interceção com a curva de instalação teórica n.º 9 de 1,1 dB(A).

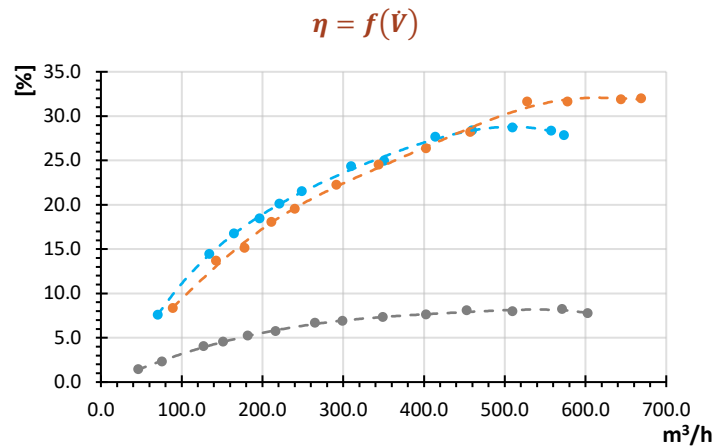


Gráfico 61 – Curvas $\eta = f(\dot{V})$. 1 / F VS 4 / F VS 3 / F

A utilização do motor 4 apresentou um rendimento semelhante ao motor 3 em toda a extensão. A utilização dos motores do tipo ECM exibiram um rendimento de utilização superior ao motor de polos sombreados em grande parte devido à diferença no consumo elétrico por parte dos conjuntos de acordo com Gráfico 59.

Os conjuntos devem funcionar, em sistemas, com um perfil semelhante às curvas de instalação teórica n.º 1 a n.º 3 que garanta a utilização no local de maior rendimento.

- **Conjunto 2 / B VS Conjunto 4 / B VS Conjunto 3 / B**

Legenda:

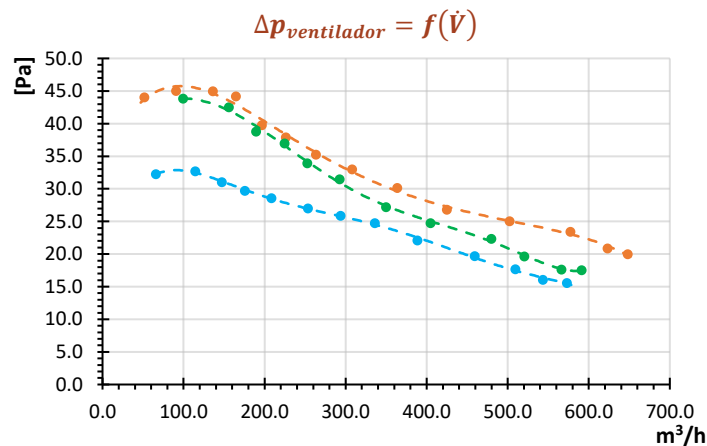


Gráfico 62 – Curvas $\Delta p_{ventilador} = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B

A capacidade de ventilação com a utilização da hélice B, de acordo com Gráfico 62, foi superior utilizando o motor 3 devido à sua capacidade de girar o impulsor a maiores rotações. A capacidade de ventilação do motor 3 foi superior entre 2 % a 9 % (2,8 m³/h a 53,9 m³/h) relativamente ao motor 2 e entre 10 % e 16 % (25,9 m³/h a 77,6 m³/h) relativamente ao motor 4.

Apesar dos motores 4 e 2 funcionarem à mesma rotação teórica de 1300 rpm, que à partida garantia uma capacidade de ventilação semelhante, o mesmo não se verificou. Ao analisarmos as medições das rotações reais, verificamos que a utilização da hélice B no motor 4 revelou um esforço por parte do motor fazendo com que girasse a valores inferiores a 1300 rpm em toda a extensão, reduzindo gradualmente o seu valor à medida que se aumentou as perdas de carga do sistema. O mesmo não se verificou com a utilização do motor 2 que apesar de gradualmente o valor das rotações também fossem diminuindo o seu valor manteve-se sempre superior a 1300 rpm.

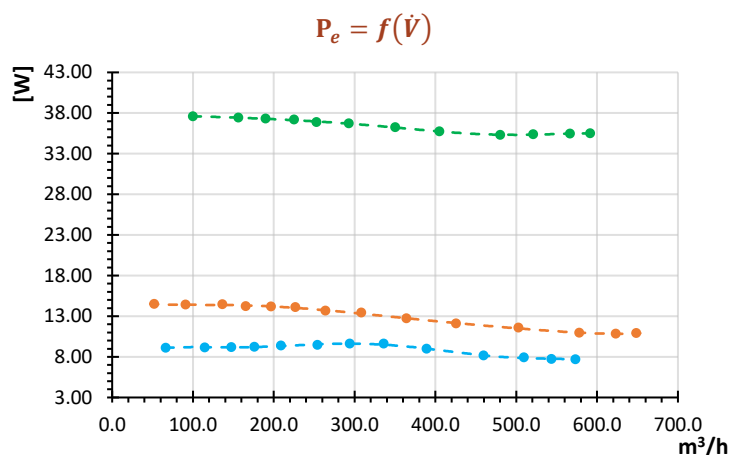


Gráfico 63 – Curvas $P_e = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B

Na potência elétrica verificou-se um aumento considerável com a utilização do motor 2 (polos sombreados) relativamente aos restantes do tipo ECM de acordo com Gráfico 63. As diferenças do motor 2 para o motor 3 e 4 foram superiores entre 162 % e 227 % (23,1 W a 24,6 W) e entre 279 % a 356 % (26,7 W a 28,2 W) respetivamente.

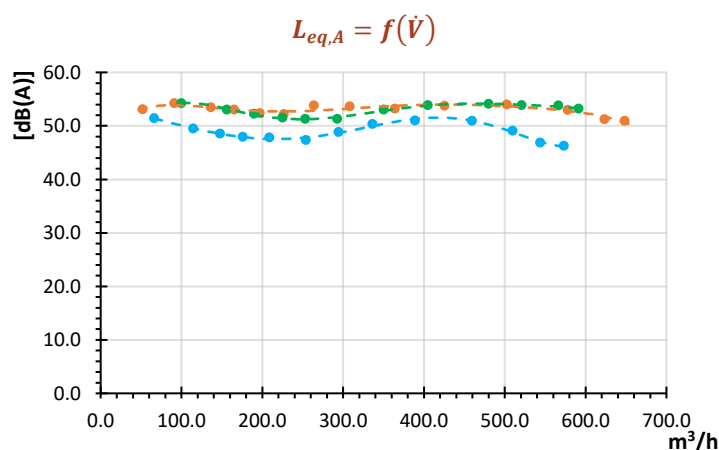


Gráfico 64 – Curvas $L_{eq,A} = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B

Relativamente à pressão sonora a utilização do motor 3 provocou níveis de ruído semelhantes ao motor 2 com diferença máxima, pouco significativa, de 1,9 dB(A) na interceção com a curva teórica de instalação n.º 2 de acordo com Gráfico 64. Apesar da utilização do motor 3 apresentar

uma capacidade de ventilação e rotações do impulsor superiores, o ruído associado ao próprio motor poderá ter influenciado o ruído do conjunto.

Por sua vez a utilização do motor 4 evidenciou níveis de ruído inferiores associado à sua inferior capacidade de ventilação e rotações do impulsor apesar de evidenciar um esforço suplementar com a utilização da hélice B. As diferenças de ruído alcançam um valor máximo de 6,8 dB(A) relativamente ao motor 2 e 4,8 dB(A) relativamente ao motor 3 na interceção com a curva de instalação teórica n.º 2.

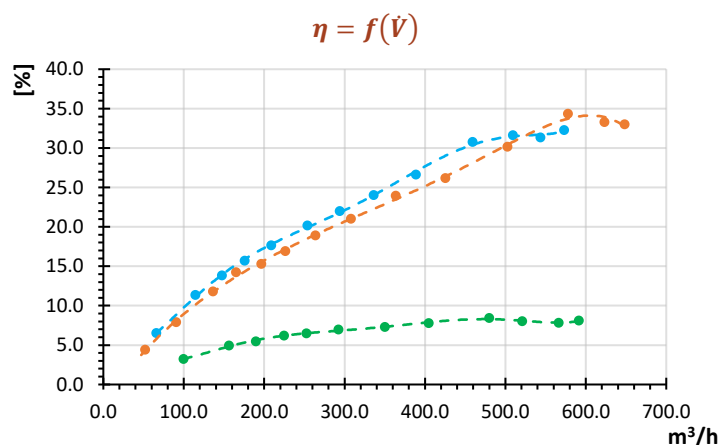


Gráfico 65 – Curvas $\eta = f(\dot{V})$. 2 / B VS 4 / B VS 3 / B

A utilização do motor 4 apresentou um rendimento semelhante ao motor 3 em toda a extensão de acordo com Gráfico 65.

A utilização dos motores do tipo ECM exibiu um rendimento de utilização superior ao motor de polos sombreados em grande parte devido à diferença no consumo elétrico por parte dos conjuntos de acordo com Gráfico 63.

Os conjuntos devem funcionar em sistemas com o perfil semelhante entre as curvas de instalação teórica n.º 1 a n.º 3 que garanta a utilização no local de maior rendimento.

COMENTÁRIOS GERAIS

A utilização do motor 3 comparando com os restantes motores ensaios e com a utilização das mesmas hélices permite uma capacidade de ventilação pois apresenta um funcionamento a rotações mais elevadas do que os restantes. Contudo apresenta níveis de ruído superiores relativamente aos motores 4 e 1 (diferenças médias de 4,5 dB(A)) assemelhando-se ao motor 2.

O motor 1 e 4 apresentam no geral capacidades de ventilação e níveis de ruído semelhantes com diferenças pouco significativas tendo em conta as incertezas expandidas para a medição do caudal entre 6 % a 11 %.

Relativamente ao consumo elétrico dos conjuntos, verifica-se que os motores 2 e 1 apresentam valores bastante superiores quando comparados com os motores 3 e 4 e rendimento inferiores

que podem ser explicados pela variação temperatura dos motores em ensaio resultantes de perdas por efeito de Joule conforme Figuras 48 a 51.

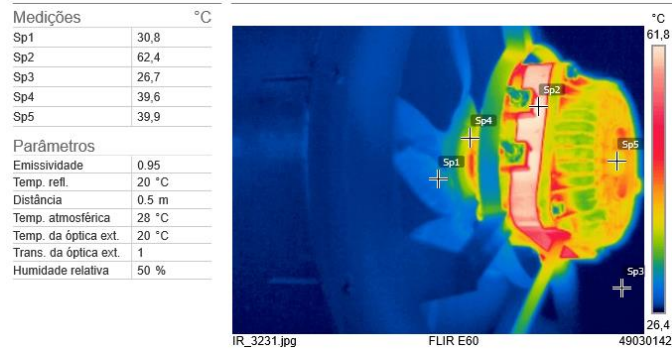


Figura 48 – Variação da temperatura do motor 1 em ensaio.

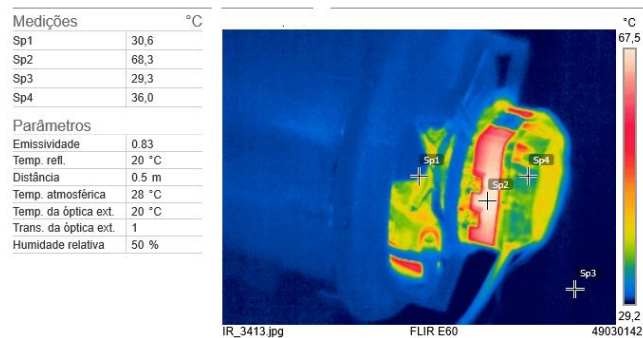


Figura 49 – Variação da temperatura do motor 2 em ensaio.

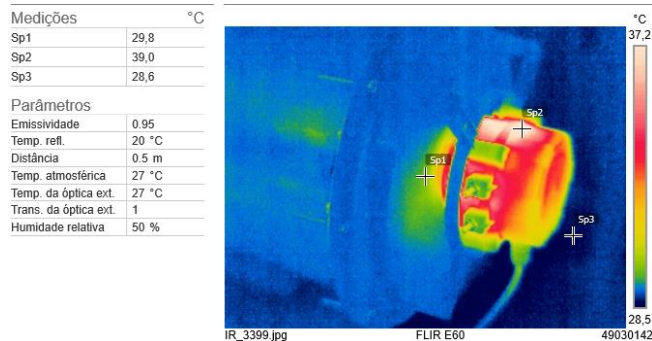


Figura 50 – Variação da temperatura do motor 4 em ensaio.

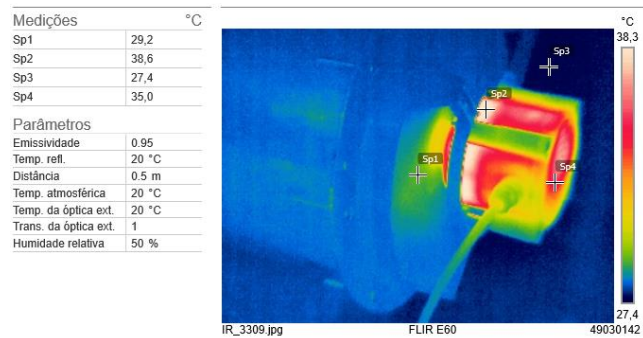


Figura 51 – Variação da temperatura do motor 3 em ensaio.

Da análise das Figuras 49 a 51 verificamos que a variação da temperatura do motor relativamente à temperatura ambiente foi de 11,2 °C no motor 3, 11,4 °C no motor 4, 35,7 °C no motor 1 e 39,0 °C no motor 2.

4.5 ANÁLISE ECONÓMICA

Dos resultados obtidos na secção 4.4 verificou-se que com o motor 4, do tipo ECM, conseguimos performances semelhantes ao nível do ruído e capacidade de ventilação quando comparado com o motor 1 do tipo polos sombreados com um consumo elétrico bastante inferior.

Tendo em conta o consumo elétrico e o custo de aquisição do motor 4 realizou-se uma estimativa da poupança energética e do retorno de investimento.

A análise considerou-se o exemplo do investimento de motores 4 pela troca dos motores de polos sombreados dos seus equipamentos de refrigeração comercial (considerando-se uma performance semelhante aos motores 1), que utilizam os motoventiladores como parte integrante do sistema, por parte de supermercados.

4.5.1 TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO

De acordo com a SKK, num supermercado estimam-se que existem cerca de 200 motoventiladores inseridos nos sistemas de refrigeração comercial com uma frequência de utilização de 11 h/dia.

Considerando as seguintes variáveis:

- Preço de aquisição motor 4 (ECM): 25 €;
- Preço kWh: 0,1652 € (baseado na tarifa simples, EDP 2017);
- Potência elétrica consumida por cada motor 4: 9,51 W (Com utilização da hélice F e uma curva de instalação do sistema semelhante à n.º 6);
- Potência elétrica consumida por cada motor 1: 33,15W (Com utilização da hélice F e uma curva de instalação do sistema semelhante à n.º 6);

Verificamos através do Gráfico 66 verificamos que após cerca de 20 meses obtemos o retorno do investimento, a partir do qual obtemos uma poupança anual na ordem dos 3136 €.

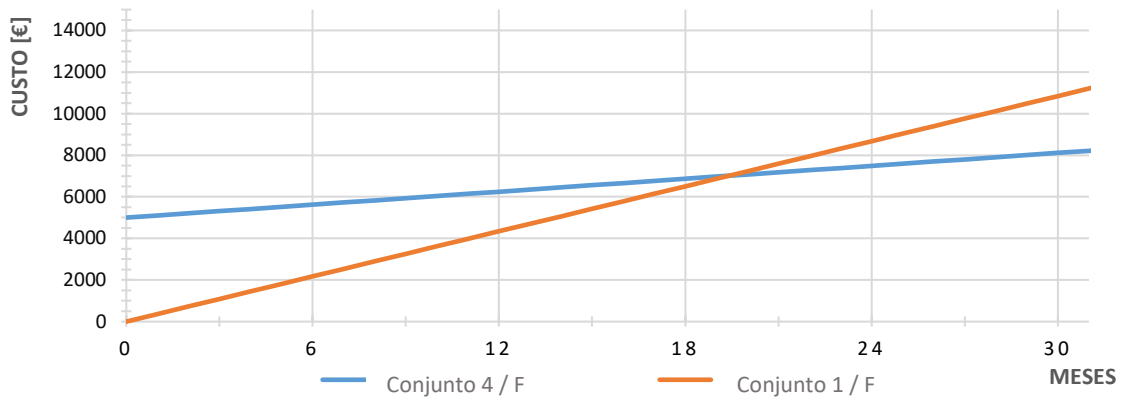


Gráfico 66 – Tempo de retorno do investimento e poupança anual

4.5.2 ESTIMATIVA DA POUPANÇA ENERGÉTICA ANUAL RESULTANTE DA TROCA DE MOTORES

A SKK prevê que existam 1261 supermercados com cerca de 200 unidades de motoventiladores nos seus sistemas de refrigeração comercial.

