

SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE DESENFUMAGEM DE PARQUES
DE ESTACIONAMENTO RECORRENDO AO PROGRAMA
OPENFOAM

Paulo Inverneiro

Dissertação submetida para a obtenção do grau de
Mestre em Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



Outubro de 2013

Relatório da Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado
em Energias Sustentáveis

Candidato: Paulo Inverneiro, N° 1070732, 1070732@isep.ipp.pt
Orientação Científica: Dr. Eng. Aristides Castro, fac@isep.ipp.pt
Co-Orientador: Eng. Isabel Sarmento, isp@isep.ipp.pt

Mestrado em Energias Sustentáveis
Perfil de Climatização
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



Outubro de 2013

Agradecimentos

Desejo expressar a minha gratidão ao meu orientador Dr. Eng. Aristides Castro pelo seu apoio contínuo, pelas críticas construtivas e pela infinita paciência. Menciono que sem a sua ajuda seria impossível a realização desta dissertação.

Agradeço também à Eng. Isabel Sarmento por toda a informação técnica disponibilizada e pelos esclarecimentos prestados.

Resumo

Os parques de estacionamento cobertos estão obrigados por legislação a terem sistemas de desenfumagem. Assim, nesta dissertação desenvolve-se um procedimento computacional para a análise e verificação de funcionamento de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso para parques de estacionamento, recorrendo ao software de mecânica dos fluidos computacional *OpenFOAM*.

Actualmente nos sistemas de desenfumagem de parques de estacionamento estão a ser aplicados ventiladores de impulso. Este tipo de ventiladores não estão contemplados pela legislação em vigor. Assim, para serem utilizados é necessário verificar se estes podem substituir as redes de condutas. A verificação do funcionamento de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso é efectuada com recurso a programas de simulação de mecânica dos fluidos computacional.

O software *OpenFOAM* não tem tutoriais para ventiladores de impulso. Assim, foi executado um procedimento para validação dos ventiladores de impulso. A validação consistiu em reproduzir-se uma experiência executada por [Giesen et al. \(2011\)](#). Executaram-se várias simulações com diferentes modelos de turbulência, verificando-se que o programa *buoyant-pimplefoam* do software *OpenFOAM* ao utilizar o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ simulou quase na perfeição os ventiladores de impulso.

O desenvolvimento do procedimento computacional foi executado para um parque de estacionamento com uma geometria bastante complexa. O parque de estacionamento foi criado com um software em 3D e posteriormente inserido numa malha já criada com as dimensões exteriores do parque. Foram estipuladas as condições de fronteira e executou-se uma simulação de seiscentos segundos com parâmetros determinados previamente. O processamento da simulação teve a duração de aproximadamente oito dias. Dos resultados obtidos concluiu-se que o procedimento computacional apresentado simula adequadamente sistemas de desenfumagem em parques de estacionamento.

Palavras-chave: *OpenFOAM*, Parque de Estacionamento, Desenfumagem, Ventilador de Impulso.

Abstract

Covered car parks are obliged by legislation to have smoke control systems. Thus, this dissertation develops a computational procedure for the analysis and verification of operation of smoke control systems with jet fans for car parks, using the computational fluid dynamics software *OpenFOAM*.

Currently jet fans are being applied in smoke control systems for car parks. This type of fans are not covered by existing legislation. Thus, for use it is necessary to determine whether these can replace ducts networks. The verification of operation of smoke control system with jet fans is made by simulation programs of computational fluid dynamics.

The *OpenFOAM* software does not have tutorials for jet fans. Thus, it was performed a procedure for validating the jet fans. The validation consisted in reproduce an experiment performed by [Giesen et al. \(2011\)](#). Several simulations were executed using different turbulence models and it was verified that the program *buoyantpimplefoam* of software *OpenFOAM* using the $k - \varepsilon$ turbulence model, simulated almost perfectly jet fans.

The development of the computational procedure was performed for a car park with a very complex geometry. The car park was created with 3D software and then inserted into a mesh already created with the external dimensions of the park. Boundary conditions were prescribed and a simulation of six hundred seconds were performed with parameters determined previously. The simulation took approximately eight days. From the results it was concluded that the computational procedure presented here can adequately simulate car parks smoke control systems.

Keywords: *OpenFOAM*, Car Park, Smoke Control, Jet Fan.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Nomenclatura	xiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e objectivos da presente dissertação	1
1.2 Conteúdo da dissertação	2
1.3 Revisão bibliográfica	2
2 Enquadramento	3
2.1 Introdução	3
2.2 Modelo matemático	3
2.2.1 Leis fundamentais	4
2.2.2 Equações para o campo médio	4
2.2.3 Modelos de turbulência	5
2.3 OpenFOAM	11
2.3.1 Estrutura do OpenFOAM	11
2.3.2 Algoritmo para resolução das equações fundamentais	13
2.3.3 Malha de cálculo computacional	15
2.3.4 Esquemas numéricos	15
2.3.5 Condições de fronteira	16
3 Validação do Software OpenFOAM	19
3.1 Introdução	19
3.2 Condições utilizadas em G2011	20
3.3 Geração da malha	20

3.4	Condições de fronteira	22
3.5	Simulações	25
3.6	Resultados	26
3.7	Conclusões	27
4	Procedimento Computacional	29
4.1	Introdução	29
4.2	Parque de estacionamento	30
4.3	Modelação do parque de estacionamento em 3D	31
4.4	Geração da malha	32
4.5	Condições de fronteira iniciais	32
4.6	Simulação	34
4.7	Resultados	35
	4.7.1 Resultados em 3D da simulação	35
	4.7.2 Resultados do campo velocidade	37
	4.7.3 Resultados do campo temperatura	38
4.8	Análise de resultados	40
5	Conclusões e Trabalho Futuro	41
5.1	Introdução	41
5.2	Conclusões	41
5.3	Trabalho futuro	42
	Bibliografia	43
A	Dicionários do OpenFOAM	45
A.1	controlDict	45
A.2	fvSchemes	47
A.3	fvSolution	49
A.4	g	51
A.5	thermophysicalProperties	52
A.6	turbulenceProperties	53
A.7	RASProperties	54
A.8	blockMeshDict	55

