

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Estudo e optimização da geometria de um túnel
de vento por CFD***

Tese de Mestrado

de

Soraia Ferreira Neves

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em



CeNTI - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Departamento de Engenharia Química

Orientador na FEUP: Doutor João Campos

Orientador na empresa: Doutor Tiago Sotto Mayor

Julho de 2010

À minha família,

Ao Rui

“Ao fazeres algo, fá-lo com amor ou não o faças de todo”

Mohandas Gandhi

Agradecimentos

A realização deste projecto não teria sido possível sem a colaboração de inúmeras pessoas, às quais gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos.

Gostaria de agradecer ao Doutor Tiago Sotto Mayor, pela constante dedicação, disponibilidade e apoio prestados no decorrer deste projecto e ainda pela confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

Ao Doutor João Campos, pela sua orientação e pelos seus conselhos, que se revelaram de extrema importância ao longo do projecto.

Ao Rui por todo o seu apoio, ajuda e compreensão.

À Ana Silva, Carla Santos, Isabel Gomes, Raquel Coelho e Vera Mendes, pelo companheirismo e compreensão demonstradas ao longo desta experiência.

Não podia deixar de agradecer a todas as pessoas do CeNTI, pela forma como me acolheram e tornaram este estágio ainda mais interessante.

Por fim, à minha família e amigos pela ajuda e apoio prestados.

Resumo

O mercado é cada vez mais exigente quanto à segurança e qualidade dos produtos. Para responder a esta necessidade é preciso melhorar técnicas e métodos que avaliem fidedignamente o desempenho dos mais distintos produtos. Actualmente, recorre-se a técnicas de simulação de uso, em que variáveis como a temperatura, pressão e humidade são manipuladas, e a interacção entre o produto e esses mesmos parâmetros é avaliada. De entre os vários parâmetros que se podem controlar durante os testes, destaca-se o escoamento do fluido. Devido à sua importante influência sobre os fenómenos de transferência de calor e de massa, este deve ser um dos parâmetros controlados, durante os testes. Assim sendo, os testes devem ser realizados dentro de uma câmara climática, na qual o escoamento é controlado. Nesse sentido, o CeNTI, Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes, pretende adaptar a geometria da sua câmara climática de forma a permitir a imposição de uma gama mais alargada de velocidades. O principal objectivo desta dissertação é estudar e optimizar a geometria de um túnel de vento, a introduzir na câmara climática, através de ferramentas de *CFD* (Simulação da Dinâmica de Fluidos).

Neste projecto analisaram-se as características do escoamento promovido por uma ventoinha (estado pseudo-estacionário e transiente) e duas ventoinhas (estado pseudo-estacionário), assim como a influência de alguns aspectos da geometria da câmara climática e da zona de testes, sobre o escoamento.

Em síntese, concluiu-se que o manequim deve ser colocado a montante das ventoinhas, que os cantos da câmara climática não necessitam de ser arredondados, que a zona de testes deve-se localizar no centro da câmara climática e que a região da zona de testes a montante das ventoinhas deve apresentar uma contracção pouco abrupta e bastante dirigida.

Palavras-chave: *CFD*, escoamento dos fluidos, túnel de vento, simulação de movimento de ventoinhas e do escoamento de fluidos

Abstract

The market is increasingly becoming more critical about product's safety and quality. In order to meet this demand we need to improve techniques and methods that evaluate the performance of the most various products. Nowadays, it is employed the use of simulation techniques, in which variables such as temperature, pressure and humidity are manipulated, and it is analysed the response of the interaction between the product and those parameters. Among the various parameters that can be monitored during the tests, Due to its relevant influence on the phenomena of heat and mass transfer, this should be one of the parameters monitored during the tests. Therefore, tests should be performed in a climatic chamber, where the flow is controlled. Thus, CeNTI, Centre for Nanotechnology and Smart Materials, intends to adapt the geometry of its climatic chamber to allow the imposition of a wider range of speeds. The main purpose of this dissertation is the study and optimization of the geometry of a wind tunnel, to be introduced in the climatic chamber, through tools of CFD (Computational Fluid Dynamics).

In this project it is analyzed the flow characteristics made by a fan (pseudo-steady and transient state) and two fans (pseudo-steady state) as well as the influence of some aspects of the climatic chamber's geometry and of the test zone, on the flow.

In summary, it is concluded that the dummy should be placed upstream of the fans, the corners of the climatic chamber do not need to be rounded, the test zone should be located in the center of the climatic chamber and the region upstream of the fan in the test zone should have a contraction less abrupt and fairly guided.

Índice

Índice de Figuras.....	iv
Índice de Tabelas	viii
Notação e Glossário	x
1	Introdução..... 1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projecto.....1
1.2	Contributos do Trabalho
1.3	Organização da Tese
2	Descrição do Problema..... 3
2.1	Câmara climática, manequim térmico e ventoinhas.....3
2.2	Estratégia adoptada.....4
3	Estado da Arte..... 5
3.1	Ventoinhas.....5
3.2	Túneis de vento.....6
4	Descrição Técnica e Discussão dos Resultados..... 9
4.1	Escoamento promovido por uma ventoinha (estado pseudo-estacionário).....9
4.1.1	Geometria adoptada..... 10
4.1.2	Construção da geometria..... 11
4.1.3	Construção da grelha
4.1.4	Configuração da simulação..... 14
4.1.5	Velocidade de rotação da ventoinha..... 17
4.1.6	Volume definido na <i>Moving Reference Frame</i> 19
4.2	Escoamento promovido por duas ventoinhas (pseudo-estacionário) 21
4.2.1	Geometria adoptada..... 21
4.2.2	Construção da geometria e da grelha
4.2.3	Configuração da simulação..... 22
4.2.4	Resultados do escoamento promovido por duas ventoinhas..... 23
4.3	Escoamento promovido por uma ventoinha (estado transiente) 24
4.3.1	Construção da geometria e da grelha
4.3.2	Configuração da simulação..... 25
4.3.3	Resultados do escoamento promovido por uma ventoinha (estado transiente)..... 28
4.4	Escoamento ao longo da câmara climática 30
4.4.1	. Escoamento ao longo da câmara climática, sem alterar a sua geometria 31
4.4.1.1	Geometrias adoptadas
4.4.1.2	Construção das geometrias..... 32
4.4.1.3	Propriedades do fluido e condições-fronteira do domínio da simulação

4.4.1.4	Construção das grelhas	33
4.4.1.5	Configuração da simulação.....	34
4.4.1.6	Resultados do escoamento ao longo da câmara climática, sem arredondar os seus cantos.....	36
4.4.2	Cantos da câmara climática	37
4.4.2.1	Geometrias adoptadas	37
4.4.2.2	Construção das geometrias.....	38
4.4.2.3	Condições-fronteira, construção das grelhas e configuração da simulação	38
4.4.2.4	Resultados do arredondamento dos cantos da câmara climática	38
4.4.3	Largura da zona de testes.....	39
4.4.3.1	Geometrias adoptadas	40
4.4.3.2	Construção das geometrias.....	40
4.4.3.3	Condições-fronteira, construção das grelhas e configuração da simulação	40
4.4.3.4	Resultados obtidos para as duas larguras da zona de testes.....	40
4.4.4	Geometria da zona de testes	42
4.4.4.1	Geometrias adoptadas	43
4.4.4.2	Construção das geometrias.....	44
4.4.4.3	Condições-fronteira, construção das grelhas e configuração da simulação	44
4.4.4.4	Resultados obtidos para as diferentes geometrias da zona de testes	44
5	Conclusões	47
6	Avaliação do Trabalho Realizado	49
6.1	Objectivos Realizados	49
6.2	Limitações e Trabalho Futuro	49
6.3	Apreciação Final	49
Referências		50
ANEXO A	Manequim térmico e ventoinhas	52
ANEXO A.1	Manequim térmico	52
ANEXO A.2	Ventoinhas	53
ANEXO B	Configuração do modo de processamento (em série/ paralelo).....	54
ANEXO C	Testes de grelha, requisitos de memória RAM e Resíduos, referentes ao <i>subcapítulo 4.1</i>	56
ANEXO C.1	Testes de grelha	56
ANEXO C.2	Número de pontos da grelha vs memória RAM	58
ANEXO C.3	Resíduos	59
ANEXO D	Cálculo da magnitude do vector velocidade no <i>Tecplot</i>.....	61
ANEXO E	Grelhas, condições-fronteira e testes de grelha referentes ao <i>subcapítulo 4.2</i>.....	64
ANEXO E.1	Características das grelhas.....	64

ANEXO E.2 Condições-fronteira	66
ANEXO E.3 Testes de grelha	67
ANEXO F Largura da zona de testes	68
ANEXO G Testes de grelha e parâmetros de turbulência referentes ao <i>subcapítulo 4.4</i>.....	69
ANEXO G.1 Testes de grelha	69
ANEXO G.2 Parâmetros de turbulência	70
ANEXO H Processo iterativo de simulações	72

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática da câmara climática, do manequim térmico e das ventoinhas.....	4
Figura 2 - Curva de operação de uma ventoinha, consoante a velocidade de rotação imposta (Moonen, 2006)	5
Figura 3 - Exemplo de objectos testados em túneis de vento: a) Camião real na NASA Ames; b) Protótipo de camião na Universidade A & M do Texas; c) Esquiador na Universidade de Washington; d) Pássaro vivo na Universidade de Lund (Suécia); e) Ciclista na Universidade de in Witchita State; f) Carro na Universidade de Maryland (Trefny, 2002)	7
Figura 4 - Diferentes tipos de túneis de vento: a) Circuito aberto; b) Esquema de um túnel de circuito aberto; c) Circuito fechado; d) Esquema de um túnel de circuito fechado (NASA, 2010; Trefny, 2002)	7
Figura 5 - Estruturas utilizadas para direccionar/uniformizar o escoamento, em túneis de vento: a) deflectores (<i>vanes</i>) (Lindgren, 2002); b) grelhas (<i>screens</i>) (Moonen, 2006)	8
Figura 6 - Túnel de vento referido em (Moonen, 2006): a) Geometria de todo o túnel de vento, com a condição-fronteira <i>fan boundary condition</i> ; b) zona de testes do túnel de vento, com a entrada e saída definidas como <i>fan boundary condition</i> (abordagem convencional)	8
Figura 7 - Zonas definidas em diferentes <i>frames</i> no FLUENT; 1) zona definida na <i>frame</i> de referência; 2) zona definida na <i>MRF</i> (zona com rotação)	10
Figura 8 - Geometria adoptada (dimensões dos volumes encontram-se na Tabela 2)	10
Figura 9 - Representação esquemática da ventoinha e zonas que a rodeiam (corte horizontal do tubo, no GAMBIT)	11
Figura 10 - Identificação das áreas a partir das quais se construiu a grelha 2 (Tabela 3); 1) Superfícies da ventoinha e do V_1 ; 2) Superfícies do V_2 ; 3) Superfícies do V_3 ; 4) Superfície do V_4 ; 5) Superfície do V_5 ; 6) Superfície do V_6 ; 7) Superfície do V_7	13
Figura 11 - Locais onde se avaliaram os perfis de velocidade (ao longo do plano que atravessa o centro do tubo): Posição 1) Montante da ventoinha; Posição 2) Jusante da ventoinha; Posição 3) Saída do tubo	17
Figura 12 - Campo de velocidades ($m.s^{-1}$) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro do tubo), obtidas para diferentes velocidades de rotação da ventoinha: a) $VR1 = 36.5 \text{ rad.s}^{-1}$ (6 rotações por segundo); b) $VR2 = 180 \text{ rad.s}^{-1}$ (29 rotações por segundo); c) $VR3 = 365 \text{ rad.s}^{-1}$ (58 rotações por segundo)	18
Figura 13 - Perfis de velocidade obtidos para as diferentes velocidades de rotação da ventoinha, na posição: a) 1; b) 2; c) 3 (ver Figura 11)	19

Figura 14 - Perfis de velocidade obtidos para os diferentes casos estudados (Tabela 8), nas posições: a) 1; b) 2; c) 3 (ver Figura 11)	20
Figura 15 - Geometria adoptada para o estudo do escoamento promovido por duas ventoinhas	21
Figura 16 - Zonas definidas em diferentes <i>frames</i> no FLUENT; 1) zonas definidas na <i>frame</i> de referência; 2) zonas definidas na <i>Moving Reference Frame</i> (zonas com rotação)	21
Figura 17 - Campo de velocidades (m.s^{-1}) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro do tubo), obtidos para o caso: a) ventoinhas sem carcaça; b) ventoinhas com carcaça	23
Figura 18 - Deslocamento de uma grelha relativamente à grelha adjacente; posição das grelhas: a) no tempo 0; b) no tempo Δt (1 - elemento da grelha do V_1 ; 2 - elemento da grelha 2 do V_2 ; 3 - interface entre os dois volumes)	26
Figura 19 - Velocidade de escoamento e pressão, avaliadas num ponto central (na posição 2, Figura 11): a) Velocidade de escoamento no caso 4 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-4} \text{ s}$ e $VR = 365 \text{ rad.s}^{-1}$) e 5 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-5} \text{ s}$ e $VR = 365 \text{ rad.s}^{-1}$); b) Pressão no caso 4 e 5; c) Velocidade de escoamento no caso 6 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-3} \text{ s}$ e $VR = 36.5 \text{ rad.s}^{-1}$); d) Pressão no caso 6	28
Figura 20 - a) Velocidade de escoamento e b) Pressão, avaliadas no ponto 1 (central) e no ponto 2 (entre as paredes do tubo e a ventoinha) na posição 2 (Figura 11), caso 7 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-4} \text{ s}$ e $VR = 365 \text{ rad.s}^{-1}$)	29
Figura 21 - Posição das ventoinhas e da zona de testes, na câmara climática (corte horizontal ao longo da câmara climática): a) no centro da câmara; b) junto de uma parede da câmara (1 - ventoinhas; 2 - zona de testes; 3 - paredes da zona de testes)	30
Figura 22 - Geometrias adoptadas para o estudo do escoamento ao longo da câmara climática, quando a zona de testes se encontra a) no centro; b) junto da parede da câmara climática	32
Figura 23 - Grelhas utilizadas no estudo do escoamento ao longo da câmara climática, no caso da: a) $G_{zt, \text{centro}}$; b) $G_{zt, \text{parede}}$	34
Figura 24 - Campo de velocidades (m.s^{-1}) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro da câmara climática), obtidos para o caso: a) $G_{zt, \text{centro}}$; b) $G_{zt, \text{parede}}$	36
Figura 25 - Escoamento ao longo da câmara climática: a) Curvas características do sistema; b) Perfis de velocidade a montante das ventoinhas (na saída), quando a zona de testes se encontra no centro e junto da parede da câmara	36
Figura 26 - Esquemas correspondentes a diferentes efeitos de arredondamento dos cantos da câmara climática, quando a zona de testes se encontra: a) no centro; b) junto da parede da câmara (os índices 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, aos casos 11, 12 e 13 da Tabela 16)	37

Figura 27 - Campo de velocidades ($m.s^{-1}$) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro da câmara climática), obtidos para o caso da zona de testes estar localizada: a) no centro b) junto da parede, da câmara climática (os índices 1, 2 e 3 correspondem aos casos 11, 12 e 13, respectivamente, da Tabela 16)	38
Figura 28 - Efeito do arredondamento dos cantos da câmara climática, no caso da zona de testes se encontrar: a) no centro; b) junto da parede, da câmara climática (o índice 1 corresponde às curvas características do sistema e o 2 aos perfis de velocidade obtidos a montante das ventoinhas)	39
Figura 29 - Largura da zona de testes igual a 1.33 m, quando a zona de testes se encontra: a) centro; b) junto da parede da câmara climática	40
Figura 30 - Zona de testes no centro da câmara, com uma largura de: a) 0.88 m: b) 1.33 m (índice 1 corresponde ao campo de velocidades ($m.s^{-1}$) e o 2 aos perfis de velocidade, avaliados ao longo da zona de testes)	41
Figura 31 - Zona de testes junto da parede da câmara, com uma largura de: a) 0.88 m: b) 1.33 m (índice 1 corresponde ao campo de velocidades ($m.s^{-1}$) e o 2 aos perfis de velocidade, avaliados ao longo da zona de testes)	41
Figura 32 - Estudo da geometria da zona de testes: a) caso 14, b) caso 15, c) caso 16, d) caso 17 e e) caso 18, da Tabela 19	43
Figura 33 - Campo de velocidades ($m.s^{-1}$) obtidos para uma geometria da zona de testes inicial (sistema não converge para quedas de pressão superiores a 1 Pa)	44
Figura 34 - Campos de velocidades ($m.s^{-1}$) (índice 1) e perfis de velocidades (índice 2) obtidos para as diferentes geometrias da zona de testes: a) caso 14, b) caso 15, c) caso 16, d) caso 17 e e) caso 18	45
Figura 35 - Representação esquemática do manequim térmico (vista de cima)	52
Figura 36 - Representação esquemática do conjunto das três ventoinhas adquiridas pelo CeNTI.....	53
Figura 37 - Curva característica de 1 ventoinha e das 3 ventoinhas em paralelo.....	53
Figura 38 - Criação de um atalho do FLUENT 6.3.21, definindo o processamento em paralelo	54
Figura 39 - Divisão do domínio em 2 partes (processado em 2 núcleos do processador).....	55
Figura 40 - Velocidade ($m.s^{-1}$) ao longo do domínio da grelha com a) 280×10^3 elementos; b) 520×10^3 elementos; c) 1×10^6 elementos	56
Figura 41 - Perfis de velocidade obtidos para as 3 simulações: a) Posição 1; b) Posição 2; c) Posição 3	57
Figura 42 - Requisitos de memória RAM versus número de pontos da grelha.....	58

Figura 43 - Perfis de velocidade obtidos para a grelha 2 (para ambos os parâmetros de convergência; PR1 e PR2 correspondem a resíduos inferiores a 10^{-5} e 10^{-3} , respectivamente), na posição: a) 1; b) 2; c) 3 (Figura 11)	60
Figura 44 - Código escrito para o <i>software</i> Tecplot que permite calcular a velocidade em todo o domínio em estudo e grava os resultados (Parte 1)	61
Figura 45 - Código escrito para o <i>software</i> Tecplot que permite calcular a velocidade em todo o domínio em estudo e grava os resultados (Parte 2)	62
Figura 46 - Código escrito para o <i>software</i> Tecplot que permite calcular a velocidade em todo o domínio em estudo e grava os resultados (Parte 3)	63
Figura 47 - Identificação das áreas a partir das quais se construiu a grelha 4 (Tabela 22); 1) Superfícies das ventoinhas e do V_1 ; 2) Superfícies do V_2 ; 3) Superfícies do V_3 ; 4) Superfície do V_4 ; 5) Superfícies do V_5 ; 6) Superfície do V_6 ; 7) Superfícies V_7	65
Figura 48 - Perfis de velocidade obtidos para os diferentes casos estudados (Tabela 22), nas posições: a) 1; b) 2; c) 3 (ver Figura 11)	67
Figura 49 - Testes de grelha: a) Local (linha a amarelo) onde se avaliaram os diferentes perfis de velocidade; b) Perfis de velocidade obtidos para os diferentes casos estudados (Tabela 26), na posição representada em a)	69
Figura 50 - Efeito dos diferentes parâmetros de turbulência nas: a) Curvas características do sistema para a $G_{zt, centro}$; b) Perfis de velocidade obtidos a montante das ventoinhas para a $G_{zt, centro}$; c) Curvas características do sistema para a $G_{zt, parede}$; d) Perfis de velocidade obtidos a montante das ventoinhas para a $G_{zt, parede}$	71

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Geometria da ventoinha	10
Tabela 2 - Geometria de todos os volumes da Figura 8	11
Tabela 3 - Características das grelhas utilizadas.....	12
Tabela 4 - Número de elementos das grelhas 1, 2 e 3	12
Tabela 5 - Opções seleccionadas no <i>Solver</i>	14
Tabela 6 - Opções seleccionadas no <i>Viscous Model</i>	15
Tabela 7 - Condições-fronteira	16
Tabela 8 - Número de pontos das grelhas e volumes definidos na <i>Moving Reference Frame (MRF)</i>	19
Tabela 9 - Geometria dos volumes apresentados na Figura 15.....	22
Tabela 10 - Diferentes Δt estudados.....	26
Tabela 11 - Opções seleccionadas no <i>Solver</i>	27
Tabela 12 - Memória RAM e tempo de simulação necessários para as simulações (casos 4, 5, 6 e 7).....	29
Tabela 13 - Principais considerações adoptadas no estudo do escoamento ao longo da câmara climática	31
Tabela 14 - Dimensões das áreas apresentadas na Figura 22	32
Tabela 15 - Condições-fronteira utilizadas no estudo do escoamento ao longo da câmara climática	33
Tabela 16 - Curvatura dos cantos da câmara.....	37
Tabela 17 - Dimensões das áreas apresentadas na Figura 29	40
Tabela 18 - Condições de operação (queda de pressão de operação e velocidade média na saída da zona de testes), para diferentes larguras da zona de testes.....	42
Tabela 19 - Geometria das paredes da zona de testes, a montante e jusante das ventoinhas 43	
Tabela 20 - Dimensões das áreas apresentadas na Figura 32	43
Tabela 21 - Condições de operação (queda de pressão de operação e velocidade média na saída do domínio), para as diferentes geometrias da zona de testes	46
Tabela 22 - Características das grelhas 4, 5 e 6	64

Tabela 23 - Número de elementos das grelhas 4, 5 e 6	64
Tabela 24 - Condições-fronteira utilizadas na simulação do escoamento promovido por duas ventoinhas	66
Tabela 25 - Considerações ponderadas sobre a largura da zona de testes, l_{zt}	68
Tabela 26 - Número de elementos das grelhas 7, 8 e 9	69
Tabela 27 - Parâmetros de turbulência	70
Tabela 28 - Principais resultados obtidos no processo iterativo das simulações (Parte 1)	72
Tabela 29 - Principais resultados obtidos no processo iterativo das simulações (Parte 2)	73

Notação e Glossário

a	Altura	m
c	Comprimento	m
e	Espessura	m
l	Largura	m
k	Energia cinética turbulenta	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
t	Tempo de simulação	s
v	Velocidade de escoamento do ar	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
A	Área	m^2
D	Diâmetro	m
P	Pressão	atm
Q	Caudal volumétrico	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
V	Volume	m^3
G	Geometria	(adimensional)
I_t	Intensidade de turbulência	(adimensional)
L_t	Comprimento característico dos vórtices	m
VR	Velocidade de rotação da ventoinha	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
v_mag	Velocidade de escoamento do ar (variável definida no Tecplot)	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Letras Gregas

ε	Velocidade de dissipação turbulenta	(adimensional)
ρ	Massa volúmica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
μ	Viscosidade dinâmica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

Índices

cc	Câmara climática
zt	Zona de testes

Lista de Siglas

<i>CFD</i>	Simulação da Dinâmica de Fluidos
<i>MRF</i>	<i>Moving Reference Frame</i>
<i>PR</i>	Precisão dos resultados
<i>RAM</i>	Memória de acesso aleatório
<i>Re</i>	Número de <i>Reynolds</i>

1 Introdução

Este capítulo apresenta uma breve descrição do projecto e do seu contributo para a empresa, assim como uma síntese dos principais capítulos da tese.

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

Com a crescente preocupação com a segurança e qualidade dos produtos, surge a necessidade de melhorar técnicas e métodos que avaliem fidedignamente o desempenho dos mais distintos produtos. Actualmente, recorre-se a técnicas de simulação de uso, onde variáveis como a temperatura, pressão e humidade são manipuladas, e a interacção entre o produto e esses mesmos parâmetros é avaliada. Durante estes testes, o escoamento do fluido é um parâmetro que requer bastante atenção uma vez que este influencia fortemente as transferências de calor e de massa. Assim sendo, o mais indicado é realizar todos os testes numa câmara climática, na qual o escoamento é controlado. Nesse sentido, o CeNTI pretende adaptar a geometria da sua câmara climática, através da introdução de um túnel de vento, de forma a permitir a imposição de uma gama mais alargada de velocidades. O presente trabalho visa o estudo e optimização da geometria de um túnel de vento através de ferramentas de *CFD*.

1.2 Contributos do Trabalho

O trabalho desenvolvido permitiu adquirir conhecimentos ao nível de ferramentas de *CFD* (FLUENT e COMSOL), pré-processamento (GAMBIT), pós-processamento (Tecplot), desenho (Solidworks) assim como do escoamento dos fluidos. A partir destes conhecimentos foi possível estudar o movimento de ventoinhas e a influência da geometria do túnel de vento sobre as características do escoamento do ar, na câmara climática.

O estudo desenvolvido trouxe ao CeNTI o conhecimento necessário para o estudo e optimização da geometria do túnel de vento.

1.3 Organização da Tese

A presente tese encontra-se dividida em seis capítulos.

No Capítulo 1, referente à Introdução, apresenta-se de uma forma geral o trabalho desenvolvido durante o projecto.

A Descrição do Problema é apresentada no Capítulo 2. Nesta secção, explica-se a necessidade deste estudo, identifica-se os principais parâmetros a analisar ao longo do trabalho e descreve-se a estratégia adoptada para a resolução do problema.

O Capítulo 3 diz respeito ao Estado da Arte. Este capítulo foca vários assuntos, desde a utilização de ferramentas de CFD para a análise do escoamento promovido por ventoinhas, até à descrição de diferentes geometrias de túneis de vento.

No Capítulo 4, referente à Descrição Técnica e Discussão de Resultados, são descritas todas as simulações realizadas e são apresentadas e discutidos os principais resultados.

As conclusões do trabalho desenvolvido são apresentadas no Capítulo 5.

Por fim, no Capítulo 6, avalia-se o trabalho realizado, identificam-se as limitações encontradas e propõem-se possíveis trabalhos futuros. Este capítulo consta ainda de uma apreciação final sobre o trabalho desenvolvido.

2 Descrição do Problema

O CeNTI tem uma câmara climática de fluxo laminar (Figura 1), que permite impor uma velocidade máxima de $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na zona de testes. Contudo, surgiu a necessidade de aumentar a velocidade dentro da câmara climática, de 0.4 para $7.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, de modo a corresponder às exigências do mercado. Para o efeito, a empresa adquiriu um conjunto de 3 ventoinhas, *ANEXO A.2*. No entanto, estas originam um escoamento bastante turbulento (Sulaiman, 2009), com grandes vórtices, pelo que a colocação das ventoinhas dentro da câmara não assegura a obtenção de um escoamento homogéneo dentro desta. Uma forma de ultrapassar este problema é adaptar a geometria interna da câmara, nomeadamente na zona de testes.

Neste capítulo, apresenta-se as principais dimensões da câmara climática, do manequim e das ventoinhas. Além disso, são descritos os principais objectivos assim como a estratégia adoptada para a resolução do problema.

2.1 Câmara climática, manequim térmico e ventoinhas

Nas avaliações de desempenho utiliza-se um manequim térmico e transpirável para simular as características dos humanos (*ANEXO A.1*). Nestas avaliações, estuda-se o desempenho de alguns produtos (peças de vestuário) quando expostos a condições ambientais controladas (dentro da câmara climática). Uma vez que se pretende alterar as condições de operação da câmara climática, é fundamental compreender os mecanismos que são utilizados para as controlar. Actualmente, parâmetros como a temperatura e o caudal de ar são controlados dentro da câmara, através de ventiladores, localizados no exterior da mesma. Neste caso, o ar entra e sai pelas paredes laterais da câmara, Figura 1, no máximo com uma velocidade igual a $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Contudo, deseja-se aumentar a velocidade até $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na zona de testes. Para tal, a geometria desta zona deverá assegurar um escoamento homogéneo quando este é promovido por 3 ventoinhas (*ANEXO A.2*). Por escoamento homogéneo entende-se que a velocidade deve ser relativamente uniforme ao longo do plano perpendicular ao escoamento e as linhas de correntes paralelas entre si (ver *subcapítulo 4.1.5*). Outro factor a ter em conta é o escoamento junto do manequim. Este não deve ser influenciado pelas paredes da zona de testes (isto influencia parâmetros de transferência de calor e de massa), tal como pelos vórtices gerados pelas ventoinhas.