A poupança energética, resultante da troca dos motoventiladores, conforme dados da secção 4.5.1, situa-se nos 24 GWh anuais, contribuindo para uma redução anual nas emissões de CO₂ de 2425 ton conforme Gráfico 67.

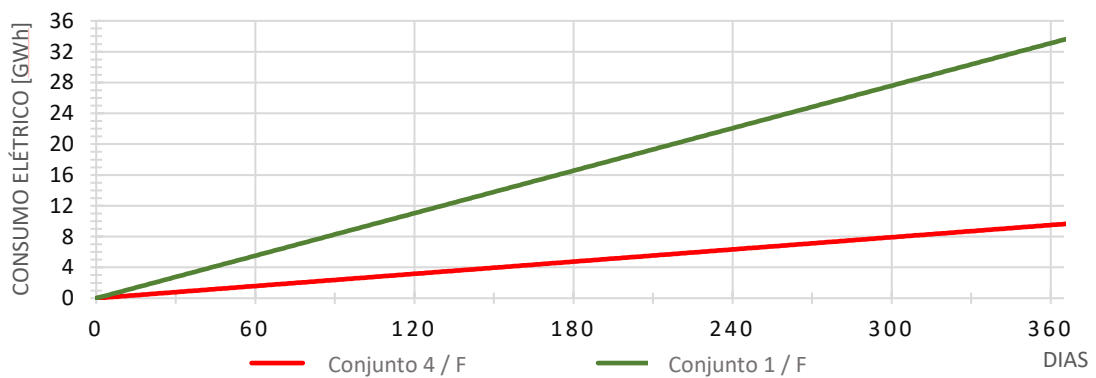


Gráfico 67 – Consumo elétrico anual. Motor 4 VS Motor 1

CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

Verificou-se que a alteração do ângulo de ataque das pás, α , de 28° para 34° aumentou a capacidade de ventilação, entre 2 % a 29 %, e a potência elétrica consumida entre 22 % a 83 %. Ao nível de ruído verificou-se um aumento máximo de 3,9 dB(A) na utilização com motor 3 e 3,2 dB(A) quando utilizado o motor 4.

Relativamente ao impacto da rugosidade, verificou-se que a capacidade de ventilação foi semelhante, apresentando diferenças entre os 3 % e 4 % superiores na utilização da hélice menos rugosa, com um consumo elétrico semelhante. Quanto ao ruído, verificaram-se diferenças não significativas com utilização dos motores 1, 3 e 4 tendo em conta as incertezas associadas às medições.

Na avaliação das diferentes geometrias, as hélices C e F apresentaram capacidades de ventilação semelhantes, tendo em conta as incertezas associadas, com diferenças entre - 2 % a 6 %, apesar da hélice F apresentar valores ligeiramente superiores em grande parte da extensão das curvas. Em comparação com as hélices A e E, as hélices C e F apresentaram capacidades de ventilação superiores até 31 %.

Na potência elétrica, a utilização da hélice F face à hélice C, gerou um aumento do consumo em praticamente toda a extensão das curvas com uma variação máxima de 32 %, na utilização dos motores 3 e 4, e semelhante na utilização do motor 1 tendo em conta as incertezas associadas. A utilização da hélice A, face às restantes, permitiu uma redução da potência elétrica consumida com diferenças que podem chegar aos 53 % quando comparada com a utilização da hélice de F.

Nos níveis de ruído, não se verificou nenhum padrão relativamente à utilização das hélices com os diferentes motores. Dependendo do ponto de funcionamento do sistema, cada hélice apresentou níveis inferiores ou superiores. A exceção foi a utilização da hélice A no motor 3 que comparativamente com as outras hélices utilizadas no mesmo motor apresentou níveis de ruído inferiores com uma diferença entre os 0,3 dB(A) a 4,7 dB(A) quando comparada com a hélice F.

Para regimes de escoamento livre a utilização da hélice A permitiu níveis de ruído ligeiramente inferiores na utilização de todos os motores ensaiados ao contrário da E que com uma capacidade de ventilação semelhante à hélice A e inferior à hélice F e a hélice C apresentou níveis de ruído semelhante com estes dois últimos.

Relativamente ao desempenho dos motores, a utilização do motor 3 permitiu uma capacidade de ventilação superior entre 2 % a 18 % relativamente aos restantes. Contudo apresentou níveis de ruído superiores relativamente aos motores 1 e 4 com diferenças médias de 4,5 dB(A) que apenas se assemelhou quando comparado com o motor 2. Os motores 1 e 4 apresentaram, no geral, capacidades de ventilação e níveis de ruído semelhantes com variações entre - 7 % a 3 % no caudal e entre $\pm 1,8$ dB(A) nos níveis de ruído. Na potência elétrica consumida, verificou-se que os motores 1 e 2, apresentaram consumos superiores quando comparados com os motores 3 e 4. A utilização dos motores ECM face aos motores de polo sombreados ensaiados permitem uma redução no consumo elétrico entre 57 % a 86 %.

A troca do motor 1, de polos sombreados, pelo motor 4 do tipo ECM permite manter uma capacidade de ventilação e níveis de ruído semelhantes, diminuindo a potência elétrica consumida. O retorno do investimento é inferior a 2 anos e permite poupanças consideráveis a longo prazo.

A escolha do melhor conjunto deve ser avaliada caso a caso, comparando as curvas da instalação do sistema e as curvas características determinadas considerando sempre as incertezas associadas às medições. Os resultados apenas dizem respeito às extensões das curvas características determinadas e não devem ser extrapoladas para zonas fora da gama de medições registadas.

As incertezas das medições consideradas são conservadoras, devido à utilização, para efeitos de cálculo, dos erros máximos declarados pelo fabricante, dos equipamentos e que podem ser reduzidos sujeitando-os a calibrações na gama de utilização.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS
FONTES DE INFORMAÇÃO**

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] - Directiva 209/125/EC do Parlamento Europeu e do conselho de 21 de Outubro de 2009;
- [2] - Regulamento (UE) 2015/1095 da Comissão de 5 de maio de 2015;
- [3] - Regulamento (UE) 2015/1094 da Comissão de 5 de maio de 2015;
- [4] - Regulamento (UE) 2016/2281 da Comissão de 30 de novembro de 2016;
- [5] - *Portaria n.º 701-H2008 de 29 de Julho de 2008. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Telecomunicações;*
- [6] - Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho de 2008;
- [7] - Solerpalau (consultado a 12 de 02 de 2017). Disponível em: http://www.solerpalau.pt/formacion_01_14.html;
- [8] - ASHRE. *HVAC Systems and Equipment. Chapter 20 - Fans*. 2008. ISBN 9781933742335;
- [9] - *CIBSE JOURNAL (Consultado a 06 de 04 de 2017)*. Disponível em: <http://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2011-12/>;
- [10] - Sistemas Fluidomecânicos (consultado em 22 de 03 de 2017). Disponível em: <http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-23.pdf>
- [11] - Catálogo técnico REFRTUBO MULTSERVIÇOS, SA (consultado em 04 de 05 de 2017). Disponível em: <http://docplayer.com.br/12407493-Catalogo-2015-tubo-spiro-acessorios-condutas-filtros-grelhas-difusores-ventiladores-hotes-etc.html>
- [12] - Catálogo INFINAIR SA (consultado em 21 de 06 de 2017). Disponível em: <http://infinair-pt.com/produtos/ventilador-de-tunel-ventilador-de-metro/jet-type.html>
- [13] - Ventiladores (consultado em 09 de 06 de 2016). Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/-ventiladores_arquivos-Image201_gif_arquivos/ventiladores.htm
- [14] - ISO 5801:2007 - "Industrial fans — Performance testing using standardized airways"
- [15] - *AMCA 210 - "Laboratory Methods of Testing Fans and Aerodynamic Performance Rating"*. 1999.
- [16] - Applications to Fans (Consultado em 23 de 04 de 2017) Disponível em: <http://what-when-how.com/electric-motors/applications-to-fans-electric-motor/>
- [17] - Typical Performance Curves 700 to 1700 R.P.M. Conditionare International (consultado em 02 de 04 de 2017). Disponível em: <http://www.conditionaire.com.au/pm-series.html>
- [18] - ASHRE. *Fundamentals. Chapter 21 – Duct Design*. 2009. ISBN 978-1-933742-55-7;
- [19] - White, Frank M. *Mecânica dos Fluidos – Capítulo 3*. 4ª Edição. MC Graw Hill. ISBN 0-07-069716-7
- [20] - White, Frank M. *Mecânica dos Fluidos – Capítulo 6*. 4ª Edição. MC Graw Hill. ISBN 0-07-069716-7
- [21] - Oliveira, Luis Adriano e Lopes, António Gameiro. *Mecânica dos fluidos 2ª Edição*. Capítulo 12. LIDEL. ISBN 978-972-8480-13-4
- [22] - White, Frank M. *Mecânica dos Fluidos – Capítulo 11*. 4ª Edição. MC Graw Hill. ISBN 0-07-069716-7
- [23] - 1986 Chevy Pathfinder K Van (consultado em 03 de 04 de 2017). Disponível em: <http://www.nomadicman.com/kvan.html>
- [24] - Catálogo de produtos EVA (consultado em 05 de 04 de 2017). Disponível em: <http://www.eduardoverde.pt/pt/frio-congelacao/expositores/expositor-de-bebidas/armario-frigorifico-com-porta-de-vidro-infrico-an-49-cr.html>

- [25] - Inácio, Octávio. A Acústica nas Instalações AVAC & R, Tardes Técnicas EFRIARC. Porto 2016
- [26] - *fq*. (consultado em 05 de 10 de 2016) Disponível em: <http://www.fq.pt/som/33>
- [27] - Salgueiro, Filipa Carvalho. Relatório de estágio "Avaliação de ruído e determinação de medidas técnicas para a sua contenção. 2014. Disponível em:
<https://pt.slideshare.net/FilipeSalgueiro/relatorio-de-estgio-galp1-43436887>
- [28] - ASHRE. *Fundamentals. Chapter 8 – Sound and Vibration*. 2009. ISBN 978-1-933742-55-7;
- [29] - Decreto Lei 9/2007 de 17 de Janeiro de 2007
- [30] - ASHRE. *HVAC Applications. Chapter 48 – Noise and vibration control*. 2011. ISBN 978-1936504060
- [31] - Acoustic Noise: Causes, Rating Systems, and Design Guidelines. *Comair Rotron*. (Consultado em 04/06/2017). Disponível em: <http://www.comairrotron.com/acoustic-noise-causes-rating-systems-and-design-guidelines>
- [32] - Cabral, Paulo. Erros e Incertezas nas Medições. 2004. Disponível em:
<http://docplayer.com.br/6377497-Paulo-cabral-erros-e-incertezas-nas-medicoes-julho-2004.html>
- [33] - EA-4/02 M:2013 - "Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European Accreditation. Setembro 2013 REV02
- [34] - T-Student Distribution (consultado em 04 de 09 de 2016) disponível em:
<https://pt.slideshare.net/Maicori/tabla-t-student-3372178>
- [35] - SKK Refrigeração e climatização. *Smart Power 2015 - Motoventiladores*. 2015 (consultado em 03 de 03 de 2016). Disponível em: <http://www.skk.pt/images/pdf/smartpower.pdf>
- [36] - Leal, António Miguel. *Caracterização de Materiais para hélices de motoventiladores*. Porto. 2016.
- [37] - Ventilation Meter Model 956. TSI (consultado em 05 de 04 de 2016). Disponível em:
http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/9565-VelociCalc_US_5001361-web.pdf
- [38] - Çengel, Yunus A e Cimbala, John M. Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e aplicações– Capítulo 8. MC Graw Hill. ISBN 978-85-86804-58-8
- [39] - ISO 3774:2010 - "Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane"
- [40] - Guia RELACRE 22 - Cálculo de Incertezas - Acústica. Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal. RELACRE. 978-972-8574

Anexos

7 Anexos

7.1 MEMÓRIA DE CÁLCULO

Para exemplificação dos cálculos efetuados recorreu-se ao conjunto 4 / F para o ponto de medição 1 (registo 100% aberto).

7.1.1 CAUDAL – ANEMÓMETRO DE HÉLICE

Dados:

- Resolução do anemómetro, r_{anem} : 0,1 m/s
- Resolução do paquímetro, r_{paq} : 0,05 mm
- Incerteza expandida do paquímetro, $U(paq)$. 0,016 mm com $k=2,0$
- Erro máximo do anemómetro de hélices declarado pelo fabricante, $E_{max,anem}$; 0,2 + 2% da leitura = 0,3 m/s
- Velocidades, V_0 , medidas: 5,1 m/s; 5,2 m/s; 5,0 m/s; 4,8 m/s; 5,1 m/s
- Diâmetros, D_0 , medidos: 198,30 mm; 202,95 mm; 200,50 mm

$$\bar{V}_0 = \frac{\sum_{i=1}^5 V_{0i}}{5} = 5,04 \text{ m/s}$$

$$\bar{D}_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 D_{0i}}{3} = 200,58 \text{ mm}$$

$$\dot{V} = \bar{V}_0 \cdot A_0 = \bar{V}_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\bar{D}_0}{1000}\right)^2 = 0,159 \text{ m}^3/\text{s}$$

De acordo com tabela 14:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\dot{V})$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|---|
| \bar{V}_0 | 5,04 | $6,78E^{-2}$ | A | 0,032 | $4,59E^{-6}$ | 0,006 |
| $E_{max,anem}$ | --- | $1,74E^{-1}$ | B Retangular | 0,032 | $3,01E^{-5}$ | |
| r_{anem} | --- | $2,89E^{-2}$ | B Retangular | 0,032 | $8,32E^{-7}$ | |
| \bar{D}_0 | 200,58 | 1,10 | A | 0,002 | $3,03E^{-6}$ | |
| $U(paq)$ | --- | $8,00 E^{-6}$ | B Normal | 0,002 | $1,61E^{-10}$ | |
| r_{paq} | ---- | $1,44 E^{-5}$ | B Retangular | 0,002 | $5,25E^{-10}$ | |

De acordo com tabela 15:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(\dot{V})$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|---|---|-----------------------|
| \bar{V} | 4 | $2,11E^{-11}$ | $1,49E^{-9}$ | 53 | 2,05 |
| $E_{max,anem}$ | 50 | $9,07E^{-10}$ | | | |
| r_{anem} | ∞ | $6,92E^{-13}$ | | | |
| \bar{D}_0 | 2 | $9,19E^{-16}$ | | | |
| $u(paq)$ | 50 | $2,60E^{-20}$ | | | |
| r_{paq} | ∞ | $2,76E^{-19}$ | | | |

A incerteza expandida do caudal será:

$$U(\dot{V}) = \pm 2,05 \times 0,006 = 0,013 \text{ m}^3/\text{s} = \pm 45,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

7.1.2 ROTAÇÕES DO MOTOR

Dados:

- Resolução do equipamento, r_{taq} ; 1 rpm
- Erro máximo declarado pelo fabricante: $E_{max,taq}$: 1 + 0,5 % da Leitura
- Rotações, ω , medidas: 1320 rpm; 1260 rpm; 1320 rpm; 1260 rpm; 1320 rpm

$$\frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i}{5} = 1296 \text{ rpm}$$

De acordo com Tabela 39:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\omega)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| $\bar{\omega}$ | 1296 | 14,697 | Normal | 1 | $2,16E^2$ | |
| r_{taq} | --- | 0,289 | B Retangular | 1 | $6,94E^{-3}$ | 15,3 |
| $E_{max\ taq}$ | --- | 4,319 | B Retangular | 1 | $1,87E^1$ | |

De acordo com Tabela 40:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(\omega)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|--|---|-----------------------|
| $\bar{\omega}$ | 4 | $4,67E^4$ | | | |
| r_{taq} | ∞ | $6,94E^{-3}$ | $5,51E^4$ | 5 | 2,87 |
| $E_{max\ taq}$ | 50 | $3,48E^2$ | | | |

A incerteza expandida das rotações será:

$$U(\omega) = \pm 2,87 \times 15,3 = \pm 44 \text{ rpm}$$

7.1.3 PRESSÕES ESTÁTICAS DO MOTOVENTILADOR

Dados:

- Valores de pressão estática no ponto 1, p_1 , medidos: -16,2 Pa; -16,4 Pa; -16,1 Pa; -16,6 Pa; -16,4 Pa
- Pressão atmosférica, p_{atm} , medida: 747,3 mmHg
- Temperatura do ar, T_{ar} , medida: 28,2 °C
- Humidade relativa, h_u , medida: 54,4 %
- Valores medidos de D_1 : 204,80 mm; 200,80 mm; 202,80 mm
- Valores medidos de D_2 : 208,80 mm; 208,60 mm; 208,35 mm
- Medição do comprimento L_1 : 373 mm
- Valor da perda de carga localizada da transição C_0 : 0,00994 (por interpolação dos valores consultados na Figura 41)
- Valor do caudal, \dot{V} : 0,15926 m³/s
- Valor do diâmetro D_0 : 200,58 mm
- Valor da velocidade V_0 : 5,04 m/s
- Incerteza expandida do caudal determinado, $U(\dot{V})$: 0,013 m³/s ($k=2,05$)
- Erro da utilização da fórmula para a determinação de f : considerado ± 15 % do valor Calculado.
- Erro da utilização do coeficiente de perda localizada, C_0 , tabelado: considerado ± 20 % do valor calculado.
- Resolução do paquímetro para a medição de D_1 e D_2 , r_{paq, D_i} : 0,05 mm
- Incerteza expandida do paquímetro, $U(paq)$: 0,016 mm com $k=2,0$
- Resolução da fita métrica para a medição de L_1 , $r_{FM, L}$: 1 mm
- Incerteza da fita métrica para a medição de L_1 , $U(FM)_L$: 0,03 m ($K=2,00$)
- Erro máximo do termohigrómetro, $E_{max, TH}$: 1 °C
- Resolução do termohigrómetro, r_{TH} : 0,1 °C
- Resolução da Sonda termohigrómetro, r_H : 0,1%
- Erro máximo da sonda termohigrómetro declarada pelo fabricante, $E_{max H}$: 1,5 + 1 % da Leitura

- Resolução do multifunções TSI para leitura da pressão barométrica, r_{PB} ; 0,1 mmHg
- Erro máximo do multifunções TSI declarado pelo fabricante para leituras de pressão barométrica, $E_{\max PB}$: 2% da Leitura
- Resolução do multifunções TSI para medição de pressão diferencial, r_{TSI} ; 0,1 Pa
- Erro máximo do multifunções TSI declarado pelo fabricante para leituras de pressão diferencial, $E_{\max TSI}$: 1 + 1% da leitura

$$\mu = (17,10 + 0,048 \times T_{ar}) \times 10^{-6} = 1,85E^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

$$P_{sat} = e^{\left(\frac{17,438 \times T_{ar}}{239,78 + T_{ar}} + 6,4147\right)} = 3826,6 \text{ Pa}$$

$$p_v = \frac{hu}{100} \times (p_{sat})_{T_{ar}} = 2081,7 \text{ Pa}$$

$$\rho_{ar} = \frac{(p_{atm} \cdot 133,32) - 0,378 \cdot (p_v)}{287 \times (273,15 + T_{ar})} = 1,14302 \text{ kg/m}^3$$

$$\overline{D}_1 = \frac{\sum_{i=1}^3 D_{1i}}{3} = 202,80 \text{ mm}$$

$$\overline{D}_2 = \frac{\sum_{i=1}^3 D_{2i}}{3} = 208,58 \text{ mm}$$

$$Re = \frac{D_0 \times V_0 \times \rho_{ar}}{\mu} = 62618$$

$$f = \frac{0,14}{Re^{0,17}} = 0,02141$$

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot \left(\left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\overline{D}_1}{1000}\right)^2} \right)^2 - \left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\overline{D}_2}{1000}\right)^2} \right)^2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\overline{D}_1}{1000}\right)^2} \right)^2 \cdot \left(f_1 \cdot \frac{L_1}{\overline{D}_1} + C_0 \right)$$

$$= -15,547 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{ventilador} = -p_2 = 15,5 \text{ Pa}$$

- Incerteza do cálculo de μ

De acordo com tabela 21:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\mu)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| r_{TH} | --- | 0,029 | B Retangular | $0,048 E^6$ | $1,92E^{-18}$ | $2,77E^{-8}$ |
| $E_{max,TH}$ | --- | 0,577 | B Retangular | $0,048E^6$ | $7,68E^{-16}$ | |

De acordo com Tabela 22:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(\mu)$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|---|---------------------------------------|-----------------------|
| r_{TH} | ∞ | $3,69E^{-36}$ | $2,70E^{-32}$ | 51,2 | 2,05 |
| $E_{max,TH}$ | 50 | $1,63E^{-16}$ | | | |

A incerteza expandida de μ será:

$$U(\mu) = \pm 2,05 \times 2,77E^{-8} = \pm 5,56E^{-8} N.s/m^2$$

- Incerteza do cálculo de p_{ar}

De acordo com Tabela 23:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\rho_{ar})$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|---|
| r_{TH} | --- | 0,029 | B Retangular | $-4,48E^{-3}$ | $1,67E^{-8}$ | 0,01 |
| $E_{max,TH}$ | --- | 0,577 | B Retangular | $-4,48E^{-3}$ | $6,68E^{-6}$ | |
| r_H | --- | 0,029 | B Retangular | $-2,87E^{-5}$ | $6,87E^{-13}$ | |
| $E_{max,H}$ | --- | 1,180 | B Retangular | $1,54E^{-3}$ | $1,15E^{-9}$ | |
| r_{PB} | --- | 0,029 | B Retangular | $1,54E^{-3}$ | $1,98E^{-9}$ | |
| $E_{max,PB}$ | --- | 8,630 | B Retangular | $1,54E^{-3}$ | $1,77E^{-4}$ | |

De acordo com Tabela 24:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevada à quarta potência $u^4(p_{ar})$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|--|---------------------------------------|-----------------------|
| r_{TH} | ∞ | $2,79E^{-16}$ | $3,37E^{-8}$ | 54 | 2,05 |
| $E_{max,TH}$ | 50 | $4,46E^{-11}$ | | | |
| r_H | ∞ | $4,72E^{-25}$ | | | |
| $E_{max,H}$ | 50 | $1,32E^{-18}$ | | | |
| r_{PB} | ∞ | $3,92E^{-18}$ | | | |
| $E_{max,PB}$ | 50 | $3,13E^{-8}$ | | | |

A incerteza expandida de p_{ar} será:

$$U(p_{ar}) = \pm 2,05 \times 0,01 = \pm 0,03 Pa$$

- Incerteza R_e

De acordo com Tabela 25:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(R_e)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| $U(\mu)$ | --- | $2,77E^{-8}$ | B Normal | $-3,39E^{-3}$ | $8,86E^3$ | 2460 |
| $U(\rho_{ar})$ | --- | 0,01 | B Normal | 54783 | $5,51E^5$ | |
| \bar{V}_0 | 5,04 | 0,068 | A | 12424 | $7,10E^5$ | |
| r_{anem} | --- | 0,029 | B Retangular | 12424 | $4,66E^6$ | |
| $E_{max,anem}$ | --- | 0,174 | B Retangular | 12424 | $1,29E^5$ | |
| \bar{D}_0 | 0,20058 | $1,10E^{-3}$ | A | 312177 | $3,42E^2$ | |
| r_{paq} | --- | $1,44E^{-5}$ | B Retangular | 312177 | $2,03E^1$ | |
| $U(paq)$ | --- | $8,00E^{-6}$ | B Normal | 312177 | $6,24E^0$ | |

De acordo com Tabela 26:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade v_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(R_e)$ | Graus de liberdade efetivos v_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|--------------------------|--|---|---------------------------------------|-----------------------|
| $U(\mu)$ | ∞ | $7,86E^7$ | $6,05E^6$ | 5311 | 2,00 |
| $U(\rho_{ar})$ | ∞ | $3,04E^{11}$ | | | |
| \bar{V}_0 | 4 | $5,04E^{11}$ | | | |
| r_{anem} | ∞ | $1,65E^{10}$ | | | |
| $E_{max,anem}$ | 50 | $2,17E^{13}$ | | | |
| D_0 | 2 | $1,37E^{10}$ | | | |
| r_{paq} | ∞ | $4,12E^2$ | | | |
| $U(paq)$ | ∞ | $3,89E^1$ | | | |

A incerteza expandida de R_e será:

$$U(R_e) = \pm 2,00 \times 2460 = \pm 4922$$

- Incerteza f

De acordo com Tabela 27:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(f)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|
| $U(Re)$ | --- | 2460 | B Normal | $-5,81E^{-8}$ | $2,05E^{-8}$ | $1E^{-4}$ |

De acordo com Tabela 28:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(f)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|---|---|-----------------------|
| $U(Re)$ | ∞ | $4,19E^{-16}$ | $4,19E^{-16}$ | 10000 | 2,00 |

A incerteza expandida de f será:

$$U(f) = \pm 2,00 \times 1E^{-4} = \pm 3E^{-4}$$

- Incerteza p_1

De acordo com Tabela 29:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(p_1)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| r_{TSI} | --- | 0,029 | B Retangular | -1 | $8,33E^{-4}$ | |
| $E_{max,TSI}$ | --- | 1,163 | B Retangular | -1 | 1,35 | 1,17 |
| \bar{p}_1 | 16,34 | 0,087 | A | -1 | $7,60E^{-3}$ | |

De acordo com Tabela 30:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(p_1)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|---|---|-----------------------|
| r_{TSI} | ∞ | $6,94E^{-7}$ | | | |
| $E_{max,TSI}$ | 50 | $1,83E^0$ | $1,85E^0$ | 51 | 2,05 |
| \bar{p}_1 | 4 | $5,78E^{-5}$ | | | |

A incerteza expandida de p_1 será:

$$U(p_1) = \pm 2,05 \times 1,17 = \pm 2,4 Pa$$

- Incerteza $\Delta p_{\text{ventilador}}$

De acordo com Tabela 31:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\Delta p_{\text{ventilador}})$ |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| $U(\rho_{ar})$ | --- | $1,36E^{-2}$ | B Normal | $-6,93E^{-1}$ | $8,83E^{-5}$ | 1,19 |
| $U(\dot{V})$ | --- | $6,21E^{-3}$ | B Normal | $-9,95E^0$ | $3,82E^{-2}$ | |
| $U(f)$ | --- | $1,43E^{-4}$ | B Normal | $2,59E^0$ | $1,37E^{-7}$ | |
| $E_{\text{formula } f}$ | --- | $1,85E^{-3}$ | B Retangular | $2,59E^0$ | $2,31E^{-5}$ | |
| $U(p_1)$ | --- | $1,17E^0$ | B Normal | 1 | $1,36E^0$ | |
| $\overline{D_1}$ | 202,80 | $1,06E^{-1}$ | Normal | $2,58E^{-1}$ | $7,51E^{-4}$ | |
| $r_{paq_{D_1}}$ | --- | $1,44E^{-2}$ | B Retangular | $2,58E^{-1}$ | $1,38E^{-5}$ | |
| $U(paq)_{D_1}$ | --- | $8,00E^{-3}$ | B Normal | $2,58E^{-1}$ | $4,25E^{-6}$ | |
| $\overline{D_2}$ | 208,58 | $9,43E^{-1}$ | Normal | $-2,38E^{-1}$ | $5,04E^{-2}$ | |
| $r_{paq_{D_2}}$ | --- | $1,44E^{-2}$ | B Retangular | $-2,38E^{-1}$ | $1,18E^{-5}$ | |
| $U(paq)_{D_2}$ | --- | $8,00E^{-3}$ | B Normal | $-2,38E^{-1}$ | $3,63E^{-6}$ | |
| $E_{\text{tabela } C_0}$ | --- | $1,15E^{-3}$ | B Retangular | $1,39E^1$ | $2,54E^{-4}$ | |
| r_{FML} | --- | $2,89E^{-1}$ | B Retangular | $1,47E^{-3}$ | $1,79E^{-7}$ | |
| $U(FM)_L$ | --- | $1,50E^{-3}$ | B Normal | $1,47E^{-3}$ | $4,84E^{-12}$ | |

De acordo com Tabela 32:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(\Delta p_{ventilador})$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|---|---|-----------------------|
| $U(\rho_{ar})$ | ∞ | $7,80E^{-9}$ | | | |
| $U(\dot{V})$ | ∞ | $1,46E^{-5}$ | | | |
| $U(f)$ | ∞ | $1,88E^{-14}$ | | | |
| $E_{formula f}$ | 50 | $5,31E^{-10}$ | | | |
| $U(p_1)$ | ∞ | $1,85E^0$ | | | |
| $\overline{D_1}$ | 2 | $5,64E^{-7}$ | | | |
| $r_{paq_{D_1}}$ | ∞ | $1,92E^{-10}$ | | | |
| $U(pa q)_{D_1}$ | ∞ | $1,81E^{-11}$ | 2,01 | 1380 | 2,00 |
| $\overline{D_2}$ | 2 | $2,54E^{-3}$ | | | |
| $r_{paq_{D_2}}$ | ∞ | $1,39E^{-10}$ | | | |
| $U(pa q)_{D_2}$ | ∞ | $1,32E^{-11}$ | | | |
| $E_{tabela C_0}$ | 50 | $6,47E^{-8}$ | | | |
| r_{FM_L} | ∞ | $3,22E^{-14}$ | | | |
| $U(FM)_L$ | ∞ | $2,34E^{-23}$ | | | |

A incerteza expandida de $\Delta p_{ventilador}$ será:

$$U(\Delta p_{ventilador}) = \pm 2,00 \times 1,19 = \pm 2,4 Pa$$

7.1.4 POTÊNCIA ELÉTRICA

Dados:

- Potências elétricas, P_e , medidas: 8,89W; 8,89W; 8,91 W; 8,90 W; 8,91 W
- Resolução do equipamento, r_{pot} ; 0,01 W
- Erro máximo declarado pelo fabricante: $E_{max,pot}$: 0,1024 + 2% da leitura

$$\frac{\sum_{i=1}^5 P_{e_i}}{5} = 8,90 W$$

De acordo com tabela 33:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade c_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(P_e)$ |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| $\overline{P_e}$ | 8,90 | $4,00E^{-3}$ | Normal | 1 | $2,00E^{-5}$ | |
| r_{pot} | --- | $3,00E^{-3}$ | B Retangular | 1 | $8,33E^{-6}$ | 0,28 |
| $E_{max,pot}$ | --- | $2,80E^{-1}$ | B Retangular | 1 | $7,86E^{-2}$ | |

De acordo com Tabela 34:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(P_e)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|------------------|----------------------------|--|---|---|-----------------------|
| $\overline{P_e}$ | 4 | $4,00E^{-10}$ | | | |
| r_{pot} | ∞ | $6,94E^{-11}$ | $6E^{-3}$ | 50 | 2,05 |
| $E_{max,pot}$ | 50 | $6,18E^{-3}$ | | | |

A incerteza expandida da potência elétrica será:

$$U(P_e) = \pm 2,05 \times 0,28 = \pm 0,58 W$$

7.1.5 RENDIMENTO

Dados:

- Incerteza expandida da determinação da potência elétrica, $U(P_e)$; $\pm 0,58$ W ($k=2,05$)
- Incerteza expandida para a determinação do caudal, $U(\dot{V})$; $\pm 0,013$ m³/s ($k=2,05$)
- Incerteza expandida para a determinação da pressão estática de elevação do motoventilador, $U(\Delta p_{\text{ventilador}})$; $\pm 2,4$ Pa ($k=2,00$)

$$\eta = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{\text{ventilador}}}{P_e} \times 100 = 27,8 \%$$

De acordo com Tabela 35:

| Quantidade X_i | Valor medido x_i | Incerteza padrão da variável $u(x_i)$ | Tipo de distribuição de probabilidade | Coefficiente de probabilidade C_i | Quadrado da incerteza padrão associado à variável i $u_i^2(y)$ | Incerteza padrão combinada $u(\eta)$ |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| $U(P_e)$ | --- | 0,28 | B Normal | -3,13 | $7,69E^{-1}$ | |
| $U(\dot{V})$ | --- | 0,006 | B Normal | $1,75E^2$ | 1,18 | 2,53 |
| $U(\Delta p_{\text{ventilador}})$ | --- | 1,18 | B Normal | 1,79 | 4,47 | |

De acordo com Tabela 36:

| Quantidade X_i | Graus de liberdade ν_i | Quadrado da contribuição da incerteza da variável i , elevado ao quadrado $u_i^4(y)$ | Incerteza padrão combinada elevado à quarta potência $u^4(\eta)$ | Graus de liberdade efetivos ν_{eff} | Fator de expansão k |
|-----------------------------------|----------------------------|--|--|---|-----------------------|
| $U(P_e)$ | ∞ | 0,59 | | | |
| $U(\dot{V})$ | ∞ | 1,39 | 41,1 | 2969 | 2,00 |
| $U(\Delta p_{\text{ventilador}})$ | ∞ | 19,95 | | | |

A incerteza expandida do rendimento será:

$$U(\eta) = \pm 2,00 \times 2,53 = \pm 5,1 \%$$

7.1.6 RUÍDO

Dados:

- Medições de pressão sonora $L_{eq,A}$: 46,2 dB(A); 46,3 dB(A); 46,2 dB(A)
- Medição do ruído ambiente inicial $L_{eq,A_{amb}}$: 24,3 dB (A)
- Medição do ruído ambiente final $L_{eq,A_{amb}}$: 26,4 dB (A)
- Incerteza padrão relativa ao uso da instrumentação para a caracterização do nível sonoro u_2 : 0,7 dB(A) (Para equipamento classe 1
- Incerteza padrão relativa à posição do microfone, u_3 : 1 dB(A)

$$\overline{L_{eq,A}} = 10 \cdot \log \left(\frac{10^{0,1 \cdot L_{eq,A1}} + 10^{0,1 \cdot L_{eq,A2}} + 10^{0,1 \cdot L_{eq,A3}}}{3} \right) = 46,2 \text{ dB(A)}$$