A.8.1	Para a validação do Software OpenFOAM	55
A.8.2	Para o parque de estacionamento	58
B	Cálculos	65
B.1	Validação do Software OpenFOAM	65
B.1.1	Características técnicas do ventilador de impulso utilizado em G2011	65
B.1.2	Dimensões para o ventilador de impulso	65
B.1.3	Pressão	66
B.2	Procedimento Computacional	66
B.2.1	Características técnicas dos ventiladores propostos para o parque de estacionamento	66
B.2.2	Dimensões para os ventiladores de impulso	66
B.2.3	Velocidade do fluido na grelha de entrada/saída	66
B.2.4	Temperatura atingida pela viatura	67
B.2.5	Pressão	67
C	Figuras	69
C.1	Validação do Software OpenFOAM	69
C.1.1	Geração da malha	69
C.1.2	Simulações	70
C.2	Procedimento Computacional	71
C.2.1	Parque de estacionamento	71
C.2.2	Modelação do parque de estacionamento em 3D	73
C.2.3	Taxa de liberação de calor	73
C.2.4	Resultados	74

Lista de Tabelas

3.1	Condições de fronteira comuns aos modelos de turbulência.	22
3.2	Condições de fronteira comuns aos modelos de turbulência $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$ e Realizable $k - \varepsilon$	23
3.3	Condições de fronteira para o modelo de turbulência SST $k - \omega$	24
3.4	Condições de fronteira para o modelo de turbulência Spalart-Allmaras.	24
4.1	Condições de fronteira iniciais.	33
4.2	Condições de fronteira iniciais (continuação).	34

Lista de Figuras

2.1	Estrutura dos directórios para os dicionários.	11
3.1	Refinamento da malha em redor do ventilador.	21
3.2	Comportamento da velocidade de exaustão a diferentes distâncias com o decorrer do tempo.	25
3.3	Velocidade do fluido ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso.	26
3.4	Intensidade de turbulência em percentagem ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso.	27
4.1	Planta da arquitectura do parque de estacionamento.	30
4.2	Planta simplificada da arquitectura do parque de estacionamento.	31
4.3	Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento.	36
4.4	Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo velocidade de $t = 0$ s a $t = 360$ s.	37
4.5	Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo velocidade de $t = 420$ s a $t = 600$ s.	38
4.6	Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 120$ s a $t = 540$ s.	39
C.1	Malha da arquitectura com o ventilador.	69
C.2	Resultado da simulação para verificação da estabilidade da velocidade do jacto. A primeira figura (a maior) é para $t = 0$ s, as restantes têm um Δt de 10 s, sendo a sequência da esquerda para a direita de cima para baixo, terminado em $t = 120$ s.	70
C.3	Imagem dos ventiladores de impulso.	71
C.4	Atravancamentos dos ventiladores de impulso.	71
C.5	Características dos ventiladores de impulso.	72
C.6	Arquitectura do parque de estacionamento em 3D.	73

C.7 Taxa de liberação de calor para viaturas (figura 2.19 de Klote and Milke (2002)).	73
C.8 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 0$ s a $t = 70$ s.	74
C.9 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 80$ s a $t = 170$ s.	75
C.10 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 180$ s a $t = 270$ s.	76
C.11 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 280$ s a $t = 370$ s.	77
C.12 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 380$ s a $t = 470$ s.	78
C.13 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 480$ s a $t = 570$ s.	79
C.14 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 580$ s a $t = 600$ s.	80
C.15 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 120$ s a $t = 150$ s.	80
C.16 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 160$ s a $t = 250$ s.	81
C.17 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 260$ s a $t = 350$ s.	82
C.18 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 360$ s a $t = 450$ s.	83
C.19 Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 460$ s a $t = 540$ s.	84

Nomenclatura

Caracteres Romanos

A_0	constante do modelo de turbulência Realizable $k - \varepsilon$
a_1	constante do modelo de turbulência SST $k - \omega$
$C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	constantes dos modelos de turbulência $k - \varepsilon$
C_{b1}, C_{b2}, C_{v1}	constantes do modelo de turbulência Spalart-Allmaras
C_{w1}, C_{w2}, C_{w3}	constantes do modelo de turbulência Spalart-Allmaras
$C_{t1}, C_{t2}, C_{t3}, C_{t4}$	constantes do modelo de turbulência Spalart-Allmaras
c_p	calor específico a pressão constante
d	distância
E	energia total contida num sistema
\vec{F}_{ext}	forças externas aplicadas a um sistema
g	magnitude da aceleração da gravidade
g_i	vector da aceleração da gravidade
I	tensor unitário
k	energia cinética da turbulência
l	comprimento turbulento
m	massa de um sistema
Pr_t	número de Prandtl turbulento
p	pressão absoluta, pressão total
p_d	pressão dinâmica
p_{ref}	pressão referência
P_k, P_b	geração de energia cinética turbulenta
Q	calor fornecido ao sistema
R	constante universal dos gases perfeitos
T	temperatura absoluta
t	tempo
\vec{U}, U	vector velocidade do escoamento
u	módulo da velocidade
u'	componente flutuante da velocidade
W	trabalho realizado sobre o sistema

Caracteres Gregos

α_{eff}	difusão térmica efectiva
α_l	difusão térmica laminar
α_t	difusão térmica turbulenta
β	constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$
$\beta_1, \beta_2, \beta^*$	constantes do modelo de turbulência SST $k - \omega$
β_t	coeficiente de expansão térmica
ε	taxa de dissipação da turbulência
η_0	constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$
Θ	temperatura absoluta
κ	constante do modelo de turbulência SST $k - \omega$, constante do modelo de turbulência Spalart-Allmaras
μ	viscosidade dinâmica
μ_{eff}	viscosidade efectiva
μ_l	viscosidade molecular
μ_t	viscosidade turbulenta
ν	viscosidade cinemática
ρ	massa volúmica
σ	constante do modelo de turbulência Spalart-Allmaras
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	constantes dos modelos de turbulência $k - \varepsilon$
$\sigma_{k1}, \sigma_{\omega1}, \sigma_{k2}, \sigma_{\omega2}$	constantes do modelo de turbulência SST $k - \omega$
Ω_{ij}	tensor de velocidade de rotação
ω	taxa de dissipação específica da energia cinética da turbulência
ω_k	velocidade de rotação angular

Operadores

$\overline{(\)}$	valor médio
$(\)^T$	tensor
d/d	derivada total
∂/∂	derivada parcial
∇	gradiente
Δ	diferença
\sum	somatório

Abreviaturas

3D	<i>Três Dimensões</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DIC	<i>Diagonal Incompleta-Cholesky</i>

DILU	<i>Diagonal Incomplete-LU</i>
HRR	<i>Heat Release Rate</i>
PBiCG	<i>Preconditioned Bi-Conjugate Gradient</i>
PCG	<i>Preconditioned Conjugated Gradient</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Split-Operator</i>
RaNS	<i>Reynolds averaged Navier-Stokes</i>
RNG	<i>Re-Normalisation Group</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
STL	<i>STereoLithography</i>
TI	<i>Intensidade de Turbulência</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e objectivos da presente dissertação

O propósito de um sistema de desenfumagem activo instalado num parque de estacionamento é o de limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão e com isso facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco e também de permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro.