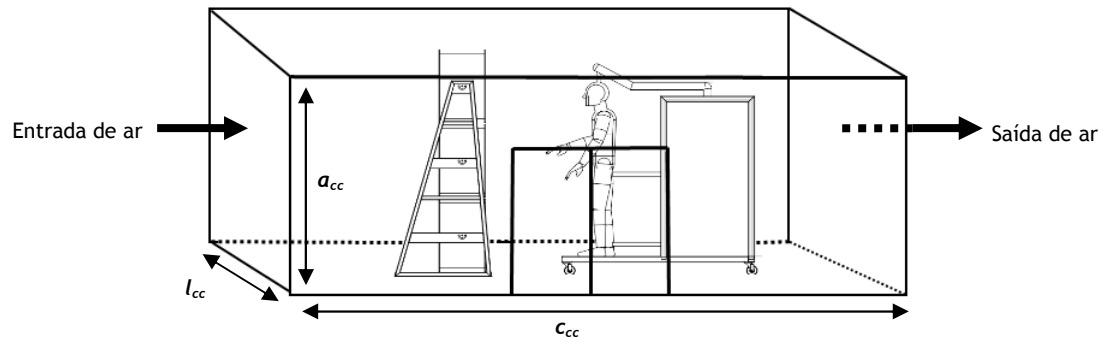


Figura 1 - Representação esquemática da câmara climática, do manequim térmico e das ventoinhas

2.2 Estratégia adoptada

Dois factores influenciam claramente o escoamento dentro da câmara climática: o facto do escoamento ser promovido por ventoinhas e a própria geometria da câmara. Assim sendo, dividiu-se o estudo pelas duas áreas de interesse: analisou-se o escoamento promovido por uma ou mais ventoinhas e o escoamento ao longo da câmara climática. Em ambos os casos, utilizaram-se ferramentas de *CFD* para prever e analisar as características do escoamento do ar, de um modo rápido e pouco dispendioso.

3 Estado da Arte

O presente projecto consistiu no estudo e optimização da geometria da câmara climática, que o CeNTI detém (*capítulo 2*), através da introdução de um túnel de vento. Neste caso, pretende aumentar-se a velocidade na zona de testes, através da utilização de um conjunto de ventoinhas. Para o conseguir fazer, deve realizar-se um estudo prévio sobre o estado da arte das várias tecnologias inerentes ao projecto. Assim sendo, exploraram-se dois temas principais: as ventoinhas e os túneis de vento.

3.1 Ventoinhas

Quando se pretende mover ar ou outro tipo de gás utilizam-se habitualmente ventoinhas (Company, 2000; Munson, 1998). Tipicamente, as ventoinhas operam com uma velocidade de rotação muito baixa e são capazes de movimentar grandes volumes de gás. Como o fluido de interesse é um gás, a sua densidade altera-se quando atravessa a ventoinha, embora esta alteração nunca exceda os 7 % (Munson, 1998). No caso do ar, esta mudança representa uma alteração da pressão em 0.06 atm (Munson, 1998). Por isso, quando se utilizam ventoinhas considera-se que a densidade do ar é constante e a análise do escoamento é baseada no conceito dos fluidos incompressíveis.

O caudal que uma ventoinha consegue debitar depende do tipo de ventoinha e das características do sistema. Para determinar as condições de operação de um conjunto ventoinha + sistema recorre-se à curva característica da ventoinha e à curva de operação do sistema, onde se identifica o ponto de operação do mesmo, Figura 2 (intersecção entre a curva do sistema e a curva característica da ventoinha) (Company, 2000; Moonen, 2006; Munson, 1998). Na realidade, não existe apenas um ponto de operação mas sim uma região de operação, pois o aumento da velocidade da ventoinha aumenta quer o caudal quer a pressão de operação (Moonen, 2006).

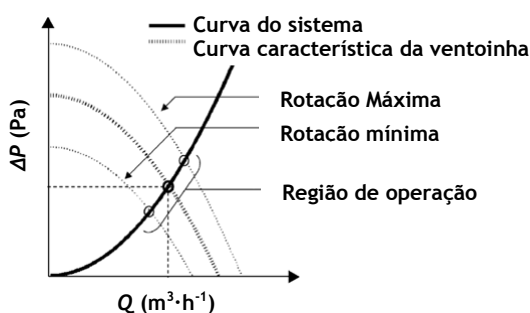


Figura 2 - Curva de operação de uma ventoinha, consoante a velocidade de rotação imposta (Moonen, 2006)

Actualmente, já existem alguns estudos sobre o escoamento promovido por ventoinhas/turbomáquinas, através de ferramentas de CFD. Os casos analisados, (FLUENT,

Backward-Inclined Centrifugal Fan, 2001; FLUENT, *Squirrel Cage Blower*, 2001; Meyer, 2001; Sulaiman, 2009), apresentam alguns pontos em comum, como por exemplo, a avaliação do escoamento em estado estacionário, a consideração do ar como um fluido incompressível, a utilização do modelo de turbulência $k-\epsilon$ (equações da continuidade e momento) e o uso do modelo *MRF* (*moving reference frame*), do FLUENT, para simular o movimento das pás da turbomáquina.

Nos artigos (FLUENT, *Backward-Inclined Centrifugal Fan*, 2001; FLUENT, *Squirrel Cage Blower*, 2001) são apresentadas simulações, em estado estacionário, do escoamento promovido por um ventilador centrífugo, nas quais se utiliza o modelo *MRF* para impor o movimento das suas pás. Estes autores reportaram a obtenção de resultados numéricos próximos dos experimentais (desvio de 12 %). Contudo, no artigo (FLUENT, *Backward-Inclined Centrifugal Fan*, 2001), verificou-se que o modelo *MRF* era desadequado para escoamentos muito instáveis. Além disso, estes artigos apresentam alguma informação sobre os *solvers*, condições-fronteira e definições do *software* (FLUENT) utilizados.

3.2 Túneis de vento

Os túneis de vento são uma ferramenta de pesquisa muito usual na investigação aerodinâmica. Estes são utilizados para estudar o efeito do escoamento do ar através de objectos sólidos. A informação resultante destes estudos é utilizada para melhorar o *design* dos objectos em análise (Trefny, 2002). Nesse sentido, uma câmara climática em que a ventilação seja controlada, pode ser vista como um túnel de vento.

É usual a utilização de túneis de vento para testar aviões, porém existem outros objectos que também são testados em túneis de vento. Na Figura 3 apresentam-se alguns exemplos (refira-se que os objectos testados podem ser reais ou protótipos, em pequena escala).

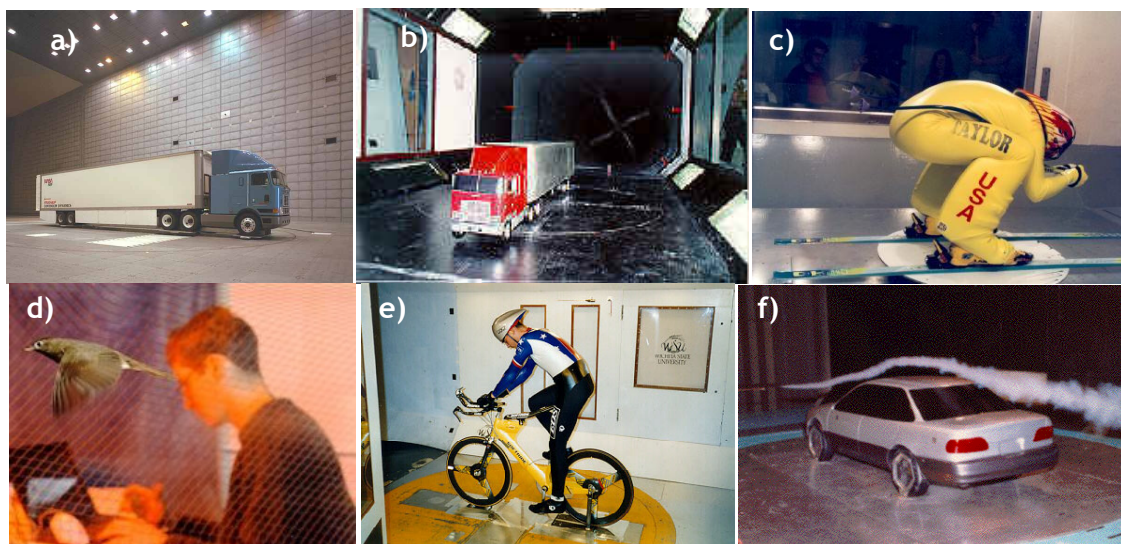


Figura 3 - Exemplo de objectos testados em túneis de vento: a) Camião real na NASA Ames; b) Protótipo de camião na Universidade A & M do Texas; c) Esquiador na Universidade de Washington; d) Pássaro vivo na Universidade de Lund (Suécia); e) Ciclista na Universidade de in Witchita State; f) Carro na Universidade de Maryland (Trefny, 2002)

Os túneis de vento são desenhados com propósitos específicos e para determinadas gamas de velocidade. Na Figura 4 encontram-se apresentados os dois tipos de túnel de vento existentes (em circuito aberto e em circuito fechado).

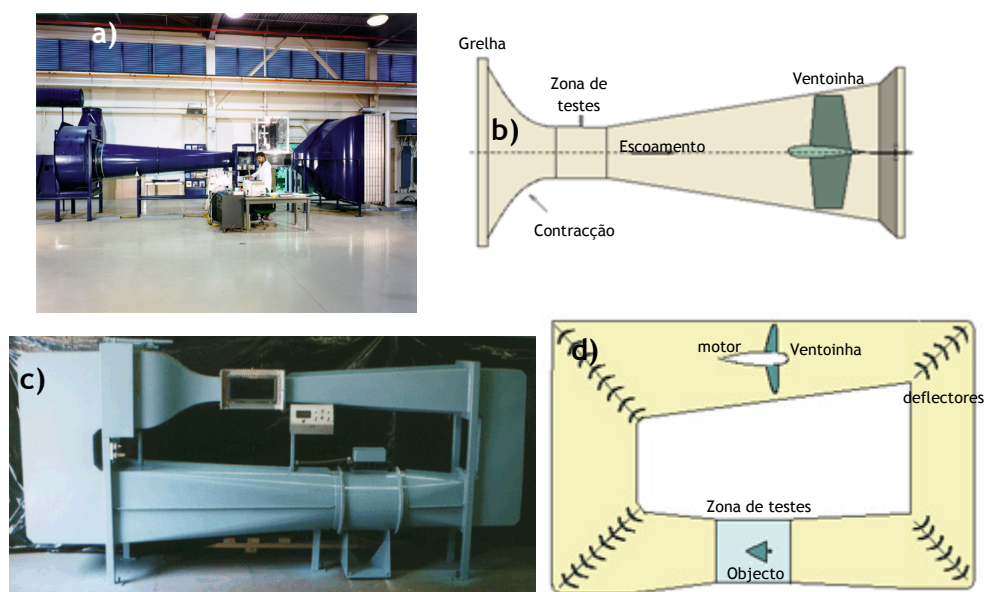


Figura 4 - Diferentes tipos de túneis de vento: a) Circuito aberto; b) Esquema de um túnel de circuito aberto; c) Circuito fechado; d) Esquema de um túnel de circuito fechado (NASA, 2010; Trefny, 2002)

No túnel de vento de circuito aberto, Figura 4a e b, o ar entra pela contracção de entrada, que acelera o ar até à zona de testes. Nesta zona coloca-se o modelo a ser testado e simulam-se as condições do vento natural (NASA, 2010; Trefny, 2002; Uzueli). A grelha indicada na Figura 4b é responsável, basicamente, pela uniformização do caudal de ar no túnel. No túnel de vento de circuito fechado, Figura 4c e d, também é habitual a utilização de grelhas (a montante da zona de testes) para uniformizar o escoamento (NASA, 2010;

NASA). Além disso, nos cantos do túnel de vento colocam-se deflectores para ajudar a direccionar o escoamento, Figura 4d.

O relatório técnico de Lindgren e Johansson (Lindgren, 2002) apresenta detalhes bastante interessantes sobre o *design* e características de um túnel de vento de circuito fechado. Salientam-se alguns detalhes: o rácio das áreas entre a zona a montante da zona de testes, e a zona de testes é igual a 9; antes da zona de testes existem 6 grelhas (ver Figura 5); o comprimento da zona de testes é igual a 4 m (só é possível este comprimento devido à adição de deflectores nos cantos); a velocidade máxima é de $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na zona de testes e nos cantos do túnel, existem deflectores correspondentes a $\frac{1}{4}$ de círculo.

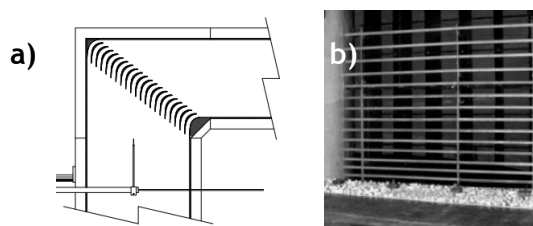


Figura 5 - Estruturas utilizadas para direccionar/uniformizar o escoamento, em túneis de vento: a) deflectores (*vanes*) (Lindgren, 2002); b) grelhas (*screens*) (Moonen, 2006)

Para o estudo do escoamento ao longo de um túnel de vento, é usual simular-se o escoamento somente ao longo da zona de testes, no entanto esta abordagem é inadequada (Moonen, 2006). Moonen (2006), utilizando o FLUENT 5.4, simularam o escoamento da zona de testes, considerando apenas a zona de testes (abordagem convencional) assim como todo o túnel (Figura 6). Ao simular todo o túnel de vento, obtêm-se resultados 2 a 4 vezes melhores do que os obtidos pela análise convencional. Neste caso, os resultados da simulação do escoamento, ao longo de todo o túnel de vento, aproximam-se dos resultados reais (desvio de 10 %). Como condições-fronteira à entrada da zona de testes, é utilizada a condição *fan boundary condition*, que impõe uma queda de pressão inicial nessa zona, e ao longo das iterações o *software* vai recalculando a pressão de entrada (através da curva característica da ventoinha) até encontrar a pressão de operação do sistema (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009).

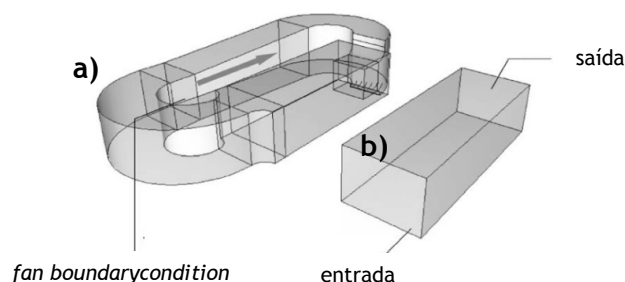


Figura 6 - Túnel de vento referido em (Moonen, 2006): a) Geometria de todo o túnel de vento, com a condição-fronteira *fan boundary condition*; b) zona de testes do túnel de vento, com a entrada e saída definidas como *fan boundary condition*

4 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

Este projecto surge da necessidade de obter um escoamento homogéneo, com uma velocidade da ordem dos $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, na zona de testes da câmara climática (ver *capítulo 2*). Para o efeito, analisaram-se as características do escoamento promovido por uma ventoinha (estado pseudo-estacionário e transiente) e duas ventoinhas (estado pseudo-estacionário), assim como a influência da geometria da câmara climática e da zona de testes, sobre o escoamento.

É de salientar que, para garantir a coerência entre todas as tabelas e gráficos, optou-se por utilizar o ponto como separador decimal (*software* Tecplot e COMSOL apresentam imagens dos resultados com o ponto como separador decimal).

4.1 Escoamento promovido por uma ventoinha (estado pseudo-estacionário)

O escoamento de ar num túnel de vento é particularmente complexo, pelo que é difícil identificar os principais parâmetros que o influenciam. Sendo assim, em vez de olhar para o túnel como um todo, decompôs-se o domínio em problemas mais pequenos e simples. A primeira questão que se colocou foi como se iria simular o escoamento promovido por uma ventoinha. Neste caso, é preciso definir o movimento da ventoinha, o qual origina uma queda de pressão e consequentemente o escoamento do fluido (ar).

O *software* da simulação da dinâmica de fluidos (CFD) seleccionado foi o FLUENT 6.3.21 devido às suas potencialidades para impor o movimento de sólidos (ventoinhas, pás, etc.). No estudo do escoamento ao longo da câmara climática, é relevante conhecer as características do escoamento médio, que as ventoinhas originam. Assim sendo, de entre os vários modelos existentes, escolheu-se o modelo *MRF* (*Moving Reference Frame*) para simular o movimento da ventoinha (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009). Os resultados obtidos com este modelo podem ser considerados como resultados em estado pseudo-estacionário, ou seja uma aproximação do estado-estacionário, onde cada célula¹ pode assumir diferentes velocidades de rotação e/ou translação. Estes resultados são os que se obteriam se se parasse o movimento da zona com rotação numa posição específica e se observasse instantaneamente o escoamento (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009). Para o efeito, existem duas zonas distintas, uma fixa e outra com movimento (a qual engloba a ventoinha e o fluido que a envolve), Figura 7.

¹ Elemento da grelha

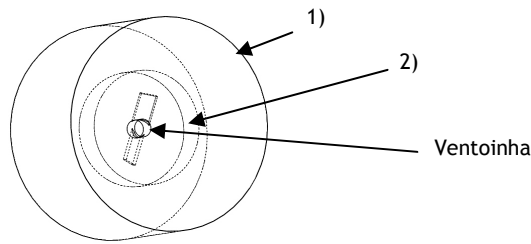


Figura 7 - Zonas definidas em diferentes *frames* no FLUENT; 1) zona definida na *frame* de referência; 2) zona definida na MRF (zona com rotação)

Os próximos subcapítulos descrevem os principais pontos abordados durante o estudo do efeito da rotação da ventoinha sobre o escoamento.

4.1.1 Geometria adoptada

A geometria estudada tem as seguintes características,

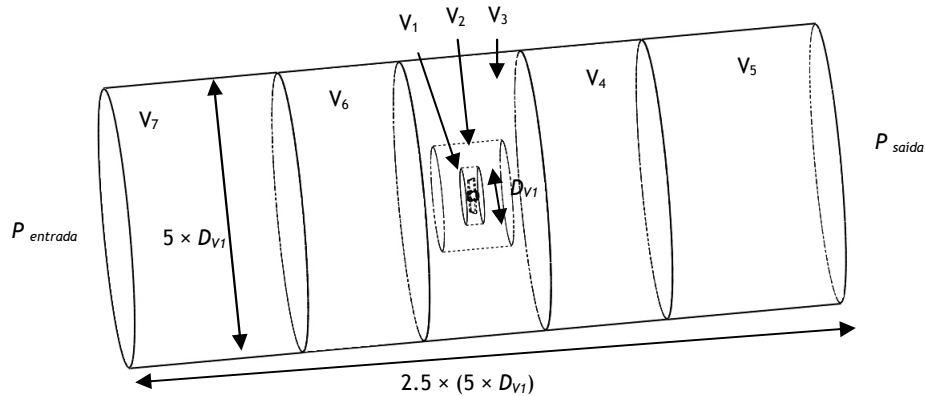


Figura 8 - Geometria adoptada (dimensões dos volumes encontram-se na Tabela 2)

A construção da estrutura teve por base os seguintes pressupostos:

- Escala em milímetros;
- Ventoinha simples (apenas com 2 pás);
- Pressão à entrada igual à pressão à saída ($P_{entrada} = P_{saida} = P_{atm}$);
- Paredes do tubo não afectam o escoamento junto da ventoinha (diâmetro do tubo é 5 vezes superior ao diâmetro D_{v1}).

Nesta etapa do projecto, consideraram-se hipotéticas as dimensões da estrutura e ventoinha (Tabela 1), porque estes testes iniciais visavam somente a observação do escoamento promovido por uma ventoinha e a identificação dos parâmetros mais relevantes.

Tabela 1 - Geometria da ventoinha

D (m)	3.0×10^{-2}
$c_{pás}$ (m)	1.0×10^{-2}
$l_{pás}$ (m)	0.5×10^{-2}
$e_{pás}$ (m)	1.0×10^{-3}

Tabela 2 - Geometria de todos os volumes da Figura 8

Volumes	D (m)	l (m)
V_1	3.2×10^{-2}	1.0×10^{-2}
V_2	6.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}
V_3, V_4, V_6	1.6×10^{-1}	7.0×10^{-2}
V_5, V_7	1.6×10^{-1}	1.0×10^{-1}

Definida a geometria e dimensões da estrutura procedeu-se à sua composição e respectiva construção da grelha.

4.1.2 Construção da geometria

O modelo da ventoinha foi construído no software SolidWorks 2010 e gravado no formato STEP.

Para simular a rotação da ventoinha é necessário impor que a ventoinha e a zona que a rodeia estejam englobadas na mesma *frame*² (Figura 7 e Figura 9). Além disso, ao construir a estrutura, deve envolver-se esta zona com rotação, com outra zona com fluido (*frame* de referência; ver Figura 7 e Figura 9).

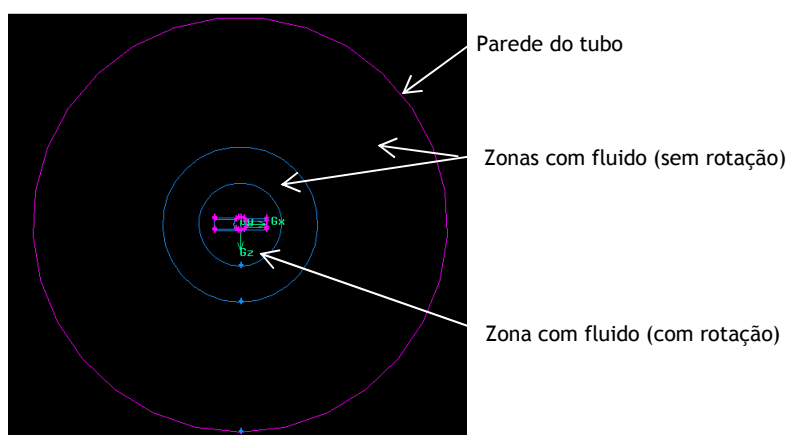


Figura 9 - Representação esquemática da ventoinha e zonas que a rodeiam (corte horizontal do tubo, no GAMBIT)

Destaca-se que não são considerados fenómenos de transferência de calor entre a ventoinha e o ar envolvente, pelo que é apenas necessário considerar a presença das paredes da ventoinha na geometria em estudo. Por uma questão de simplificação da geometria, subtraiu-se o volume da ventoinha aos volumes que a rodeiam. Após a subtração da

² No FLUENT, uma *frame* está associada a um eixo de coordenadas

ventoinha, foi necessário definir a interface entre as duas zonas (V_1 e V_2). É de notar que este procedimento aplica-se a todos os volumes que tenham pelo menos uma face em comum.

Os restantes volumes foram construídos segundo as dimensões apresentadas anteriormente na Tabela 2.

4.1.3 Construção da grelha

Observando a estrutura em estudo, Figura 8, presume-se que a convergência será mais difícil nalgumas porções da mesma, nomeadamente, nas zonas imediatamente antes e após a ventoinha bem como junto às suas superfícies. Nestes locais, a grelha será mais refinada, ao contrário das zonas mais afastadas da ventoinha (entrada/saída do fluido) onde não existe a necessidade de ter um elevado número de elementos de grelha.

As características e o número de pontos das grelhas utilizadas encontram-se compilados na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 - Características das grelhas utilizadas

Volume	Elements ³	Type	Spacing		
			Grelha 1	Grelha 2	Grelha 3
V_1 *			Interval size: 1	Interval size: 0,5	Interval size: 0,5
V_2			Interval size: 1	Interval size: 1	Interval size: 0,6 **
V_3			Interval size: 5	Interval size: 2	Interval size: 1,5 **
V_4	Tri	Pave	Interval count: 100	Interval count: 100	Interval count: 100
V_5			Interval size: 10	Interval size: 10	Interval size: 10
V_6			Interval count: 100	Interval count: 100	Interval count: 100
V_7			Interval size: 10	Interval size: 10	Interval size: 10

* Além das superfícies a montante e a jusante da ventoinha, definiram-se os elementos da grelha nas paredes da ventoinha

** Menor valor permitido

Tabela 4 - Número de elementos das grelhas 1, 2 e 3

Grelha	Nº de Elementos
1	3×10^5
2	5×10^5
3	1×10^6

De seguida são apresentadas as superfícies utilizadas na construção das grelhas, Figura 10.

³ Elements, Type e Spacing são opções do GAMBIT disponíveis para definir as características dos elementos da grelha

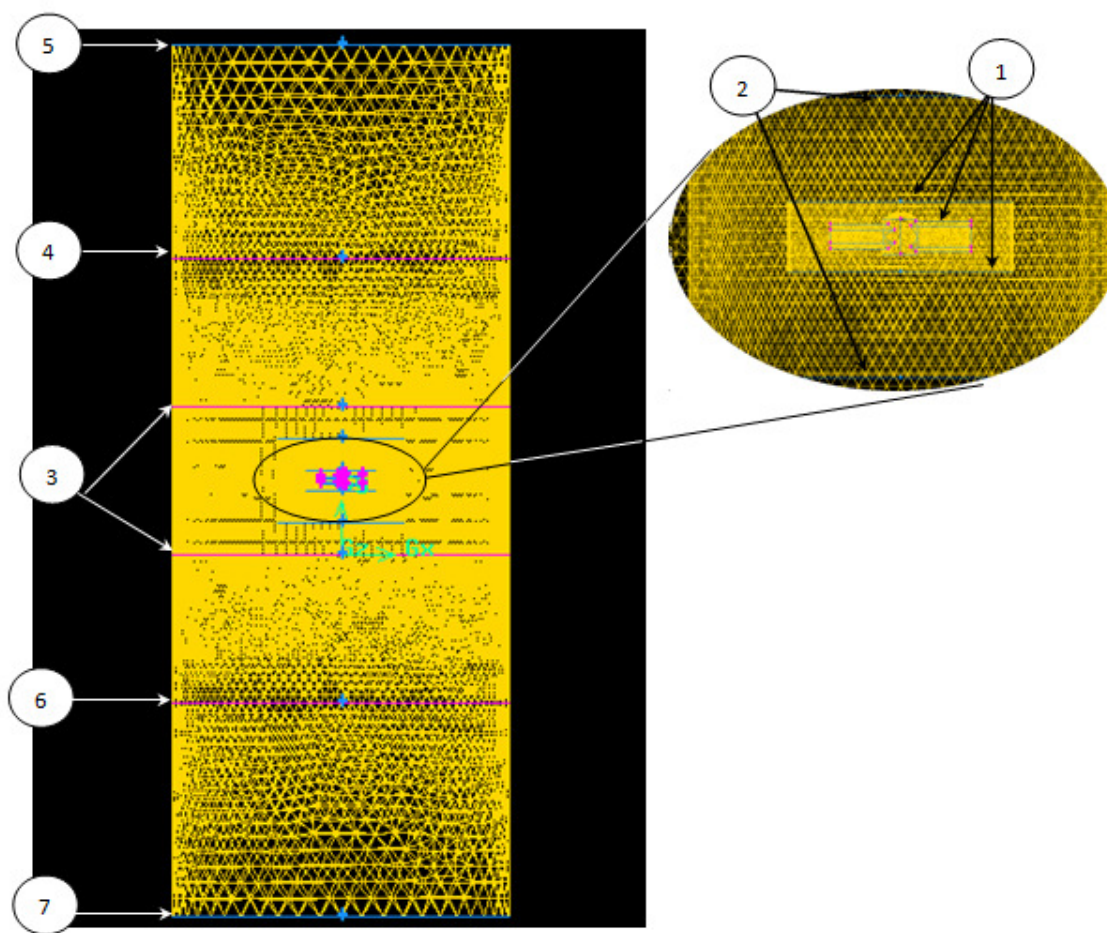


Figura 10 - Identificação das áreas a partir das quais se construiu a grelha 2 (Tabela 3); 1) Superfícies da ventoinha e do V_1 , 2) Superfícies do V_2 ; 3) Superfícies do V_3 ; 4) Superfície do V_4 ; 5) Superfície do V_5 ; 6) Superfície do V_6 ; 7) Superfície do V_7

Antes de proceder à construção da grelha em todo o volume é aconselhável definir inicialmente o refinamento nas várias áreas de forma a diminuir a probabilidade de aparecimento de elementos com pouca qualidade. Durante a construção da grelha, teve-se o cuidado de averiguar a qualidade dos elementos, quer nas superfícies quer em todos os volumes da estrutura. Isto porque, as equações (de momento e turbulência) são resolvidas no centro dos elementos da grelha (FLUENT, *Fluent Software Training*, 2001; ANSYS, ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2009) e, como tal, a sua geometria influencia o tempo de simulação. Caso os elementos da grelha não consistam em poliedros congruentes (faces iguais) o cálculo do centro dos elementos da grelha será dificultado e consequentemente o tempo da simulação aumentará (FLUENT, *Fluent Software Training*, 2001). Neste sentido, a qualidade e ajuste da grelha ao domínio em questão são 2 pontos determinantes na convergência dos resultados. Neste caso, os elementos da grelha têm uma qualidade inferior a 0.86 (qualidade deve ser inferior a 0.90⁴ (FLUENT, *Fluent Software Training*, 2001)). Os

⁴ Qualidade = 0 (alta qualidade); qualidade = 1 (elementos da grelha com muito baixa qualidade; não aconselhável)

elementos da grelha foram definidos em todos os volumes como elementos *Tet/ Hybrid* do tipo *TGrid*.