Os coeficientes de sensibilidade assumem valores unitários.

$$u_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^N (L_{eq,Aj} - \overline{L_{eq,A}})^2}}{\sqrt{n}} = 0,03 \text{ dB(A)}$$

$$u(L_{eqA}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1,22 \text{ dB(A)}$$

A incerteza expandida $U(L_{eqA})$ será:

$$U(L_{eqA}) = \pm 1,65 \times 1,22 = \pm 2,0 \text{ dB(A)}$$

7.2 TABELAS COM OS VALORES MEDIDOS/CALCULADOS DE TODOS OS CONJUNTO

4_A

| | w [rpm] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Pe [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 320 ± 9 | 10.1 ± 2.2 | 461.9 ± 40.8 | 4.22 ± 0.38 | 30.6 ± 7.8 | 44.1 ± 2.0 |
| 2 | 1 320 ± 9 | 10.2 ± 2.2 | 448.2 ± 41.8 | 4.27 ± 0.39 | 29.9 ± 7.5 | 44.2 ± 2.1 |
| 3 | 1 320 ± 9 | 11.2 ± 2.3 | 409.5 ± 40.3 | 4.54 ± 0.40 | 28.2 ± 6.7 | 48.5 ± 2.0 |
| 4 | 1 320 ± 9 | 12.3 ± 2.3 | 364.0 ± 38.4 | 4.79 ± 0.41 | 26.0 ± 5.9 | 49.2 ± 2.0 |
| 5 | 1 320 ± 9 | 13.9 ± 2.3 | 330.1 ± 18.9 | 5.11 ± 0.42 | 24.9 ± 4.8 | 48.8 ± 2.0 |
| 6 | 1 320 ± 9 | 16.7 ± 2.4 | 290.1 ± 19.9 | 5.65 ± 0.44 | 23.7 ± 4.1 | 47.4 ± 2.0 |
| 7 | 1 320 ± 9 | 18.8 ± 2.4 | 255.5 ± 15.8 | 6.07 ± 0.46 | 21.9 ± 3.5 | 46.3 ± 2.0 |
| 8 | 1 320 ± 9 | 21.6 ± 2.5 | 220.7 ± 14.3 | 6.49 ± 0.48 | 20.4 ± 3.0 | 45.7 ± 2.0 |
| 9 | 1 320 ± 9 | 24.6 ± 2.5 | 205.0 ± 14.0 | 7.02 ± 0.50 | 20.0 ± 2.8 | 44.9 ± 2.0 |
| 10 | 1 320 ± 9 | 26.6 ± 2.6 | 181.3 ± 13.5 | 7.22 ± 0.52 | 18.5 ± 2.6 | 45.3 ± 2.0 |
| 11 | 1 307 ± 33 | 30.0 ± 2.7 | 150.2 ± 12.3 | 7.61 ± 0.54 | 16.4 ± 2.3 | 45.8 ± 2.0 |
| 12 | 1 307 ± 33 | 31.7 ± 2.7 | 127.6 ± 11.6 | 7.63 ± 0.63 | 14.8 ± 2.2 | 46.6 ± 2.0 |
| 13 | 1 307 ± 33 | 31.9 ± 2.8 | 102.2 ± 11.3 | 7.87 ± 0.54 | 11.5 ± 1.8 | 47.6 ± 2.0 |
| 14 | 1 307 ± 33 | 32.5 ± 2.7 | 60.3 ± 9.7 | 8.19 ± 0.56 | 6.7 ± 1.3 | 47.3 ± 2.0 |

4_B

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 284 ± 44 | 16.4 ± 2.4 | 573.3 ± 45.8 | 7.68 ± 0.53 | 32.3 ± 5.9 | 46.2 ± 2.0 |
| 2 | 1 284 ± 44 | 16.7 ± 2.4 | 543.8 ± 45.5 | 7.73 ± 0.53 | 31.3 ± 5.7 | 46.8 ± 2.0 |
| 3 | 1 284 ± 44 | 18.3 ± 2.4 | 509.6 ± 43.9 | 7.91 ± 0.54 | 31.6 ± 5.5 | 49.1 ± 2.0 |
| 4 | 1 260 ± 9 | 20.1 ± 2.4 | 459.6 ± 42.1 | 8.15 ± 0.55 | 30.8 ± 5.1 | 50.9 ± 2.0 |
| 5 | 1 260 ± 9 | 22.4 ± 2.5 | 389.1 ± 43.0 | 8.97 ± 0.58 | 26.6 ± 4.5 | 51.0 ± 2.0 |
| 6 | 1 260 ± 9 | 25.0 ± 2.5 | 336.3 ± 18.7 | 9.60 ± 0.61 | 24.0 ± 3.2 | 50.3 ± 2.0 |
| 7 | 1 260 ± 9 | 26.0 ± 2.5 | 294.2 ± 16.8 | 9.60 ± 0.61 | 22.0 ± 2.8 | 48.8 ± 2.0 |
| 8 | 1 260 ± 9 | 27.1 ± 2.6 | 253.9 ± 15.6 | 9.43 ± 0.60 | 20.2 ± 2.6 | 47.3 ± 2.0 |
| 9 | 1 236 ± 44 | 28.6 ± 2.6 | 208.9 ± 14.3 | 9.37 ± 0.60 | 17.7 ± 2.3 | 47.8 ± 2.0 |
| 10 | 1 164 ± 44 | 29.7 ± 2.6 | 176.1 ± 13.0 | 9.23 ± 0.59 | 15.7 ± 2.0 | 47.9 ± 2.0 |
| 11 | 1 164 ± 44 | 31.0 ± 2.7 | 147.7 ± 12.3 | 9.18 ± 0.59 | 13.8 ± 1.9 | 48.5 ± 2.0 |
| 12 | 1 164 ± 44 | 32.7 ± 2.7 | 114.7 ± 11.6 | 9.15 ± 0.59 | 11.4 ± 1.6 | 49.5 ± 2.0 |
| 13 | 1 164 ± 44 | 32.2 ± 2.7 | 66.2 ± 10.0 | 9.09 ± 0.58 | 6.5 ± 1.2 | 51.4 ± 2.0 |

4_C

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 296 ± 44 | 15.8 ± 2.4 | 557.4 ± 43.7 | 6.83 ± 0.49 | 34.2 ± 6.4 | 46.8 ± 2.0 |
| 2 | 1 296 ± 44 | 16.5 ± 2.4 | 543.8 ± 48.8 | 6.93 ± 0.50 | 34.4 ± 6.4 | 47.3 ± 2.0 |
| 3 | 1 296 ± 44 | 18.3 ± 2.4 | 507.4 ± 46.7 | 6.98 ± 0.50 | 35.6 ± 6.3 | 48.6 ± 2.0 |
| 4 | 1 296 ± 44 | 19.7 ± 2.4 | 455.0 ± 42.2 | 7.12 ± 0.51 | 34.2 ± 5.8 | 49.9 ± 2.0 |
| 5 | 1 296 ± 44 | 20.9 ± 2.4 | 380.0 ± 39.3 | 7.44 ± 0.52 | 29.2 ± 5.0 | 50.8 ± 2.0 |
| 6 | 1 296 ± 44 | 23.9 ± 2.5 | 326.3 ± 21.8 | 8.06 ± 0.54 | 26.6 ± 3.7 | 49.9 ± 2.0 |
| 7 | 1 296 ± 44 | 26.8 ± 2.5 | 293.7 ± 23.4 | 8.66 ± 0.57 | 25.0 ± 3.4 | 49.0 ± 2.0 |
| 8 | 1 296 ± 44 | 29.2 ± 2.6 | 251.4 ± 16.4 | 9.10 ± 0.59 | 22.3 ± 2.8 | 48.8 ± 2.0 |
| 9 | 1 296 ± 44 | 32.3 ± 2.7 | 213.4 ± 14.9 | 9.61 ± 0.61 | 19.9 ± 2.5 | 48.8 ± 2.0 |
| 10 | 1 296 ± 44 | 34.3 ± 2.7 | 189.1 ± 13.6 | 9.70 ± 0.61 | 18.5 ± 2.3 | 48.5 ± 2.0 |
| 11 | 1 296 ± 44 | 35.3 ± 2.7 | 159.5 ± 12.6 | 9.68 ± 0.61 | 16.1 ± 2.0 | 48.7 ± 2.0 |
| 12 | 1 296 ± 44 | 37.3 ± 2.8 | 129.5 ± 11.9 | 9.63 ± 0.61 | 13.9 ± 1.8 | 49.2 ± 2.0 |
| 13 | 1 296 ± 44 | 37.1 ± 2.8 | 75.1 ± 10.4 | 9.64 ± 0.61 | 8.0 ± 1.3 | 50.3 ± 2.0 |

4_D

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 319 ± 9 | 14.8 ± 2.5 | 534.7 ± 43.1 | 7.64 ± 0.52 | 27.5 ± 5.6 | 47.4 ± 2.0 |
| 2 | 1 319 ± 9 | 15.1 ± 2.3 | 518.7 ± 47.0 | 7.64 ± 0.53 | 27.3 ± 5.3 | 47.9 ± 2.0 |
| 3 | 1 319 ± 9 | 16.7 ± 2.4 | 493.7 ± 41.7 | 7.48 ± 0.52 | 29.5 ± 5.4 | 48.9 ± 2.0 |
| 4 | 1 319 ± 9 | 18.5 ± 2.4 | 436.8 ± 42.2 | 7.66 ± 0.53 | 28.5 ± 5.0 | 50.1 ± 2.0 |
| 5 | 1 319 ± 9 | 19.7 ± 2.4 | 368.6 ± 39.0 | 7.81 ± 0.53 | 25.4 ± 4.4 | 50.8 ± 2.0 |
| 6 | 1 319 ± 9 | 22.6 ± 2.5 | 319.7 ± 18.8 | 8.55 ± 0.57 | 23.2 ± 3.3 | 49.3 ± 2.0 |
| 7 | 1 319 ± 9 | 25.2 ± 2.5 | 291.4 ± 17.4 | 9.08 ± 0.59 | 22.3 ± 3.0 | 48.6 ± 2.0 |
| 8 | 1 319 ± 9 | 27.5 ± 2.6 | 246.9 ± 16.3 | 9.32 ± 0.60 | 20.1 ± 2.6 | 48.3 ± 2.0 |
| 9 | 1 319 ± 9 | 30.4 ± 2.6 | 216.1 ± 14.3 | 9.66 ± 0.61 | 18.8 ± 2.3 | 47.9 ± 2.0 |
| 10 | 1 319 ± 9 | 31.3 ± 2.6 | 180.4 ± 13.2 | 9.64 ± 0.61 | 16.2 ± 2.1 | 47.8 ± 2.0 |
| 11 | 1 319 ± 9 | 33.2 ± 2.7 | 151.1 ± 12.5 | 9.61 ± 0.61 | 14.5 ± 1.9 | 48.1 ± 2.0 |
| 12 | 1 319 ± 9 | 34.5 ± 2.7 | 119.2 ± 11.4 | 9.60 ± 0.60 | 11.9 ± 1.6 | 48.5 ± 2.0 |
| 13 | 1 319 ± 9 | 33.5 ± 2.7 | 64.8 ± 9.8 | 9.61 ± 0.61 | 6.3 ± 1.1 | 49.4 ± 2.0 |

4_E

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 308 ± 34 | 12.0 ± 2.3 | 484.6 ± 40.8 | 5.45 ± 0.43 | 28.2 ± 6.4 | 46.8 ± 2.0 |
| 2 | 1 308 ± 34 | 11.8 ± 2.3 | 475.5 ± 41.1 | 5.58 ± 0.44 | 26.7 ± 6.2 | 47.7 ± 2.0 |
| 3 | 1 308 ± 34 | 12.3 ± 2.3 | 427.7 ± 39.2 | 5.63 ± 0.44 | 25.0 ± 5.6 | 49.2 ± 2.0 |
| 4 | 1 308 ± 34 | 12.8 ± 2.3 | 375.4 ± 39.4 | 5.66 ± 0.44 | 23.0 ± 5.2 | 48.8 ± 2.0 |
| 5 | 1 308 ± 34 | 15.4 ± 2.3 | 317.6 ± 20.1 | 6.24 ± 0.47 | 21.5 ± 3.9 | 47.1 ± 2.0 |
| 6 | 1 308 ± 34 | 17.0 ± 2.3 | 286.9 ± 16.8 | 6.62 ± 0.48 | 20.2 ± 3.4 | 46.8 ± 2.0 |
| 7 | 1 296 ± 44 | 19.5 ± 2.4 | 244.8 ± 16.6 | 6.95 ± 0.50 | 18.9 ± 3.0 | 46.9 ± 2.0 |
| 8 | 1 308 ± 34 | 21.9 ± 2.5 | 219.3 ± 14.6 | 7.40 ± 0.52 | 18.0 ± 2.7 | 46.7 ± 2.0 |
| 9 | 1 308 ± 34 | 23.8 ± 2.5 | 195.0 ± 13.7 | 7.70 ± 0.54 | 16.7 ± 2.4 | 47.2 ± 2.0 |
| 10 | 1 308 ± 34 | 25.5 ± 2.5 | 171.8 ± 13.1 | 7.89 ± 0.54 | 15.4 ± 2.2 | 47.7 ± 2.0 |
| 11 | 1 308 ± 34 | 28.8 ± 2.6 | 146.1 ± 12.1 | 8.18 ± 0.55 | 14.2 ± 2.0 | 48.6 ± 2.0 |
| 12 | 1 308 ± 34 | 29.3 ± 2.7 | 120.6 ± 11.5 | 8.41 ± 0.57 | 11.7 ± 1.7 | 48.9 ± 2.0 |
| 13 | 1 296 ± 44 | 29.9 ± 2.6 | 70.5 ± 10.0 | 8.58 ± 0.56 | 6.8 ± 1.2 | 50.5 ± 2.0 |
| 14 | #DIV/0! | #DIV/0! | 0.0 ± 0.0 | #DIV/0! | #DIV/0! | #DIV/0! |

4_F

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 296 ± 44 | 16.3 ± 2.4 | 573.3 ± 45.8 | 8.90 ± 0.58 | 27.8 ± 5.1 | 46.2 ± 2.0 |
| 2 | 1 296 ± 44 | 17.2 ± 2.4 | 557.4 ± 45.6 | 9.00 ± 0.58 | 28.3 ± 5.0 | 46.9 ± 2.0 |
| 3 | 1 296 ± 44 | 18.2 ± 2.4 | 509.6 ± 47.3 | 8.65 ± 0.57 | 28.7 ± 5.1 | 48.0 ± 2.0 |
| 4 | 1 296 ± 44 | 19.6 ± 2.4 | 459.6 ± 42.8 | 8.58 ± 0.56 | 28.4 ± 4.8 | 50.4 ± 2.0 |
| 5 | 1 296 ± 44 | 21.9 ± 2.5 | 414.1 ± 41.6 | 8.94 ± 0.58 | 27.7 ± 4.5 | 51.6 ± 2.0 |
| 6 | 1 284 ± 44 | 25.0 ± 2.5 | 350.8 ± 22.9 | 9.67 ± 0.61 | 24.9 ± 3.3 | 51.1 ± 2.0 |
| 7 | 1 260 ± 9 | 27.1 ± 2.5 | 309.6 ± 19.1 | 9.52 ± 0.60 | 24.3 ± 3.1 | 48.9 ± 2.0 |
| 8 | 1 260 ± 9 | 29.1 ± 2.6 | 248.7 ± 15.4 | 9.31 ± 0.59 | 21.5 ± 2.7 | 46.9 ± 2.0 |
| 9 | 1 260 ± 9 | 30.4 ± 2.6 | 221.1 ± 15.1 | 9.25 ± 0.59 | 20.1 ± 2.5 | 47.2 ± 2.0 |
| 10 | 1 260 ± 9 | 31.3 ± 2.6 | 196.3 ± 13.8 | 9.23 ± 0.59 | 18.5 ± 2.3 | 47.7 ± 2.0 |
| 11 | 1 260 ± 9 | 33.6 ± 2.7 | 164.7 ± 12.6 | 9.18 ± 0.59 | 16.7 ± 2.1 | 48.2 ± 2.0 |
| 12 | 1 260 ± 9 | 35.6 ± 2.7 | 134.2 ± 11.8 | 9.19 ± 0.59 | 14.4 ± 1.9 | 48.9 ± 2.0 |
| 13 | 1 176 ± 44 | 35.4 ± 2.7 | 70.5 ± 10.0 | 9.14 ± 0.59 | 7.6 ± 1.3 | 49.6 ± 2.0 |