A legislação sobre segurança contra incêndio em edifícios em vigor, a data da redação deste documento, ou seja, o Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12 de Novembro, regulamentado pela Portaria n.º 1532/2008 de 29 de Dezembro, obriga que os parques de estacionamento cobertos tenham sistemas de desenfumagem. Dependendo de determinados factores estabelecidos nessa legislação, os sistemas podem ser activos, passivos ou híbridos. Nos sistemas activos e híbridos para a desenfumagem de parques de estacionamento, está regulamentado o uso ventiladores para a retirada de fumos e poluentes, com o encaminhamento por condutas.

A verificação do funcionamento do sistema de desenfumagem pode ser efectuada por simulação dinâmica computacional, com a qual se confirma que o sistema projectado realiza a função prevista ou se é necessário efectuar-se alterações.

A legislação mencionada no segundo parágrafo não contempla a utilização de ventiladores de impulso em substituição da rede de condutas, que normalmente é mais onerosa. Para se efectuar esta substituição recorre-se a softwares de simulação dinâmica computacional onde se verifica a melhor localização dos ventiladores de impulso para substituir as condutas.

Existe vários softwares onde se pode efectuar a simulação dinâmica computacional. A maioria desses softwares não são de distribuição gratuita e usualmente demasiado dispendiosos. Um software onde se pode efectuar simulações dinâmicas é o *OpenFOAM* que é grátis e de fonte aberta.

Assim, esta dissertação tem como objectivo o desenvolvimento de procedimento computacional para a análise e verificação de funcionamento de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso para parques de estacionamento, recorrendo ao software de mecânica dos fluidos computacional *OpenFOAM*.

1.2 Conteúdo da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos e três apêndices.

Neste capítulo efectua-se uma introdução onde se explana a motivação e o objectivo da presente dissertação. Efectua-se também uma pequena revisão bibliográfica sobre o assunto em estudo.

No capítulo 2 realiza-se o enquadramento do problema de escoamentos de ar no interior de parques de estacionamento a nível matemático. Realiza-se também o enquadramento do software *OpenFOAM* com problema em estudo.

Os resultados da validação do software *OpenFOAM* para a simulação de escoamentos com recurso a ventiladores de impulso são apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4 apresenta-se o procedimento computacional para a análise e verificação do funcionamento de sistemas de desenfumagem em parques de estacionamento, recorrendo ao software de mecânica dos fluidos computacional *OpenFOAM*.

A conclusão sobre o procedimento para simulação de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso para parques de estacionamento recorrendo ao software *OpenFOAM* é realizada no capítulo 5.

O apêndice A contém os principais dicionários que o software *OpenFOAM* necessita para correr o programa *buoyantpimplefoam*. No apêndice B apresentam-se os cálculos que são necessários para o presente estudo. No apêndice C inclui-se as figuras de carácter complementar as apresentadas no corpo da presente dissertação.

1.3 Revisão bibliográfica

À data da realização deste estudo não havia conhecimento de já ter sido criado algum procedimento para a utilização do software *OpenFOAM* para a análise e verificação de funcionamento de sistemas de desenfumagem de parques de estacionamento com recurso a ventiladores de impulso.

No caso particular de simulações para análise e verificação de funcionamento de sistemas de desenfumagem de parques de estacionamento com recurso a ventiladores de impulso, existem diversos estudos tais como o de [Veiga \(2009\)](#) e o de [Carvalho \(2011\)](#). Contudo, estes estudos não utilizam o *OpenFOAM* para as simulações.

Capítulo 2

Enquadramento

2.1 Introdução

Neste capítulo efectua-se o enquadramento do problema de escoamentos de ar no interior de parques de estacionamento a nível matemático. Efectua-se também o enquadramento do software *OpenFOAM* com problema em estudo.

No actual capítulo tem-se a secção 2.2 que apresenta o modelo matemático, no qual se insere a subsecção 2.2.1 com as equações fundamentais necessárias para a análise de escoamentos de ar no interior de parques de estacionamento. Apresenta-se também na subsecção 2.2.2 as equações para o campo médio que o *OpenFOAM* utiliza para resolver o problema em estudo e na subsecção 2.2.3 expõem-se os modelos de turbulência a serem utilizados para a obtenção da viscosidade turbulenta.

Na secção 2.3 resume-se a informação sobre o *OpenFOAM* e a sua relação com o problema em estudo. Na subsecção 2.3.1 faz-se uma descrição da estrutura que o software utiliza. Na subsecção 2.3.2 apresenta-se os algoritmos para resolução das equações fundamentais e das equações algébricas. Na subsecção 2.3.3 faz-se referência à malha a utilizar. Os esquemas numéricos de discretização dos diferentes termos das equações algébricas são mencionados na subsecção 2.3.4. E por fim, na subsecção 2.3.5 faz-se referência aos ficheiros que contêm as condições iniciais e as condições fronteira.

2.2 Modelo matemático

O ponto de partida para a obtenção da solução numérica é a escolha do modelo matemático. Nesta secção vai-se produzir a solução digital resultante do conjunto de equações fundamentais que descrevem matematicamente o problema em estudo.

2.2.1 Leis fundamentais

Existe algumas leis fundamentais que são necessárias observar para a análise de escoamentos de ar no interior de parques de estacionamento. Essas leis são:

- Lei de conservação de massa (equação de continuidade),

$$\frac{dm}{dt} = 0; \quad (2.1)$$

- Lei de conservação da quantidade de movimento linear (segunda lei de Newton),

$$\frac{d(m\vec{U})}{dt} = \sum \vec{F}_{ext}; \quad (2.2)$$

- Lei de conservação de energia (primeira lei da termodinâmica),

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt}. \quad (2.3)$$

Em que t representa o tempo, m a massa de um sistema de fluido¹, \vec{U} o vector velocidade do escoamento, \vec{F}_{ext} as forças externas aplicadas a um sistema de fluido, E representa a energia total contida num sistema de fluido, Q o calor fornecido ao sistema e W o trabalho realizado sobre o sistema.