Antes de prosseguir para a simulação propriamente dita, definem-se ainda no GAMBIT as condições-fronteira e as zonas do fluido, com e sem movimento. Deste modo, ao importar a grelha, o FLUENT identifica as zonas discriminadas e especifica, consoante o tipo de condição-fronteira seleccionado, os parâmetros que deverão ser introduzidos na plataforma.

4.1.4 Configuração da simulação

Após a construção da grelha no GAMBIT, importou-se o ficheiro para o FLUENT, no qual se definaram os modelos de escoamento, os materiais considerados, as condições-fronteira, os *solvers* e os critérios de convergência pretendidos. Depois de verificar a qualidade da grelha e de redimensionar a escala da grelha, definiu-se o *solver* (Tabela 5) e o modelo de viscosidade adequados ao problema (Tabela 6).

Tabela 5 - Opções seleccionadas no Solver

Opções no Solver	Razão da escolha
<i>Solver -> Pressure Based</i>	Aconselhável para o escoamento de fluidos incompressíveis (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009) (ANEXO A)
<i>Velocity Formulation -> Absolute</i>	Adequado para situações onde apenas uma pequena parte do volume de fluido se encontra a rodar (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
<i>Gradient Option -> Green-Gauss Cell Based</i>	Alternativa menos precisa (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009; ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide</i> , 2009) para diminuir o consumo de memória
<i>Formulation -> Implicit</i>	Pré-definido (<i>implicit</i> é o mais preciso) (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide</i> , 2009)
<i>Time -> Steady</i>	Simulação menos morosa; os resultados obtidos neste estado pseudo-estacionário são uma boa aproximação da realidade (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
<i>Porous Formulation -> Superficial Velocity</i>	Só existe uma fase (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide</i> , 2009)

Tabela 6 - Opções seleccionadas no *Viscous Model*

Opções no <i>Viscous Model</i>	Razão da escolha
Model -> $k-\varepsilon$	Adequado para problemas de escoamento turbulento (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
$k-\varepsilon$ model -> RNG	De entre os 3 modelos disponíveis, o que apresenta resultados mais precisos é o <i>Realizable</i> , no entanto, não é aconselhável utilizá-lo quando se recorre a uma <i>moving reference frame</i> . Assim, optou-se pelo modelo RNG, o segundo modelo com resultados mais precisos, que contempla o efeito da rotação durante o cálculo dos parâmetros de turbulência (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide</i> , 2009)
RNG Options -> Swirl Dominated Flow	Apropriado quando o escoamento é promovido pela rotação da ventoinha (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
Near-Wall Functions -> Non-Equilibrium Wall Functions	Aconselhável para Re elevados e escoamentos complexos (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009) (imposição de rotação)
Model Constants	Swirl Factor 0.07 é um valor pré-definido (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)

De seguida, definiu-se o material (fluido e/ou sólido) que constitui o domínio de simulação. Neste caso em concreto, apenas se definiu o fluido (ar) porque, das propriedades do sólido (paredes dos tubos e da ventoinha), é somente necessário especificar a rugosidade das paredes e a condição de não deslizamento nas mesmas (não importa o tipo de material).

O passo seguinte consiste em definir as condições-fronteira do sistema. Chegado a este ponto, é preciso estabelecer alguns parâmetros do regime turbulento. De modo a garantir que o regime seria totalmente turbulento, impôs-se um número de *Reynolds* (Re) superior a 4000 (Munson, 1998). O Re escolhido foi então de 5000, o que corresponde a uma velocidade de escoamento de 3.7 m.s^{-1} ⁵. Esta escolha afecta a intensidade de turbulência⁶, I , parâmetro requerido pelo modelo de turbulência ($k-\varepsilon$) (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009). A intensidade de turbulência pode ser estimada através da Equação 4.1, quando o escoamento ocorre ao longo de um tubo circular (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009).

$$I = \frac{\sqrt{v'}}{v_{\text{média}}} = 0,16 \times (Re_{DH})^{-1/8} \quad (4.1)$$

em que I é a intensidade de turbulência, v' é a velocidade média de flutuação, $v_{\text{média}}$ é a velocidade média de escoamento e Re_{DH} é o número de *Reynolds* calculado para o diâmetro hidráulico, D_H . Neste caso, o diâmetro hidráulico coincide com o diâmetro das tubagens visto estas terem uma secção circular (Munson, 1998).

As condições-fronteira utilizadas são apresentadas na Tabela 7.

⁵ $\rho_{\text{ar}} = 1.225 \text{ kg.m}^{-3}$ e $\mu_{\text{ar}} = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ (valores retirados do FLUENT, quando $T = 20^\circ\text{C}$)

⁶ Intensidade de turbulência, I , é um parâmetro que quantifica a turbulência

Tabela 7 - Condições-fronteira

Zona	Tipo de condição-fronteira	Considerações
Fluido	<i>Fluid</i>	<i>Material Name: Air</i> <i>Motion Type: Stationary</i>
Fluido com rotação	<i>Fluid</i>	<i>Material Name: Ar</i> <i>Motion Type: Moving Reference Frame</i> <i>Rotarion-Axis Origin: (0,0,0)</i> <i>Rotarion-Axis Direction: (0,1,0)</i> <i>Speed (rad/s): 365</i>
Paredes da ventoinha	<i>Wall</i>	<i>Wall motion: Moving Wall</i> <i>Motion: Relative to Adjacent Cell Zone</i> <i>Rotational</i> <i>Speed (rad/s): 0</i> <i>Rotarion-Axis Origin: (0,0,0)</i> <i>Rotarion-Axis Direction: (0,1,0)</i> <i>Shear Condition: No-Slip</i> <i>Wall Roughness: Roughness Constant= 0.5 *</i>
Entrada	<i>Pressure-Inlet</i>	<i>Pressão atmosférica</i> <i>Back Flow Turbulent Intensity (%) = 6 % **</i> <i>Back Flow Hydraulic Diameter = 0.16 m</i>
Saída	<i>Pressure-Outlet</i>	<i>Pressão atmosférica</i> <i>Back Flow Turbulent Intensity (%) = 6 % **</i> <i>Back Flow Hydraulic Diameter = 0.16 m</i>

* Valor pré-definido

** Intensidade de turbulência estimada pela Equação 4.1

De entre as zonas citadas na Tabela 7, é de realçar as 3 primeiras: Fluido, Fluido com rotação e Paredes da ventoinha. O domínio foi dividido de forma a ser possível definir qual a zona do fluido com movimento (Fluido com rotação) e a zona de fluido de referência, na qual não se impõe movimento (Fluido). Além disso, como a zona com movimento inclui as paredes da ventoinha, foi necessário definir como estas se movem relativamente às células adjacentes que as envolvem (ver esquema da Figura 7 e Figura 8). Relativamente à velocidade de rotação da ventoinha (neste caso é o fluido que se movimenta e as paredes da ventoinha descrevem o mesmo movimento que o fluido envolvente), estipulou-se uma rotação de 365 rad.s^{-1} (o que equivale a 58 voltas completas por segundo).

Quanto às opções do *Solver*, utilizaram-se os parâmetros pré-definidos pelo programa (*solver* de primeira ordem), visto o objectivo destes testes iniciais consistir em testar o consumo de memória versus o número de pontos da grelha. Relativamente ao critério de convergência, considerou-se como critério de paragem do cálculo 10^{-3} (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009) para todos os resíduos verificados (continuidade, componentes da velocidade, energia cinética turbulenta e velocidade de dissipação da energia cinética turbulenta). Quanto ao modo de processamento, este foi em paralelo uma vez que o número de pontos da grelha é elevado (ANEXO B).

Por fim, inicializou-se todo o domínio. Para o fazer, impôs-se que, no início da simulação, as condições existentes na entrada, prevalecessem sobre todo o domínio. Chegado a este ponto, a simulação foi iniciada.

4.1.5 Velocidade de rotação da ventoinha

Para a optimização do escoamento promovido por uma ventoinha, é necessário conhecer como a velocidade de rotação da ventoinha afecta o escoamento. Nesse sentido, testaram-se diferentes velocidades de rotação (*VR*) e analisou-se como estas influenciam as características do escoamento, Figura 12 e Figura 13. Neste ponto, é necessário ter em atenção que os resultados da simulação dependem da grelha utilizada. Como tal, realizaram-se testes de grelha (*ANEXO C.1*), que permitem identificar a grelha que apresenta o melhor compromisso entre a exactidão dos resultados e a rapidez da simulação, neste caso, a grelha 2 (Tabela 4). Além disso, verificou-se que as simulações devem ser realizadas considerando precisão simples (*ANEXO C.2*) e impondo, como critério de paragem das simulações, resíduos inferiores a 10^{-3} (*ANEXO C.3*).

Os resultados obtidos para as diferentes velocidades de rotação são comparados em 3 posições específicas da grelha, indicadas na Figura 11.

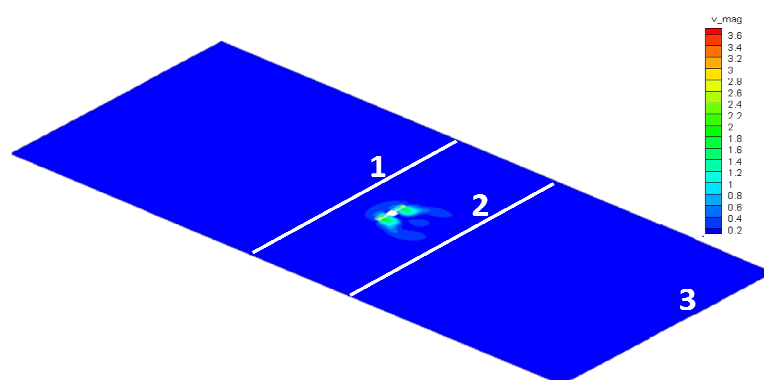


Figura 11 - Locais onde se avaliaram os perfis de velocidade (ao longo do plano que atravessa o centro do tubo): Posição 1) Montante da ventoinha; Posição 2) Jusante da ventoinha; Posição 3) Saída do tubo

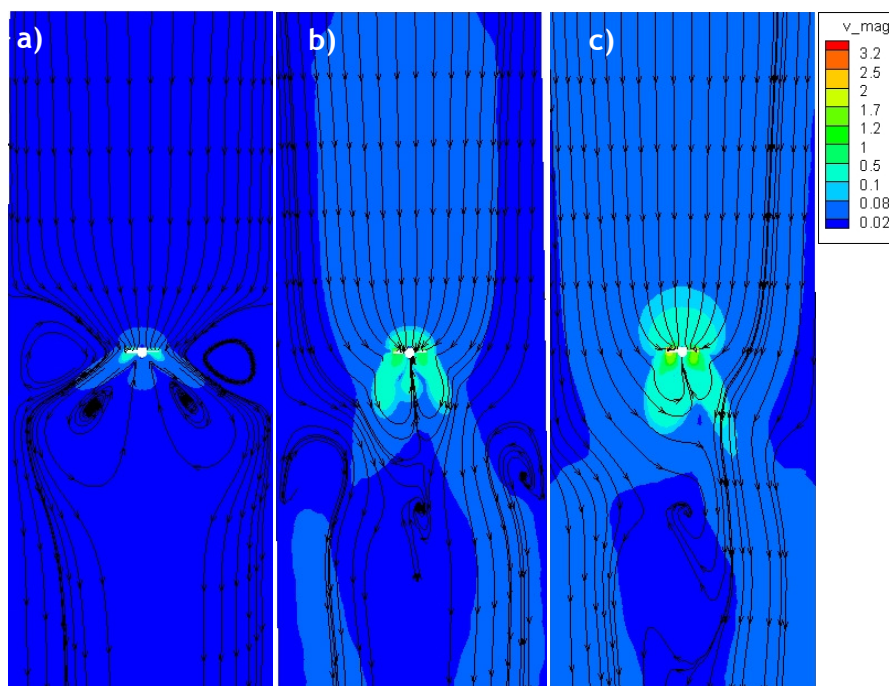


Figura 12 - Campo de velocidades (m.s^{-1}) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro do tubo), obtidas para diferentes velocidades de rotação da ventoinha: a) $VR1 = 36.5 \text{ rad.s}^{-1}$ (6 rotações por segundo); b) $VR2 = 180 \text{ rad.s}^{-1}$ (29 rotações por segundo); c) $VR3 = 365 \text{ rad.s}^{-1}$ (58 rotações por segundo)

A Figura 12 apresenta, além do campo de velocidades ao longo do plano que atravessa o centro do tubo, as linhas de corrente do fluido. Por definição, as linhas de corrente do fluido são tangentes aos vectores velocidade dos elementos de fluido em escoamento, num dado instante (Munson, 1998). Neste caso em particular (estado pseudo-estacionário), a orientação das linhas de corrente é fixa no tempo e as trajectórias das partículas coincidem com as linhas de corrente (Munson, 1998). É de salientar que algumas das linhas de corrente (da Figura 12) aparentam terminar no meio do domínio, contudo, o que acontece é que a partícula segue uma trajectória diferente da do plano. Os vórtices originados durante o escoamento não são evidentes na Figura 12, visto que apenas se representa um plano que atravessa o tubo. O mais indicado seria estudar o escoamento ao longo de todo o volume do tubo. Embora os resultados não sejam aqui representados em 3 dimensões (análise da imagem resultante extremamente complexa em modo estático) observou-se que a jusante da ventoinha o escoamento é mais caótico uma vez que apresenta bastantes vórtices.

A análise das linhas de corrente da Figura 12 revela que quanto maior é a velocidade de rotação da ventoinha mais axial se torna o escoamento. A Figura 13 torna evidente as diferenças entre o escoamento promovido por uma ventoinha com VR de 365 rad.s^{-1} (58 rotações por segundo) relativamente ao escoamento promovido com as restantes velocidades de rotação.

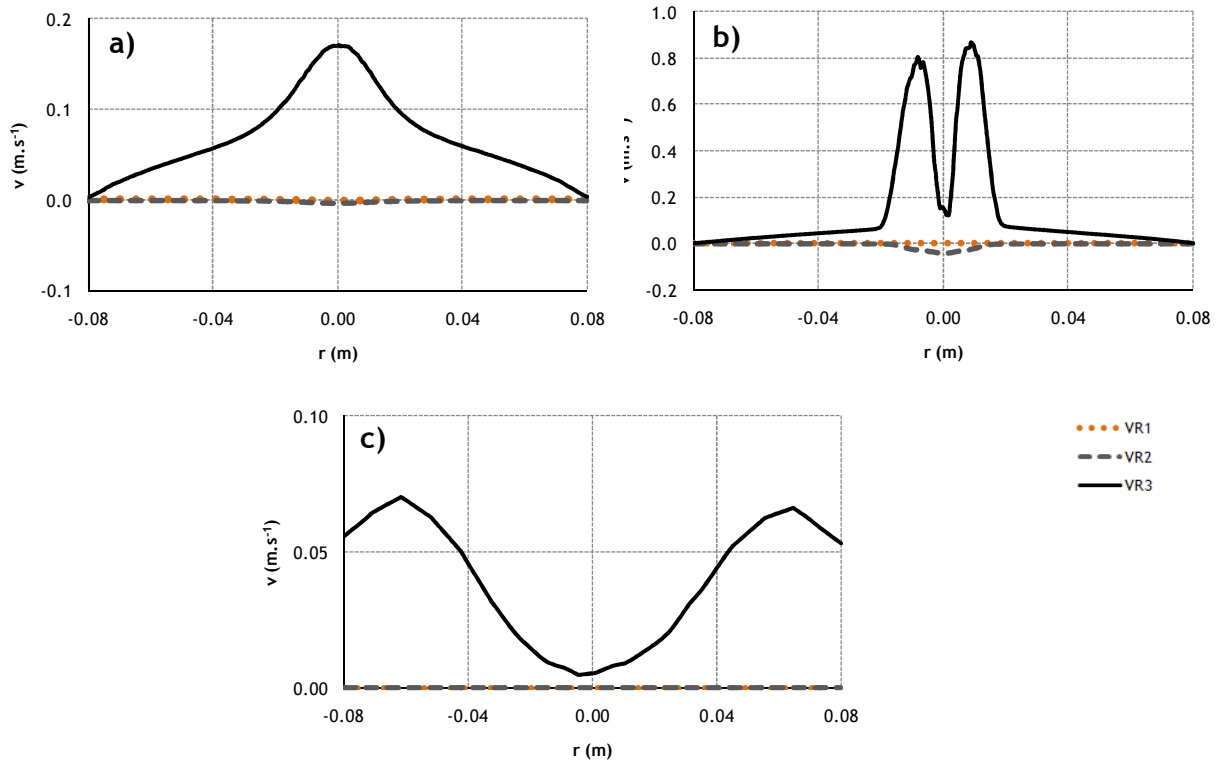


Figura 13 - Perfis de velocidade obtidos para as diferentes velocidades de rotação da ventoinha, na posição: a) 1; b) 2; c) 3 (ver Figura 11)

Para cada velocidade testada, foram necessários 2 GB de memória RAM e, em média, 6h para concluir cada simulação. Um estudo prévio, descrito no ANEXO C.2, permitiu averiguar se os requisitos de memória RAM disponíveis eram suficientes para realizar as simulações pretendidas.

4.1.6 Volume definido na *Moving Reference Frame*

Para impor o movimento da ventoinha é necessário definir a rotação de um determinado volume de fluido (que englobe as pás da ventoinha; Figura 7 e Figura 8). No entanto, as dimensões desse volume podem influenciar os resultados da simulação. Por isso, testaram-se 2 volumes com diferentes tamanhos, a rodar com a mesma VR (365 rad.s^{-1}). Na Tabela 8, encontram-se as principais características das grelhas consideradas (volume V_1 e V_2 representados na Figura 8).

Tabela 8 - Número de pontos das grelhas e volumes definidos na *Moving Reference Frame* (MRF)

Caso	Nº pontos	Volume definido na MRF
1	5×10^5	V_1
2	5×10^5	V_2 e V_1
3	1×10^6	V_2 e V_1

Avaliaram-se os perfis de velocidade (Figura 14) nas 3 posições assinaladas na Figura 11.

Na Figura 14, verifica-se que no caso 1 e 2 os perfis de velocidade são um pouco diferentes, principalmente à saída do tubo (Figura 14c). Em ambos os casos, as grelhas têm o mesmo número de pontos e as mesmas características (Tabela 8), no entanto os volumes definidos na *MRF* são diferentes (Tabela 8), o que significa que a escolha do volume em rotação (definido na *MRF*) influencia a solução. O caso 3 (grelha com características iguais às da grelha 3, da Tabela 4), mostra que os resultados obtidos no caso 2 são independentes do número de pontos da grelha.

Conclui-se que a dimensão do volume ao qual se confere rotação influencia os resultados obtidos. Logo, para garantir que os resultados obtidos são precisos, deve avaliar-se qual a dimensão adequada para o volume com rotação. No entanto, como a geometria estudada tem apenas propósitos académicos, este estudo não foi realizado.

Cada simulação requer 2 GB de memória RAM e aproximadamente 6 h de computação.

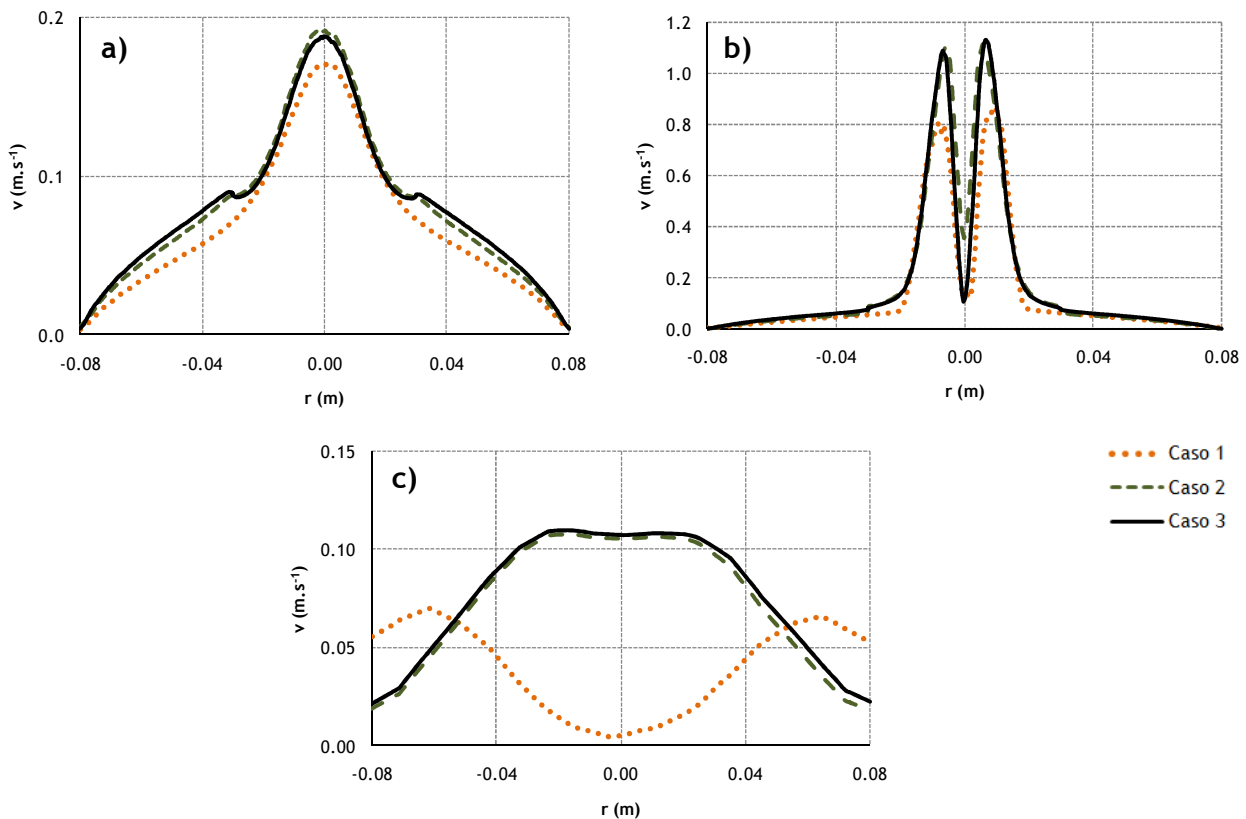


Figura 14 - Perfis de velocidade obtidos para os diferentes casos estudados (Tabela 8), nas posições: a) 1; b) 2; c) 3 (ver Figura 11)

4.2 Escoamento promovido por duas ventoinhas (pseudo-estacionário)

O deslocamento do ar dentro da câmara climática será promovido por um conjunto de 3 ventoinhas (Figura 36), logo o estudo do escoamento resultante da operação de mais do que uma ventoinha é bastante relevante para a otimização do túnel de vento, a introduzir na câmara climática.

O facto do escoamento ser promovido por um conjunto de ventoinhas, e não apenas por uma ventoinha, torna-o mais complexo (Laboratory, 1989). Assim sendo, avaliou-se o escoamento promovido por 2 ventoinhas, com ou sem carcaça. Não se simulou a rotação de 3 ventoinhas para que as simulações fossem mais rápidas e consumissem menos memória RAM. Para o efeito, utilizou-se o modelo *MRF* e impôs-se uma velocidade de rotação igual a 365 rad.s^{-1} .

4.2.1 Geometria adoptada

A geometria adoptada, Figura 15, consiste num tubo igual ao utilizado no subcapítulo 4.1, com duas ventoinhas, com carcaça, Figura 16.

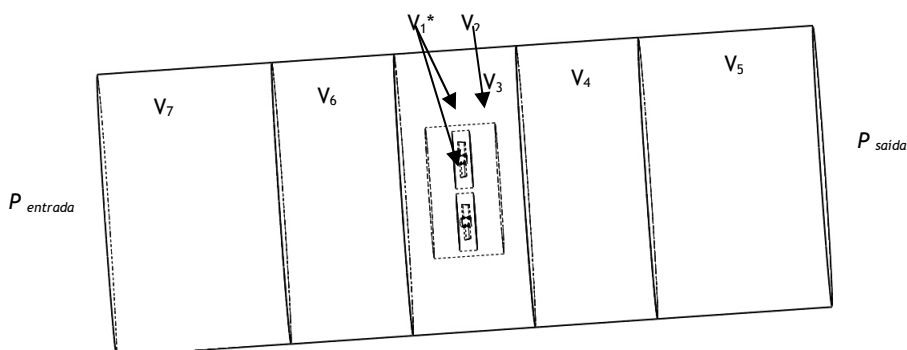


Figura 15 - Geometria adoptada para o estudo do escoamento promovido por duas ventoinhas

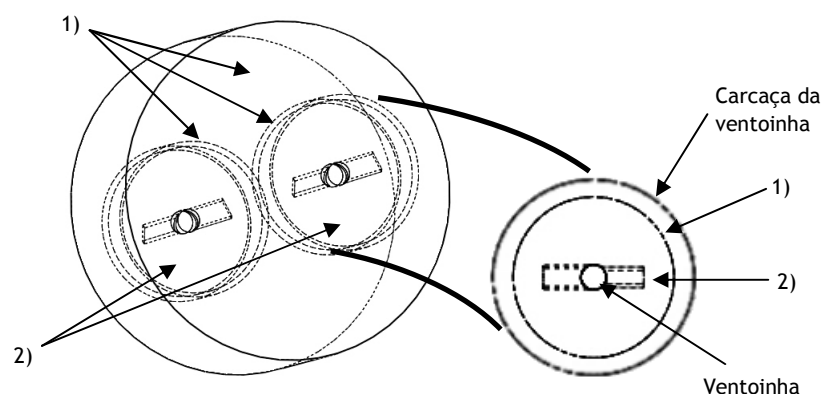


Figura 16 - Zonas definidas em diferentes *frames* no FLUENT; 1) zonas definidas na *frame* de referência; 2) zonas definidas na *Moving Reference Frame* (zonas com rotação)

As dimensões dos diferentes volumes da Figura 15 encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Geometria dos volumes apresentados na Figura 15

Volume	D (m)	l (m)
V_1^*	3.2×10^{-2}	1.0×10^{-3}
V_2	6.0×10^{-2}	4.0×10^{-3}
V_3, V_4, V_6	1.6×10^{-1}	7.0×10^{-2}
V_5, V_7	1.6×10^{-1}	1.0×10^{-1}

* Geometria de cada volume que rodeia as ventoinhas

É de salientar que cada volume V_1^* tem uma zona definida na *frame* de referência e outra zona na *MRF*, Figura 16. Isto porque, entre um volume com movimento e uma parede (definida na *frame* de referência) tem de existir uma zona com fluido (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009).

4.2.2 Construção da geometria e da grelha

Na construção da geometria e da grelha da estrutura, Figura 15, atendeu-se às considerações indicadas nos subcapítulos 4.1.2 e 4.1.3. As características das grelhas utilizadas encontram-se reunidas na Tabela 22 e Tabela 23 (ANEXO E).

4.2.3 Configuração da simulação

Para a configuração da simulação, consideraram-se os mesmos modelos de escoamento, *solvers* e critérios de convergência que no caso do tubo com uma ventoinha (Tabela 5 e Tabela 6). Porém, o facto de existirem duas ventoinhas implica definir cada volume V_i (volume que envolve cada ventoinha) numa *MRF* diferente. Como tal, as condições-fronteira apresentam 2 zonas definidas em diferentes *MRF* e as paredes de cada ventoinha movimentam-se consoante a rotação do volume que as envolve (ANEXO E).

As simulações foram processadas em paralelo e terminadas quando os resíduos se tornaram inferiores a 10^{-3} , de acordo com o que foi referido no ANEXO B.

Dos testes de grelha (ANEXO E), concluiu-se que é mais adequado utilizar uma grelha com 2×10^6 elementos.

4.2.4 Resultados do escoamento promovido por duas ventoinhas

Como seria de esperar, com duas ventoinhas o escoamento torna-se mais complexo do que com apenas uma ventoinha, Figura 17a e Figura 12c. Com as duas ventoinhas, Figura 17a, formam-se turbilhões mais acentuados a montante e a jusante das mesmas. Note-se que as características do escoamento são mais evidentes quando se analisa todo o domínio, contudo, a sua representação em 3 dimensões, torna a sua leitura extremamente complexa.