3_A

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 476 ± 44 | 12.9 ± 2.3 | 491.4 ± 44.1 | 6.87 ± 0.52 | 25.7 ± 5.4 | 49.6 ± 2.0 |
| 2 | 1 476 ± 44 | 14.0 ± 2.3 | 448.2 ± 42.5 | 7.26 ± 0.55 | 24.0 ± 4.9 | 52.3 ± 2.0 |
| 3 | 1 476 ± 44 | 15.3 ± 2.3 | 400.4 ± 40.3 | 7.41 ± 0.53 | 23.0 ± 4.5 | 52.6 ± 2.0 |
| 4 | 1 476 ± 44 | 17.9 ± 2.4 | 343.1 ± 20.1 | 8.03 ± 0.55 | 21.2 ± 3.4 | 52.1 ± 2.0 |
| 5 | 1 476 ± 44 | 20.7 ± 2.4 | 309.9 ± 20.2 | 8.57 ± 0.58 | 20.8 ± 3.1 | 50.6 ± 2.0 |
| 6 | 1 476 ± 44 | 23.3 ± 2.5 | 278.7 ± 18.1 | 9.09 ± 0.61 | 19.9 ± 2.8 | 49.5 ± 2.1 |
| 7 | 1 476 ± 44 | 26.6 ± 2.6 | 234.8 ± 16.5 | 9.35 ± 0.66 | 18.6 ± 2.5 | 49.3 ± 2.0 |
| 8 | 1 476 ± 44 | 30.2 ± 2.6 | 203.6 ± 13.9 | 10.15 ± 0.66 | 16.8 ± 2.1 | 48.7 ± 2.0 |
| 9 | 1 476 ± 44 | 32.9 ± 2.7 | 177.5 ± 14.4 | 10.47 ± 0.69 | 15.5 ± 2.0 | 49.0 ± 2.1 |
| 10 | 1 476 ± 44 | 37.0 ± 2.8 | 153.8 ± 12.7 | 10.64 ± 0.68 | 14.9 ± 1.9 | 49.2 ± 2.0 |
| 11 | 1 476 ± 44 | 38.2 ± 2.8 | 129.9 ± 11.6 | 10.54 ± 0.66 | 13.1 ± 1.7 | 49.9 ± 2.0 |
| 12 | 1 476 ± 44 | 38.3 ± 2.8 | 101.5 ± 10.8 | 11.02 ± 0.68 | 9.8 ± 1.4 | 50.6 ± 2.0 |
| 13 | 1 476 ± 44 | 38.7 ± 2.8 | 61.7 ± 10.7 | 11.11 ± 0.68 | 6.0 ± 1.2 | 51.8 ± 2.0 |

3_B

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 464 ± 44 | 21.0 ± 2.5 | 648.4 ± 45.8 | 10.90 ± 0.69 | 33.0 ± 5.1 | 50.9 ± 2.1 |
| 2 | 1 464 ± 44 | 21.8 ± 2.5 | 623.4 ± 50.2 | 10.84 ± 0.67 | 33.3 ± 5.2 | 51.2 ± 2.0 |
| 3 | 1 464 ± 44 | 24.2 ± 2.5 | 577.9 ± 50.3 | 10.93 ± 0.70 | 34.3 ± 5.2 | 53.0 ± 2.1 |
| 4 | 1 476 ± 44 | 25.6 ± 2.6 | 502.8 ± 44.4 | 11.57 ± 0.71 | 30.2 ± 4.4 | 54.0 ± 2.0 |
| 5 | 1 476 ± 44 | 27.2 ± 2.6 | 425.5 ± 41.9 | 12.09 ± 0.74 | 26.2 ± 3.9 | 53.7 ± 2.0 |
| 6 | 1 476 ± 44 | 30.4 ± 2.7 | 364.0 ± 40.6 | 12.71 ± 0.76 | 23.9 ± 3.6 | 53.2 ± 2.0 |
| 7 | 1 476 ± 44 | 33.2 ± 2.7 | 308.3 ± 19.5 | 13.43 ± 0.78 | 21.0 ± 2.5 | 53.6 ± 2.0 |
| 8 | 1 452 ± 34 | 35.4 ± 2.8 | 263.9 ± 16.5 | 13.66 ± 0.79 | 18.9 ± 2.2 | 53.8 ± 2.0 |
| 9 | 1 440 ± 10 | 38.0 ± 2.9 | 226.6 ± 15.2 | 14.10 ± 0.79 | 16.9 ± 1.9 | 52.2 ± 2.0 |
| 10 | 1 440 ± 10 | 39.8 ± 2.8 | 196.8 ± 14.5 | 14.18 ± 0.82 | 15.3 ± 1.8 | 52.4 ± 2.0 |
| 11 | 1 416 ± 44 | 44.2 ± 3.0 | 165.2 ± 12.9 | 14.23 ± 0.82 | 14.2 ± 1.7 | 53.0 ± 2.0 |
| 12 | 1 416 ± 44 | 45.0 ± 3.0 | 136.5 ± 11.9 | 14.45 ± 0.82 | 11.8 ± 1.4 | 53.4 ± 2.0 |
| 13 | 1 416 ± 44 | 45.0 ± 3.1 | 91.0 ± 11.1 | 14.41 ± 0.83 | 7.9 ± 1.2 | 54.2 ± 2.0 |
| 14 | 1 416 ± 44 | 44.0 ± 2.9 | 53.1 ± 9.5 | 14.48 ± 0.83 | 4.4 ± 0.9 | 53.1 ± 2.0 |

3_C

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 476 ± 44 | 19.8 ± 2.5 | 630.2 ± 45.6 | 9.69 ± 0.62 | 34.0 ± 5.5 | 53.9 ± 2.1 |
| 2 | 1 464 ± 44 | 21.0 ± 2.5 | 607.5 ± 51.2 | 9.81 ± 0.62 | 34.6 ± 5.6 | 53.9 ± 2.0 |
| 3 | 1 476 ± 44 | 23.0 ± 2.5 | 571.1 ± 49.5 | 10.01 ± 0.63 | 35.2 ± 5.4 | 53.9 ± 2.1 |
| 4 | 1 476 ± 44 | 23.6 ± 2.5 | 498.3 ± 45.0 | 10.11 ± 0.67 | 31.5 ± 4.9 | 53.9 ± 2.0 |
| 5 | 1 476 ± 44 | 24.2 ± 2.5 | 411.8 ± 45.0 | 10.39 ± 0.67 | 26.2 ± 4.3 | 53.9 ± 2.0 |
| 6 | 1 476 ± 44 | 27.2 ± 2.6 | 368.6 ± 41.9 | 10.86 ± 0.69 | 25.3 ± 4.0 | 53.9 ± 2.0 |
| 7 | 1 476 ± 44 | 31.2 ± 2.7 | 320.3 ± 21.7 | 11.48 ± 0.70 | 24.0 ± 3.0 | 53.9 ± 2.0 |
| 8 | 1 464 ± 44 | 35.0 ± 2.8 | 271.7 ± 17.1 | 11.86 ± 0.72 | 22.2 ± 2.6 | 53.9 ± 2.1 |
| 9 | 1 464 ± 44 | 36.8 ± 2.8 | 239.1 ± 15.5 | 12.42 ± 0.74 | 19.6 ± 2.3 | 53.9 ± 2.0 |
| 10 | 1 464 ± 44 | 40.8 ± 2.9 | 214.8 ± 14.9 | 12.84 ± 0.75 | 18.9 ± 2.2 | 53.9 ± 2.1 |
| 11 | 1 464 ± 44 | 44.2 ± 3.2 | 165.9 ± 12.9 | 12.81 ± 0.78 | 15.9 ± 1.9 | 53.9 ± 2.0 |
| 12 | 1 476 ± 44 | 46.0 ± 3.5 | 137.4 ± 12.1 | 13.02 ± 0.81 | 13.5 ± 1.7 | 53.9 ± 2.0 |
| 13 | 1 476 ± 44 | 44.4 ± 3.1 | 64.6 ± 9.9 | 13.05 ± 0.80 | 6.1 ± 1.1 | 53.9 ± 2.0 |

3_D

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 476 ± 44 | 18.8 ± 2.4 | 614.3 ± 49.7 | 10.79 ± 0.66 | 28.2 ± 4.7 | 51.6 ± 2.2 |
| 2 | 1 476 ± 44 | 19.5 ± 2.4 | 600.6 ± 47.7 | 10.69 ± 0.69 | 29.1 ± 4.8 | 51.9 ± 2.0 |
| 3 | 1 476 ± 44 | 21.9 ± 2.5 | 534.7 ± 48.3 | 10.61 ± 0.68 | 29.8 ± 4.7 | 52.5 ± 2.0 |
| 4 | 1 476 ± 44 | 22.3 ± 2.5 | 466.4 ± 46.7 | 10.69 ± 0.66 | 26.5 ± 4.3 | 53.3 ± 2.0 |
| 5 | 1 476 ± 44 | 23.2 ± 2.5 | 389.1 ± 40.1 | 10.79 ± 0.68 | 22.9 ± 3.7 | 53.7 ± 2.0 |
| 6 | 1 476 ± 44 | 26.8 ± 2.6 | 333.1 ± 19.1 | 11.59 ± 0.71 | 21.2 ± 2.7 | 53.3 ± 2.1 |
| 7 | 1 476 ± 44 | 30.1 ± 2.7 | 287.1 ± 17.2 | 12.15 ± 0.75 | 19.6 ± 2.4 | 52.8 ± 2.0 |
| 8 | 1 476 ± 44 | 32.5 ± 2.7 | 257.3 ± 15.6 | 12.29 ± 0.73 | 18.8 ± 2.2 | 52.7 ± 2.0 |
| 9 | 1 476 ± 44 | 35.9 ± 2.7 | 232.3 ± 14.9 | 12.92 ± 0.79 | 17.9 ± 2.1 | 52.6 ± 2.0 |
| 10 | 1 464 ± 44 | 38.2 ± 2.8 | 193.4 ± 14.5 | 13.01 ± 0.75 | 15.7 ± 1.9 | 52.7 ± 2.0 |
| 11 | 1 464 ± 44 | 42.3 ± 2.9 | 165.9 ± 12.9 | 13.20 ± 0.77 | 14.7 ± 1.7 | 52.7 ± 2.0 |
| 12 | 1 476 ± 44 | 42.6 ± 2.9 | 133.6 ± 11.8 | 13.19 ± 0.76 | 12.0 ± 1.5 | 53.2 ± 2.0 |
| 13 | 1 476 ± 44 | 40.9 ± 3.0 | 78.7 ± 10.5 | 13.00 ± 0.75 | 6.9 ± 1.1 | 54.0 ± 2.0 |

3_E

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 476 ± 44 | 14.0 ± 2.3 | 484.6 ± 40.8 | 8.45 ± 0.58 | 21.9 ± 4.5 | 54.6 ± 2.1 |
| 2 | 1 476 ± 44 | 14.2 ± 2.3 | 475.5 ± 41.1 | 8.46 ± 0.57 | 20.3 ± 4.1 | 54.6 ± 2.0 |
| 3 | 1 476 ± 44 | 15.4 ± 2.3 | 427.7 ± 39.2 | 8.59 ± 0.58 | 18.8 ± 3.8 | 54.0 ± 2.0 |
| 4 | 1 476 ± 44 | 17.8 ± 2.4 | 375.4 ± 39.4 | 9.12 ± 0.61 | 18.5 ± 3.0 | 52.9 ± 2.0 |
| 5 | 1 476 ± 44 | 20.1 ± 2.5 | 317.6 ± 20.1 | 9.55 ± 0.63 | 17.8 ± 2.7 | 52.2 ± 2.0 |
| 6 | 1 476 ± 44 | 22.0 ± 2.5 | 286.9 ± 16.8 | 9.85 ± 0.64 | 16.9 ± 2.4 | 51.9 ± 2.0 |
| 7 | 1 476 ± 44 | 25.5 ± 2.5 | 244.8 ± 16.6 | 10.32 ± 0.66 | 17.0 ± 2.3 | 51.6 ± 2.0 |
| 8 | 1 476 ± 44 | 27.2 ± 2.6 | 219.3 ± 14.6 | 10.72 ± 0.65 | 14.9 ± 2.0 | 51.8 ± 2.0 |
| 9 | 1 476 ± 44 | 29.8 ± 2.6 | 195.0 ± 13.7 | 10.84 ± 0.67 | 13.8 ± 1.8 | 52.0 ± 2.0 |
| 10 | 1 476 ± 44 | 33.2 ± 2.7 | 171.8 ± 13.1 | 10.98 ± 0.69 | 13.0 ± 1.7 | 52.4 ± 2.0 |
| 11 | 1 476 ± 44 | 34.8 ± 2.8 | 146.1 ± 12.1 | 11.08 ± 0.70 | 11.2 ± 1.5 | 52.8 ± 2.0 |
| 12 | 1 476 ± 44 | 34.2 ± 2.9 | 120.6 ± 11.5 | 11.21 ± 0.71 | 9.4 ± 1.4 | 53.0 ± 2.0 |
| 13 | 1 476 ± 44 | 34.4 ± 2.9 | 70.5 ± 10.0 | 11.42 ± 0.72 | 6.6 ± 1.1 | 53.0 ± 2.0 |

3_F

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 476 ± 44 | 22.2 ± 2.5 | 668.9 ± 48.4 | 12.25 ± 0.73 | 32.0 ± 4.8 | 52.1 ± 2.0 |
| 2 | 1 476 ± 44 | 22.6 ± 2.5 | 643.9 ± 50.2 | 12.13 ± 0.75 | 31.9 ± 4.8 | 51.8 ± 2.0 |
| 3 | 1 476 ± 44 | 24.5 ± 2.5 | 577.9 ± 45.2 | 12.00 ± 0.73 | 31.6 ± 4.6 | 52.8 ± 2.0 |
| 4 | 1 476 ± 44 | 26.7 ± 2.6 | 527.8 ± 46.6 | 12.09 ± 0.71 | 31.6 ± 4.5 | 53.6 ± 2.0 |
| 5 | 1 476 ± 44 | 28.4 ± 2.6 | 457.3 ± 46.8 | 12.57 ± 0.78 | 28.2 ± 4.2 | 54.5 ± 2.0 |
| 6 | 1 476 ± 44 | 30.6 ± 2.6 | 402.7 ± 39.9 | 12.84 ± 0.77 | 26.4 ± 3.8 | 54.4 ± 2.0 |
| 7 | 1 476 ± 44 | 35.4 ± 2.7 | 344.0 ± 19.9 | 13.72 ± 0.81 | 24.5 ± 2.7 | 53.6 ± 2.0 |
| 8 | 1 476 ± 44 | 39.5 ± 2.8 | 291.4 ± 17.0 | 14.29 ± 0.81 | 22.2 ± 2.4 | 52.9 ± 2.0 |
| 9 | 1 476 ± 44 | 42.0 ± 2.9 | 240.3 ± 15.9 | 14.32 ± 0.80 | 19.5 ± 2.1 | 53.3 ± 2.0 |
| 10 | 1 440 ± 10 | 44.9 ± 2.9 | 211.1 ± 14.2 | 14.56 ± 0.81 | 18.0 ± 1.9 | 53.5 ± 2.0 |
| 11 | 1 440 ± 10 | 47.3 ± 3.0 | 177.7 ± 13.2 | 15.42 ± 1.44 | 15.1 ± 2.0 | 54.1 ± 2.0 |
| 12 | 1 440 ± 10 | 50.1 ± 3.0 | 142.7 ± 12.2 | 14.53 ± 0.82 | 13.7 ± 1.6 | 55.0 ± 2.0 |
| 13 | 1 440 ± 10 | 49.0 ± 3.0 | 89.2 ± 11.0 | 14.60 ± 0.82 | 8.3 ± 1.2 | 55.5 ± 2.0 |

1_A

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 384 ± 13 | 11.9 ± 2.3 | 471.0 ± 42.4 | 30.58 ± 1.47 | 5.1 ± 1.1 | 47.3 ± 2.1 |
| 2 | 1 384 ± 13 | 12.6 ± 2.3 | 430.0 ± 42.5 | 30.62 ± 1.47 | 4.9 ± 1.0 | 50.4 ± 2.0 |
| 3 | 1 384 ± 13 | 14.0 ± 2.3 | 375.4 ± 42.4 | 30.74 ± 1.47 | 4.7 ± 1.0 | 50.7 ± 2.0 |
| 4 | 1 384 ± 13 | 15.9 ± 2.3 | 331.5 ± 23.5 | 30.86 ± 1.48 | 4.7 ± 0.8 | 49.9 ± 2.0 |
| 5 | 1 356 ± 44 | 17.8 ± 2.4 | 292.8 ± 18.4 | 31.22 ± 1.49 | 4.7 ± 0.7 | 48.3 ± 2.0 |
| 6 | 1 356 ± 44 | 20.0 ± 2.4 | 250.5 ± 15.8 | 31.34 ± 1.50 | 4.4 ± 0.6 | 47.0 ± 2.0 |
| 7 | 1 356 ± 44 | 22.3 ± 2.5 | 224.8 ± 14.9 | 31.56 ± 1.51 | 4.4 ± 0.6 | 46.6 ± 2.0 |
| 8 | 1 356 ± 44 | 25.3 ± 2.5 | 199.5 ± 13.9 | 31.86 ± 1.52 | 4.4 ± 0.6 | 45.4 ± 2.0 |
| 9 | 1 319 ± 9 | 27.0 ± 2.6 | 165.9 ± 13.5 | 31.88 ± 1.52 | 3.9 ± 0.5 | 45.5 ± 2.0 |
| 10 | 1 319 ± 9 | 29.4 ± 2.6 | 148.1 ± 12.2 | 32.04 ± 1.53 | 3.8 ± 0.5 | 45.9 ± 2.0 |
| 11 | 1 319 ± 9 | 31.2 ± 2.7 | 120.1 ± 11.5 | 32.20 ± 1.53 | 3.2 ± 0.4 | 46.7 ± 2.0 |
| 12 | 1 319 ± 9 | 31.4 ± 2.7 | 100.8 ± 10.8 | 32.32 ± 1.54 | 2.7 ± 0.4 | 47.2 ± 2.0 |
| 13 | 1 319 ± 9 | 31.7 ± 2.7 | 48.7 ± 9.5 | 32.56 ± 1.55 | 1.3 ± 0.3 | 49.2 ± 2.0 |