Este conjunto de leis fundamentais é complementado com a equação de estado (equação dos gases perfeitos),

$$p = \rho RT, \quad (2.4)$$

em que R representa a constante universal dos gases perfeitos, ρ a massa volúmica do fluido, T a temperatura absoluta do fluido e p a pressão absoluta.

2.2.2 Equações para o campo médio

As leis fundamentais apresentadas não são usadas directamente na simulação dos escoamentos, sendo necessário introduzir alguns pressupostos de forma a se obter um conjunto de equações adaptadas ao escoamento em estudo.

Recorrendo ao Teorema de Transporte de Reynolds para adequar as leis fundamentais a uma análise de volumes de controlo e usando a formulação RaNS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*) com um operador *Ensemble Average*, as equações para campo médio do escoamento transiente e compressível, são na forma:

¹Sistema de fluido corresponde a um conjunto de parcelas de fluido com identidade única.

- Conservação de massa,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0; \quad (2.5)$$

- Conservação da quantidade de movimento linear,

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) - \nabla \cdot \left[\mu_{eff} (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot U) I \right] = -\nabla p_d - \rho g, \quad (2.6)$$

onde

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t, \quad (2.7)$$

e

$$p = p_d + \rho g + p_{ref}; \quad (2.8)$$

- Conservação de energia, transformada numa equação de transporte para a temperatura do fluido,

$$\frac{\partial(\rho c_p \Theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) - \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla (c_p \Theta)) = \frac{\partial p}{\partial t} + U \cdot \nabla p, \quad (2.9)$$

onde

$$\alpha_{eff} = \alpha_l + \alpha_t. \quad (2.10)$$

U representa o vector velocidade, I o tensor unitário, g a magnitude da aceleração da gravidade, μ_{eff} a viscosidade efectiva, μ_l a viscosidade molecular, μ_t a viscosidade turbulenta, p a pressão total, p_d a pressão dinâmica do fluido, ρg a pressão estática, p_{ref} a pressão de referência (atmosférica), c_p é o calor específico a pressão constante, Θ a temperatura absoluta, α_{eff} a difusão térmica efectiva, α_l a difusão térmica laminar e α_t a difusão térmica turbulenta. Estas equações foram obtidas em [Sass-Tisovskaya \(2008\)](#).

2.2.3 Modelos de turbulência

Nesta subsecção apresentam-se as equações dos modelos de turbulência utilizadas para obtenção da viscosidade turbulenta. Estes modelos serão utilizados no capítulo 3 onde será seleccionado o modelo que mais se adequa ao problema em estudo.

Modelo $k - \varepsilon$

A viscosidade turbulenta (μ_t) no modelo $k - \varepsilon$ de [Launder and Spalding \(1972\)](#) é obtida por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.11)$$

em que C_μ é uma constante, k é a energia cinética da turbulência e ε a taxa de dissipação da turbulência. Os valores de k e ε são obtidos através da resolução das equações de transporte em que para a energia cinética da turbulência se usa a equação,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon, \quad (2.12)$$

e para a taxa de dissipação da turbulência,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.13)$$

onde P_k representa a geração de energia cinética turbulenta e surge devido a gradientes de velocidade média,

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (2.14)$$

e onde P_b é a geração de energia cinética turbulenta que surge devido a impulsão,

$$P_b = \beta_t g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (2.15)$$

com o coeficiente de expansão térmica,

$$\beta_t = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p. \quad (2.16)$$

Em que g_i é o vector da aceleração da gravidade, Pr_t é o número de Prandtl turbulento, μ a viscosidade dinâmica. $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k$ e σ_ε são constantes empíricas que foram obtidas por calibração do modelo $k - \varepsilon$ e têm os seguintes valores:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

As equações apresentadas, designadas por modelo de elevado número de Reynolds, não são válidas na proximidade de fronteiras sólidas e em outras regiões onde o efeito da viscosidade molecular é importante. Para mais informação consultar [Ferziger and Perić \(2002\)](#). Esta formulação foi retirada do site http://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model.

Modelo RNG $k - \varepsilon$

A viscosidade turbulenta (μ_t) no modelo RNG $k - \varepsilon$ de V. Yakhot é obtida por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (2.17)$$

O valor de k e ε são obtidos através da resolução das equações de transporte em que para a energia cinética da turbulência o modelo utiliza a equação 2.12 e para a taxa de dissipação da turbulência utiliza a equação,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.18)$$

com

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.19)$$

e

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}; \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}.$$

Em que para P_k utiliza a equação 2.14 e para P_b utiliza a equação 2.15. $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \eta_0$ e β são constantes empíricas que foram obtidas por calibração do modelo RNG $k - \varepsilon$ e têm os seguintes valores:

$$C_\mu = 0,0845; \quad \sigma_k = 0,7194; \quad \sigma_\varepsilon = 0,7194; \quad C_{1\varepsilon} = 1,42; \quad C_{2\varepsilon} = 1,68;$$

$$\eta_0 = 4,38; \quad \beta = 0,012.$$

Para mais informação consultar [Yakhot et al. \(1991\)](http://www.cfd-online.com/Wiki/RNG_k-epsilon_model). Esta formulação foi retirada do site http://www.cfd-online.com/Wiki/RNG_k-epsilon_model

Modelo Realizable $k - \varepsilon$

A viscosidade turbulenta (μ_t) no modelo Realizable $k - \varepsilon$ de T. H. Shih é obtida por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (2.20)$$

O valor de k e ε são obtidos através da resolução das equações de transporte em que para a energia cinética da turbulência tem-se a equação,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon, \quad (2.21)$$

para a taxa de dissipação da turbulência tem-se a equação,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Em que para P_k utiliza a equação 2.14 e para P_b utiliza a equação 2.15. As restantes equações auxiliares são:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; & \eta &= S \frac{k}{\varepsilon}; & S &= \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}; \\
C_\mu &= \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}; & U^* &\equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}; \\
\tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k; & \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k; \\
A_s &= \sqrt{6} \cos \phi; & \phi &= \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W); \\
W &= \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}; & \tilde{S} &= \sqrt{S_{ij}S_{ij}}; & S_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right).
\end{aligned}$$