Outro aspecto que se estudou foi o efeito das carcaças sobre o escoamento, Figura 17. No caso de as ventoinhas apresentarem carcaça, o escoamento é mais axial enquanto que, sem carcaça, os vórtices são mais abruptos junto das ventoinhas (perceptível após a análise do escoamento em todo o domínio). Na Figura 17a, a montante e a jusante das ventoinhas o escoamento não é homogéneo. Na realidade existem turbilhões nestes locais, apesar da sua representação, ao longo do plano que atravessa o tubo, não o tornar evidente.

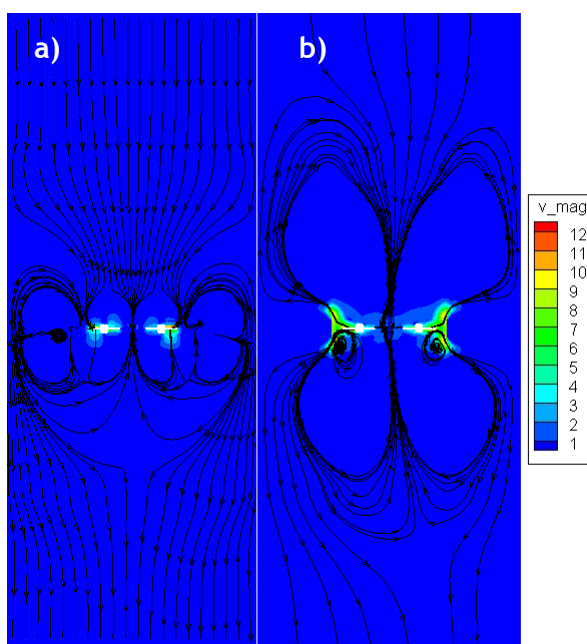


Figura 17 - Campo de velocidades ($m \cdot s^{-1}$) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro do tubo), obtidos para o caso: a) ventoinhas sem carcaça; b) ventoinhas com carcaça

Ao comparar os perfis de velocidade da Figura 14c e da Figura 48c, verifica-se que as velocidades obtidas à saída do tubo são maiores quando se tem apenas uma ventoinha. Isto pode acontecer por duas razões: ou o escoamento de uma ventoinha está a influenciar o da outra (Laboratory, 1989) ou o modelo *MRF* é desadequado a este estudo. O que é facto é que o escoamento é bastante turbulento junto dos volumes definidos na *MRF* (V_1^*) e segundo a literatura (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009), nestas situações é recomendado utilizar modelos mais precisos, como por exemplo o *Sliding Mesh*.

As simulações deste subcapítulo exigem 9 GB de memória RAM e 7 h de processamento.

4.3 Escoamento promovido por uma ventoinha (estado transiente)

O modelo utilizado nas simulações reportadas nos subcapítulos anteriores (*MRF*) é aplicado em estado estacionário (ou pseudo-estacionário), e despreza interações instáveis (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009). No subcapítulo 4.2.4, surgiu a questão se este modelo se adequava ao sistema em análise. De acordo com a literatura (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009), quando o escoamento é bastante turbulento junto do volume definido com rotação (V_1^*) deve utilizar-se o modelo *Sliding Mesh*. Este modelo permite variar a posição da grelha, durante a simulação, de acordo com a velocidade de rotação que a ventoinha apresenta (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009; ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009; Gebrehiwot, 2010; Pope, 2010). Isto implica, simular o escoamento promovido pela ventoinha (Figura 9) em estado transiente (Gebrehiwot, 2010).

4.3.1 Construção da geometria e da grelha

A geometria adoptada é igual à apresentada na Figura 8 e a sua construção é análoga à descrita no capítulo 4.1.2. No entanto, como o modelo utilizado é o *Sliding Mesh*, os volumes V_1 e V_2 têm que ser construídos independentes um do outro, ou seja, não se pode criar uma interface entre eles (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Tutorial Guide*, 2009). Somente após a construção da grelha no GAMBIT é que se pode importar o ficheiro *.mesh* para o FLUENT e definir a interface entre os dois volumes (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Tutorial Guide*, 2009). Ao definir esta interface, deve indicar-se que as duas zonas podem deslizar (rodar) ao longo desta interface em passos discretos (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Tutorial Guide*, 2009).

Em estado transiente, para além do número de pontos da grelha, outros factores podem influenciar a solução final, como por exemplo o incremento de tempo da simulação. Para determinar o incremento de tempo mínimo para obtenção de resultados independentes deste parâmetro, optou-se por considerar diferentes incrementos para uma mesma grelha, a utilizada no estudo do escoamento promovido por uma ventoinha, em estado estacionário (com o modelo *MRF*), grelha 2 da Tabela 3.

4.3.2 Configuração da simulação

Para simulações em estado transiente, a discretização temporal das equações de conservação (transporte) de massa, momento, energia, entre outras, envolve a integração de cada termo das equações diferenciais num dado intervalo de tempo de simulação, Δt (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009). A dimensão deste intervalo tem de ser ajustada para o caso que se pretende analisar.

A formulação do *solver*, no FLUENT, é implícita e não existe nenhuma relação que permita calcular o Δt mais adequado (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009; Barley, 2009; Norton, 2006). No entanto, para simular fenómenos em estado transiente é necessário determinar o Δt mais adequado. Uma forma de o fazer é observando o número de iterações que o FLUENT necessita para convergir com um dado Δt . O número de iterações por Δt deve encontrar-se entre 5 e 10 (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009). Caso o FLUENT necessite de substancialmente mais, o Δt deve ser reduzido (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009). Pelo contrário, caso o FLUENT necessite de muito poucas iterações, o Δt pode ser aumentado. De uma forma geral, os problemas em estado transiente são bastante rápidos a convergir durante os primeiros Δt . Contudo, é prudente escolher um Δt bastante pequeno para os 5-10 primeiros intervalos de integração, aumentando-o gradualmente ao longo da simulação. Para cálculos que variam periodicamente no tempo, deve escolher-se o Δt de acordo com a periodicidade do sistema. Por exemplo, para um modelo de um rotor/estator, devem ocorrer 20 Δt entre cada passagem das pás (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009). No caso da ventoinha em análise, tendo em conta que a sua geometria é meramente académica (2 pás), impôs-se um Δt duas vezes superior ao sugerido em (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009), ou seja, 40 Δt entre cada passagem das pás. Neste caso, o Δt é determinado segundo a equação 4.2,

$$\Delta t = \left(\frac{\text{percurso da ventoinha, em cada } \Delta t}{\text{velocidade de rotação}} \right) = \frac{p_{\text{ventoinha}}}{2 \times n^{\circ}_{\text{passagem entre pás}}} \times \frac{1}{VR} \quad (4.2)$$

em que, $p_{\text{ventoinha}}$ é o perímetro da ventoinha (Tabela 1), $n^{\circ}_{\text{passagem entre pás}}$ é o número de passagens entre cada passagem das pás (40) e VR é a velocidade de rotação.

Alternativamente, pode definir-se o Δt em função do comprimento de cada elemento de grelha presentes na interface entre o volume V_1 e V_2 . O Δt tem que ser pequeno o suficiente para garantir que, quando a grelha se desloca (roda), um dado elemento de grelha mantém-se, em 2 Δt consecutivos, adjacente ao mesmo elemento de grelha (Figura 18).

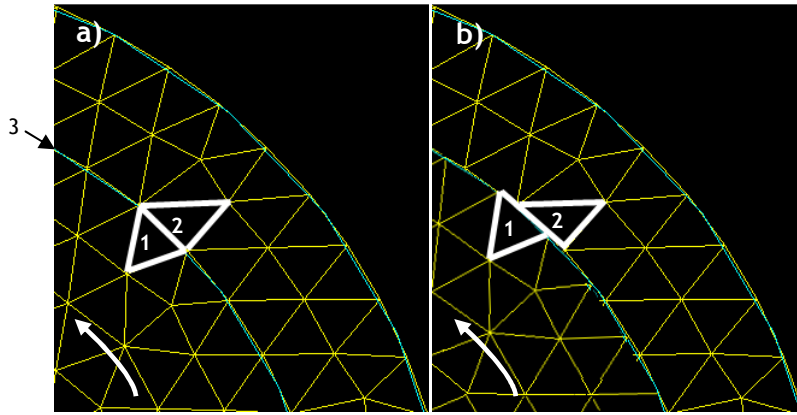


Figura 18 - Deslocamento de uma grelha relativamente à grelha adjacente; posição das grelhas: a) no tempo 0; b) no tempo Δt (1 - elemento da grelha do V_1 ; 2 - elemento da grelha 2 do V_2 ; 3 - interface entre os dois volumes)

Assim sendo, tendo em consideração que $\Delta t \times VR \times D_{V_1} \leq \frac{c_{elemento do V_1}}{2}$, calculou-se o intervalo de simulação, Δt , através da equação 4.3

$$\Delta t = \frac{c_{elemento do V_1}}{2 \times VR \times D_{V_1}} \quad (4.3)$$

em que $c_{elemento do V_1}$ é o comprimento de cada elemento do V_1 (junto da interface), VR é a velocidade de rotação e D_{V_1} é o diâmetro do volume V_1 (Tabela 2). Os diferentes casos estudados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Diferentes Δt estudados

Caso	Número de voltas completas da ventoinha	VR (rad.s ⁻¹)	Base de cálculo do Δt	Δt (s)	t_{total} (s)	Número Δt
4	3	365.0	Equação 4.2	2.2×10^{-4}	0.06	240
5			Equação 4.3	2.1×10^{-5}	0.06	2417
6			Equação 4.2	2.2×10^{-3}	0.60	240
7	58	365.0	Equação 4.2	2.2×10^{-4}	1.0	4545

O tempo total de simulação de escoamento, t_{total} é determinado através da equação

$$\text{Número } \Delta t (\text{número de voltas completas}) = \frac{t_{total}}{\Delta t}$$

Para a configuração da simulação, consideraram-se os mesmos modelos de escoamento e critérios de convergência, que no caso do tubo com uma ventoinha (*subcapítulo 4.1.4*). Contudo, como o escoamento ocorre em estado transiente, a configuração do *solver* é diferente da que se utilizou até então, Tabela 11.

Tabela 11 - Opções seleccionadas no Solver

Opções no Solver	Razão da escolha
Solver -> Pressure Based	Aconselhável para o escoamento de fluidos incompressíveis (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
Velocity Formulation -> Absolute	Adequado para situações onde apenas uma pequena parte do volume de fluido se encontra a rodar (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
Gradient Option -> Green-Grauss Cell Based	Alternativa menos precisa (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009) para diminuir o consumo de memória
Formulation -> Implicit	Pré-definido (<i>implicit</i> é o mais preciso) (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide</i> , 2009)
Time -> Unsteady	Simulação mais morosa; os resultados são representativos da realidade (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009)
Unsteady formulation -> 1st-Order Implicit	Alternativa menos precisa (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide</i> , 2009) para diminuir o consumo de memória
Porous Formulation -> Superficial Velocity	Só existe uma fase (ANSYS, <i>ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide</i> , 2009)

Quanto às opções das condições-fronteira, definiu-se o movimento das zonas do Fluido com rotação e Paredes da ventoinha (Tabela 7) na *Sliding Mesh*, enquanto as restantes zonas foram definidas tal como no caso do escoamento em estado pseudo-estacionário (modelo *MRF*, Tabela 7).

O intervalo de tempo da simulação, Δt , e o número total de Δt são definidos no *Solver*. Neste caso, o Δt é constante ao longo da simulação e o número máximo de iterações permitidas por Δt é 1000.

Por fim, é prudente definir a frequência com que o programa guarda os resultados (ficheiros *.dat*) e correspondente grelha (ficheiros *.cas*) ao longo da simulação.

4.3.3 Resultados do escoamento promovido por uma ventoinha (estado transiente)

Para avaliar as características do escoamento ao longo do tempo, analisou-se a pressão e velocidade de escoamento num ponto fixo do domínio, neste caso, no centro do tubo, a jusante das ventoinhas (na posição 2, Figura 11). Os resultados de pressão e velocidade, obtidos no caso 4, 5 e 6 (Tabela 10), encontram-se na Figura 19.

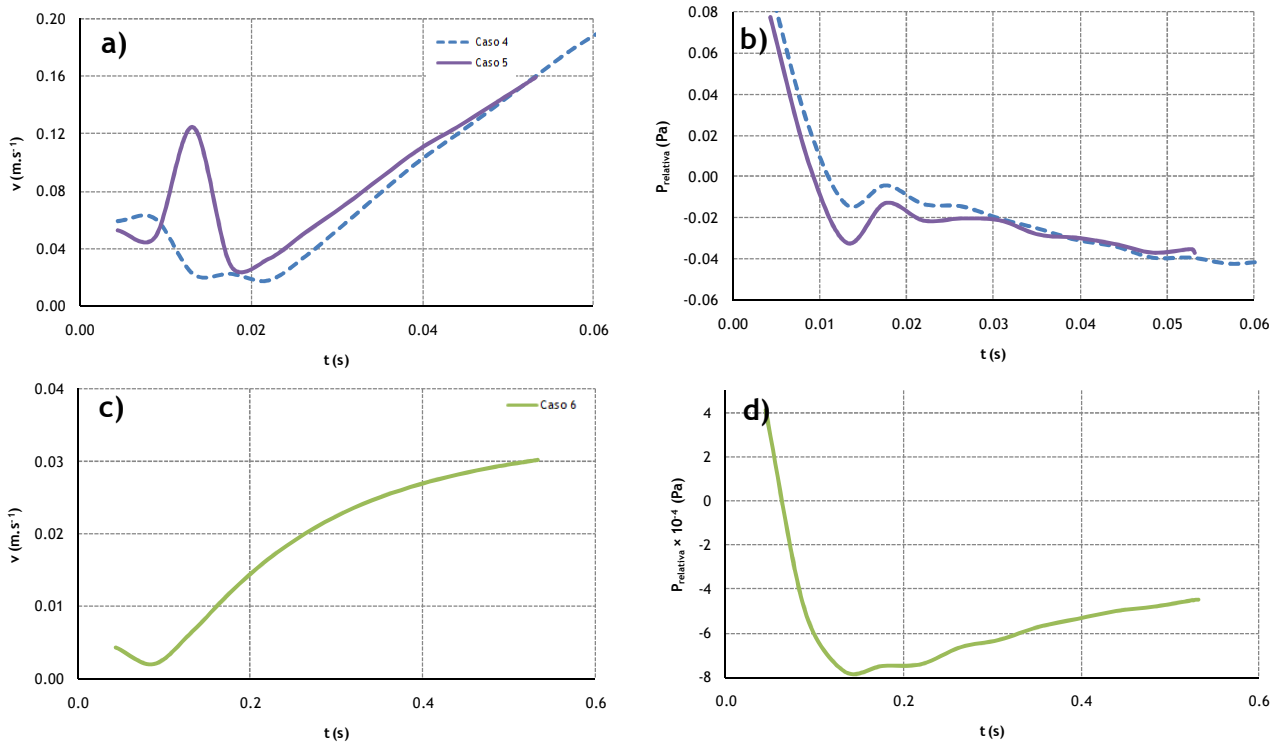


Figura 19 - Velocidade de escoamento e pressão, avaliadas num ponto central (na posição 2, Figura 11): a) Velocidade de escoamento no caso 4 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-4}$ s e $VR = 365 \text{ rad.s}^{-1}$) e 5 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-5}$ s e $VR = 365 \text{ rad.s}^{-1}$); b) Pressão no caso 4 e 5; c) Velocidade de escoamento no caso 6 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-3}$ s e $VR = 36.5 \text{ rad.s}^{-1}$); d) Pressão no caso 6

Na Figura 19, constata-se que em nenhum dos casos os resultados apresentam um comportamento cíclico (Laboratory, 1989; Sulaiman, 2009) ao longo do tempo. Isto significa que o tempo de escoamento simulado não foi suficiente para que esse comportamento se tornasse evidente. Assim sendo, simulou-se posteriormente 1 segundo de escoamento, o que corresponde a 58 voltas completas da ventoinha, caso 7. É de salientar, que o Δt utilizado é igual ao do caso 4 porque, como os resultados obtidos com os diferentes Δt (Figura 19a e Figura 19b) não diferem significativamente, optou-se por escolher o Δt (2.2×10^{-4} s) que implica menor tempo de simulação. A Figura 20 apresenta os resultados obtidos da velocidade de escoamento e pressão ao longo do tempo, para o caso 7.

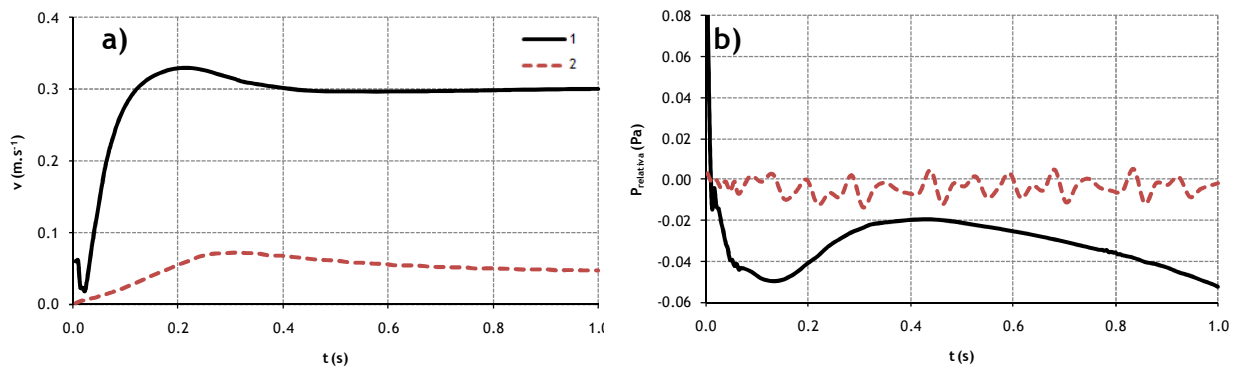


Figura 20 - a) Velocidade de escoamento e b) Pressão, avaliadas no ponto 1 (central) e no ponto 2 (entre as paredes do tubo e a ventoinha) na posição 2 (Figura 11), caso 7 ($\Delta t = 2.2 \times 10^{-4}$ s e $VR = 365$ rad.s⁻¹)

Avaliaram-se os resultados em 2 pontos distintos do domínio, ambos a jusante da ventoinha (na posição 2, Figura 11). O ponto 1 é no centro do tubo enquanto o ponto 2 é entre as paredes do tubo e a ventoinha (Figura 11). Em ambos os pontos, a velocidade de escoamento ao longo do tempo varia pouco a partir dos 0.4 s, Figura 20a. Contudo, quando se observa a pressão ao longo do tempo, no ponto 1 (no centro do tubo) esta não apresenta um comportamento cíclico, Figura 20b. Da análise da Figura 20 não é possível afirmar que estes resultados são semelhantes aos que se obteriam para um tempo de escoamento superior. Nesta situação dever-se-ia ter simulado para um tempo maior de escoamento, no entanto, como foram necessários 15 dias para simular 1 s de escoamento (Tabela 12), o tempo disponível para realizar estes estudos já não o permitia.

A Tabela 12 apresenta a memória RAM e o tempo de simulação que cada simulação requer (para os 4 casos em estudo).

Tabela 12 - Memória RAM e tempo de simulação necessários para as simulações (casos 4, 5, 6 e 7)

Caso	Memória RAM	Tempo simulação (dias)
4	2	2
5	2	4
6	2	1
7	3	15

Em suma, dos resultados obtidos para o escoamento promovido por ventoinhas, conclui-se que o manequim deve ser colocado a montante das ventoinhas porque, a jusante destas, o escoamento é mais caótico.

4.4 Escoamento ao longo da câmara climática

Vários são os factores que podem afectar as características do escoamento dentro da câmara climática: a largura e o comprimento da zona de testes, a sua localização dentro da câmara climática, os cantos da câmara climática, entre outros. Decidiu-se então estimar uma largura inicial para a zona de testes (*ANEXO F*) e estudar o efeito da localização da zona de testes na câmara, Figura 21, sobre as características do escoamento (subcapítulos 4.4.1 e 4.4.2). Para o efeito, atendeu-se a algumas considerações, Tabela 13.

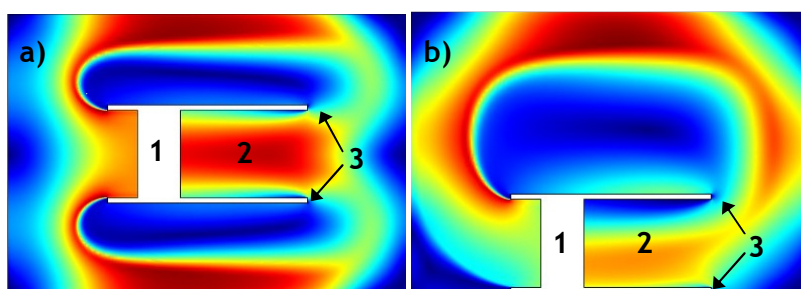


Figura 21 - Posição das ventoinhas e da zona de testes, na câmara climática (corte horizontal ao longo da câmara climática): **a)** no centro da câmara; **b)** junto de uma parede da câmara (1 - ventoinhas; 2 - zona de testes; 3 - paredes da zona de testes)

A análise da geometria da câmara climática é realizada em 2 dimensões, ao longo de um plano horizontal da câmara. Isto porque, para simular o escoamento em todo o volume da câmara (30 m^3) as simulações são muito morosas e utilizam muita memória *RAM*. Além disso, não se estudou o escoamento ao longo de um plano vertical, pois neste caso o único local por onde escoar o ar é por cima das ventoinhas, pouco relevante quando comparado com o restante volume da câmara (a câmara, Figura 1, é pouco mais alta que as ventoinhas, Figura 36). Outro aspecto a salientar é que não são considerados fenómenos de transferência de calor, assim como não há controlo de caudal de ar, através das paredes laterais da câmara climática (Figura 1). Isto porque, a velocidade de entrada na câmara (máximo $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) é pelo menos 10 vezes mais pequena que a velocidade pretendida na zona de testes ($7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Assim sendo, optou-se por considerar que o escoamento promovido pelas ventoinhas prevalece sobre o escoamento lateral da câmara climática.

Quanto às ventoinhas, número 1 da Figura 21, representou-se a área (corte longitudinal) que estas ocupam, Figura 36. Para simular o escoamento promovido pelas mesmas, impôs-se uma queda de pressão entre as duas arestas que definem a fronteira da zona 1, da Figura 21. Neste caso, o escoamento ocorre no sentido da zona de testes para as ventoinhas (de 2 para 1, Figura 21). Nos subcapítulos anteriores (4.1 e 4.2) verificou-se que os vórtices são menos acentuados a montante das ventoinhas, razão pela qual se deverá colocar as ventoinhas a puxar o ar da zona de testes para a câmara climática. A distância entre a

saída de ar das ventoinhas e a saída de ar das paredes, logo a jusante das ventoinhas, tem que ser pelo menos 30 cm. Só assim o sistema converge. O que provavelmente acontece é que quando as ventoinhas estão próximas da parede da câmara climática, o fluido inverte o sentido, saindo e entrando simultaneamente pela saída de ar das ventoinhas (não verifica a condição-fronteira imposta).

Tabela 13 - Principais considerações adoptadas no estudo do escoamento ao longo da câmara climática

Dimensão do domínio	2 Dimensões
Geometria estudada	Plano horizontal ao longo da câmara climática
Software	COMSOL 3.5a
Condições de operação da câmara	Não há controlo da temperatura nem do caudal de ar (não entra nem sai ar pelas paredes laterais da câmara, Figura 1)
Transferência de calor	Não existe
Ventoinhas	Área (da base) das ventoinhas (Figura 36) Distância entre a saída de ar das ventoinhas e a saída de ar das paredes junto das mesmas, 0.30 m Centrada ou junto das paredes da câmara climática
Zona de testes	$C_{zt} = 1$ m $e_{paredes} = 0.05$ m (3 da Figura 21)
Sentido do escoamento	De 2 para 1 (Figura 21)
Ar	Fluido incompressível ($T = 20$ °C e $P = 1$ atm)

Nas próximas abordagens, o comprimento (1 m) tal como a espessura das paredes (0.05 m) da zona de testes são constantes.

O *software* de CFD utilizado foi o COMSOL, visto este ter ferramentas de desenho que facilitam a alteração da geometria da câmara climática. Refira-se que, no FLUENT, sempre que fosse necessário modificar a geometria, ter-se-ia que a construir no GAMBIT e exportá-la seguidamente para o FLUENT.

4.4.1. Escoamento ao longo da câmara climática, sem alterar a sua geometria

Os próximos subcapítulos descrevem os principais pontos abordados durante o estudo do escoamento do ar ao longo da câmara climática, para duas localizações possíveis da zona de testes.

4.4.1.1 Geometrias adoptadas

As geometrias adoptadas têm as seguintes características,

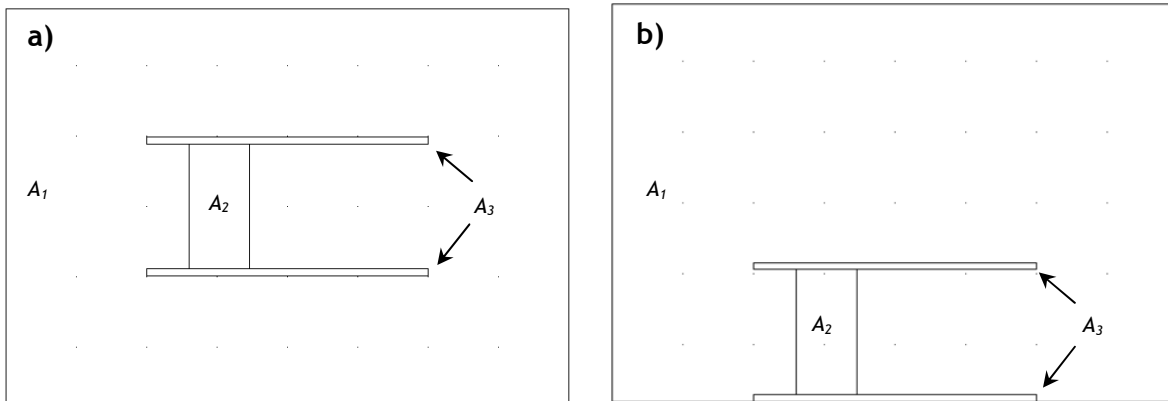


Figura 22 - Geometrias adoptadas para o estudo do escoamento ao longo da câmara climática, quando a zona de testes se encontra a) no centro; b) junto da parede da câmara climática

Para facilitar a identificação das geometrias ao longo do discurso, denominou-se a geometria da Figura 22a de $G_{zt, \text{centro}}$ e a Figura 22b de $G_{zt, \text{parede}}$. As dimensões das diferentes áreas da Figura 22 encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Dimensões das áreas apresentadas na Figura 22

Área	l (m)	c (m)
A_1	l_{cc}	c_{cc}
A_2	0.88 (ANEXO F)	0.43
A_3	0.05	2.00

Definidas as dimensões das geometrias, procedeu-se à sua composição e respectiva construção das grelhas.

4.4.1.2 Construção das geometrias

Na construção das geometrias $G_{zt, \text{centro}}$ e $G_{zt, \text{parede}}$, Figura 22, utilizaram-se as ferramentas de desenho do COMSOL 3.5a. Ao executar o *software*, o primeiro passo que se toma é definir os modelos de equações que se aplicam a este estudo. Para o efeito, seleccionou-se o modelo *Turbulent Non-Isothermal Flow, $k-\epsilon$* porque este é aconselhável para simular o escoamento de fluidos incompressíveis, quando há fenómenos de transferência de calor (COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, 2008; COMSOL, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, 2008). Neste estudo não são contemplados fenómenos de transferência de calor, contudo aplicou-se este modelo para que, posteriormente, se possa utilizar os resultados do escoamento obtidos em condições isotérmicas, sem haver a necessidade de

definir, novamente, todos os modelos e parâmetros. É de notar que é preciso remover as equações referentes às trocas de calor nos corpos sólidos, pré-definidas do modelo. Para evitar que, posteriormente, o *software* construa elementos de grelha nas áreas A_2 e A_3 , subtraíram-se estas à área A_1 . Deste modo, são consideradas a zona que o fluido percorre, as paredes da zona de testes e da câmara climática, assim como a entrada e saída de ar do domínio de simulação (ou seja, a jusante e a montante das ventoinhas).