1_C

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 356 ± 44 | 16.6 ± 2.4 | 584.7 ± 46.1 | 32.12 ± 1.53 | 8.4 ± 1.4 | 46.9 ± 2.0 |
| 2 | 1 356 ± 44 | 17.1 ± 2.4 | 573.3 ± 53.0 | 32.22 ± 1.53 | 8.5 ± 1.5 | 47.1 ± 2.0 |
| 3 | 1 356 ± 44 | 19.1 ± 2.4 | 527.8 ± 43.9 | 32.28 ± 1.53 | 8.7 ± 1.4 | 48.4 ± 2.0 |
| 4 | 1 356 ± 44 | 20.0 ± 2.4 | 452.8 ± 42.4 | 32.40 ± 1.54 | 7.8 ± 1.2 | 49.4 ± 2.0 |
| 5 | 1 356 ± 44 | 20.6 ± 2.4 | 382.2 ± 45.2 | 32.38 ± 1.54 | 6.8 ± 1.2 | 50.3 ± 2.0 |
| 6 | 1 344 ± 44 | 23.0 ± 2.5 | 327.9 ± 19.2 | 32.84 ± 1.56 | 6.4 ± 0.8 | 49.0 ± 2.0 |
| 7 | 1 320 ± 9 | 25.9 ± 2.6 | 289.6 ± 17.4 | 33.10 ± 1.57 | 6.3 ± 0.8 | 47.7 ± 2.0 |
| 8 | 1 320 ± 9 | 28.3 ± 2.6 | 246.2 ± 15.3 | 33.24 ± 1.57 | 5.8 ± 0.7 | 47.0 ± 2.0 |
| 9 | 1 320 ± 9 | 29.8 ± 2.6 | 214.5 ± 14.3 | 33.40 ± 1.58 | 5.3 ± 0.6 | 47.1 ± 2.1 |
| 10 | 1 308 ± 34 | 32.7 ± 2.7 | 173.6 ± 13.0 | 33.62 ± 1.59 | 4.7 ± 0.6 | 47.2 ± 2.0 |
| 11 | 1 296 ± 44 | 35.8 ± 2.8 | 141.3 ± 12.2 | 33.04 ± 1.57 | 4.3 ± 0.5 | 47.8 ± 2.0 |
| 12 | 1 296 ± 44 | 35.7 ± 2.7 | 86.0 ± 10.6 | 33.28 ± 1.58 | 2.6 ± 0.4 | 49.3 ± 2.0 |

1_D

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 356 ± 44 | 16.5 ± 2.4 | 564.2 ± 45.6 | 32.42 ± 1.54 | 7.6 ± 1.3 | 48.0 ± 2.0 |
| 2 | 1 351 ± 40 | 16.8 ± 2.4 | 548.3 ± 48.3 | 32.28 ± 1.55 | 7.6 ± 1.4 | 47.9 ± 2.0 |
| 3 | 1 332 ± 34 | 18.7 ± 2.4 | 500.5 ± 46.1 | 31.80 ± 1.52 | 7.9 ± 1.3 | 49.2 ± 2.0 |
| 4 | 1 332 ± 34 | 19.2 ± 2.4 | 423.2 ± 41.7 | 32.30 ± 1.54 | 6.8 ± 1.1 | 50.1 ± 2.0 |
| 5 | 1 344 ± 44 | 20.1 ± 2.4 | 357.2 ± 39.4 | 32.40 ± 1.54 | 6.1 ± 1.0 | 50.0 ± 2.0 |
| 6 | 1 320 ± 9 | 21.7 ± 2.5 | 313.5 ± 19.3 | 32.66 ± 1.56 | 5.7 ± 0.8 | 48.8 ± 2.0 |
| 7 | 1 320 ± 9 | 24.0 ± 2.5 | 274.6 ± 17.7 | 32.86 ± 1.58 | 5.5 ± 0.7 | 47.4 ± 2.0 |
| 8 | 1 320 ± 9 | 26.4 ± 2.6 | 235.3 ± 15.5 | 32.62 ± 1.55 | 5.3 ± 0.7 | 47.2 ± 2.0 |
| 9 | 1 308 ± 34 | 29.5 ± 2.7 | 197.3 ± 13.8 | 32.88 ± 1.57 | 4.9 ± 0.6 | 46.6 ± 2.0 |
| 10 | 1 296 ± 44 | 30.7 ± 2.6 | 169.5 ± 13.2 | 32.90 ± 1.56 | 4.4 ± 0.5 | 46.7 ± 2.0 |
| 11 | 1 296 ± 44 | 33.0 ± 2.7 | 147.7 ± 12.5 | 32.82 ± 1.57 | 4.1 ± 0.5 | 47.0 ± 2.0 |
| 12 | 1 284 ± 44 | 33.4 ± 2.8 | 118.3 ± 11.7 | 33.00 ± 1.57 | 3.3 ± 0.5 | 47.7 ± 2.0 |
| 13 | 1 284 ± 44 | 34.1 ± 2.8 | 98.1 ± 10.8 | 33.06 ± 1.57 | 2.8 ± 0.4 | 48.1 ± 2.0 |
| 14 | 1 284 ± 44 | 32.7 ± 2.8 | 56.7 ± 9.6 | 33.10 ± 1.57 | 1.6 ± 0.3 | 47.0 ± 2.0 |

1_E

| | w [RPM] | Pestatic [Pa] | \dot{V} [m ³ /h] | Peletric [W] | Rendi [%] | Leq A [dB(A)] |
|----|------------|------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 1 380 ± 9 | 12.4 ± 2.3 | 496.0 ± 44.4 | 31.93 ± 1.53 | 5.1 ± 1.1 | 49.0 ± 2.0 |
| 2 | 1 380 ± 9 | 12.6 ± 2.3 | 471.0 ± 42.4 | 31.42 ± 1.50 | 5.0 ± 1.1 | 49.2 ± 2.0 |
| 3 | 1 380 ± 9 | 13.0 ± 2.3 | 425.5 ± 41.2 | 31.36 ± 1.50 | 4.7 ± 1.0 | 49.9 ± 2.0 |
| 4 | 1 380 ± 9 | 14.2 ± 2.3 | 361.8 ± 40.8 | 31.44 ± 1.51 | 4.4 ± 0.9 | 49.5 ± 2.0 |
| 5 | 1 375 ± 14 | 15.8 ± 2.4 | 321.3 ± 27.7 | 31.86 ± 1.52 | 4.4 ± 0.8 | 47.5 ± 2.0 |
| 6 | 1 356 ± 44 | 18.0 ± 2.4 | 272.9 ± 18.1 | 32.10 ± 1.53 | 4.2 ± 0.7 | 47.1 ± 2.0 |
| 7 | 1 322 ± 10 | 19.4 ± 2.4 | 241.6 ± 19.6 | 32.20 ± 1.53 | 4.0 ± 0.6 | 46.6 ± 2.0 |
| 8 | 1 320 ± 9 | 22.6 ± 2.5 | 215.2 ± 16.3 | 32.46 ± 1.54 | 4.1 ± 0.6 | 45.7 ± 2.0 |
| 9 | 1 320 ± 9 | 24.4 ± 2.5 | 181.6 ± 13.7 | 32.50 ± 1.55 | 3.8 ± 0.5 | 46.4 ± 2.0 |
| 10 | 1 320 ± 9 | 27.0 ± 2.6 | 158.1 ± 13.1 | 32.58 ± 1.55 | 3.6 ± 0.5 | 46.5 ± 2.0 |
| 11 | 1 320 ± 9 | 27.6 ± 2.7 | 136.5 ± 12.6 | 32.62 ± 1.55 | 3.2 ± 0.5 | 47.1 ± 2.0 |
| 12 | 1 320 ± 9 | 28.2 ± 3.0 | 103.7 ± 11.4 | 32.72 ± 1.56 | 2.5 ± 0.4 | 47.8 ± 2.0 |
| 13 | 1 320 ± 9 | 28.6 ± 2.8 | 69.8 ± 10.3 | 32.62 ± 1.57 | 1.7 ± 0.3 | 49.2 ± 2.0 |

| 1_F | | | | | | |
|-----|------------|------------|--------------|--------------|-----------|------------|
| | w | Pestatic | \dot{V} | Peletric | Rendi | Leq A |
| | [RPM] | [Pa] | [m3/h] | [W] | [%] | [dB(A)] |
| 1 | 1 320 ± 9 | 16.2 ± 2.4 | 602.9 ± 48.1 | 33.06 ± 1.57 | 7.7 ± 1.4 | 46.1 ± 2.0 |
| 2 | 1 320 ± 9 | 17.9 ± 2.4 | 571.1 ± 52.8 | 33.06 ± 1.57 | 8.2 ± 1.4 | 46.2 ± 2.0 |
| 3 | 1 320 ± 9 | 19.2 ± 2.4 | 509.6 ± 48.0 | 33.10 ± 1.57 | 8.0 ± 1.3 | 48.1 ± 2.0 |
| 4 | 1 320 ± 9 | 21.6 ± 2.5 | 452.8 ± 45.3 | 32.84 ± 1.56 | 8.1 ± 1.3 | 49.8 ± 2.0 |
| 5 | 1 320 ± 9 | 22.9 ± 2.5 | 402.7 ± 42.7 | 33.08 ± 1.57 | 7.6 ± 1.2 | 50.7 ± 2.0 |
| 6 | 1 296 ± 44 | 25.3 ± 2.5 | 349.0 ± 21.3 | 33.12 ± 1.57 | 7.3 ± 0.9 | 50.3 ± 2.0 |
| 7 | 1 296 ± 9 | 28.2 ± 2.6 | 299.0 ± 18.2 | 33.74 ± 1.60 | 6.9 ± 0.8 | 49.0 ± 2.0 |
| 8 | 1 260 ± 9 | 30.3 ± 2.6 | 265.1 ± 16.2 | 33.30 ± 1.58 | 6.7 ± 0.8 | 48.3 ± 2.0 |
| 9 | 1 260 ± 9 | 32.6 ± 2.7 | 216.1 ± 14.8 | 34.08 ± 1.61 | 5.7 ± 0.7 | 48.4 ± 2.0 |
| 10 | 1 260 ± 9 | 35.5 ± 2.7 | 181.8 ± 13.6 | 34.34 ± 1.62 | 5.2 ± 0.6 | 48.7 ± 2.0 |
| 11 | 1 260 ± 9 | 36.9 ± 2.8 | 151.3 ± 12.8 | 34.16 ± 1.61 | 4.5 ± 0.6 | 49.3 ± 2.0 |
| 12 | 1 260 ± 9 | 39.1 ± 2.9 | 127.2 ± 11.7 | 34.28 ± 1.62 | 4.0 ± 0.5 | 50.0 ± 2.0 |
| 13 | 1 260 ± 9 | 37.6 ± 2.8 | 75.5 ± 10.3 | 34.24 ± 1.62 | 2.3 ± 0.4 | 51.0 ± 2.0 |
| 14 | 1 260 ± 9 | #DIV/0! | 46.2 ± 0.0 | 34.32 ± 1.63 | #DIV/0! | 49.8 ± 2.0 |

7.3 EQUAÇÕES DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTILADORES OBTIDAS POR LINHAS DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE GRAU 6

| | |
|------------|--|
| 4_F | Pestatic $y = -7,5585E-14x^6 + 1,5325E-10x^5 - 1,2251E-07x^4 + 4,8956E-05x^3 - 1,0187E-02x^2 + 9,8284E-01x + 2,3278E+00$ dB(A) $y = -6,1982E-15x^6 + 2,7827E-11x^5 - 3,4468E-08x^4 + 1,7996E-05x^3 - 4,2771E-03x^2 + 4,2972E-01x + 3,5055E+01$ Pe $y = -2,0649E-14x^6 + 4,0571E-11x^5 - 3,0830E-08x^4 + 1,1409E-05x^3 - 2,1334E-03x^2 + 1,8886E-01x + 3,1142E+00$ Rend $y = 1,2999E-16x^6 + 2,1687E-13x^5 - 1,4735E-09x^4 + 1,6053E-06x^3 - 7,7579E-04x^2 + 2,1987E-01x - 4,5802E+00$ |
| 4_A | Pestatic $y = 1,3631E-13x^6 - 2,1318E-10x^5 + 1,2641E-07x^4 - 3,4418E-05x^3 + 4,0529E-03x^2 - 2,0446E-01x + 3,6064E+01$ dB(A) $y = 3,2040E-14x^6 - 2,9140E-11x^5 - 6,8135E-08x^4 + 7,2038E-06x^3 - 2,2442E-03x^2 + 2,2688E-01x + 4,0310E+01$ Pe $y = 1,9222E-14x^6 - 3,3486E-11x^5 + 2,2769E-08x^4 - 7,5217E-06x^3 + 1,2246E-03x^2 - 9,9506E-02x + 1,1109E+01$ Rend $y = 4,0765E-14x^6 - 6,5682E-11x^5 + 4,1023E-08x^4 - 1,1978E-05x^3 + 1,4170E-03x^2 + 5,6948E-02x + 1,5687E-01$ |
| 4_B | Pestatic $y = -2,7823E-14x^6 + 5,9179E-11x^5 - 4,9467E-08x^4 + 2,0545E-05x^3 - 4,4095E-03x^2 + 4,2094E-01x + 1,8634E+01$ dB(A) $y = 1,8970E-14x^6 - 2,8155E-11x^5 + 1,4148E-08x^4 - 2,8831E-06x^3 + 3,4145E-04x^2 - 6,2171E-02x + 5,4606E+01$ Pe $y = -1,1512E-14x^6 + 2,2412E-11x^5 - 1,6635E-08x^4 + 5,8823E-06x^3 - 1,0296E-03x^2 + 8,5351E-02x + 6,5267E+00$ Rend $y = 3,3477E-14x^6 - 6,2616E-11x^5 + 4,4455E-08x^4 - 1,4877E-05x^3 + 2,3009E-03x^2 - 6,7022E-02x + 4,4705E+00$ |
| 4_C | Pestatic $y = -1,1406E-14x^6 + 1,7564E-11x^5 - 1,1989E-08x^4 + 5,4372E-06x^3 - 1,6654E-03x^2 + 2,0852E-01x + 2,8917E+01$ dB(A) $y = 1,8331E-15x^6 + 2,9545E-13x^5 - 3,2690E-09x^4 + 2,0845E-06x^3 - 4,0678E-04x^2 + 1,0528E-02x + 5,1046E+01$ Pe $y = 6,3729E-15x^6 - 1,5068E-11x^5 + 1,3589E-08x^4 - 5,8233E-06x^3 + 1,1977E-03x^2 - 1,1173E-01x + 1,3343E+01$ Rend $y = -1,7325E-14x^6 + 2,8466E-11x^5 - 1,9348E-08x^4 + 7,2045E-06x^3 - 1,6377E-03x^2 + 2,8183E-01x - 6,3768E+00$ |