ν representa a viscosidade cinemática e $\overline{\Omega_{ij}}$ é a média do tensor de velocidade de rotação visto de um quadro de referência com a velocidade de rotação angular ω_k . $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε e A_0 são constantes empíricas que foram obtidas por calibração do modelo Realizable $k-\varepsilon$ e têm os seguintes valores:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,9; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,2; \quad A_0 = 4,04.$$

Esta formulação foi retirada do site http://www.cfd-online.com/Wiki/Realisable_k-epsilon_model

Modelo SST $k-\omega$

A viscosidade turbulenta (μ_t) no modelo SST (*shear stress transport*) $k-\omega$ de F. R. Menter é obtida por:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad (2.23)$$

em que k é a energia cinética da turbulência e ω a taxa de dissipação específica da energia cinética da turbulência. O valor de k e ω são obtidos através da resolução das equações de transporte em que para a energia cinética da turbulência tem-se a equação,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (2.24)$$

e para a taxa de dissipação específica da energia cinética da turbulência tem-se a equação,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} \\ &= \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Como equações auxiliares têm-se:

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j};$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij};$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2;$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4);$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right];$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right);$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2);$$

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right);$$

$$\Omega = \sqrt{2W_{ij}W_{ij}};$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Como constantes tem-se:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}; \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}};$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{k1} &= 0,85; & \sigma_{\omega 1} &= 0,5; & \beta_1 &= 0,075; \\
\sigma_{k2} &= 1,0; & \sigma_{\omega 2} &= 0,856; & \beta_2 &= 0,0828; \\
\beta^* &= 0,09; & \kappa &= 0,41; & a_1 &= 0,31.
\end{aligned}$$

Em que d representa a distância à superfície sólida mais próxima. Esta formulação foi retirada do site da NASA em <http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>.

Modelo Spalart-Allmaras

A viscosidade turbulenta (μ_t) no modelo *Spalart-Allmaras* "standard" é obtida por,

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}, \quad (2.26)$$

que utiliza a seguinte formulação:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\nu} u_j) &= C_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla \cdot [(\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + C_{b2} |\nabla \nu|^2 \} \\
&\quad - \left[C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2; \quad (2.27)
\end{aligned}$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}; \quad \chi := \frac{\tilde{\nu}}{\nu}; \quad \nu = \frac{\mu}{\rho};$$

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}; \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}};$$

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}; \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}; \quad g = r + C_{w2}(r^6 - r); \quad r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S}\kappa^2 d^2};$$

$$f_{t1} = C_{t1} g_t \exp \left(-C_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} [d^2 + g_t^2 d_t^2] \right);$$

$$f_{t2} = C_{t3} \exp (-C_{t4} \chi^2);$$

com as seguinte constantes,

$$\sigma = 2/3; \quad C_{b1} = 0,1355; \quad C_{b2} = 0,622; \quad \kappa = 0,41;$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + C_{b2}}{\sigma}; \quad C_{w2} = 0,3; \quad C_{w3} = 2; \quad C_{v1} = 7,1;$$

$$C_{t1} = 1; \quad C_{t2} = 2; \quad C_{t3} = 1,1; \quad C_{t4} = 2$$

A densidade volúmica é representada por ρ , ν representa a viscosidade cinemática, μ a viscosidade dinâmica e d a distância à superfície sólida mais próxima.

Este modelo é denominado de baixo número de Reynolds, uma vez que possui a formulação necessária para atenuar as escalas turbulentas na proximidade de superfícies sólidas. Para mais informação consultar [Wilcox \(1994\)](#). Esta formulação foi retirada do site http://www.cfd-online.com/Wiki/Spalart-Allmaras_model.

2.3 OpenFOAM

2.3.1 Estrutura do OpenFOAM

Nesta secção efectua-se uma pequena apresentação sobre a estrutura do *OpenFOAM* que será utilizada neste estudo. Para mais detalhe consultar a informação disponível em [OpenFOAM - User Guide](#).

No *OpenFOAM* o interface entre o utilizador e o software é feita através de ficheiros que se designam por dicionários. Os dicionários são guardados em directórios com a estrutura mostrada na figura 2.1.

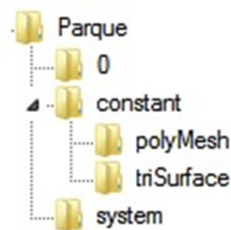


Figura 2.1: Estrutura dos directórios para os dicionários.

system

No directório *system* é onde ficam os dicionários relacionados com a fixação de parâmetros associados ao processo de obtenção da solução. Os dicionários principais são o *controlDict*, o *fvSchemes* e o *fvSolution*.

No dicionário *controlDict* é onde os parâmetros de controle de execução são definidos, incluindo o algoritmo de resolução das equações fundamentais, o início e o fim do tempo para a simulação, o passo do tempo (Δt) e os parâmetros para a saída de dados. No anexo [A.1](#) pode-se ver um exemplo deste dicionário. O dicionário *fvSchemes* será detalhado na subsecção [2.3.4](#) e o dicionário *fvSolution* na subsecção [2.3.2](#).

Este directório contém também os dicionários *snappyHexMeshDict* e *decomposeParDict*. No dicionário *decomposeParDict* é onde se introduz a informação sobre o método de processamento em paralelo utilizado pelo *OpenFOAM*. No dicionário *snappyHexMeshDict* é onde se introduz a informação que é usada pelo programa *snappyHexMesh*. Este programa gera malhas em 3D automaticamente a partir de geometrias de superfície trianguladas contidas em ficheiros de formato STL (STereoLithography).

constant

No directório *constant* é onde ficam os dicionários relacionados com a especificação das propriedades físicas para o algoritmo utilizado. Os dicionários principais são o *turbulenceProperties*, o *thermophysicalProperties*, o *RASProperties* e o *g*.

No dicionário *g* é onde se introduz o vector aceleração gravítica. No anexo [A.4](#) pode-se ver o dicionário utilizado neste estudo. A forma como se introduz o vector aceleração gravítica, condiciona o sistema de coordenadas a utilizar-se. Neste estudo vai-se utilizar o Sistema Cartesiano, com o eixo dos *yy* na direcção da força da gravidade mas com sentido contrário.

No dicionário *thermophysicalProperties* é onde se introduz as propriedades físicas, de energia e calor (anexo [A.5](#)). No dicionário *turbulenceProperties* é onde se introduz o tipo de modelação da turbulência (anexo [A.6](#)). No dicionário *RASProperties* é onde se introduz o modelo de turbulência escolhido. No anexo [A.7](#) pode-se ver o dicionário de um modelo utilizado neste estudo.