4.4.1.3 Propriedades do fluido e condições-fronteira do domínio da simulação

Ao contrário do que é feito no FLUENT, antes de construir a grelha definem-se as propriedades do fluido e as condições-fronteira do domínio da simulação. Assim sendo, define-se que todo o domínio é constituído por fluido, neste caso ar incompressível. No caso das condições-fronteira, estas são definidas como é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Condições-fronteira utilizadas no estudo do escoamento ao longo da câmara climática

Zona	Multiphysics	Tipo de condição-fronteira e considerações	Razão da escolha
Paredes da câmara e da zona de testes	General Heat Transfer	Boundary type: Insulation/Symmetry	Não há trocas de calor
	k - ε Turbulence Model	Boundary type: Wall Boundary condition: Logarithmic Wall function δ_w : $h/2$ m	Pré-definido
Entrada (jusante das ventoinhas)	General Heat Transfer	Boundary condition: Temperature T_0 : 293.15 K	Escoamento isotérmico
	k - ε Turbulence Model	Boundary type: Inlet Boundary condition: Velocity/Pressure L_t : 0.65 m L_t : 0.20 m	
Saída (montante das ventoinhas)	General Heat Transfer	Boundary condition: Convective flux	Deste modo não há acumulação de calor no domínio (COMSOL, COMSOL Multiphysics User's Guide, 2008)
	k - ε Turbulence Model	Boundary type: Outlet Boundary condition: Pressure, no viscous stress P_0 : 0 Pa	

4.4.1.4 Construção das grelhas

Da análise das estruturas em estudo, Figura 22, pressupõe-se que a convergência será mais difícil nalgumas zonas das mesmas, nomeadamente, nos cantos da câmara climática e junto das paredes da zona de testes. Nestes locais, a grelha tem que ser mais refinada ao contrário das restantes zonas do domínio.

Para construir as grelhas, das diferentes geometrias, $G_{zt, \text{centro}}$ e $G_{zt, \text{parede}}$, começa por refinar-se todo o domínio com uma grelha com tamanho *NORMAL*. Depois, consoante o número de elementos pretendidos, torna-se a mesma ainda mais densa. Após realizar alguns testes de grelha (ANEXO G.1) concluiu-se que, para obter resultados independentes da sua densidade de elementos, é necessário refinar, duas vezes, todo o domínio da grelha (*Mesh -> Refine Mesh*). Além disso, é preciso refinar manualmente os cantos da câmara e a região junto das paredes da zona de testes. É de salientar que se atendeu à qualidade dos elementos de grelha. Em todas as grelhas construídas, os seus elementos têm uma qualidade superior a 0.84. O COMSOL considera que qualidade 1 corresponde a um elemento com boa qualidade, enquanto que qualidade 0 corresponde a um elemento de péssima qualidade (COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, 2008).

As grelhas utilizadas neste subcapítulo encontram-se apresentadas na Figura 23.

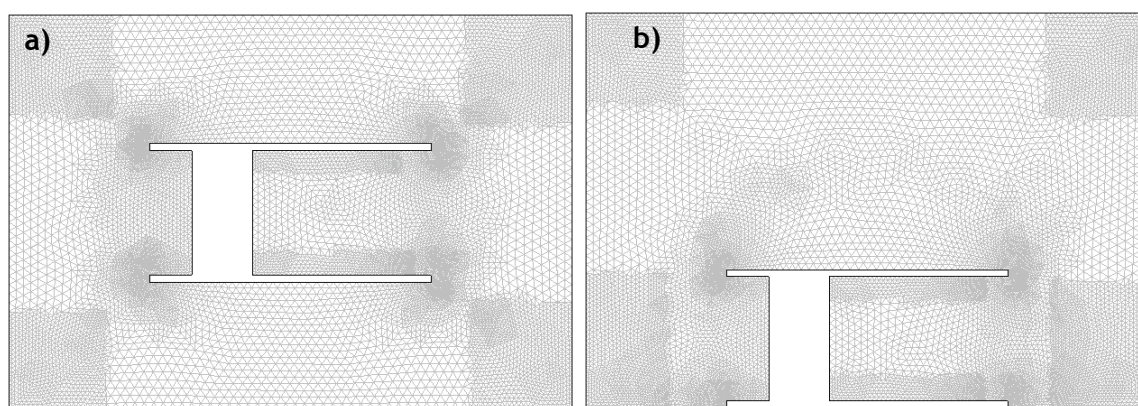


Figura 23 - Grelhas utilizadas no estudo do escoamento ao longo da câmara climática, no caso da: a) $G_{zt, \text{centro}}$; b) $G_{zt, \text{parede}}$

4.4.1.5 Configuração da simulação

Quando se seleccionam os modelos de equações (*subcapítulo 4.4.1.3*) define-se que a simulação ocorre em estado estacionário. Optou-se por analisar o escoamento do ar em estado estacionário porque este tipo de simulação é bastante exigente, do ponto de vista computacional (muito morosa e de difícil convergência).

Em relação ao *solver* mais adequado, a sua escolha baseou-se em alguns critérios referidos no manual do COMSOL (COMSOL, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, 2008). O *solver* utilizado foi então o *Stationary segregated*. Este *solver* permite definir o método de resolução das equações, de três grupos de variáveis: Grupo 1: velocidade e pressão; Grupo 2: logaritmos de k e de ε e Grupo 3: temperaturas e calor do fluido. Como neste caso o número de graus de liberdade encontra-se entre 1×10^3 e 1×10^6 , utilizaram-se os *solvers* directos (COMSOL, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, 2008). De entre os *solvers* (directos) disponíveis

seleccionou-se o UMFPACK uma vez que este é um *solver* muito eficiente para escoamentos assimétricos (COMSOL, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, 2008). Como critério de convergência impôs-se que a tolerância, para cada grupo do *solver*, teria que ser inferior a 10^{-3} (COMSOL, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, 2008).

Alguns parâmetros podem ser ajustados para facilitar a convergência do sistema (COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, 2008), dos quais se destaca o factor de amortecimento (metodologia semelhante à do FLUENT, ANEXO C.2) (COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, 2008). Como os vários grupos do *solver* apresentam dificuldade em convergir, diminuiu-se o factor de amortecimento do grupo 1 e 3 para 0.3. No caso do grupo 2, somente quando se impõe um factor de amortecimento igual a 0.1 é que o sistema consegue convergir.

O sistema é bastante complexo do ponto de vista computacional e como tal, para garantir que o mesmo converge é necessário iniciar a simulação num estado próximo do que se obterá, no final da nova simulação. Ou seja, a pressão imposta na entrada (Tabela 15) deve ser aumentada em pequenos incrementos. Nos casos em estudo, o sistema converge quando se impõe a seguinte sequência de valores, para a entrada do domínio (Tabela 15): $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 1 Pa; 5 Pa; 10 Pa; 20 Pa; 40 Pa e assim sucessivamente. O término deste processo iterativo de simulações ocorre quando se encontra o ponto de operação do sistema, ou seja, quando a queda de pressão imposta na condição-fronteira de entrada é aproximadamente igual ($\pm 6 \text{ Pa}$) à queda de pressão calculada pela curva característica das três ventoinhas (Figura 37) (Munson, 1998). Para tal, analisou-se o perfil de velocidades obtido, na zona de testes, a montante das ventoinhas (condição-fronteira de saída, Tabela 15). Contudo, como o perfil é assimétrico, optou-se por determinar a velocidade média. A partir da velocidade média calcula-se o caudal⁷ e de seguida determina-se a queda de pressão que as ventoinhas precisam de vencer para conseguir promover o referido caudal de ar (para o efeito utiliza-se a curva de operação das três ventoinhas em paralelo, Figura 37).

⁷ $Q = v_{\text{média}} \times L_{zt} \times c_{\text{ventoinhas}}$, em que Q é o caudal volumétrico, $v_{\text{média}}$ é à velocidade média do escoamento, na saída e $c_{\text{ventoinhas}}$ é a altura das ventoinhas (Figura 36)

4.4.1.6 Resultados do escoamento ao longo da câmara climática, sem arredondar os seus cantos

Os campos de velocidade e linhas de corrente obtidos para as duas geometrias $G_{zt, centro}$ e $G_{zt, parede}$, encontram-se apresentados na Figura 24.

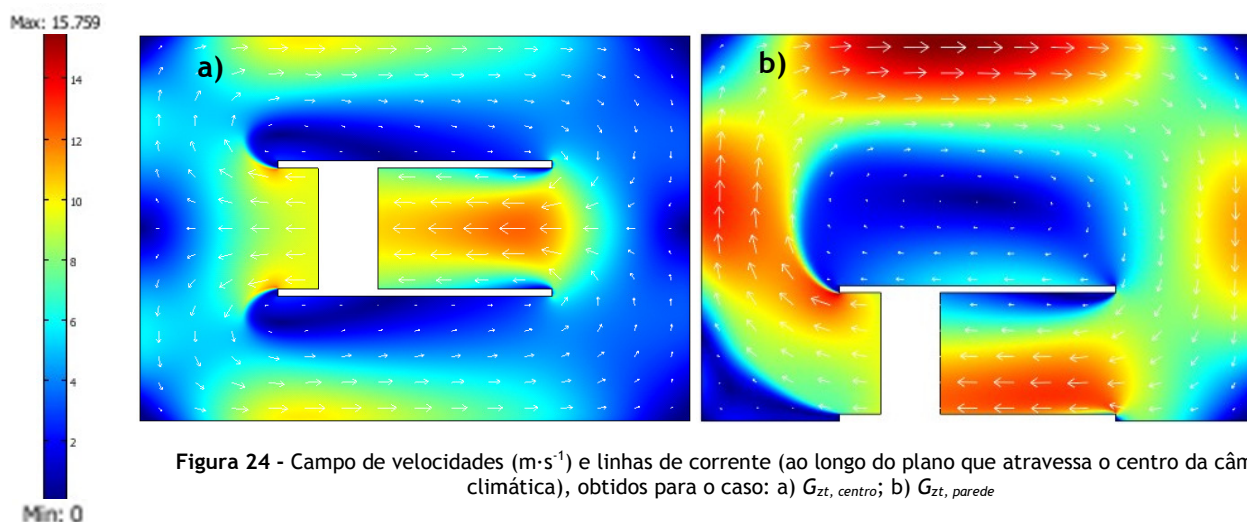


Figura 24 - Campo de velocidades ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro da câmara climática), obtidos para o caso: a) $G_{zt, centro}$; b) $G_{zt, parede}$

Da análise da Figura 24 verifica-se que se obtêm as maiores velocidades de escoamento na zona de testes quando se coloca esta junto da parede da câmara climática. Contudo, neste caso, o perfil de velocidades é bastante assimétrico Figura 25b.

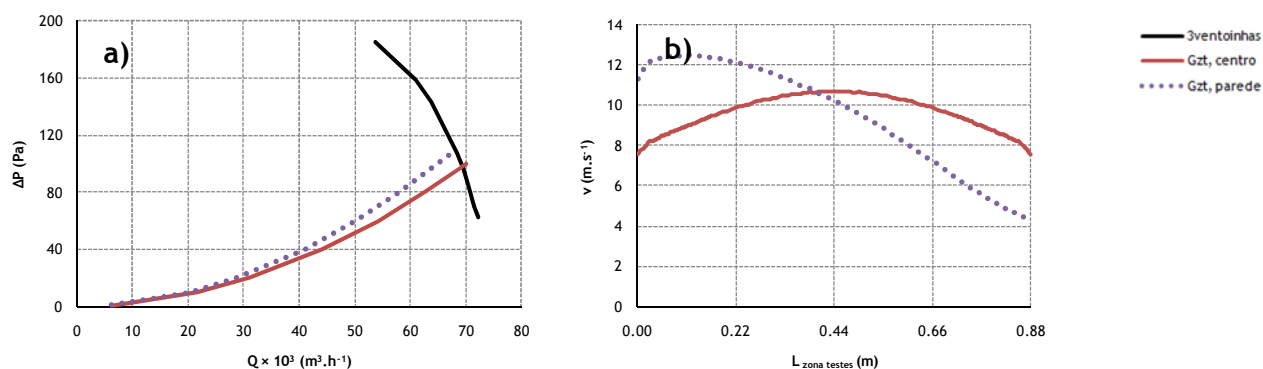


Figura 25 - Escoamento ao longo da câmara climática: a) Curvas características do sistema; b) Perfis de velocidade a montante das ventoinhas (na saída), quando a zona de testes se encontra no centro e junto da parede da câmara

Em relação à geometria $G_{zt, centro}$, esta apresenta um perfil de velocidades simétrico, Figura 25b, e entre as duas geometrias em estudo, é a que apresenta menor pressão de operação, Figura 25a.

Cada simulação requer 1.5 GB de memória RAM e dura em média 20 minutos. Todos os resultados relacionados com o processo iterativo de simulações encontram-se no ANEXO H.

4.4.2 Cantos da câmara climática

Observando a geometria da câmara climática, Figura 1, presume-se que os cantos da câmara climática conduzem a grandes perdas de carga localizadas (Munson, 1998). Por essa razão, construíram-se geometrias com diferentes arredondamentos dos cantos da câmara para as diferentes localizações da zona de testes, Figura 26.

4.4.2.1 Geometrias adoptadas

As geometrias adoptadas apresentam as seguintes características,

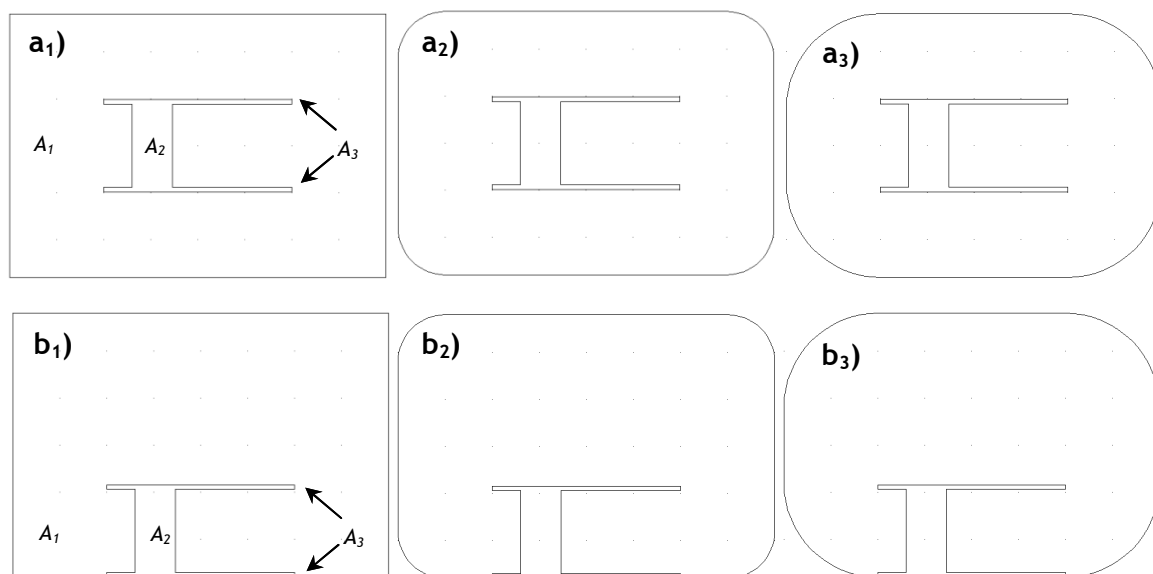


Figura 26 - Esquemas correspondentes a diferentes efeitos de arredondamento dos cantos da câmara climática, quando a zona de testes se encontra: a) no centro; b) junto da parede da câmara (os índices 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, aos casos 11, 12 e 13 da Tabela 16)

As dimensões das diferentes áreas da Figura 26 encontram-se na Tabela 14.

Tabela 16 - Curvatura dos cantos da câmara

Caso	Raio da curvatura dos cantos da câmara (m)
11	Sem curvatura (90°)
12	0.5
13	1.0

4.4.2.2 Construção das geometrias

Na construção das geometrias, Figura 26, atenderam-se às considerações indicadas no *subcapítulo 4.4.1.2*. Contudo, foi necessário arredondar os cantos da câmara climática. Para tal, seleccionou-se cada vértice dos cantos da câmara e definiu-se a curvatura desejada (da Tabela 16).

4.4.2.3 Condições-fronteira, construção das grelhas e configuração da simulação

Neste subcapítulo, consideraram-se as mesmas condições-fronteira, características das grelhas, modelos de escoamento, *solvers* e critérios de convergência que no caso do estudo do escoamento ao longo da câmara climática, *subcapítulo 4.4.1*.

4.4.2.4 Resultados do arredondamento dos cantos da câmara climática

Os campos de velocidade e linhas de corrente, obtidos para as diferentes geometrias, encontram-se apresentados na Figura 27.

Ao contrário do que era esperado, o arredondamento dos cantos da câmara climática, não afecta significativamente nem as condições de operação das ventoinhas, Figura 28a₁ e b₁, nem o perfil de velocidades na zona de teste, Figura 28 a₂ e b₂.

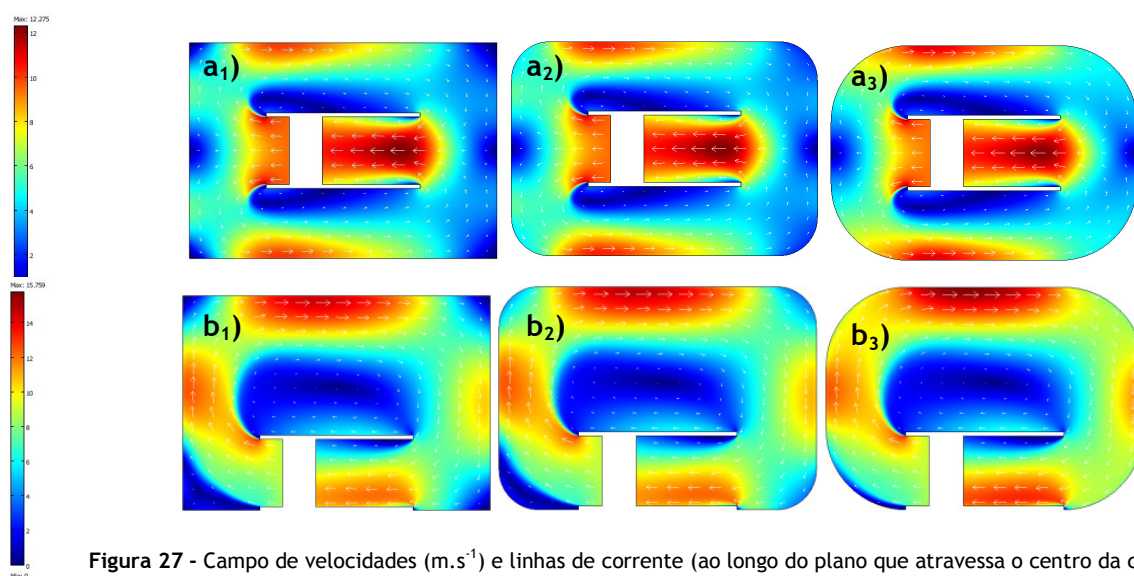


Figura 27 - Campo de velocidades ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e linhas de corrente (ao longo do plano que atravessa o centro da câmara climática), obtidos para o caso da zona de testes estar localizada: a) no centro b) junto da parede, da câmara climática (os índices 1, 2 e 3 correspondem aos casos 11, 12 e 13, respectivamente, da Tabela 16)

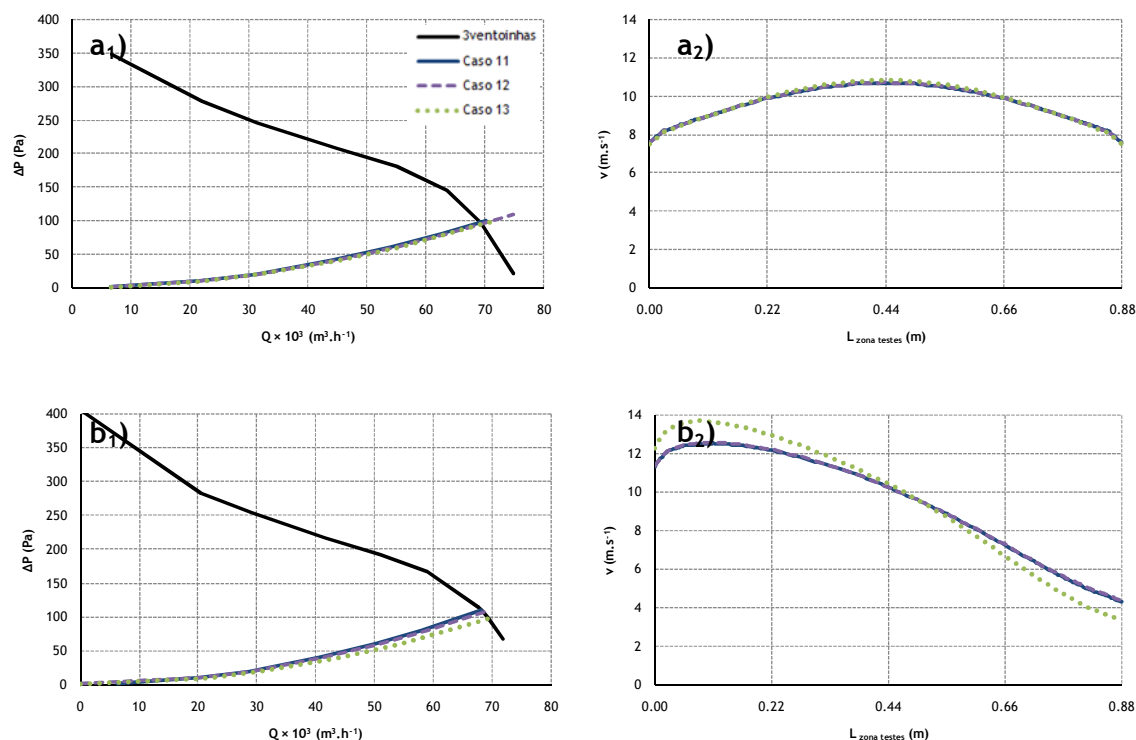


Figura 28 - Efeito do arredondamento dos cantos da câmara climática, no caso da zona de testes se encontrar: a) no centro; b) junto da parede, da câmara climática (o índice 1 corresponde às curvas características do sistema e o 2 aos perfis de velocidade obtidos a montante das ventoinhas)

Quando a zona de testes se encontra junto da parede da câmara, Figura 28b, verifica-se que o aumento da curvatura dos cantos da câmara diminui ligeiramente a perda de carga do sistema. Ainda neste caso, observa-se que nem todos os perfis de velocidades são iguais, Figura 28b₂. Idealmente, os cantos não deveriam existir (perdas de carga localizadas (Munson, 1998)), no entanto, o seu arredondamento implica diminuir consequentemente as superfícies laterais da câmara. No entanto, estas não podem estar totalmente obstruídas, visto o ar entrar e sair da câmara, através delas (ver *capítulo 2*). Além disso, como o arredondamento dos cantos só influencia os resultados quando o raio é 1 m, optou-se por não arredondar os cantos da câmara, para ambas as localizações testadas da zona de testes.

As simulações deste subcapítulo exigem 1.5 GB de memória RAM e, aproximadamente, 20 minutos de processamento. Os resultados relacionados com o processo iterativo de simulações encontram-se no *ANEXO H*.

4.4.3 Largura da zona de testes

O escoamento junto do manequim não deve ser influenciado pelas paredes da zona de testes. Caso contrário, parâmetros relacionados com transferência de calor e de massa são influenciados e por isso os testes de simulação de uso perdem representatividade. Assim sendo, é prudente avaliar diferentes larguras para a zona de testes.

4.4.3.1 Geometrias adoptadas

As geometrias apresentadas na Figura 29 têm em conta os resultados obtidos no *subcapítulo 4.4.2.4* (não há necessidade de arredondar os cantos da câmara).

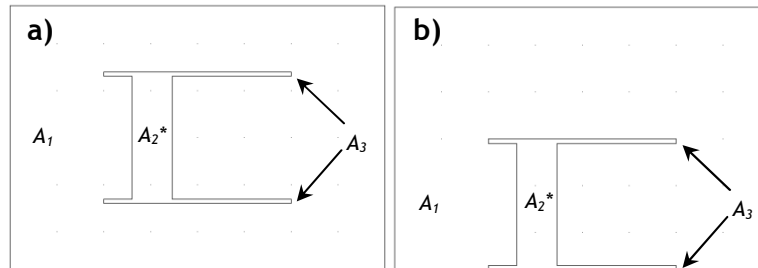


Figura 29 - Largura da zona de testes igual a 1.33 m, quando a zona de testes se encontra: *a)* centro; *b)* junto da parede da câmara climática

As dimensões das diferentes áreas da Figura 29 encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Dimensões das áreas apresentadas na Figura 29

Área	l (m)	c (m)
A_1	l_{cc}	c_{cc}
A_2^*	1.33 (ANEXO F)	0.43
A_3	0.05	2.00

4.4.3.2 Construção das geometrias

Na construção das geometrias, Figura 29, atenderam-se às considerações indicadas no *subcapítulo 4.4.1.2*.

4.4.3.3 Condições-fronteira, construção das grelhas e configuração da simulação

Mais uma vez, consideraram-se as mesmas condições-fronteira, características das grelhas, modelos de escoamento, *solvers* e critérios de convergência que no caso do estudo do escoamento ao longo da câmara climática, *subcapítulo 4.4*.

4.4.3.4 Resultados obtidos para as duas larguras da zona de testes

Os campos de velocidades e perfis de velocidade obtidos ao longo das zonas de testes, com diferentes larguras, são apresentados nas Figuras 30 e 31.