| | |
|------------|--|
| 4_D | Pestic $y = -1,0845E-14x^6 + 1,4399E-11x^5 - 8,0976E-09x^4 + 3,3627E-06x^3 - 1,1312E-03x^2 + 1,5248E-01x + 2,7650E+01$ dB(A) $y = 1,6645E-14x^6 - 2,4258E-11x^5 + 1,2153E-08x^4 - 2,5217E-06x^3 + 2,6932E-04x^2 - 3,1953E-02x + 5,0870E+01$ Pe $y = -1,4337E-15x^6 - 3,2459E-13x^5 + 2,7623E-09x^4 - 1,9336E-06x^3 + 4,9235E-04x^2 - 5,0381E-02x + 1,1290E+01$ Rend $y = 1,3625E-14x^6 - 3,0416E-11x^5 + 2,4120E-08x^4 - 8,5924E-06x^3 + 1,2913E-03x^2 + 1,6970E-02x + 1,7351E+00$ |
| 4_E | Pestic $y = -2,9599E-14x^6 + 5,8888E-11x^5 - 4,8731E-08x^4 + 2,1456E-05x^3 - 5,1139E-03x^2 + 5,2819E-01x + 1,1619E+01$ dB(A) $y = 1,5340E-14x^6 - 3,1122E-11x^5 + 2,1569E-08x^4 - 6,6633E-06x^3 + 1,0524E-03x^2 - 1,0987E-01x + 5,4829E+01$ Pe $y = -2,3906E-14x^6 + 3,8435E-11x^5 - 2,4436E-08x^4 + 7,9132E-06x^3 - 1,3875E-03x^2 + 1,1479E-01x + 5,1483E+00$ Rend $y = 6,3897E-14x^6 - 1,0203E-10x^5 + 6,3715E-08x^4 - 1,9253E-05x^3 + 2,7045E-03x^2 - 7,0938E-02x + 3,7154E+00$ |
| 3_F | Pestic $y = -9,0663E-15x^6 + 2,2973E-11x^5 - 2,3987E-08x^4 + 1,3179E-05x^3 - 3,9181E-03x^2 + 5,0886E-01x + 2,7005E+01$ dB(A) $y = -6,0276E-15x^6 + 1,6770E-11x^5 - 1,7818E-08x^4 + 9,0512E-06x^3 - 2,2392E-03x^2 + 2,3867E-01x + 4,6649E+01$ Pe $y = 5,0504E-16x^6 - 1,3081E-12x^5 + 1,2669E-09x^4 - 5,0055E-07x^3 + 4,1923E-05x^2 + 8,7778E-03x + 1,3729E+01$ Rend $y = 7,7631E-15x^6 - 1,7643E-11x^5 + 1,5249E-08x^4 - 6,2195E-06x^3 + 1,1344E-03x^2 - 4,8158E-03x + 3,3816E+00$ |
| 3_A | Pestic $y = 4,2537E-14x^6 - 6,3614E-11x^5 + 3,2642E-08x^4 - 5,1297E-06x^3 - 7,2934E-04x^2 + 1,7726E-01x + 3,1172E+01$ dB(A) $y = 7,1740E-15x^6 - 1,0575E-11x^5 + 3,7839E-09x^4 + 1,6589E-07x^3 - 1,4182E-04x^2 - 1,5626E-02x + 5,3180E+01$ Pe $y = -7,2820E-15x^6 + 9,8078E-12x^5 - 4,7787E-09x^4 + 1,0913E-06x^3 - 1,5288E-04x^2 + 6,8586E-03x + 1,1080E+01$ Rend $y = 2,4261E-14x^6 - 3,8900E-11x^5 + 2,4034E-08x^4 - 6,7934E-06x^3 + 6,5886E-04x^2 + 9,2230E-02x - 1,0133E+00$ |
| 3_B | Pestic $y = -5,5610E-15x^6 + 1,4185E-11x^5 - 1,5367E-08x^4 + 8,7864E-06x^3 - 2,6326E-03x^2 + 3,1086E-01x + 3,3593E+01$ dB(A) $y = -9,7638E-15x^6 + 2,1996E-11x^5 - 1,9473E-08x^4 + 8,4120E-06x^3 - 1,7905E-03x^2 + 1,6750E-01x + 4,8322E+01$ Pe $y = 1,9152E-15x^6 - 4,1524E-12x^5 + 3,5261E-09x^4 - 1,4344E-06x^3 + 2,6601E-04x^2 - 2,2713E-02x + 1,5131E+01$ Rend $y = -5,1524E-15x^6 + 8,6427E-12x^5 - 5,9119E-09x^4 + 2,3392E-06x^3 - 6,4224E-04x^2 + 1,6211E-01x - 2,6810E+00$ |
| 3_C | Pestic $y = -9,3575E-15x^6 + 1,8701E-11x^5 - 1,6941E-08x^4 + 9,2108E-06x^3 - 2,9153E-03x^2 + 3,8214E-01x + 2,9683E+01$ dB(A) $y = -6,9330E-15x^6 + 1,4947E-11x^5 - 1,2398E-08x^4 + 4,9161E-06x^3 - 9,3069E-04x^2 + 7,0380E-02x + 5,2868E+01$ Pe $y = 3,0076E-15x^6 - 7,2966E-12x^5 + 6,6850E-09x^4 - 2,8483E-06x^3 + 5,5804E-04x^2 - 4,9449E-02x + 1,4574E+01$ Rend $y = -1,0546E-14x^6 + 1,6776E-11x^5 - 9,9790E-09x^4 + 3,0764E-06x^3 - 7,0511E-04x^2 + 1,8115E-01x - 3,3082E+00$ |
| 3_D | Pestic $y = -1,5433E-15x^6 + 5,1777E-12x^5 - 9,2971E-09x^4 + 8,0559E-06x^3 - 3,2102E-03x^2 + 4,8244E-01x + 1,9243E+01$ dB(A) $y = -6,4439E-15x^6 + 1,4955E-11x^5 - 1,3312E-08x^4 + 5,5936E-06x^3 - 1,1000E-03x^2 + 8,4408E-02x + 5,1876E+01$ Pe $y = 5,5655E-15x^6 - 1,2256E-11x^5 + 1,0377E-08x^4 - 4,1508E-06x^3 + 7,7428E-04x^2 - 6,2840E-02x + 1,4821E+01$ Rend $y = -5,5919E-15x^6 + 6,7078E-12x^5 - 2,7148E-09x^4 + 8,2845E-07x^3 - 4,3045E-04x^2 + 1,6727E-01x - 3,9413E+00$ |

| | |
|------------|--|
| 3_E | Pestatic $y = -9,9386E-14x^6 + 1,8029E-10x^5 - 1,3151E-07x^4 + 4,9633E-05x^3 - 1,0197E-02x^2 + 9,9437E-01x - 5,5809E-01$ dB(A) $y = 5,4751E-15x^6 - 5,6279E-12x^5 - 5,1846E-10x^4 + 2,2661E-06x^3 - 8,0930E-04x^2 + 9,3498E-02x + 4,9638E+01$ Pe $y = -4,5975E-15x^6 + 5,0238E-12x^5 - 9,5320E-10x^4 - 6,0489E-07x^3 + 2,5896E-04x^2 - 3,8950E-02x + 1,3211E+01$ Rend $y = -3,7321E-14x^6 + 6,7289E-11x^5 - 4,7895E-08x^4 + 1,7439E-05x^3 - 3,5690E-03x^2 + 4,4270E-01x - 1,3087E+01$ |
| 1_F | Pestatic $y = 1,8883E-15x^6 - 2,6508E-12x^5 - 1,6529E-10x^4 + 1,8401E-06x^3 - 9,8917E-04x^2 + 1,3385E-01x + 3,3326E+01$ dB(A) $y = -8,6201E-15x^6 + 2,5739E-11x^5 - 2,7158E-08x^4 + 1,2985E-05x^3 - 2,8901E-03x^2 + 2,6612E-01x + 4,2574E+01$ Pe $y = 2,3422E-15x^6 - 5,1730E-12x^5 + 4,3063E-09x^4 - 1,6491E-06x^3 + 2,8381E-04x^2 - 2,1416E-02x + 3,4837E+01$ Rend $y = -1,6180E-15x^6 + 2,5508E-12x^5 - 1,5177E-09x^4 + 4,7977E-07x^3 - 1,3929E-04x^2 + 4,7914E-02x - 5,7939E-01$ |
| 1_A | Pestatic $y = 5,9698E-14x^6 - 8,9814E-11x^5 + 4,9268E-08x^4 - 1,1103E-05x^3 + 6,0976E-04x^2 + 2,5639E-02x + 3,0049E+01$ dB(A) $y = -5,2717E-14x^6 + 8,5716E-11x^5 - 5,6682E-08x^4 + 1,8512E-05x^3 - 2,8337E-03x^2 + 1,5591E-01x + 4,6443E+01$ Pe $y = -4,8187E-15x^6 + 6,9518E-12x^5 - 3,8010E-09x^4 + 1,0162E-06x^3 - 1,4373E-04x^2 + 4,7663E-03x + 3,2573E+01$ Rend $y = 1,3371E-14x^6 - 2,2143E-11x^5 + 1,4233E-08x^4 - 4,3275E-06x^3 + 5,6585E-04x^2 - 4,3042E-03x + 6,0930E-01$ |
| 1_C | Pestatic $y = -3,5846E-14x^6 + 7,2051E-11x^5 - 5,9343E-08x^4 + 2,5723E-05x^3 - 6,0818E-03x^2 + 6,6332E-01x + 1,0286E+01$ dB(A) $y = -2,2838E-14x^6 + 5,1464E-11x^5 - 4,5072E-08x^4 + 1,9033E-05x^3 - 3,9100E-03x^2 + 3,4905E-01x + 3,8262E+01$ Pe $y = 1,1719E-14x^6 - 2,5574E-11x^5 + 2,1898E-08x^4 - 9,2520E-06x^3 + 1,9839E-03x^2 - 2,0067E-01x + 4,0650E+01$ Rend $y = -6,0930E-15x^6 + 1,0192E-11x^5 - 6,8142E-09x^4 + 2,4713E-06x^3 - 5,6931E-04x^2 + 9,3785E-02x - 2,5193E+00$ |
| 1_D | Pestatic $y = 9,6740E-15x^6 - 1,6793E-11x^5 + 8,4222E-09x^4 + 7,6807E-08x^3 - 1,0306E-03x^2 + 1,7431E-01x + 2,6046E+01$ dB(A) $y = -1,8673E-14x^6 + 4,3990E-11x^5 - 3,9768E-08x^4 + 1,7167E-05x^3 - 3,5917E-03x^2 + 3,3343E-01x + 3,6961E+01$ Pe $y = 9,2285E-17x^6 + 1,0295E-12x^5 - 1,4494E-09x^4 + 6,8853E-07x^3 - 1,4068E-04x^2 + 1,0191E-02x + 3,2869E+01$ Rend $y = 4,1708E-15x^6 - 9,9400E-12x^5 + 8,4322E-09x^4 - 3,1640E-06x^3 + 4,9066E-04x^2 - 3,1575E-03x + 6,6044E-01$ |
| 1_E | Pestatic $y = 7,8381E-14x^6 - 1,3042E-10x^5 + 8,2136E-08x^4 - 2,3741E-05x^3 + 2,9877E-03x^2 - 1,6309E-01x + 3,1671E+01$ dB(A) $y = 5,2211E-14x^6 - 8,3935E-11x^5 + 5,1751E-08x^4 - 1,5771E-05x^3 + 2,6556E-03x^2 - 2,5864E-01x + 5,8591E+01$ Pe $y = 4,3531E-16x^6 + 7,9832E-13x^5 - 1,3208E-09x^4 + 6,8025E-07x^3 - 1,7658E-04x^2 + 2,0039E-02x + 3,1890E+01$ Rend $y = 1,2081E-14x^6 - 2,1920E-11x^5 + 1,5359E-08x^4 - 5,1031E-06x^3 + 7,6734E-04x^2 - 2,7514E-02x + 1,2766E+00$ |
| 2_B | Pestatic $y = 2,7730E-14x^6 - 4,9167E-11x^5 + 3,1357E-08x^4 - 8,0427E-06x^3 + 4,1483E-04x^2 + 5,2045E-02x + 3,9888E+01$ dB(A) $y = -2,3818E-14x^6 + 5,6161E-11x^5 - 5,2294E-08x^4 + 2,4076E-05x^3 - 5,5937E-03x^2 + 5,9433E-01x + 3,1326E+01$ Pe $y = -4,3822E-15x^6 + 8,2548E-12x^5 - 5,9626E-09x^4 + 2,1300E-06x^3 - 4,1160E-04x^2 + 3,7638E-02x + 3,6316E+01$ Rend $y = 2,0461E-14x^6 - 4,0800E-11x^5 + 3,1781E-08x^4 - 1,2192E-05x^3 + 2,3512E-03x^2 - 1,8944E-01x + 8,0862E+00$ |

7.4 VALORES RESULTANTES DAS INTERCEPÇÕES DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS COMS AS CURVAS TEÓRICAS DE INSTALAÇÃO

| 4_A | | | | | | |
|-----------|------|-----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 467,0 | 10,3 | 2,859E-12 | 10,3 | 43,2 | 31,0 | 4,21 |
| 440,1 | 10,3 | 1,507E-08 | 10,3 | 45,7 | 29,4 | 4,33 |
| 407,3 | 11,2 | 1,422E-09 | 11,2 | 48,1 | 27,9 | 4,53 |
| 371,0 | 12,4 | 1,667E-07 | 12,4 | 49,3 | 26,5 | 4,78 |
| 332,4 | 13,8 | 3,63E-07 | 13,8 | 49,0 | 25,0 | 5,10 |
| 285,7 | 16,4 | 3,47E-09 | 16,4 | 47,4 | 23,2 | 5,64 |
| 257,7 | 18,6 | 1,059E-07 | 18,6 | 46,3 | 22,2 | 6,06 |
| 219,3 | 22,5 | 4,258E-09 | 22,5 | 45,3 | 20,6 | 6,67 |
| 199,8 | 24,7 | 7,756E-09 | 24,7 | 45,2 | 19,6 | 6,97 |
| 181,6 | 26,7 | 1,07E-07 | 26,7 | 45,3 | 18,6 | 7,22 |
| 154,2 | 29,4 | 4,481E-08 | 29,4 | 45,9 | 16,7 | 7,52 |

| 4_F | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 571,7 | 15,5 | 7,22E-10 | 15,5 | 46,4 | 27,9 | 9,01 |
| 555,3 | 16,3 | 7,49E-11 | 16,3 | 46,4 | 28,3 | 8,99 |
| 508,7 | 17,5 | 2,16E-09 | 17,5 | 48,2 | 28,8 | 8,69 |
| 458,9 | 19,0 | 3E-10 | 19,0 | 50,5 | 28,4 | 8,65 |
| 413,2 | 21,4 | 1,63E-09 | 21,4 | 51,5 | 27,4 | 8,99 |
| 351,7 | 24,9 | 1,86E-10 | 24,9 | 50,7 | 25,5 | 9,51 |
| 308,9 | 26,8 | 3E-10 | 26,8 | 49,2 | 23,9 | 9,63 |
| 248,7 | 29,0 | 3,35E-09 | 29,0 | 47,4 | 21,4 | 9,40 |
| 220,7 | 30,2 | 8,67E-10 | 30,2 | 47,1 | 20,0 | 9,24 |
| 196,9 | 31,4 | 8,12E-10 | 31,4 | 47,3 | 18,7 | 9,15 |
| 164,6 | 33,5 | 4,81E-11 | 33,5 | 48,1 | 16,7 | 9,14 |

| 4_B | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 571,5 | 15,4 | 1,75E-11 | 15,4 | 46,2 | 32,0 | 7,71 |
| 551,1 | 16,1 | 1,47E-10 | 16,1 | 46,7 | 31,7 | 7,78 |
| 508,6 | 17,5 | 8,75E-10 | 17,5 | 48,9 | 31,4 | 7,87 |
| 462,1 | 19,3 | 1,02E-09 | 19,3 | 50,9 | 30,5 | 8,18 |
| 413,7 | 21,4 | 1,8E-09 | 21,4 | 51,5 | 28,4 | 8,72 |
| 346,7 | 24,1 | 4,78E-11 | 24,1 | 50,3 | 24,6 | 9,42 |
| 301,8 | 25,6 | 4,51E-10 | 25,6 | 48,9 | 22,2 | 9,61 |
| 241,4 | 27,3 | 2,42E-10 | 27,3 | 47,7 | 19,4 | 9,48 |
| 213,7 | 28,3 | 2,75E-10 | 28,3 | 47,5 | 18,0 | 9,35 |
| 189,9 | 29,2 | 3,53E-11 | 29,2 | 47,7 | 16,8 | 9,25 |
| 157,5 | 30,7 | 1,23E-10 | 30,7 | 48,3 | 14,7 | 9,17 |

| 4_C | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 559,5 | 14,8 | 6,46E-10 | 14,8 | 46,8 | 33,8 | 6,83 |
| 546,7 | 15,8 | 5,19E-10 | 15,8 | 47,2 | 34,7 | 6,90 |
| 509,9 | 17,6 | 2,98E-09 | 17,6 | 48,4 | 35,4 | 6,99 |
| 454,4 | 18,7 | 1,82E-09 | 18,7 | 49,9 | 33,6 | 7,05 |
| 400,1 | 20,1 | 3,4E-10 | 20,1 | 50,4 | 30,6 | 7,28 |
| 338,7 | 23,0 | 9,05E-09 | 23,0 | 50,0 | 27,2 | 7,92 |
| 301,6 | 25,5 | 1,77E-09 | 25,5 | 49,5 | 25,2 | 8,46 |
| 250,5 | 29,4 | 2E-10 | 29,4 | 48,8 | 22,3 | 9,19 |
| 225,0 | 31,4 | 5,4E-09 | 31,4 | 48,6 | 20,8 | 9,47 |
| 202,0 | 33,1 | 4,08E-10 | 33,1 | 48,5 | 19,3 | 9,64 |
| 168,7 | 35,2 | 1,52E-09 | 35,2 | 48,7 | 17,0 | 9,72 |