Este directório inclui também o subdirectório *triSurface* que contém os ficheiros em STL utilizados pelo programa *snappyHexMesh* e o subdirectório *polymesh* que contém o dicionário *blockMeshDict*. Este dicionário contém a informação da geometria do domínio, da malha e da localização das fronteiras a ser utilizada pelo programa *blockMesh* para gerar os ficheiros (*points*, *faces*, *cells* e *boundary* e etc.) com os dados da malha no mesmo subdirectório.

0

No directório *0* é onde ficam os dicionários das variáveis em estudo (U , p e etc.). Nesses dicionários é onde se insere os valores iniciais e as condições fronteira das variáveis. Estes dicionários serão detalhados na subsecção 2.3.5.

2.3.2 Algoritmo para resolução das equações fundamentais

O *OpenFOAM* tem diversos programas disponíveis para a resolução das equações fundamentais. Para este estudo utilizar-se-á o programa *buoyantpimplefoam* porque é que contém os algoritmos que resolvem as equações fundamentais adequadas para escoamentos compressíveis de baixa velocidade com transferência de calor.

No algoritmo *PIMPLE* do *buoyantpimplefoam* faz-se o cálculo da pressão dinâmica (p_d) através da resolução de uma equação na forma,

$$\frac{\partial \psi p_d}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial t} \cdot p_{ref} + \frac{\partial \psi \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) - \Delta(\rho U) \cdot p_d = 0, \quad (2.28)$$

onde

$$\psi = \frac{1}{RT}. \quad (2.29)$$

Método de resolução das equações

O *buoyantpimplefoam* utiliza um procedimento de discretização que produz uma equação algébrica para cada volume de controle, e assim passa-se a dispor de equações algébricas equivalentes para cada ponto interior do domínio de cálculo. Estas equações algébricas envolvem o volume de controle a qual se destinam e os volumes vizinhos.

O dicionário *fvSolution*, que se anexa em A.3, está dividido em dois sub-dicionários onde se especifica como os algoritmos devem ser executados. No sub-dicionário **solvers** é onde se introduz a informação que controla os algoritmos para a resolução das equações algébricas para a obtenção da solução da variável em estudo. No sub-dicionário **PIMPLE** é onde se introduz a informação que controla o algoritmo para a resolução das equações fundamentais do problema.

- **Equações algébricas**

O sub-dicionário **solvers** é o que contém a informação que controla os algoritmos para a resolução destas equações. No anexo A.3 pode-se verificar a estrutura dos algoritmos utilizados neste estudo. Essa estrutura é composta para cada variável em estudo pelo algoritmo que resolve as equações algébricas (**solver** e **preconditioner**) e pelo seu critério de convergência (**tolerance** e **relTol**).

Dos métodos disponíveis, utiliza-se o método iterativo para a resolução das equações algébricas referentes às variáveis em estudo. Este método utiliza o algoritmo PCG (*Preconditioned Conjugated Gradient*), que resolve matrizes simétricas, para a pressão dinâmica (p_rgh) e para a massa volúmica (ρ). Para as restantes variáveis (U , h , k , ϵ , ω e R), utiliza-se algoritmo PBiCG (*Preconditioned Bi-Conjugate Gradient*), que resolve matrizes assimétricas. Os pré-condicionadores utilizados foram o DIC (*Diagonal incomplete-Cholesky*) para as matrizes simétricas e o DILU (*Diagonal incomplete-LU*) para matrizes assimétricas. Estes algoritmos tipicamente convertem o sistema de equações num problema de minimização para o qual são aplicadas técnicas de pesquisa de mínimos ao longo de "direções" especiais, que aceleram a sua detecção [Castro (2012)]. Para mais informação recomenda-se a consulta de Ferziger and Perić (2002).

No critério de convergência são utilizados dois tipos de tolerâncias. Estas obrigam a executar os algoritmos de resolução das equações algébricas até que ambas condições de tolerância sejam cumpridas. No campo `tolerance` introduz-se o valor máximo do erro aceite (resíduo) na solução de modo que quanto menor ele for, mais precisa é a solução. O resíduo é avaliado por substituição da solução actual na equação e verificada a magnitude da diferença entre o lado esquerdo e o lado direito. Este resíduo é normalizado para ser independentemente da escala do problema que está a ser analisado. No campo `relTol` introduz-se o valor máximo da tolerância relativa, que consiste em limitar a melhoria relativa da solução inicial para a solução final. Nas simulações transientes, define-se o campo da tolerância relativa a 0 para forçar a solução a convergir para o valor do resíduo aceite em cada etapa de tempo.

• Equações fundamentais

O *buoyantpimplefoam* utiliza o algoritmo *PIMPLE* para a resolução das equações fundamentais do problema. Este algoritmo é um mistura do algoritmo *PISO* (*pressure-implicit with split-operator*) que é utilizado para problemas transientes e do algoritmo *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) que é utilizado para problemas estacionários ([OpenFOAM - User Guide](#)).

Este algoritmo emprega procedimentos iterativos para a resolução das equações (velocidade, pressão e etc.), em que utiliza a solução inicial para efectuar as correcções. No sub-dicionário *PIMPLE* é onde se define o número de correcções a serem efectuadas, em que:

- `nNonOrthogonalCorrectors` - indica o número de correcções a efectuar na equação da pressão quando a malha não é ortogonal;
- `nCorrectors` - indica o número de correcções a efectuar na equação da pressão;
- `nOuterCorrectors` - indica o número de correcções a efectuar com todas as equações, incluído a equação da velocidade e a equação da pressão.

2.3.3 Malha de cálculo computacional

A malha de cálculo computacional é obtida dividindo o domínio físico do problema em pequenos sub-domínios, que representam os volumes de controlo. A malha vai assim determinar as posições no espaço onde a solução digital vai ser obtida.

O *OpenFOAM* utiliza a malha de cálculo computacional não-estruturada. Este tipo de malha permite dispor os volumes no espaço de forma a acompanhar qualquer tipo de geometria do domínio, o que é uma maior valia já que a geometria do parque de estacionamento e dos ventiladores é complexa.

2.3.4 Esquemas numéricos

No dicionário *fvSchemes*, que se encontra no directório *system* e que se pode analisar no anexo [A.2](#), é onde se introduz a informação dos esquemas numéricos de discretização dos diferentes termos das equações algébricas.