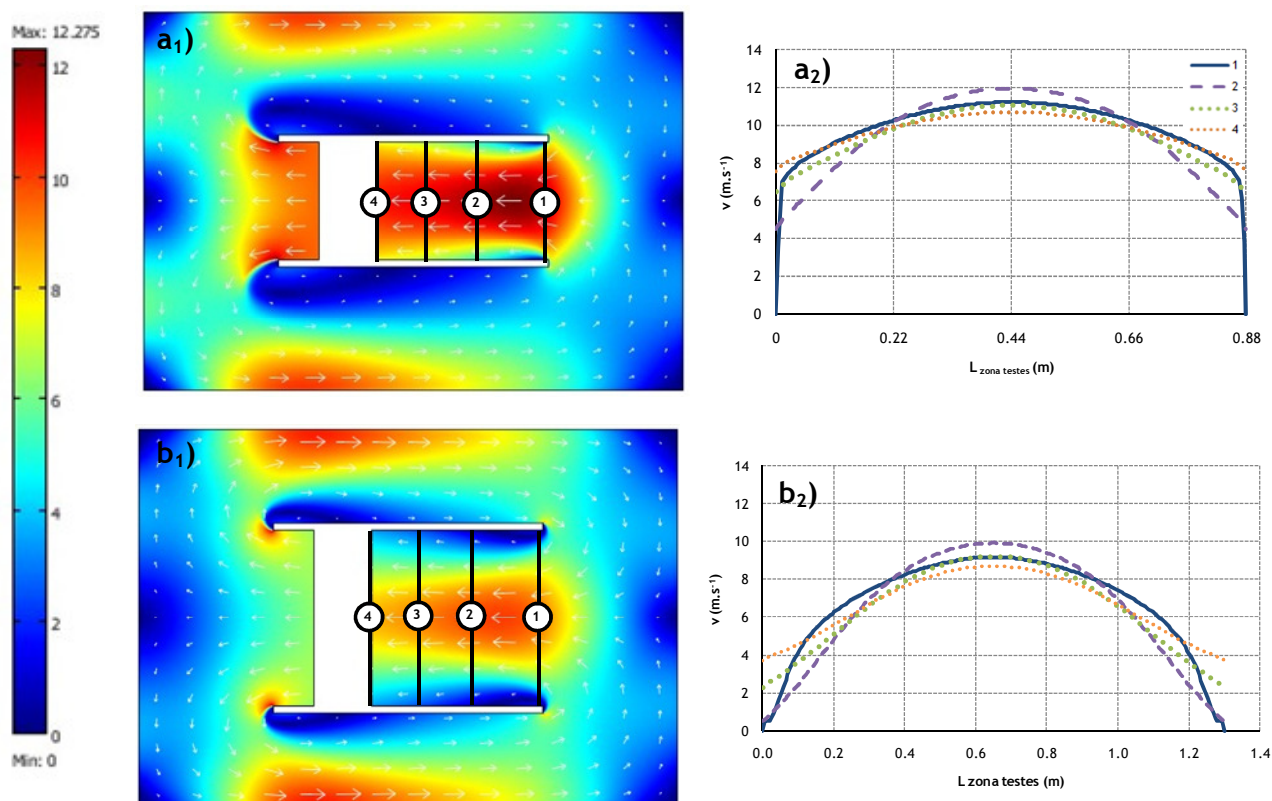


Figura 30 - Zona de testes no centro da câmara, com uma largura de: a) 0.88 m; b) 1.33 m (índice 1 corresponde ao campo de velocidades (m.s^{-1}) e o 2 aos perfis de velocidade, avaliados ao longo da zona de testes)

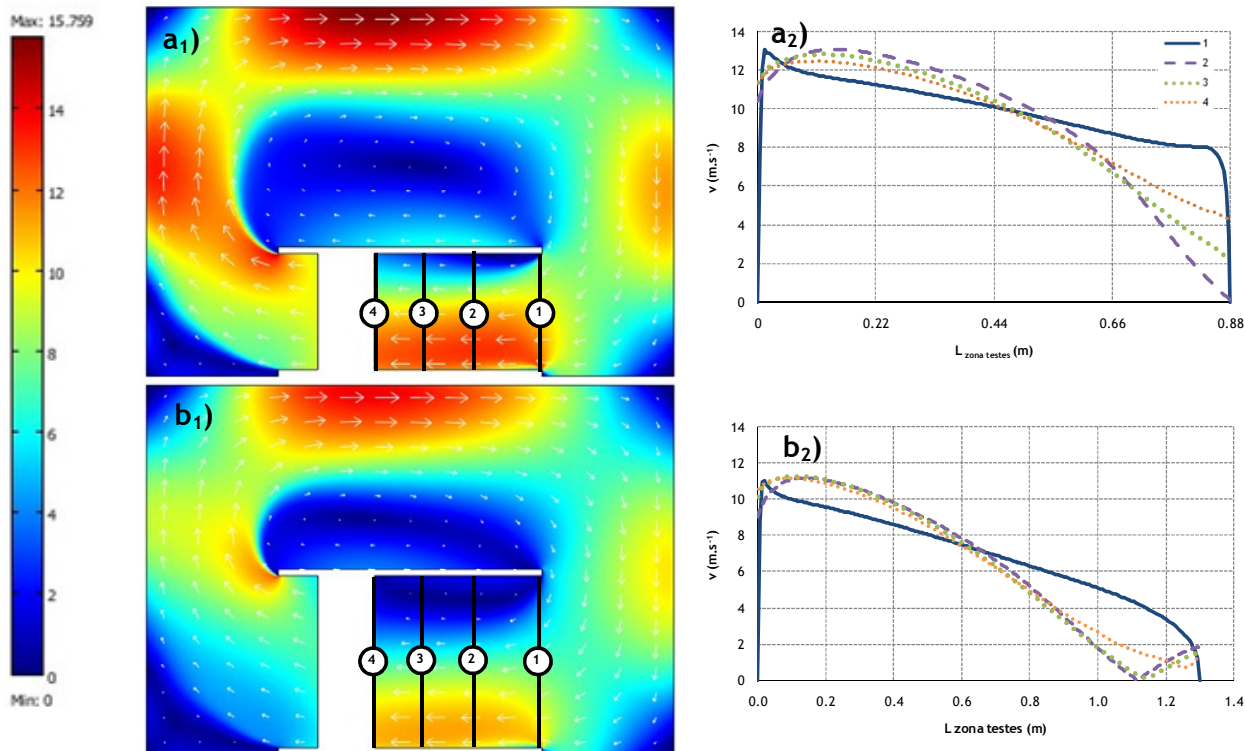


Figura 31 - Zona de testes junto da parede da câmara, com uma largura de: a) 0.88 m; b) 1.33 m (índice 1 corresponde ao campo de velocidades (m.s^{-1}) e o 2 aos perfis de velocidade, avaliados ao longo da zona de testes)

Na Tabela 18, encontram-se compiladas as condições de operação (queda de pressão e velocidade de escoamento) das diferentes geometrias estudadas neste subcapítulo.

Tabela 18 - Condições de operação (queda de pressão de operação e velocidade média na saída da zona de testes), para diferentes larguras da zona de testes

<i>Localização zona de testes</i>	<i>L_{zt} (m)</i>	<i>ΔP_{operação} (Pa)</i>	<i>v_{média}, na saída (m.s⁻¹)</i>
Centro da câmara	0.88	98	9.7
	1.33	77	6.7
Parede da câmara	0.88	110	9.5
	1.33	105	6.5

Da análise da Figura 30, da Figura 31 e da Tabela 18, verifica-se que o aumento da largura da zona de testes diminui a queda de pressão de operação e diminui, como esperado, a velocidade de escoamento na zona de testes. Para a zona de testes com uma largura de 1.33 m, centrada na câmara, Figura 30b₂, a velocidade média na saída do domínio (posição 4, da Figura 30a e b) é aproximadamente igual à velocidade pretendida nesta zona, 7 m.s⁻¹, Tabela 18 (ver *capítulo 2*). No entanto, a velocidade ainda não é homogênea ao longo de toda a zona de testes, Figura 30b₂. Uma das hipóteses mais utilizadas para ultrapassar este problema, é adicionar uma grelha (Lindgren, 2002; NASA, 2010; NASA; Trefny, 2002) que impõe uma nova resistência ao escoamento. Deste modo, o escoamento é homogeneizado na zona de testes. Contudo, ao colocar uma grelha na zona de testes (por exemplo na posição 1, da Figura 30a), aumenta-se a pressão de operação e consequentemente diminui-se o caudal de operação. Nestas condições, a velocidade máxima nunca será 7 m.s⁻¹ para uma largura da zona de testes igual a 1.33 m.

Quanto às geometrias com a zona de testes junto da parede da câmara, Figura 31, em ambos os casos, os perfis de velocidades são bastante assimétricos. Além disso, o aumento da largura da zona de testes não influencia muito as quedas de pressão de operação. Estas continuam a ser elevadas, quando comparadas com as quedas de pressão das geometrias com a zona de testes no centro da câmara (Tabela 18). Assim sendo, conclui-se que a zona de testes dever-se-á encontrar centrada na câmara climática.

Para cada simulação foram necessários 1.5 GB de memória *RAM* e, aproximadamente, 20 minutos de processamento. Todos os resultados relacionados com o processo iterativo de simulações encontram-se no *ANEXO H*.

4.4.4 Geometria da zona de testes

Ao analisar o escoamento, por exemplo, da Figura 30, verifica-se que na entrada da zona de testes (posição 1) o fluido altera a sua direcção, apresentando velocidades superiores

no centro da zona de testes. Neste caso, a geometria da zona de testes poderá estar a dificultar a homogeneização do escoamento, nesta mesma zona. Por essa razão, optou-se por avaliar diferentes geometrias para a zona de testes.

4.4.4.1 Geometrias adoptadas

Até este ponto tinha-se considerado que as ventoinhas ocupavam toda a largura da zona de testes. Como é possível verificar na Figura 32, neste subcapítulo teve-se em consideração a largura real das ventoinhas (o seu diâmetro).

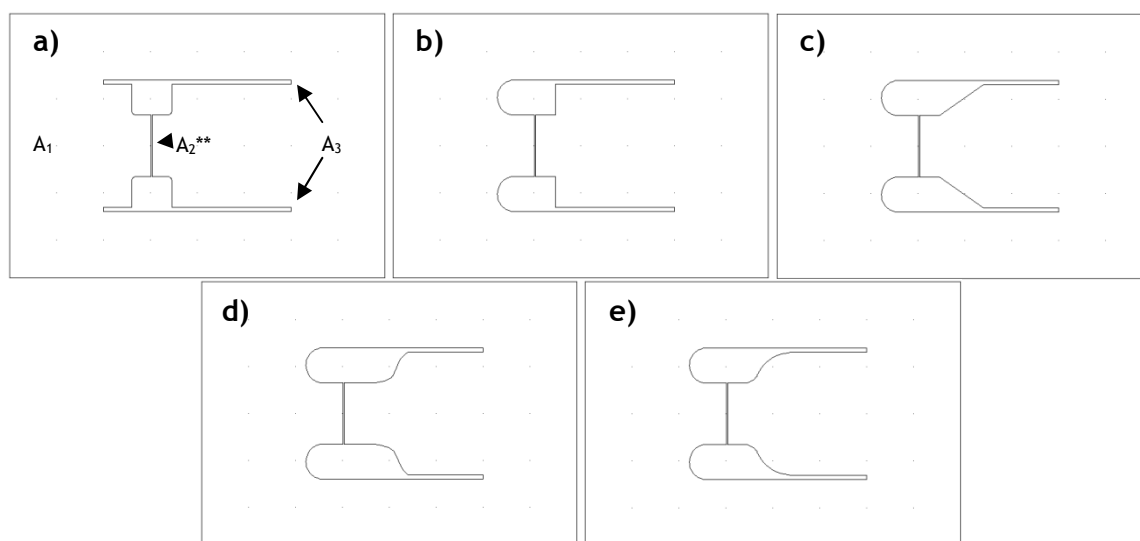


Figura 32 - Estudo da geometria da zona de testes: a) caso 14, b) caso 15, c) caso 16, d) caso 17 e e) caso 18, da Tabela 19

Tabela 19 - Geometria das paredes da zona de testes, a montante e jusante das ventoinhas

Caso	Jusante das ventoinhas	Montante das ventoinhas
14	Paredes rectas	Paredes rectas
15		Paredes rectas
16	Paredes Arredondadas	Contração da geometria 1
17		Contração da geometria 2
18		Contração da geometria 3

As dimensões das diferentes áreas da Figura 32 encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Dimensões das áreas apresentadas na Figura 32

Área	l (m)	c (m)
A_1	l_{cc}	c_{cc}
A_2^{**}	0.65	0.01
A_3	0.05	2.00

4.4.4.2 Construção das geometrias

Na construção das geometrias, Figura 32, atenderam-se às considerações indicadas no *subcapítulo 4.4.1.2*. Contudo, as dimensões da área correspondente às ventoinhas é bastante diferente das apresentadas nos subcapítulos anteriores. Isto porque, quando se consideram as dimensões reais da ventoinhas: largura 0.65 m e comprimento 0.43 m, o sistema não consegue convergir, para quedas de pressão superiores a 1 Pa. Possivelmente, o que acontece é que as condições fronteira impostas na entrada e saída do fluido não são respeitadas. Na Figura 33 verifica-se que existem pequenos vórtices junto da entrada do fluido.

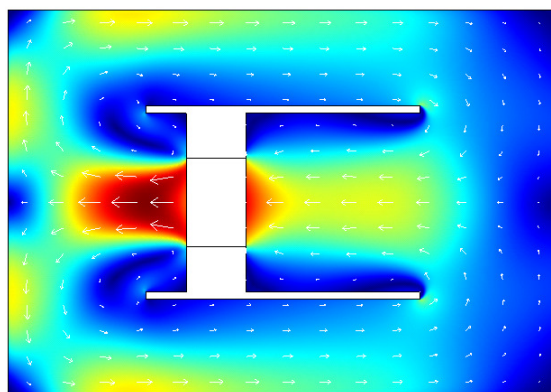


Figura 33 - Campo de velocidades (m.s^{-1}) obtidos para uma geometria da zona de testes inicial (sistema não converge para quedas de pressão superiores a 1 Pa)

Assim sendo, optou-se por simplificar a geometria das ventoinhas, impondo uma espessura fictícia igual a 0.01 m, de forma a garantir que o escoamento à saída das ventoinhas, ficava devidamente condicionado pelas paredes (carcaça). Deste modo, garantiu-se que as condições-fronteira eram verificadas. Além disso, para facilitar a convergência dos resultados, houve a necessidade de arredondar ligeiramente os cantos, da superfície adjacente às ventoinhas (Figura 34a).

4.4.4.3 Condições-fronteira, construção das grelhas e configuração da simulação

Para a configuração da simulação, consideraram-se os mesmos modelos de escoamento, *solvers* e critérios de convergência que no caso do estudo do escoamento ao longo da câmara climática, *subcapítulo 4.4.*, assim como as condições-fronteira e as características das grelhas foram consideradas as mesmas.

4.4.4.4 Resultados obtidos para as diferentes geometrias da zona de testes

Os campos de velocidade e perfis de velocidade obtidos ao longo das zonas de testes, com diferentes geometrias, são apresentados na Figura 34.

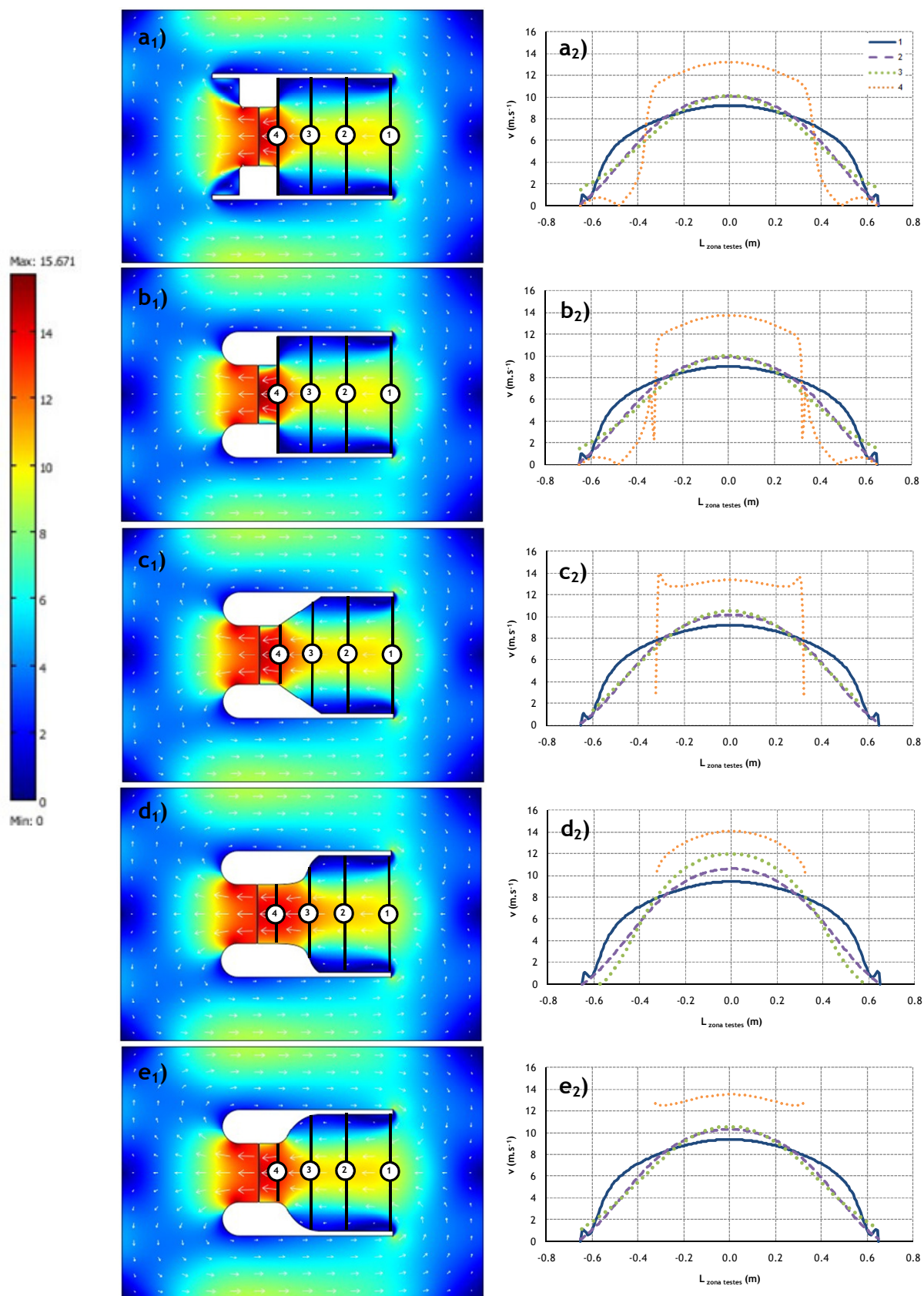


Figura 34 - Campos de velocidades ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (índice 1) e perfis de velocidades (índice 2) obtidos para as diferentes geometrias da zona de testes: a) caso 14, b) caso 15, c) caso 16, d) caso 17 e e) caso 18

Na Tabela 21, encontram-se as condições de operação (queda de pressão e velocidade média de escoamento) das diferentes geometrias estudadas neste subcapítulo.

Tabela 21 - Condições de operação (queda de pressão de operação e velocidade média na saída do domínio), para as diferentes geometrias da zona de testes

Caso	ΔP operação (Pa)	$v_{\text{média}}$ na saída ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
14	107	12.9
15	122	12.6
16	103	12.9
17	95	13.1
18	99	13.0

É de salientar que o caso 14, Tabela 19, foi a simulação que apresentou mais dificuldades em convergir, acabando por ser a última a ser processada.

Da análise das restantes geometrias, conclui-se que quando a zona de testes, a montante das ventoinhas, apresenta uma contracção menos abrupta e mais dirigida a pressão de operação diminui (Tabela 21). Isto significa que com este tipo de geometria consegue diminuir-se as perdas de carga, originadas a montante das ventoinhas. Além disso, como na zona de testes se colocará o manequim é preciso que exista uma região ao longo desta com uma velocidade aproximadamente uniforme. Por essa razão, como os perfis de velocidade (Figura 34b₂ a e₂) são semelhantes no ponto 2 e 3 (excepto o caso 17, Figura 34d₂), a posição mais adequada para se colocar o objecto de estudo deverá ser no ponto 2 (mais afastado das ventoinhas).

Da análise da Figura 34 e da Tabela 21, conclui-se que o arredondamento das paredes, a jusante das ventoinhas (caso 15, da Tabela 19), oferece mais resistência à passagem do fluido (queda de pressão de operação superior à do caso 14, Tabela 21). Provavelmente será ainda pertinente retirar as paredes a jusante das ventoinhas, para facilitar o escoamento.

Para cada simulação foram necessários 1.5 GB de memória RAM e, aproximadamente, 20 minutos de processamento. Todos os resultados relacionados com o processo iterativo de simulações encontram-se no *ANEXO H*.

5 Conclusões

O principal objectivo desta dissertação é estudar e otimizar a geometria de um túnel de vento, a introduzir na câmara climática, existente no CeNTI. A sua geometria deve assegurar um escoamento homogéneo na zona de testes, quando este é promovido por três ventoinhas e a velocidade média do ar é de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Neste caso, tornam-se evidentes dois factores que influenciam o escoamento dentro da câmara climática: o facto do escoamento ser promovido por ventoinhas e a própria geometria da câmara. Os estudos desenvolvidos ao longo deste projecto incidem sobre estes dois tópicos. Em ambos os casos, utilizaram-se ferramentas de *CFD* para prever e analisar as características do escoamento do ar.

Começou por se estudar o escoamento promovido por uma ventoinha (estado pseudo-estacionário e transiente) e duas ventoinhas (estado pseudo-estacionário). De seguida analisou-se a influência de alguns parâmetros sobre o escoamento da câmara climática, nomeadamente: os cantos da câmara e a posição, largura e geometria da zona de testes.

No estudo do escoamento promovido por uma ventoinha (em estado pseudo-estacionário) a geometria consistia num tubo com uma ventoinha. Neste ponto, definiram-se todas as configurações da simulação (como por exemplo o modelo *MRF*) e considerações necessárias para simular o movimento de uma ventoinha (em estado pseudo-estacionário). A partir destes conhecimentos, analisou-se o modo como a velocidade de rotação da ventoinha e o volume definido na *MRF* afectam o escoamento. Concluiu-se que quanto maior é a velocidade de rotação da ventoinha mais axial se torna o escoamento e que o volume definido na *MRF* influencia os resultados.

Em relação ao escoamento promovido por duas ventoinhas (em estado pseudo-estacionário) avaliou-se o escoamento promovido por 2 ventoinhas, com e sem carcaça, ao longo de um tubo. Não se simulou a rotação de 3 ventoinhas para que as simulações fossem mais rápidas e consumissem menos memória RAM. Estas simulações tiveram como base as mesmas considerações que no caso do tubo com uma ventoinha. Neste caso, concluiu-se que as velocidades obtidas à saída do tubo são maiores quando se tem apenas uma ventoinha ao invés de duas. Por isso, surgiu a dúvida se o modelo *MRF* se adequava ao sistema em análise.

Quanto ao escoamento promovido por uma ventoinha (em estado transiente), utilizaram-se diferentes considerações e configurações para a simulação (como por exemplo o modelo *Sliding Mesh*). Concluiu-se que se deveria ter simulado um tempo maior de

escoamento, no entanto, como foram necessários 15 dias para simular 1 s de escoamento, o tempo disponível para realizar estes estudos não o permitiu.

De entre os resultados obtidos para o escoamento promovido por ventoinhas, concluiu-se que o manequim deve ser colocado a montante das ventoinhas porque, a jusante destas, o escoamento é mais caótico.

O estudo do escoamento ao longo da câmara climática foi realizado em 2 dimensões, ao longo de um plano horizontal da câmara (simulações em 3 dimensões muito morosas e necessitam de muita memória RAM). O sistema é bastante complexo do ponto de vista computacional e como tal, para garantir que o sistema convergia impôs-se uma sequência de valores, para a entrada do domínio. O término deste processo iterativo de simulações ocorreu quando se encontrou o ponto de operação do sistema. Nestes estudos, estimou-se inicialmente uma largura para a zona de testes e estudou-se o efeito da sua localização na câmara, sobre o escoamento. Além disso, analisou-se como os cantos da câmara e a largura e geometria da zona de testes, influenciavam o escoamento.

No estudo do escoamento ao longo da câmara climática conclui-se que os cantos da câmara climática não necessitam de ser arredondados, a zona de testes deve-se localizar no centro da câmara climática e a região da zona de testes a montante das ventoinhas deve apresentar uma contracção pouco abrupta e bastante dirigida.

6 Avaliação do Trabalho Realizado

Neste capítulo são enumerados os objectivos concretizados, identificadas as limitações do projecto, sugeridas eventuais extensões e modificações do trabalho e por fim, é apresentada uma opinião pessoal sobre o trabalho desenvolvido.

6.1 Objectivos Realizados

A elaboração desta dissertação teve como objectivo o estudo e optimização da geometria de um túnel de vento, a introduzir na câmara climática, existente no CeNTI, através de ferramentas de *CFD*. Com o desenvolvimento deste projecto, a empresa pretendeu adquirir novos conhecimentos que permitam, futuramente, dimensionar a geometria óptima do túnel de vento.

Neste projecto, conseguiu determinar-se a posição mais indicada para colocar o manequim, estudar a influência dos cantos da câmara climática sobre o escoamento, identificar possíveis geometrias para a zona de testes assim como determinar a sua localização dentro da câmara.

6.2 Limitações e Trabalho Futuro

Na elaboração deste projecto, as limitações temporais não permitiram analisar mais geometrias da zona de testes e impediram o estudo de outros factores, que poderão facilitar a homogeneização do escoamento na zona de testes (exemplo: grelha, deflectores). O próprio *hardware* disponível revelou-se também uma limitação. Por essa razão, não foi possível simular o escoamento quando promovido pelo conjunto das três ventoinhas reais nem o escoamento, do ar, em todo o volume da câmara climática.

Outros estudos complementares podem ser realizados, como por exemplo, a análise do escoamento promovido pela ventoinha, com as dimensões reais. A partir destes resultados, conseguir-se-ia estimar a distância mínima entre o manequim e as ventoinhas, que garante que os vórtices originados pelas mesmas não influenciam o escoamento junto do manequim. Quanto à geometria da zona de testes, poder-se-ia retirar as paredes (a jusante das ventoinhas) e adicionar uma grelha na entrada da zona de testes e logo após o manequim (a montante das ventoinhas). Um outro estudo possível seria considerar fenómenos de transferência de calor entre o manequim e o ar que o rodeia.

6.3 Apreciação Final

O trabalho desenvolvido foi bastante gratificante quer do ponto de vista pessoal quer profissional, uma vez que possibilitou a aquisição de novos conhecimentos ao nível do funcionamento de ventoinhas e túneis de vento, escoamento de fluidos, e ferramentas de *CFD*.

Referências

- Multinúcleo. <http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-core>, Acedido a 12 de Abril de 2010
- ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. (2009)
- ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Tutorial Guide*. (2009)
- ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*. (2009)
- Barley, C. D. e Gawlik, K., *Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: Laboratory test and model validation*. international Journal of Hydrogen Energy, **34**: p. 5592-5603 (2009)
- Bogomolov, N. A., *Factors affecting the flow and length of the initial turbulence section in a ventilation fan duct with a diameter of 500mm*. Journal of Mining Science: p. 673-678 (1971)
- Company, H. P., *The Basics of axial flow fans*. McDermott Incorporated, (2000)
- COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, (2008)
- COMSOL, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, (2008)
- Corporation, G. F. *Multiple Fan Systems - Fans in Series and Parallel (FA/115-02)*. <http://www.greenheck.com/library/articles/42>, Acedido a 25 de Maio de 2010
- FLUENT, *Backward-Inclined Centrifugal Fan*, (2001)
- FLUENT. *Fluent Software Training*. <http://www.engr.uconn.edu/~ewebhk/buttons/flfem/fluent5/training/train14.pdf>, Acedido a 2 de Abril de 2010
- FLUENT, *Squirrel Cage Blower*, (2001)
- Gebrehiwot, M. G., De Baerdemaeker, J., et al., *Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester: Computational and experimental study*. Biosystems Engineering, **105**(2): p. 247-256 (2010)
- Laboratory, L. B. N., *Improving Fan System Performance: A Sourcebook for Industry*, The United States Department of Energy Air Movement and Control Association International, Editor(1989)
- Lindgren, B. e Johansson, A. V., *Design and Evaluation of a Low-Speed Wind-Tunnel with Expanding Corners*, Royal Institute of Technology: Stockholm(2002)
- Meyer, C. J. e Kroger, D. G., *Numerical simulation of the flow field in the vicinity of an axial flow fan*. Int. J. Numer. Meth. Fluids **36**: p. 947-969 (2001)
- Moonen, P., Blocken, B., et al., *Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel*. International Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **94**: p. 699-723 (2006)

- Moonen, P., Blocken, B., et al., *Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **94**(10): p. 699-723 (2006)
- Munson, B. R., Young, D. F., et al., *Fundamentals of fluid mechanics*. 3th ed ed, New York: John Wiley & Sons(1998)
- NASA. *Closed Return Wind Tunnel*. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tuncrct.html>,
Acedido a 19 de Abril de 2010
- NASA. *Low Speed Tunnel Operation* <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunop.html>,
Acedido a 19 de Abril de 2010
- Norton, T. e Sun, D.-W., *Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review* Trends in Food Science & Technology, **17**: p. 600-620 (2006)
- Pope, K., Rodrigues, V., et al., *Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine*. Renewable Energy, **35**(5): p. 1043-1051 (2010)
- Sulaiman, M. Y., Azraai, S. B., et al., *CFD Modelling of Air Flow Distribution from a fan*, in *Proceeding of International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering (ICADME)*: Malaysia. p. 11-13 (2009)
- Trefny, C. *Wind Tunnel Aerodynamics*. 20 de Setembro; www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/Chuck/Wind-Tunnels1.ppt, Acedido a 20 de Abril de 2010
- Uzueli, A. G., *Pesquisa, projecto e construção de ferramentas de ensaio para modelos físicos de conforto ambiental - Túnel de vento*)

ANEXO A Manequim térmico e ventoinhas

Este anexo apresenta as principais dimensões do manequim térmico (utilizado nas avaliações de desempenho) e do conjunto das três ventoinhas adquiridas pelo CeNTI. A curva característica das ventoinhas, necessária no estudo da geometria e localização da zona de testes (*subcapítulo 4.4*) é também aqui apresentada.

ANEXO A.1 Manequim térmico

As principais dimensões do manequim térmico encontram-se na Figura 35.

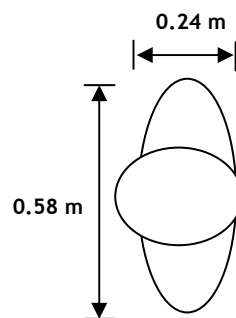


Figura 35- Representação esquemática do manequim térmico (vista de cima)

ANEXO A.2 Ventoinhas

Na Figura 36 encontram-se as dimensões das ventoinhas adquiridas pelo CeNTI. As dimensões das pás das ventoinhas não são aqui apresentadas por uma questão de confidencialidade.