| 4_D | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 536,8 | 13,6 | 2,19E-10 | 13,6 | 47,4 | 26,9 | 7,62 |
| 524,4 | 14,6 | 7,88E-13 | 14,6 | 47,7 | 27,8 | 7,63 |
| 489,8 | 16,2 | 2,18E-10 | 16,2 | 49,0 | 29,1 | 7,56 |
| 439,6 | 17,5 | 4,72E-12 | 17,5 | 50,4 | 28,5 | 7,51 |
| 389,2 | 19,0 | 1,39E-10 | 19,0 | 50,6 | 26,6 | 7,77 |
| 330,3 | 21,9 | 9,8E-11 | 21,9 | 49,7 | 23,8 | 8,43 |
| 294,1 | 24,3 | 3,9E-11 | 24,3 | 48,9 | 22,2 | 8,90 |
| 243,7 | 27,8 | 1,93E-11 | 27,8 | 48,1 | 20,0 | 9,43 |
| 218,5 | 29,6 | 8,7E-12 | 29,6 | 47,9 | 18,8 | 9,60 |
| 195,7 | 31,0 | 8,76E-11 | 31,0 | 47,8 | 17,5 | 9,67 |
| 162,7 | 32,8 | 1,69E-11 | 32,8 | 48,0 | 15,4 | 9,67 |

| 4_E | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 490,2 | 11,4 | 1,12E-10 | 11,4 | 46,3 | 28,6 | 5,35 |
| 464,6 | 11,4 | 1,07E-09 | 11,4 | 48,3 | 26,4 | 5,60 |
| 418,1 | 11,8 | 5,92E-10 | 11,8 | 49,3 | 24,4 | 5,59 |
| 375,2 | 12,7 | 7,11E-10 | 12,7 | 48,6 | 23,2 | 5,69 |
| 336,0 | 14,1 | 5,44E-10 | 14,1 | 47,7 | 22,0 | 6,00 |
| 287,9 | 16,6 | 2,68E-10 | 16,6 | 46,8 | 20,3 | 6,55 |
| 257,8 | 18,7 | 6,91E-10 | 18,7 | 46,6 | 19,3 | 6,92 |
| 216,3 | 21,9 | 3,04E-11 | 21,9 | 46,9 | 17,8 | 7,40 |
| 195,6 | 23,7 | 1,8E-09 | 23,7 | 47,3 | 16,9 | 7,63 |
| 176,9 | 25,4 | 2,37E-10 | 25,4 | 47,6 | 15,9 | 7,84 |
| 149,6 | 27,7 | 1,61E-10 | 27,7 | 48,3 | 14,2 | 8,14 |

| 3_F | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 665,5 | 20,9 | 6,07E-13 | 20,9 | 52,0 | 31,9 | 12,23 |
| 642,2 | 21,9 | 1,69E-11 | 21,9 | 52,0 | 32,0 | 12,11 |
| 589,1 | 23,4 | 1,73E-11 | 23,4 | 52,5 | 32,0 | 12,00 |
| 528,9 | 25,3 | 1,27E-11 | 25,3 | 53,5 | 31,0 | 12,10 |
| 469,5 | 27,6 | 2,21E-11 | 27,6 | 54,1 | 29,1 | 12,41 |
| 395,5 | 31,4 | 5,14E-12 | 31,4 | 54,0 | 26,2 | 13,06 |
| 349,4 | 34,3 | 2,62E-11 | 34,3 | 53,6 | 24,4 | 13,55 |
| 287,5 | 38,8 | 1,92E-11 | 38,8 | 53,1 | 21,9 | 14,19 |
| 257,7 | 41,1 | 1,71E-11 | 41,1 | 53,1 | 20,5 | 14,46 |
| 231,3 | 43,3 | 6,42E-11 | 43,3 | 53,2 | 19,1 | 14,65 |
| 193,6 | 46,4 | 9,81E-12 | 46,4 | 53,8 | 16,9 | 14,82 |

| 3_A | | | | | | |
|-----------|------|-------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 495,6 | 13,0 | 2E-10 | 13,0 | 49,2 | 25,9 | 6,82 |
| 450,1 | 13,7 | 5E-12 | 13,7 | 52,1 | 24,1 | 7,21 |
| 409,5 | 15,2 | 4E-10 | 15,2 | 52,9 | 23,0 | 7,41 |
| 367,9 | 17,0 | 3E-10 | 17,0 | 52,3 | 22,1 | 7,76 |
| 315,1 | 19,9 | 2E-10 | 19,9 | 50,8 | 20,8 | 8,43 |
| 282,7 | 22,4 | 4E-11 | 22,4 | 49,9 | 19,9 | 8,93 |
| 238,7 | 26,7 | 7E-11 | 26,7 | 49,0 | 18,5 | 9,59 |
| 216,8 | 29,1 | 2E-11 | 29,1 | 48,9 | 17,7 | 9,89 |
| 196,8 | 31,4 | 4E-10 | 31,4 | 48,8 | 16,9 | 10,13 |
| 167,1 | 34,6 | 8E-11 | 34,6 | 49,1 | 15,3 | 10,44 |

| 3_B | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 647,8 | 19,8 | 4,45E-11 | 19,8 | 50,7 | 32,8 | 10,90 |
| 628,7 | 21,0 | 2,79E-13 | 21,0 | 51,6 | 33,8 | 10,84 |
| 582,1 | 22,9 | 4,55E-12 | 22,9 | 52,8 | 33,9 | 10,96 |
| 521,6 | 24,6 | 1,59E-11 | 24,6 | 53,5 | 31,4 | 11,35 |
| 457,7 | 26,2 | 1,04E-09 | 26,2 | 53,9 | 28,0 | 11,87 |
| 379,6 | 28,9 | 1,28E-09 | 28,9 | 53,9 | 24,2 | 12,60 |
| 333,2 | 31,2 | 1,17E-11 | 31,2 | 53,5 | 22,1 | 13,06 |
| 272,8 | 34,9 | 1,35E-11 | 34,9 | 52,9 | 19,4 | 13,65 |
| 244,2 | 37,0 | 4,6E-10 | 37,0 | 52,7 | 18,1 | 13,90 |
| 219,0 | 38,9 | 1,06E-10 | 38,9 | 52,7 | 16,8 | 14,08 |
| 183,3 | 41,6 | 1,81E-10 | 41,6 | 52,9 | 14,8 | 14,27 |

| 3_C | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 629,4 | 18,7 | 1,08E-09 | 18,7 | 53,9 | 33,8 | 9,69 |
| 615,1 | 20,1 | 2,54E-12 | 20,1 | 54,0 | 34,8 | 9,79 |
| 571,6 | 22,1 | 4,38E-12 | 22,1 | 53,9 | 35,0 | 9,99 |
| 500,8 | 22,7 | 3,56E-10 | 22,7 | 53,8 | 31,4 | 10,11 |
| 435,1 | 23,7 | 1,65E-09 | 23,7 | 53,9 | 27,8 | 10,30 |
| 366,2 | 26,9 | 1,79E-13 | 26,9 | 54,0 | 25,1 | 10,85 |
| 326,0 | 29,8 | 3E-11 | 29,8 | 53,9 | 23,8 | 11,33 |
| 271,8 | 34,6 | 3,24E-11 | 34,6 | 53,7 | 21,8 | 12,04 |
| 245,1 | 37,2 | 2,5E-10 | 37,2 | 53,6 | 20,6 | 12,36 |
| 220,9 | 39,5 | 9,99E-11 | 39,5 | 53,5 | 19,3 | 12,61 |
| 185,7 | 42,7 | 2,74E-11 | 42,7 | 53,6 | 17,1 | 12,86 |

| 3_D | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 613,5 | 17,8 | 3,76E-13 | 17,8 | 51,6 | 28,2 | 10,85 |
| 597,9 | 19,0 | 1,05E-12 | 19,0 | 51,8 | 29,4 | 10,77 |
| 555,0 | 20,8 | 4,51E-12 | 20,8 | 52,3 | 30,1 | 10,69 |
| 488,7 | 21,6 | 1,09E-11 | 21,6 | 53,1 | 27,6 | 10,64 |
| 421,8 | 22,3 | 3,61E-13 | 22,3 | 53,5 | 24,3 | 10,75 |
| 352,4 | 24,9 | 9,72E-13 | 24,9 | 53,4 | 21,7 | 11,26 |
| 313,6 | 27,6 | 7,48E-14 | 27,6 | 53,2 | 20,5 | 11,73 |
| 262,2 | 32,2 | 1,45E-13 | 32,2 | 52,7 | 18,9 | 12,42 |
| 236,9 | 34,8 | 1,15E-13 | 34,8 | 52,6 | 18,0 | 12,72 |
| 214,0 | 37,1 | 1,88E-13 | 37,1 | 52,6 | 17,0 | 12,95 |
| 180,2 | 40,2 | 1,62E-13 | 40,2 | 52,7 | 15,3 | 13,16 |

| 3_E | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 449,9 | 13,7 | 1,77E-11 | 13,7 | 54,7 | 20,3 | 8,44 |
| 401,4 | 14,6 | 1,75E-11 | 14,6 | 54,1 | 19,1 | 8,55 |
| 361,8 | 16,4 | 1,42E-11 | 16,4 | 53,4 | 18,6 | 8,87 |
| 312,6 | 19,6 | 5,83E-12 | 19,6 | 52,4 | 17,9 | 9,47 |
| 280,1 | 22,0 | 4,38E-12 | 22,0 | 51,9 | 17,3 | 9,90 |
| 233,8 | 25,6 | 6,58E-11 | 25,6 | 51,6 | 16,0 | 10,44 |
| 210,7 | 27,5 | 6,45E-14 | 27,5 | 51,7 | 15,2 | 10,65 |
| 190,1 | 29,3 | 4,28E-13 | 29,3 | 51,9 | 14,3 | 10,80 |
| 160,3 | 31,8 | 4,85E-13 | 31,8 | 52,3 | 12,9 | 10,95 |

| 1_F | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 585,2 | 16,2 | 3,62E-14 | 16,2 | 46,1 | 8,0 | 33,08 |
| 566,0 | 17,0 | 4,57E-16 | 17,0 | 46,3 | 8,1 | 33,08 |
| 523,7 | 18,5 | 1,88E-14 | 18,5 | 47,6 | 8,2 | 33,06 |
| 472,6 | 20,2 | 2,64E-14 | 20,2 | 49,5 | 8,0 | 32,99 |
| 419,0 | 22,0 | 1,87E-14 | 22,0 | 50,6 | 7,7 | 32,98 |
| 351,9 | 24,9 | 3,69E-16 | 24,9 | 50,2 | 7,4 | 33,15 |
| 310,7 | 27,1 | 1,19E-13 | 27,1 | 49,4 | 7,0 | 33,38 |
| 255,4 | 30,6 | 2,94E-14 | 30,6 | 48,4 | 6,4 | 33,76 |
| 228,6 | 32,4 | 2,45E-14 | 32,4 | 48,2 | 6,0 | 33,94 |
| 204,7 | 34,0 | 2,72E-13 | 34,0 | 48,3 | 5,6 | 34,07 |
| 170,6 | 36,0 | 4,9E-17 | 36,0 | 48,8 | 5,0 | 34,21 |

| 2_B | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 574.8 | 17.5 | 1.19E-12 | 17.5 | 53.5 | 7.8 | 35.49 |
| 532.8 | 19.2 | 5.73E-12 | 19.2 | 53.9 | 7.9 | 35.37 |
| 488.0 | 21.5 | 4.09E-13 | 21.5 | 54.1 | 8.2 | 35.32 |
| 436.0 | 23.8 | 6.52E-12 | 23.8 | 54.1 | 8.1 | 35.51 |
| 364.5 | 26.7 | 4.93E-12 | 26.7 | 53.1 | 7.5 | 36.08 |
| 321.4 | 29.0 | 1.04E-12 | 29.0 | 52.2 | 7.0 | 36.47 |
| 265.6 | 33.1 | 8.41E-13 | 33.1 | 51.3 | 6.6 | 36.89 |
| 238.9 | 35.4 | 8.66E-13 | 35.4 | 51.3 | 6.4 | 37.05 |
| 215.0 | 37.5 | 1.62E-12 | 37.5 | 51.5 | 6.1 | 37.17 |
| 180.5 | 40.3 | 3.24E-12 | 40.3 | 52.4 | 5.4 | 37.33 |

| 1_A | | | | | | |
|-----------|------|------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 472,6 | 11,8 | 0,00 | 11,8 | 47,1 | 5,1 | 30,58 |
| 429,6 | 12,5 | 0,00 | 12,5 | 50,4 | 4,9 | 30,63 |
| 389,4 | 13,7 | 0,00 | 13,7 | 50,9 | 4,8 | 30,68 |
| 347,4 | 15,1 | 0,00 | 15,1 | 50,2 | 4,7 | 30,83 |
| 294,8 | 17,5 | 0,00 | 17,5 | 48,6 | 4,6 | 31,13 |
| 263,2 | 19,4 | 0,00 | 19,4 | 47,4 | 4,6 | 31,34 |
| 220,6 | 22,8 | 0,00 | 22,8 | 46,1 | 4,4 | 31,61 |
| 199,6 | 24,7 | 0,00 | 24,7 | 45,7 | 4,3 | 31,74 |
| 180,5 | 26,4 | 0,00 | 26,4 | 45,6 | 4,1 | 31,86 |
| 152,4 | 28,8 | 0,00 | 28,8 | 45,7 | 3,8 | 32,02 |

| 1_C | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 586,3 | 16,3 | 1,51E-11 | 16,3 | 46,7 | 8,2 | 32,11 |
| 573,8 | 17,5 | 1,19E-12 | 17,5 | 47,0 | 8,5 | 32,13 |
| 532,8 | 19,2 | 8,91E-11 | 19,2 | 48,1 | 8,7 | 32,26 |
| 465,2 | 19,6 | 3,52E-10 | 19,6 | 49,5 | 7,9 | 32,36 |
| 404,3 | 20,5 | 8,11E-11 | 20,5 | 50,0 | 7,1 | 32,38 |
| 337,4 | 22,9 | 3,89E-11 | 22,9 | 49,2 | 6,5 | 32,68 |
| 297,6 | 24,8 | 2,42E-11 | 24,8 | 48,2 | 6,2 | 32,99 |
| 244,7 | 28,1 | 1,44E-10 | 28,1 | 47,1 | 5,8 | 33,37 |
| 219,5 | 29,8 | 7,91E-11 | 29,8 | 46,8 | 5,5 | 33,46 |
| 197,1 | 31,5 | 3,69E-11 | 31,5 | 46,8 | 5,2 | 33,45 |
| 165,2 | 33,8 | 4,16E-15 | 33,8 | 47,3 | 4,6 | 33,33 |

| 1_D | | | | | | |
|-----------|------|----------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 568,5 | 15,3 | 4,59E-13 | 15,3 | 47,8 | 7,4 | 32,56 |
| 551,9 | 16,1 | 7,12E-12 | 16,1 | 48,0 | 7,7 | 32,24 |
| 511,2 | 17,6 | 6,23E-13 | 17,6 | 48,8 | 7,9 | 31,90 |
| 453,4 | 18,6 | 9,13E-12 | 18,6 | 49,9 | 7,3 | 32,02 |
| 391,3 | 19,2 | 1,18E-12 | 19,2 | 50,2 | 6,5 | 32,36 |
| 323,5 | 21,0 | 4,23E-12 | 21,0 | 49,0 | 5,8 | 32,63 |
| 285,8 | 22,9 | 4,29E-13 | 22,9 | 48,0 | 5,6 | 32,71 |
| 236,6 | 26,2 | 4,1E-12 | 26,2 | 46,9 | 5,3 | 32,76 |
| 212,8 | 28,1 | 2,51E-12 | 28,1 | 46,6 | 5,1 | 32,79 |
| 191,3 | 29,7 | 2,79E-15 | 29,7 | 46,6 | 4,8 | 32,82 |
| 160,2 | 31,8 | 5,23E-12 | 31,8 | 46,9 | 4,3 | 32,88 |

| 1_E | | | | | | |
|-----------|------|-------------|----------|-------|------|--------|
| \dot{V} | Y | R2 | Pestatic | dB(A) | Rend | Potenc |
| 508,9 | 12,2 | 0,007 | 12,3 | 49,2 | 5,2 | 32,23 |
| 472,8 | 11,9 | 1,73E-11 | 11,9 | 49,3 | 5,0 | 31,51 |
| 432,0 | 12,6 | 6,09E-12 | 12,6 | 49,9 | 4,8 | 31,28 |
| 387,0 | 13,5 | 1,01E-11 | 13,5 | 49,7 | 4,6 | 31,39 |
| 341,1 | 14,6 | 7,47E-13 | 14,6 | 48,7 | 4,4 | 31,67 |
| 288,7 | 16,7 | 3,74E-13 | 16,7 | 47,2 | 4,2 | 32,00 |
| 258,1 | 18,7 | 5,71E-12 | 18,7 | 46,5 | 4,2 | 32,18 |
| 216,5 | 22,0 | 7,27E-13 | 22,0 | 46,2 | 4,1 | 32,38 |
| 195,6 | 23,7 | 4,66E-12 | 23,7 | 46,2 | 3,9 | 32,46 |
| 176,3 | 25,2 | 3,56E-13 | 25,2 | 46,4 | 3,8 | 32,54 |
| 147,7 | 27,0 | 9,99517E-13 | 27,0 | 46,8 | 3,4 | 32,62 |