Nos parágrafos seguintes será feita uma pequena referência aos esquemas utilizados para a discretização do termo transiente, do termo convectivo e do termo difusivo das equações referidas na secção [2.2](#).

Esquema de integração temporal

O esquema utilizado é o **Euler** que é um esquema com precisão de primeira ordem, delimitado e implícito. Este esquema discretiza o termo transiente utilizando o método *backward Euler*, que é incondicionalmente estável.

Esquema de interpolação

Este esquema serve tipicamente para efectuar a interpolação de valores do centro dos volumes de controlo para o centro das faces. O esquema utilizado é o **linear** que é um esquema centrado de interpolação linear (diferenciação central) e é uma técnica de segunda ordem de precisão para qualquer tipo de malha.

Esquemas de gradiente normal de superfície

Este esquema é utilizado para obter a componente gradiente, normal à face, de valores entre os centros de dois volumes de controlo com faces em comum. O esquema utilizado é o **corrected**, que é um esquema de correcção não-ortogonal explícito.

Esquema de gradiente (∇)

O esquema utilizado é o `Gauss linear`, que é um esquema de segunda ordem. A palavra `Gauss` especifica o esquema de discretização padrão dos volumes finitos de integração de Gauss, que exige a interpolação dos valores dos centros dos volumes para o centro das faces. A palavra `linear` especifica o esquema de interpolação.

Esquemas de divergência ($\nabla \cdot$)

Os esquemas utilizados são o `Gauss upwind` e o `Gauss linear`. A primeira palavra especifica a escolha do esquema de discretização. A segunda palavra especifica o esquema de interpolação. O esquema `upwind` é um esquema com comportamento numérico de primeira ordem limitada. O esquema `linear` é um esquema com comportamento numérico de segunda ordem ilimitado.

Esquemas de Laplaciano (∇^2)

O esquema utilizado é o `Gauss linear corrected`, em que a palavra `Gauss` especifica a escolha do esquema de discretização e a palavra `linear` especifica a selecção do esquema de interpolação. A palavra `corrected` especifica a selecção do esquema de gradiente normal de superfície, que tem um comportamento numérico de segunda ordem, conservativo e ilimitado.

2.3.5 Condições de fronteira

O directório θ contém os dicionários onde fazem-se a referência às condições fronteira. Estas condições normalmente consistem na especificação dos valores das variáveis em cálculo nas fronteiras (condição do tipo Dirichlet), ou na especificação do seu gradiente (condição do tipo Neumann). Estes dicionários também contém os valores das variáveis na condição inicial.

Estes dicionários tem na sua estrutura três itens obrigatórios, que são:

- `dimensions` - onde se especifica a unidade dimensional da variável do dicionário;
- `internalField` - onde se especifica o valor da variável em todos os volumes de controlo na condição inicial;
- `boundaryField` - onde se especifica o valor/gradiente da variável nas fronteiras.

Para o *buoyantpimplefoam* é necessário os seguintes dicionários:

- `U` - dicionário que contém a informação do vector velocidade;

- ***T*** - dicionário que contém a informação da temperatura. Neste estudo condição inicial da temperatura nos volumes de controlo é de 20° C;
- ***p_rgh*** (= P_d) - dicionário que contém a informação da pressão dinâmica;
- ***p*** - dicionário que contém a informação da pressão total e é calculada através da equação $p = p_rgh + \rho * g$;
- ***k*** - dicionário que contém a informação da energia cinética da turbulência. A condição inicial pode ser estimada pela relação

$$k = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{u}'}, \quad (2.30)$$

em que \mathbf{u}' é a componente flutuante estimada da velocidade;

- ***epsilon*** - dicionário que contém a informação da taxa de dissipação da energia cinética da turbulência no modelo $k - \varepsilon$ e pode ser estimada para a condição inicial pela relação

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l}, \quad (2.31)$$

em que l representa a escala de comprimento turbulento e C_μ é a contante empírica do modelo que toma o valor de 0,09 para escoamentos não atmosféricos;

- ***omega*** - dicionário que contém a informação da taxa de dissipação específica da energia cinética da turbulência no modelo $k - \omega$ e pode ser estimada para a condição inicial pela relação

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} l}, \quad (2.32)$$

em que l representa a escala de comprimento turbulento e C_μ é a contante empírica do modelo que toma o valor de 0,09. (http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions)

- ***mut*** - dicionário que contém a informação da viscosidade turbulenta;
- ***alphat*** - dicionário que contém a informação da difusividade térmica turbulenta.

Capítulo 3

Validação do Software OpenFOAM

3.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados da validação do software *OpenFOAM* para a simulação de escoamentos com recurso a ventiladores de impulso, estudados experimentalmente em [Giesen et al. \(2011\)](#). Nesse documento são apresentados os resultados do estudo experimental e de simulações em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Em futuras citações a esse documento utilizar-se-á a etiqueta G2011.

A comparabilidade dos resultados das simulações em CFD só é garantida com a colocação das condições de fronteira, da malha de cálculo computacional e as restantes restrições de forma equivalente às simulações existentes em G2011. Na secção 3.2 mencionam-se as condições principais em que a experiência de G2011 foi realizada e as adaptações efectuadas para a realização das simulações de G2011. Na secção 3.3 apresenta-se informação sobre a malha utilizada no trabalho presente.

Para esta validação efectuaram-se várias simulações, em que se utilizaram diferentes modelos de turbulência para determinar qual o modelo que melhor se adequava a utilização de ventiladores de impulso. Assim, na secção 3.4 apresentam-se as condições fronteira que foram utilizadas nas diferentes simulações, nas secções 3.5 e 3.6 expõem-se os resultados obtidos com as diversas simulações e na secção 3.7 anunciam-se as conclusões retiradas dos resultados obtidos com as simulações.

As simulações foram efectuadas num computador com sistema operativo *GNU/Linux 2.6.38-16-generic / Ubuntu 11.04*, com 12 núcleos *Intel Xeon X5650 @2.67 GHz* e com 12 GB RAM.

A visualização gráfica dos resultados foi efectuada com o programa *ParaView 4.0.1*. A produção de gráficos foi realizada com o *Microsoft Office EXCEL 2007*.