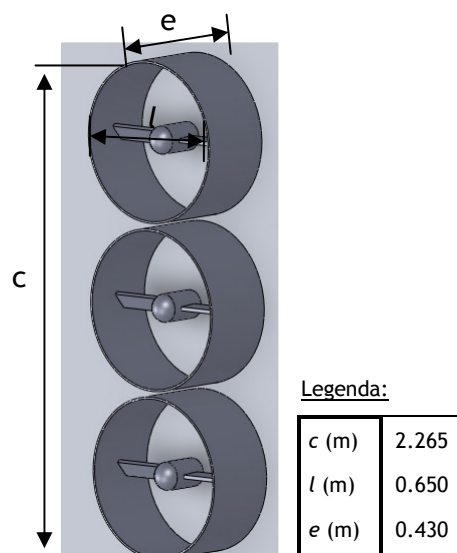


Figura 36 - Representação esquemática do conjunto das três ventoinhas adquiridas pelo CeNTI

Na Figura 37 encontram-se a curva característica de uma ventoinha (dado do fornecedor) e a curva característica que se obtém para as três ventoinhas em paralelo.

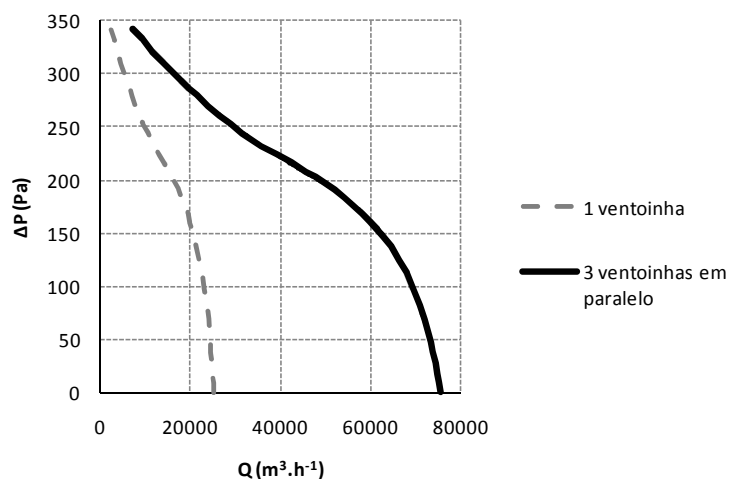


Figura 37 - Curva característica de 1 ventoinha e das 3 ventoinhas em paralelo

Em paralelo, a curva das 3 ventoinhas obtém-se adicionando os caudais para a mesma carga, ou seja, para uma mesma queda de pressão as 3 ventoinhas promovem um caudal maior (Company, 2000; Corporation, 2002; Munson, 1998).

ANEXO B Configuração do modo de processamento (em série/ paralelo)

Quando o número de pontos da grelha é bastante elevado, o FLUENT só consegue correr caso se defina o processamento em paralelo. Neste caso, o FLUENT divide o domínio e processa, em paralelo, partes do domínio em diferentes núcleos (*cores*) do processador .

Para definir o processamento em paralelo em versões anteriores à 6.3.26, pode criar-se um atalho e modificar o campo destino (Figura 38) ou abrir o FLUENT através do comando executar, indicando o destino da pasta (igual ao caso do atalho).

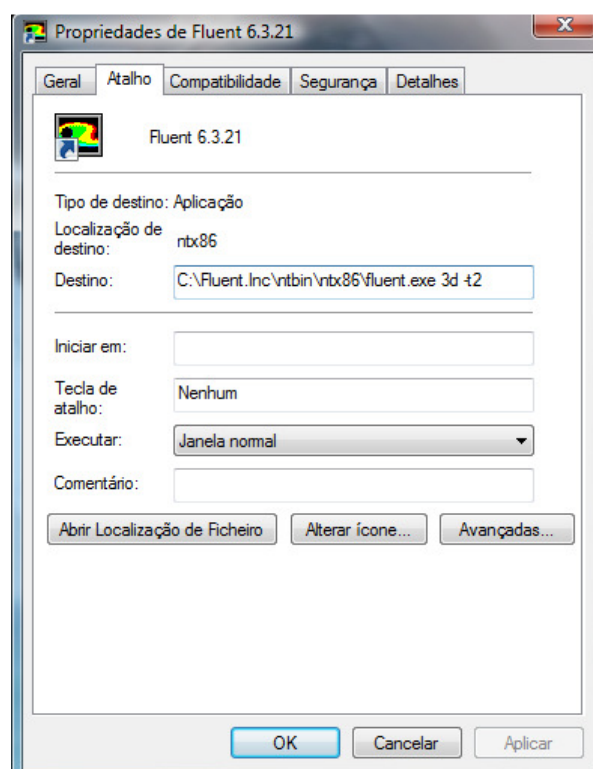


Figura 38 - Criação de um atalho do FLUENT 6.3.21, definindo o processamento em paralelo

No campo destino da Figura 38, *3d* significa que o domínio da simulação é tridimensional e *-t2* indica número de partições pretendidas. Caso se deseje precisão dupla basta acrescentar *dp* depois do *3d* (no exemplo da Figura 38 ficaria *C:\Fluent.Inc\ntbin\ntx86\fluent.exe 3ddp -t2*).

Posto isto, ao abrir o FLUENT, o domínio é dividido no número de partes que se definiu anteriormente na linha de comando (ou através do atalho). No entanto, é prudente verificar como o FLUENT decompõe o domínio, uma vez que essa decomposição pode não facilitar a comunicação entre as partições geradas. A título de exemplo, fez-se um corte ao longo de todo o domínio, Figura 39.

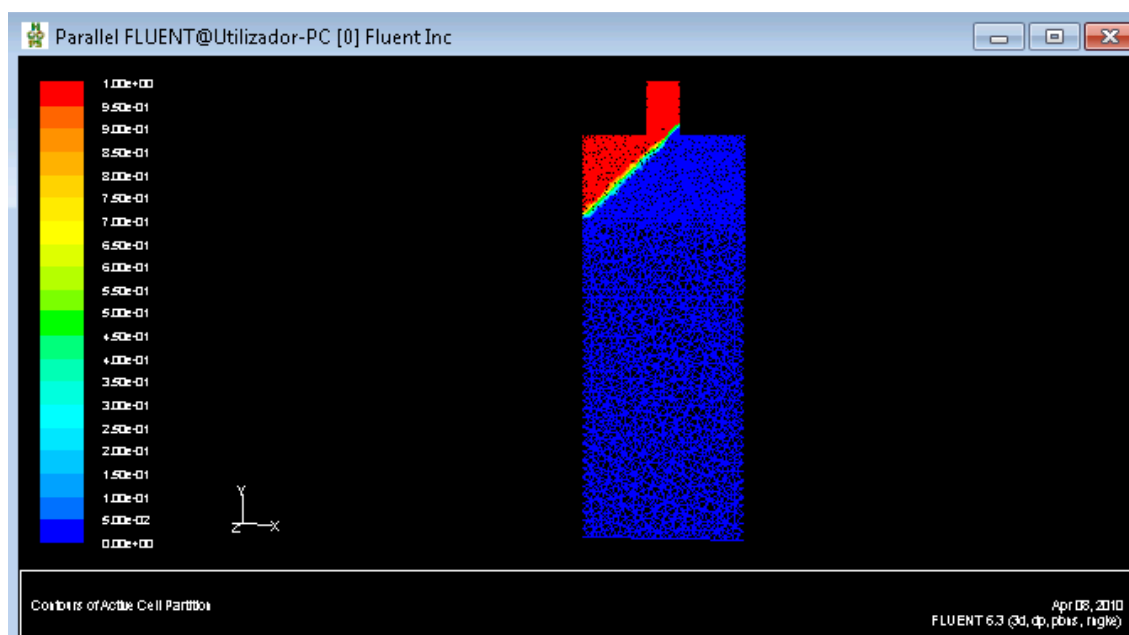


Figura 39 - Divisão do domínio em 2 partes (processado em 2 núcleos do processador)

Como é possível constatar, a decomposição automática do FLUENT (zonas diferenciadas pela cor vermelha e azul) poderá dificultar a comunicação entre as 2 zonas criadas. Portanto, deve ter-se o cuidado de verificar se a divisão realizada pelo FLUENT é a mais adequada ao problema. Caso não o seja, pode decompor-se o domínio manualmente.

ANEXO C Testes de grelha, requisitos de memória RAM e Resíduos, referentes ao *subcapítulo 4.1*

Este anexo apresenta alguma informação que ajuda a compreender as considerações apresentadas no *subcapítulo 4.1*.

ANEXO C.1 Testes de grelha

Como primeira abordagem, analisaram-se as características do escoamento durante as várias simulações. O *software* utilizado para o processamento dos resultados foi o Tecplot 360. Após importar os ficheiros *.cas* e *.dat*, originados durante a simulação, é possível visualizar as características do escoamento em todo o domínio. No entanto, de entre as variáveis pré-definidas no Tecplot, não existe a magnitude do vector velocidade (existem as suas componentes segundo o eixo do x, y e z). Logo, para se observar o vector velocidade em todo o domínio, foi necessário defini-lo como uma nova variável no Tecplot⁸. A velocidade ao longo de um plano, coincidente com o sentido do escoamento encontra-se representada na Figura 40.

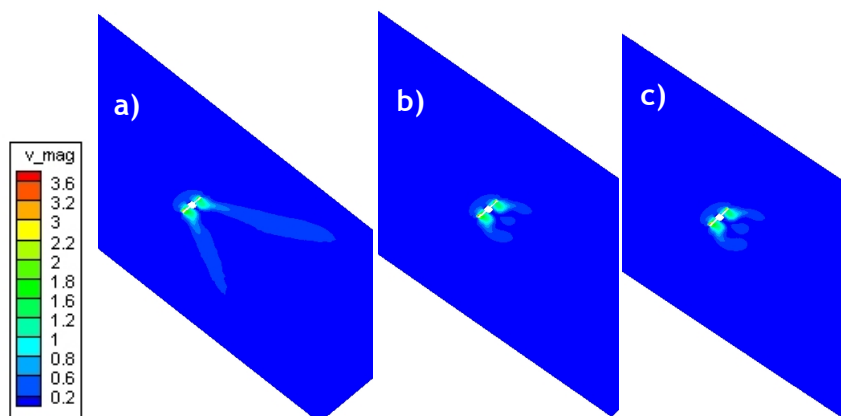


Figura 40 - Velocidade (m.s^{-1}) ao longo do domínio da grelha com *a)* 280×10^3 elementos; *b)* 520×10^3 elementos; *c)* 1×10^6 elementos

A grelha menos densa (Figura 40a) destaca-se das restantes, enquanto a grelha com 520×10^3 elementos apresenta um escoamento idêntico ao da grelha com 1×10^6 elementos. Para analisar em pormenor estes dados é prudente comparar os resultados das 3 simulações,

⁸ Manualmente: *Data* -> *Alter* -> *Specific Equations* -> *Equation* $\{v_mag = \sqrt{\{vx\}^2 + \{vy\}^2 + \{vz\}^2}\}$, onde *v_mag* é a magnitude do vector velocidade, enquanto *vx*, *vy* e *vz* são as componentes do vector velocidade segundo o eixo do x, y e z, respectivamente (ou através de uma subrotina, ANEXO D)

em posições específicas da grelha. A Figura 11 apresenta os locais onde se avaliaram os perfis de velocidade.

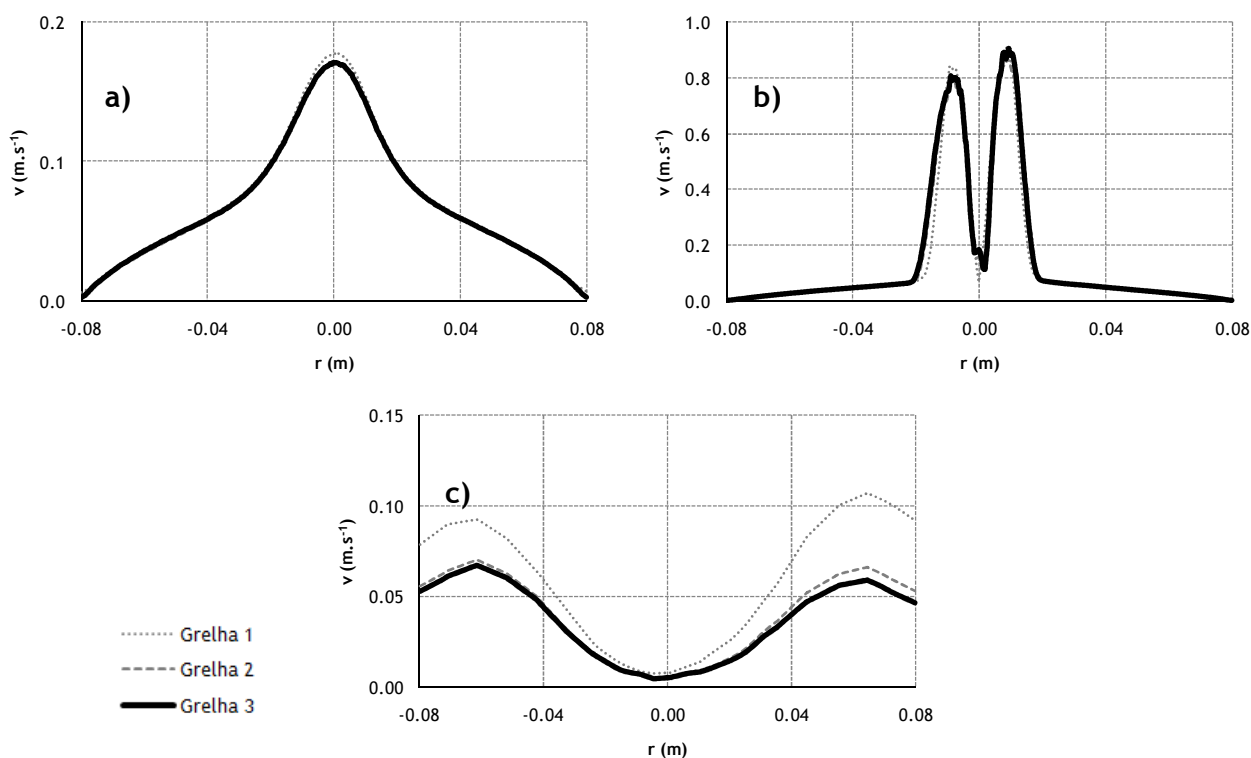


Figura 41 - Perfis de velocidade obtidos para as 3 simulações: a) Posição 1; b) Posição 2; c) Posição 3

Ao comparar os perfis de velocidade da Figura 41, verifica-se que as duas grelhas mais densas apresentam resultados bastante semelhantes, ao contrário da grelha menos densa, cujos resultados se diferenciam, principalmente à saída do tubo (Figura 41c). Portanto, uma vez que a simulação com 520×10^3 elementos (Grelha 2) apresenta resultados independentes da densidade da grelha, a grelha correspondente foi utilizada nos estudos posteriores.

ANEXO C.2 Número de pontos da grelha vs memória RAM

A simulação do escoamento de ar num túnel de vento implica a construção de uma grelha bastante refinada (com um número elevado de pontos) assim como um elevado consumo de memória RAM. Por um lado, quantos mais pontos tiver a grelha, mais precisos são os resultados. Por outro, o tempo e a memória RAM, necessários para processar toda a informação, são também maiores. O compromisso entre o número de pontos da grelha, o tempo de processamento e a memória RAM assume primordial importância caso a grelha exija mais memória RAM do que a disponível ou o tempo de simulação seja tão elevado que torne impraticável a simulação. Sendo assim, surge a necessidade de averiguar como o número de pontos da grelha influencia os requisitos de memória RAM e o tempo de simulação.

Nesta primeira fase, o computador em que a simulação foi realizada tinha 8 GB de RAM e 1 processador com 4 núcleos. As considerações e modelos utilizados no FLUENT (Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7) foram mantidos constantes nas várias simulações, variando apenas o número de pontos das suas grelhas. O processamento ocorreu em paralelo visto o FLUENT não permitir simular todo o domínio em série, devido ao elevado número de pontos. Além disso, foram realizadas simulações considerando precisão simples e precisão dupla.

A Figura 42 apresenta o consumo de memória para as várias simulações:

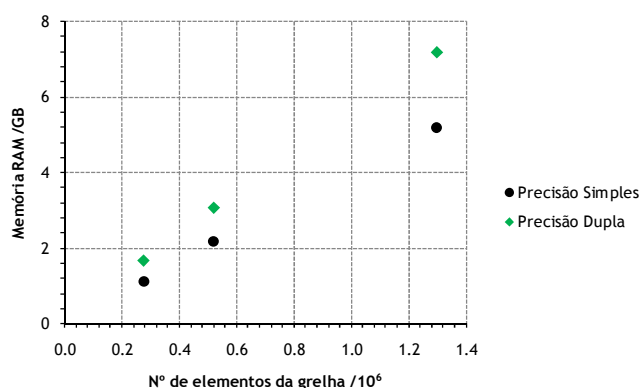


Figura 42 - Requisitos de memória RAM versus número de pontos da grelha

A análise da Figura 42 permite concluir que o consumo de memória aumenta com o aumento da precisão dos resultados (dupla versus simples). No entanto, no problema particular em estudo, não é necessário utilizar precisão dupla (da ordem dos 10^{-12}). De acordo com a literatura consultada (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009), tal rigor é fundamental apenas quando se utilizam equações de transporte de energia. Sendo assim, optou-se por correr a simulação considerando apenas precisão simples de forma a poder aumentar bastante a densidade da grelha, nas porções da geometria em que o escoamento é

mais complexo (cotovelos, estreitamentos da conduta, etc.). Para uma grelha com um milhão de pontos são necessários aproximadamente 4 GB de RAM.

É de salientar que a convergência da simulação com 900 000 pontos, em particular para o valor de ε (velocidade de dissipação turbulenta), mostrou-se lenta e difícil. Para ultrapassar este problema, diminuiu-se o factor de relaxamento do momento, α , (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009; ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009). O modo como o factor de relaxamento influencia as variáveis, E , das equações do momento, é descrito segundo a Equação C.1.

$$E_{i+1} = E_i + \alpha \cdot (E_{calculado} - E_i) \quad (C.1)$$

Como se pode observar na Equação C. 1, ao diminuir α , a variável determinada na iteração anterior, E_i , predomina sobre a (nova) variável calculada, $E_{calculada}$. Consequentemente, ao diminuir α , a variável ao longo da simulação, E_{i+1} , modifica-se em incrementos mais pequenos.

ANEXO C.3 Resíduos

Como critério de paragem da simulação impôs-se que os resíduos teriam que ser inferiores a 10^{-3} . Neste caso, os resíduos “escalados”, R^ϕ , são calculados segundo a equação (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009),

$$R^\phi = \frac{\sum_{n^\circ \text{ elementos } P} \left\{ \sum_{nb} (a_{nb} \times \phi_{nb} + b) - a_p \times \phi_p \right\}}{\sum_{n^\circ \text{ elementos } P} |a_p \times \phi_p|} \quad (C.2)$$

Na Equação C.2, a equação de conservação de uma variável genérica, ϕ , numa célula P , corresponde à parcela,

$$\sum_{nb} (a_{nb} \times \phi_{nb} + b) - a_p \times \phi_p = 0 \quad (C.3)$$

Na Equação C.3, o índice nb é o número de células vizinhas, a_p é o coeficiente que determina o centro do elemento P , a_{nb} é o coeficiente que indica a influência das células vizinhas da célula P , e b é a contribuição do termo de origem (*source*)⁹.

O manual do FLUENT (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009) refere que, para escoamentos em que não existe transferência de calor, uma precisão desta magnitude (10^{-3}) é

⁹ Termo de origem pode ser, por exemplo, a energia produzida durante uma reacção (neste caso $b=0$)

suficiente para garantir bons resultados. Contudo, não é claro se isto se aplica a escoamentos promovidos por uma ventoinha (em que se utiliza mais que uma *frame* de referência). Assim sendo, foi necessário averiguar se resíduos da ordem de 10^{-3} originam resultados precisos. Para tal, aproveitou-se a geometria definida anteriormente, Figura 8, tal como a grelha cujos resultados são independentes do número de pontos, grelha 2. Relativamente ao parâmetro de convergência, estabeleceu-se que a simulação deveria terminar quando os resíduos fossem da ordem de 10^{-5} (como se considera precisão simples os resíduos só podem diminuir até os 10^{-6}). Os resultados obtidos para as duas simulações contemplam diferentes parâmetros de convergência apresentam-se na Figura 43.

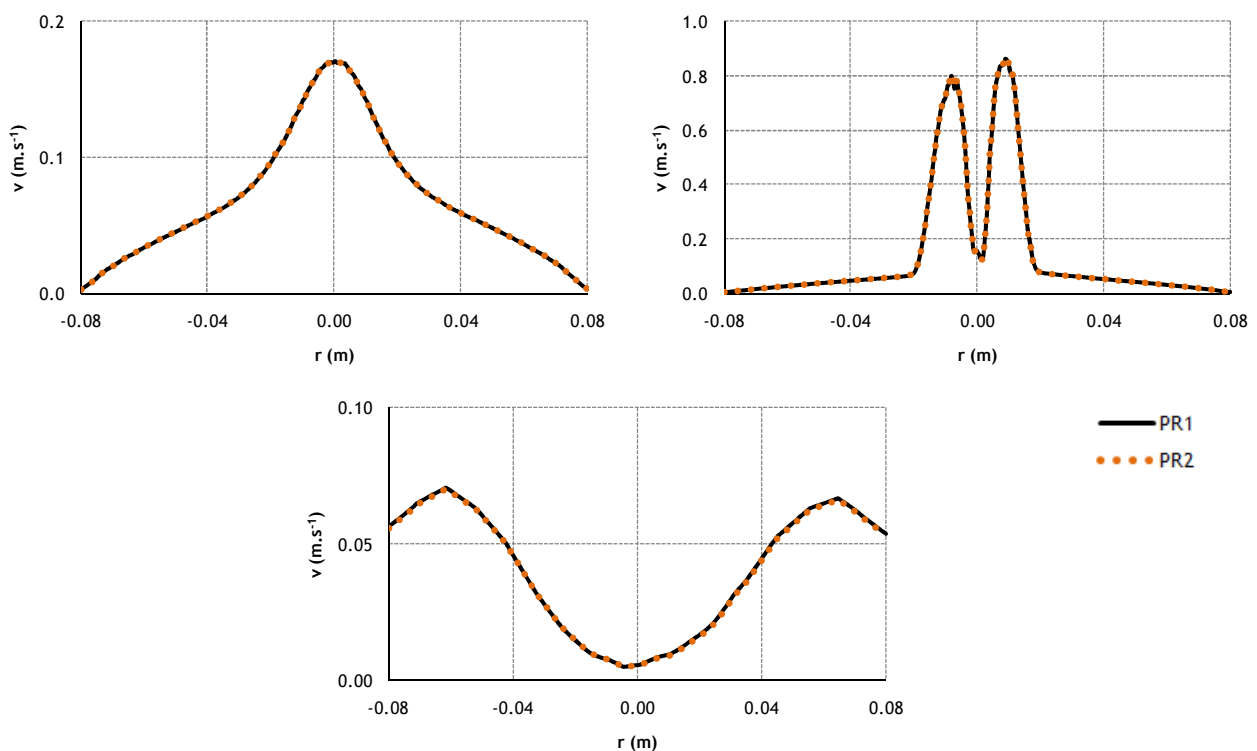


Figura 43 - Perfis de velocidade obtidos para a grelha 2 (para ambos os parâmetros de convergência; PR1 e PR2 correspondem a resíduos inferiores a 10^{-5} e 10^{-3} , respectivamente), na posição: a) 1; b) 2; c) 3 (Figura 11)

Os perfis correspondem a zonas a montante e a jusante da ventoinha (a e b) e à saída do tubo (c). Como se pode verificar, os resultados não variam quando se altera o critério de convergência dos resíduos (de 10^{-5} para 10^{-3}). Por isso, pode admitir-se, como critério de convergência, resíduos da ordem dos 10^{-3} .

ANEXO D Cálculo da magnitude do vector velocidade no *Tecplot*

Criou-se uma subrotina que calcula a nova variável magnitude do vector velocidade, *v_mag*, e grava os resultados de interesse. O seguinte código, Figura 44, Figura 45 e Figura 46, tem de ser gravado no formato *.mcr* e importado para o Tecplot 360 através do menu *Scripting, Play Macro/Script*.

```

#!MC 1000

$!varset |caminho1| = "E:\Dados_CeNTI\Soraia"
#! Inputbox onde se introduz o caminho onde se quer gravar o layout e os seus resultados
$!PROMPTFORTEXTSTRING |caminho2|
    INSTRUCTIONS = 'Nome do layout'

#!Altera valores das componentes de velocidade
$!RENAMEDATASETVAR
    VAR = 5
    NAME = 'vx'
$!RENAMEDATASETVAR
    VAR = 7
    NAME = 'vy'
$!RENAMEDATASETVAR
    VAR = 9
    NAME = 'vz'

#!Calcula a magnitude do vector velocidade
$!ALTERDATA
    Equation= '{v_mag}=sqrt({vx}**2 + {vy}**2 + {vz}**2)'
    DATATYPE= Double

#!Extrai os valores do plano z=0
$!GLOBALTHREED
    SLICE
    {
        ORIGIN {z=0}
        NORMAL
        {
            X=0
            Y=0
            Z=1
        }
    }

```

Figura 44 - Código escrito para o *software* Tecplot que permite calcular a velocidade em todo o domínio em estudo e grava os resultados (Parte 1)

```

$!CREATESLICEZONEFROMPLANE
  SLICESOURCE = VOLUMEZONES
$!RENAMEDATASETZONE
  ZONE = 9
  NAME = 'z=0'

#! Desactiva todas as zonas com excepção do plano z=0
$!ACTIVEFIELDZONES -= [1-8]

#!valores ao longo de y=0,02
  $!GLOBALTHREED
    SLICE
    {
      ORIGIN {y=0.02}
      NORMAL
      {
        X=0
        Y=1
        Z=0
      }
    }
$!CREATESLICEZONEFROMPLANE
  SLICESOURCE = SURFACEZONES

#!valores ao longo de y=0,045
  $!GLOBALTHREED
    SLICE
    {
      ORIGIN {y=0.045}
      NORMAL
      {
        X=0
        Y=1
        Z=0
      }
    }
$!CREATESLICEZONEFROMPLANE
  SLICESOURCE = SURFACEZONES

#!valores ao longo de y=0,24
  $!GLOBALTHREED
    SLICE
    {
      ORIGIN {y=0.24}
      NORMAL
      {
        X=0
        Y=1
        Z=0
      }
    }

```

Figura 45 - Código escrito para o *software* Tecplot que permite calcular a velocidade em todo o domínio em estudo e grava os resultados (Parte 2)

```
$!CREATESLICEZONEFROMPLANE
SLICESOURCE = SURFACEZONES

$!WRITEDATASET "|caminho1||caminho2|y=0,02.dat"
INCLUDETEXT = NO
INCLUDEGEOM = NO
INCLUDECUSTOMLABELS = NO
ASSOCIATELAYOUTWITHDATAFILE = NO
ZONELIST = [10]
VARPOSITIONLIST = [1-2,4,37]
BINARY = NO
USEPOINTFORMAT = YES
PRECISION = 9

$!WRITEDATASET "|caminho1||caminho2|y=0,045.dat"
INCLUDETEXT = NO
INCLUDEGEOM = NO
INCLUDECUSTOMLABELS = NO
ASSOCIATELAYOUTWITHDATAFILE = NO
ZONELIST = [11]
VARPOSITIONLIST = [1-2,4,37]
BINARY = NO
USEPOINTFORMAT = YES
PRECISION = 9

$!WRITEDATASET "|caminho1||caminho2|y=0,24.dat"
INCLUDETEXT = NO
INCLUDEGEOM = NO
INCLUDECUSTOMLABELS = NO
ASSOCIATELAYOUTWITHDATAFILE = NO
ZONELIST = [12]
VARPOSITIONLIST = [1-2,4,37]
BINARY = NO
USEPOINTFORMAT = YES
PRECISION = 9
```

Figura 46 - Código escrito para o *software* Tecplot que permite calcular a velocidade em todo o domínio em estudo e grava os resultados (Parte 3)

ANEXO E Grelhas, condições-fronteira e testes de grelha referentes ao *subcapítulo 4.2*

ANEXO E.1 Características das grelhas

No estudo do escoamento promovido por duas ventoinhas, construíram-se 3 grelhas cujas características e número de elementos se encontram compilados na Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 - Características das grelhas 4, 5 e 6

Volume	Elements ¹⁰	Type	Spacing		
			Grelha 4	Grelha 5	Grelha 6
V1*			Interval size: 0,5	Interval size: 0,5	Interval size: 0,5
V2			Interval size: 1	Interval size: 0,6	Interval size: 0,6
V3			Interval size: 2	Interval size: 1,5	Interval size: 1,5
V4	Tri	Pave	Interval count: 100	Interval count: 100	Interval size: 1,5
V5**			Interval count: 50	Interval size: 10	Interval size: 10
V6			Interval count: 100	Interval count: 100	Interval size: 1,5
V7**			Interval count: 50	Interval size: 10	Interval size: 10

* Além das superfícies a montante e a jusante das ventoinhas, definiram-se os elementos da grelha nas paredes das ventoinhas

** Definiram-se os elementos da grelha nas paredes do tubo (deste modo garante-se uma qualidade dos elementos da grelha de 0.8)

Tabela 23 - Número de elementos das grelhas 4, 5 e 6

Grelha	Nº de Elementos
4	8×10^5
5	1×10^6
6	2×10^6

A título de exemplo, apresenta-se a grelha 4 na Figura 47, onde constam as principais superfícies utilizadas para a construção da grelha, Tabela 22.

¹⁰ Elements, Type e Spacing são opções do GAMBIT disponíveis para definir as características dos elementos da grelha

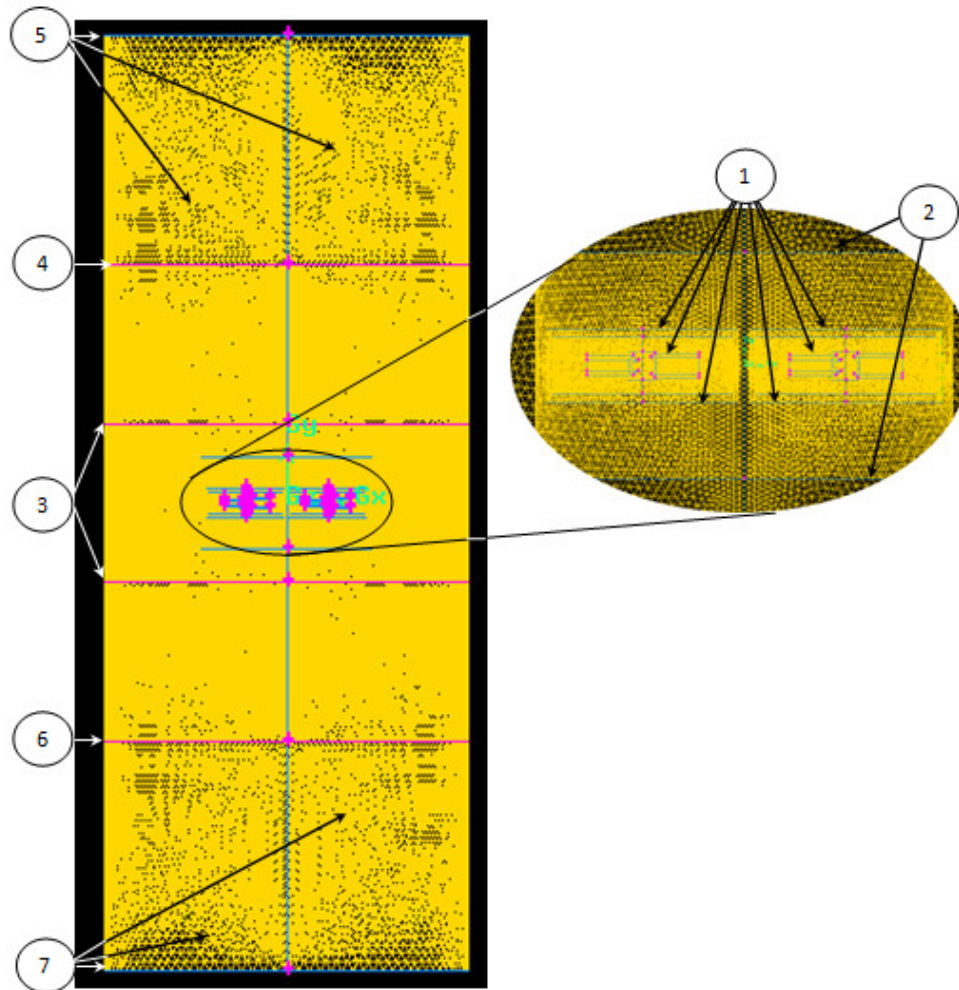


Figura 47 - Identificação das áreas a partir das quais se construiu a grelha 4 (Tabela 22); 1) Superfícies das ventoinhas e do V_1 , 2) Superfícies do V_2 ; 3) Superfícies do V_3 ; 4) Superfície do V_4 ; 5) Superfícies do V_5 ; 6) Superfície do V_6 ; 7) Superfícies V_7

ANEXO E.2 Condições-fronteira

Tabela 24 - Condições-fronteira utilizadas na simulação do escoamento promovido por duas ventoinhas

Zona	Tipo de condição-fronteira	Considerações
Fluido	Fluid	Material Name: Ar Motion Type: Stationary
Fluido com rotação (associado à ventoinha 1)	Fluid	Material Name: Ar Motion Type: Moving Reference Frame Rotarion-Axis Origin: (0,0,0) Rotarion-Axis Direction: (0,1,0) Speed (rad/s): 365 Wall motion: Moving Wall Motion: Relative to Adjacent Cell Zone Rotational Speed (rad/s): 0
Paredes da ventoinha 1	Wall	Rotarion-Axis Origin: (0,0,0) Rotarion-Axis Direction: (0,1,0) Shear Condition: No-Slip Wall Roughness: Roughness Constant= 0.5 *
Fluido com rotação (associado à ventoinha 2)	Fluid	Material Name: Ar Motion Type: Moving Reference Frame Rotarion-Axis Origin: (0,0,0) Rotarion-Axis Direction: (0,1,0) Speed (rad/s): 365
Paredes da ventoinha 2	Wall	Wall motion: Moving Wall Motion: Relative to Adjacent Cell Zone Rotational Speed (rad/s): 0 Rotarion-Axis Origin: (0,0,0) Rotarion-Axis Direction: (0,1,0) Shear Condition: No-Slip Wall Roughness: Roughness Constant= 0.5 *
Entrada	Pressure-Inlet	Pressão atmosférica Back Flow Turbulent Intensity (%) = 6 % ** Back Flow Hydraulic Diameter = 0.16 m
Saída	Pressure-Outlet	Pressão atmosférica Back Flow Turbulent Intensity (%) = 6 % ** Back Flow Hydraulic Diameter = 0.16 m

*- Valor pré-definido

** - Intensidade de turbulência estimada pela Equação 4.1

ANEXO E.3 Testes de grelha

Quando se simula tem que se garantir que os resultados obtidos são independentes do número de elementos da grelha. Para o efeito, compararam-se os perfis de velocidades, Figura 48 das 3 grelhas em estudo, Tabela 22 e Tabela 23.

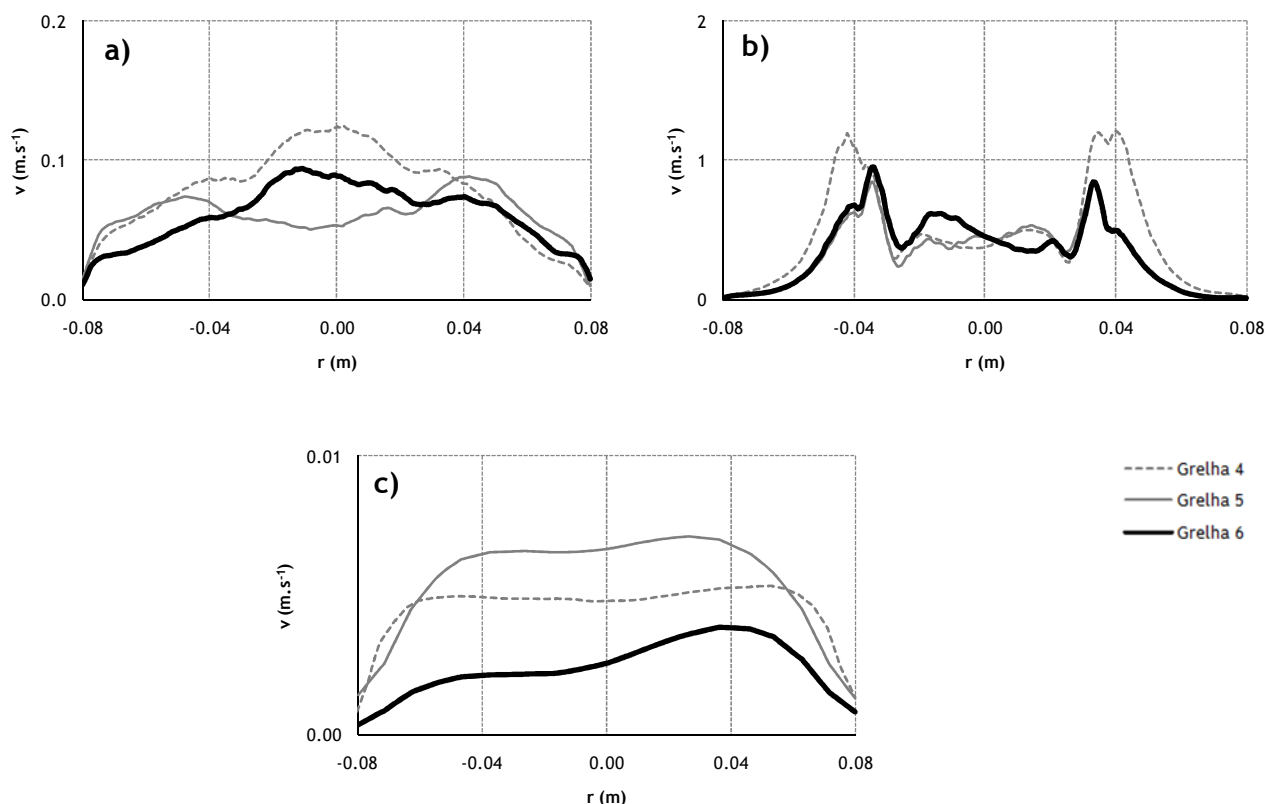


Figura 48 - Perfis de velocidade obtidos para os diferentes casos estudados (Tabela 22), nas posições: a) 1; b) 2; c) 3 (ver Figura 11)

Na análise dos perfis de velocidade da Figura 48 é preciso ter em atenção que a escala dos gráficos é diferente (para que as diferenças entre os resultados sejam mais evidentes). Os perfis de velocidade da grelha 6 e 5 são semelhantes, o que permite concluir que os resultados com estas grelhas são independentes do número de elementos da grelha. Por uma questão de precisão optou-se por utilizar a grelha com maior número de elementos, a grelha 6.

Relativamente à memória RAM necessária, para a simulação com maior número de elementos de grelha (caso 6) são necessários 9 GB de memória RAM e de 7 horas de processamento.

ANEXO F Largura da zona de testes

Alguns limites podem ser estabelecidos para a largura da zona de testes, l_{zt} , Tabela 25.

Tabela 25 - Considerações ponderadas sobre a largura da zona de testes, l_{zt}

Consideração	Razão da escolha	l_{zt} (m)
1	Largura da câmara climática (<i>subcapítulo 2.1</i>)	l_{cc}
2	Caudal máximo promovido pelas 3 ventoinhas ¹¹	1.33
3	Largura do manequim (<i>ANEXO A.1</i>)	0.58

A largura máxima que a zona de teste pode ter é igual à largura de toda a câmara climática. Contudo, nesse cenário, ao colocar as ventoinhas dentro da câmara não se consegue obter um escoamento controlado/homogéneo. No caso da consideração 2, da Tabela 25, determinou-se o caudal máximo que as ventoinhas conseguem promover (quando não há perdas de carga ao longo do sistema) através da curva característica das 3 ventoinhas (*ANEXO A.2*). Como a altura das ventoinhas é constante e a velocidade de escoamento pretendida na zona de testes é conhecida ($7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), é possível calcular a largura máxima da zona de testes¹². É também pertinente saber a largura mínima da zona de testes, consideração 3. Neste caso, terá que ser maior que largura do manequim térmico (*ANEXO A.1*), para que possa ocorrer escoamento em torno deste.

Atendendo às considerações ponderadas na Tabela 25, optou-se por escolher para a largura inicial da zona de testes 0.88 m, o que corresponde a $50 \times 10^3 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (caudal intermédio que as ventoinhas conseguem originar, *ANEXO A.2*).

¹¹ Retirado da curva característica das 3 ventoinhas, Figura 37

¹² $L_{zt} = \frac{Q}{v \times c_{cc}}$, onde L_{zt} é a largura da zona de testes, v é a velocidade de escoamento, Q é o caudal volumétrico e c_{cc} é a altura da câmara climática

ANEXO G Testes de grelha e parâmetros de turbulência referentes ao *subcapítulo 4.4*

Este anexo contém informação sobre os testes de grelha e os parâmetros de turbulência utilizados durante as simulações, do *subcapítulo 4.4*.

ANEXO G.1 Testes de grelha

Antes de proceder à análise do escoamento ao longo da câmara climática (*subcapítulo 4.4*), é preciso determinar a grelha que produz resultados independentes do número de elementos da grelha. Para o efeito, construíram-se três grelhas, Tabela 26, a partir da geometria $G_{zt, centro}$ (Figura 22a).

Tabela 26 - Número de elementos das grelhas 7, 8 e 9

Grelha	Nº de Elementos
7	4×10^3
8	2×10^4
9	6×10^4

Dada a estrutura em estudo, $G_{zt, centro}$ (Figura 22a), presume-se que a convergência é mais difícil nos cantos da câmara e junto das paredes da zona de testes. Por essa razão, na construção das grelhas refinaram-se esses locais.

Relativamente à análise dos resultados, estes não foram avaliados no ponto de operação do sistema (processo de convergência muito moroso; ver *subcapítulo 4.4.1.5*). Em vez disso, comparam-se os perfis de velocidade (Figura 49b) na posição representada na Figura 49a, quando a queda de pressão imposta era 10 Pa.

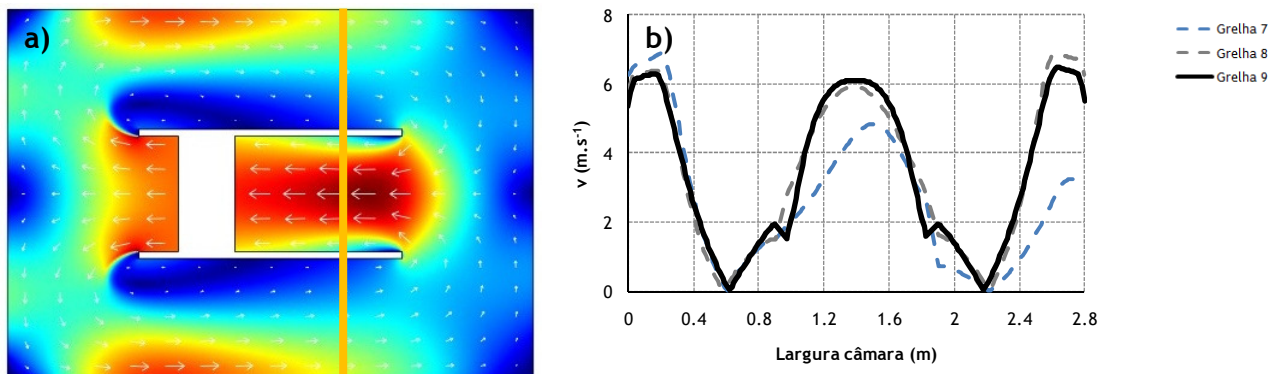


Figura 49 - Testes de grelha: a) Local (linha a amarelo) onde se avaliaram os diferentes perfis de velocidade; b) Perfis de velocidade obtidos para os diferentes casos estudados (Tabela 26), na posição representada em a)

Da análise da Figura 49b constata-se que junto das paredes (quer da câmara quer da zona de testes) os resultados entre as grelhas variam bastante. Além disso, as duas grelhas mais densas, grelha 8 e 9, apresentam resultados bastante semelhantes, ao contrário da grelha menos densa, cujos resultados se diferenciam, principalmente no centro da zona de testes. Assim sendo, conclui-se a partir de 2×10^4 elementos (grelha 8), os resultados são independentes da densidade da grelha e como tal, optou-se por utilizar este número de elementos de grelha, nos estudos posteriores.

ANEXO G.2 Parâmetros de turbulência

Quando se define a condição-fronteira de entrada, Tabela 15, dois parâmetros de turbulência têm que ser definidos: a intensidade de turbulência, I_t , e o comprimento característico dos vórtices, L_t . A I_t é um parâmetro de turbulência que quantifica a turbulência (ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, 2009; COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, 2008) e varia consoante o tipo de ventoinha que se encontra a operar (Bogomolov, 1971). O L_t , tal como o nome indica, define-se como o comprimento característico que os vórtices podem apresentar (COMSOL, *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*, 2008). A escolha desadequada dos parâmetros de turbulência conduz a resultados irrealistas. Por essa razão, estudou-se o efeito dos parâmetros de turbulência sobre o escoamento ao longo da câmara climática. Quanto à construção da geometria e da grelha, às condições-fronteira e à configuração da simulação atenderam-se às considerações indicadas do *subcapítulo 4.4.1* ao *4.4.1.5*. Os valores testados encontram-se apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Parâmetros de turbulência

Caso	I_t (%)	L_t (m)
8	0.05	0.01
9	0.05	0.65
10	0.20	0.65

De entre os valores apresentados na Tabela 27, $I_t = 0.05$ e $L_t = 0.01$ m são valores pré-definidos do COMSOL, $L_t = 0.65$ m corresponde à largura da carcaça das ventoinhas (Figura 36) e $I_t = 0.20$ é um valor retirado da literatura (Bogomolov, 1971). No caso do $L_t = 0.65$ m, considerou-se que o comprimento característico dos vórtices pode ser, no máximo, igual ao diâmetro da carcaça das ventoinhas (0.65 m), isto na saída das ventoinhas. Logo após as mesmas, podem formar-se vórtices com outros tamanhos, contudo não é necessário definir as suas dimensões no simulador.

Posto isto, avaliou-se o efeito que os diferentes parâmetros de turbulência têm sobre as condições de operação do sistema, Figura 50.

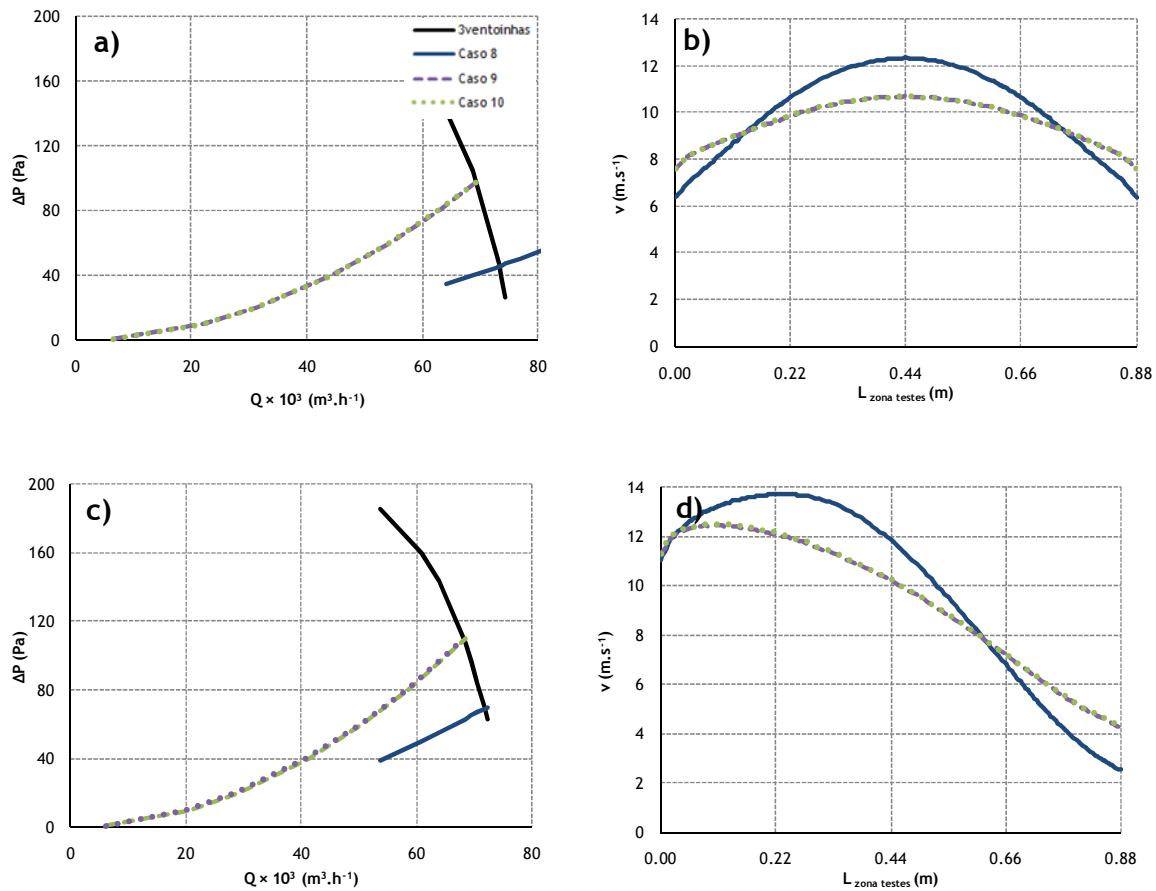


Figura 50 - Efeito dos diferentes parâmetros de turbulência nas: a) Curvas características do sistema para a $G_{zt, \text{centro}}$; b) Perfis de velocidade obtidos a montante das ventoinhas para a $G_{zt, \text{centro}}$; c) Curvas características do sistema para a $G_{zt, \text{parede}}$; d) Perfis de velocidade obtidos a montante das ventoinhas para a $G_{zt, \text{parede}}$

Da análise das curvas características do sistema, Figura 50a e c, conclui-se que o comprimento característico dos vórtices influencia significativamente os resultados. Quanto maior for o L_t (65 vezes superior ao valor pré-definido) maior será a queda de pressão que o sistema terá que vencer para conseguir escoar o mesmo caudal de ar. Contudo, o diâmetro da carcaça das ventoinhas parece ser uma boa estimativa para o L_t . Quanto à I_t , o seu aumento (4 vezes) não produz grandes diferenças nos resultados.

Em relação aos perfis de velocidade, Figura 50b e d, os perfis obtidos com os valores pré-definidos do COMSOL destacam-se dos restantes. Neste caso, o aumento da I_t não influencia os resultados. Apesar disso, das duas hipóteses apresentadas, $I_t = 0.05$ e 0.20 , é aconselhável utilizar a intensidade de turbulência maior, uma vez que o escoamento promovido por ventoinhas é caracterizado por apresentar valores de I_t elevados (Bogomolov, 1971).

ANEXO H Processo iterativo de simulações

A partir do *subcapítulo 4.4* foi necessário recorrer a um processo iterativo de simulações que garantisse a convergência do sistema (ver *subcapítulo 4.4.1.5*). Os principais resultados encontram-se apresentados na Tabela 28 e Tabela 29.

Tabela 28 - Principais resultados obtidos no processo iterativo das simulações (Parte 1)

Capítulo	Consideração	$\Delta P_{\text{imposto}}$ (Pa)	$v_{\text{média, na saída}}$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\Delta P_{\text{curva das 3 ventoinhas}}$ (Pa)
4.4.1.6	Zona de testes no centro	1	0.9	348
		10	3.0	279
		20	4.3	248
		40	6.1	210
		60	7.6	184
		80	8.7	151
		97	9.6	101
		98	9.7	97
		99	9.7	93
		100	9.8	89
4.4.2.4	Zona de testes junto da parede	1	0.9	351
		10	2.8	285
		20	4.0	255
		40	5.7	218
		60	7.0	195
		80	8.1	171
		110	9.5	110
4.4.2.4	Zona de testes no centro (caso 12 da Tabela 16)	1	0.9	347
		10	3.1	277
		20	4.4	246
		40	6.2	208
		60	7.7	181
		80	8.9	145
		95	9.7	97
		110	10.4	20
4.4.2.4	Zona de testes junto da parede (caso 12 da Tabela 16)	10	2.9	283
		20	4.1	254
		40	5.8	217
		60	7.1	192
		80	8.2	168
		105	9.4	114
		107	9.5	108
		110	9.7	98

Capítulo	Consideração	$\Delta P_{\text{imposto}}$ (Pa)	$v_{\text{média, na saída}}$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\Delta P_{\text{curva das 3 ventoinhas}}$ (Pa)
4.4.2.4	Zona de testes no centro (caso 13 da Tabela 16)	1	0.9	347
		10	3.1	277
		20	4.4	245
		40	6.3	207
		60	7.7	180
		95	9.7	93
		100	10.0	70
		1	0.9	405
		10	3.0	279
4.4.2.4	Zona de testes junto da parede (caso 13 da Tabela 16)	20	4.3	248
		40	6.1	210
		60	7.5	184
		80	8.7	150
		95	9.5	108
		97	9.6	100
		100	9.8	88
4.4.3.4	Zona de testes no centro ($L_{zt} = 1.33 m$)	1	0.7	341
		10	2.4	267
		20	3.4	233
		40	4.8	193
		60	5.9	153
		70	6.3	118
		75	6.6	94
		77	6.7	83
4.4.3.4	Zona de testes junto da parede ($L_{zt} = 1.33 m$)	80	6.8	65
		1	0.6	350
		10	2.0	282
		20	2.8	252
		40	4.0	215
		60	4.9	190
		80	5.7	164
4.4.3.4	Zona de testes junto da parede ($L_{zt} = 1.33 m$)	100	6.3	119
		105	6.5	102
		110	6.7	84

Tabela 29 - Principais resultados obtidos no processo iterativo das simulações (Parte 2)

Capítulo	Consideração	$\Delta P_{\text{imposto}}$ (Pa)	$v_{\text{média, na saída}}$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\Delta P_{\text{curva das 3 ventoinhas}}$ (Pa)	Capítulo	Consideração	$\Delta P_{\text{imposto}}$ (Pa)	$v_{\text{média, na saída}}$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\Delta P_{\text{curva das 3 ventoinhas}}$ (Pa)
4.4.4.4	Geometria da zona de testes, caso 14, da Tabela 19	10	3.9	283	ANEXO G.2	Zona de testes no centro (caso 8, da Tabela 27)	35	8.9	141
		40	7.8	217			40	9.6	105
		60	9.6	193			45	10.2	53
		80	11.1	168			45.5	10.2	46
		100	12.4	130			46	10.3	40
		105	12.7	116			47	10.4	26
		107	12.9	110			50	10.7	-20
		109	13.0	104			60	11.7	-245
		120	13.6	62			39	7.5	185
4.4.4.4	Geometria da zona de testes, caso 15, da Tabela 19	10	3.6	290	ANEXO G.2	Zona de testes junto da parede (caso 8, da Tabela 27)	50	8.5	159
		40	7.2	226			55	8.9	143
		60	8.8	203			63	9.5	143
		80	10.2	184			65	9.7	96
		100	11.4	161			67	9.8	83
		120	12.5	125			69	10.0	70
		122	12.6	120			70	10.1	63
4.4.4.4	Geometria da zona de testes, caso 16, da Tabela 19	10	3.9	282	ANEXO G.2	Zona de testes no centro (caso 9, da Tabela 27)	1	1.0	347
		40	8.0	214			10	3.1	278
		60	9.8	189			20	4.4	247
		80	11.4	162			40	6.2	209
		100	12.7	115			60	7.6	183
		102	12.9	109			80	8.8	149
		103	12.9	106			97	9.7	98
		105	13.1	99			98	9.7	94
		110	13.4	80			100	9.8	86
4.4.4.4	Geometria da zona de testes, caso 17, da Tabela 19	10	4.2	278	ANEXO G.2	Zona de testes junto da parede (caso 9, da Tabela 27)	1	0.9	350
		40	8.4	208			10	2.9	283
		60	10.4	181			20	4.1	254
		80	12.0	144			40	5.8	217
		90	12.8	115			60	7.1	193
		95	13.1	96			80	8.1	170
		100	13.5	74			108	9.5	112
4.4.4.4	Geometria da zona de testes, caso 18, da Tabela 19	10	4.1	280			110	9.6	106
		40	8.2	211					
		60	10.1	185					
		80	11.7	154					
		98	13.0	104					
		99	13.0	100					
		100	13.1	96					