3.2 Condições utilizadas em G2011

O equipamento e as condições utilizadas na realização das experiências efectuadas em G2011 são:

- O ventilador de impulso utilizado tem 2,6 m de comprimento e 0,29 m de diâmetro. Tem um caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, 21 N de impulso e uma velocidade média de saída de 18 m/s.
- A sala onde o ventilador foi testado tem 34 m de comprimento por 32 m de largura e um pé direito de 6,5 m;
- O ventilador foi colocado numa posição em que o seu eixo estava a 2,5 m de altura do solo, alinhado com a direcção do comprimento da sala e centrado relativamente à largura. A exaustão do ventilador (início do jacto) foi posicionada a uma distância de 10 m do início da sala.

Em G2011 são mencionadas as adaptações efectuadas para as simulações em CFD e que são necessárias para uma aproximação simplificada das condições utilizadas na experiência. Assim, passa-se a transcrever as principais adaptações:

- O ventilador passou de secção circular para secção quadrada, o que simplificou a construção da malha. Como se pode verificar em G2011, à distância de um metro da exaustão o contorno do jacto já é circular;
- O perfil da velocidade na exaustão foi assumido como uniforme, o que simplificou a implementação do ventilador em CFD e como se pode verificar em G2011, a partir de um metro da exaustão não existem diferenças entre os perfis de velocidade obtidos com exaustão uniforme ou não uniforme.

As malhas usadas são estruturadas e utilizam entre 166 000 e 225 000 volumes de controlo. Para informação mais detalhada consultar G2011.

3.3 Geração da malha

A geração da malha para as simulações é efectuada em duas fases. Na primeira fase cria-se a malha com a arquitectura da sala, na segunda fase insere-se o ventilador e altera-se a malha em redor do mesmo.

A malha da primeira fase foi gerada através do programa *BlockMesh* em que leu o dicionário *blockMeshDict* (anexo [A.8.1](#)) onde estava a informação da arquitectura do espaço e do tipo de fronteiras existentes. A arquitectura do espaço é igual à utilizada na experiência

mencionada em G2011, ou seja, o espaço gerado tem 34 m de comprimento (x) por 6,5 m de altura (y) por 32 m de largura (z), sendo criados 102 volumes de controlo na direcção de x , 20 na direcção y e 96 na direcção z , o que prefaz um total de 195 840 volumes de controlo. Esta malha é aproximadamente regular com volumes de controlo com 0,3 x 0,3 x 0,3 m.

Na segunda fase, a inserção do ventilador na malha já criada foi efectuada com recurso ao programa *snappyHexMesh*, que leu o dicionário *snappyHexMeshDict* onde estava a informação referente ao ficheiro em STL do ventilador e a informação sobre o refinamento da malha em redor do ventilador e da exaustão do mesmo. O ventilador em STL foi criado através do software de desenho 3D *SolidWorks*. O ventilador criado no *SolidWorks* tem a dimensão interior de 0,24 x 0,24 x 2,6 m (anexo B.1.2) com uma espessura de parede de 0,05 m e foi criado de forma a ficar colocado no espaço como na experiência mencionada em G2011. Com a utilização do *snappyHexMesh* a quantidade, a forma e o tamanho dos volumes de controlo é alterado, ficando-se com um total de 235 782 volumes de controlo. Na figura 3.1 pode-se ver o ventilador inserido na malha e o refinamento em redor do mesmo. Esta figura pertence ao plano xy que passa no centro do ventilador. Na figura C.1 pode-se ver a colocação do ventilador na arquitectura do espaço.

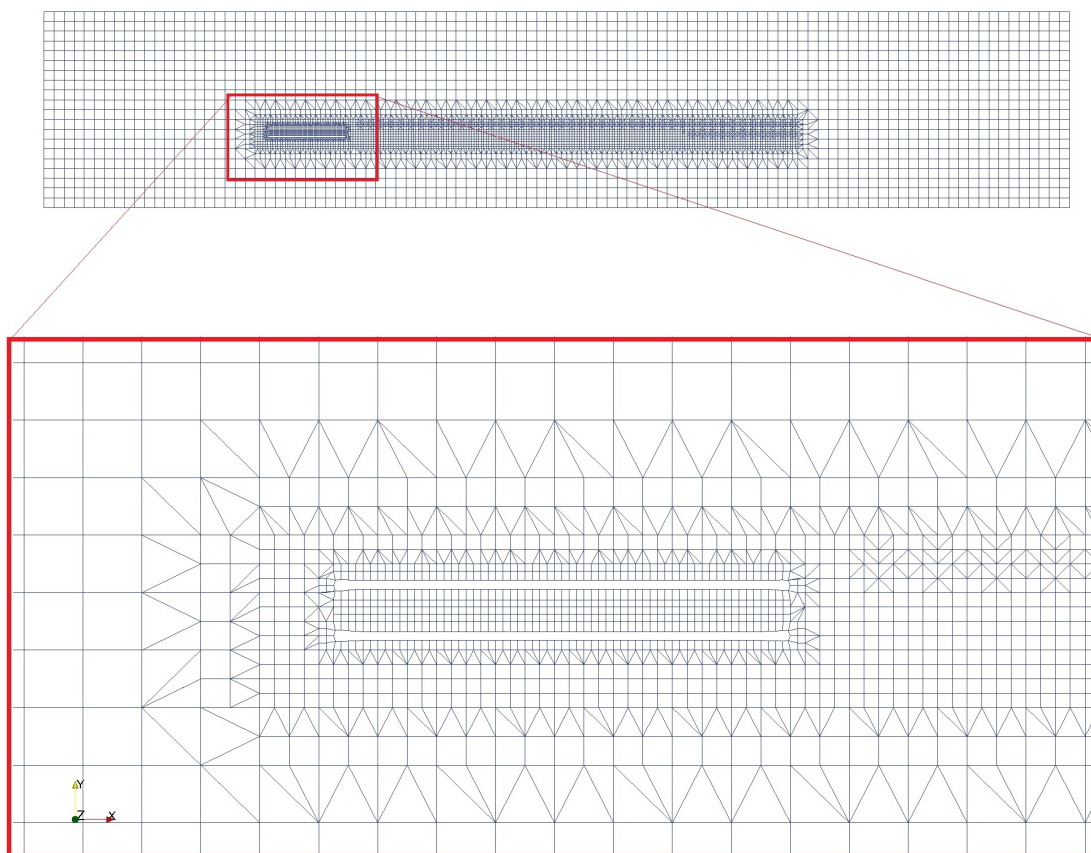


Figura 3.1: Refinamento da malha em redor do ventilador.

3.4 Condições de fronteira

As condições de fronteira estão resumidas nas tabelas seguintes, onde se indicam os nomes dados às fronteiras, as variáveis utilizadas em cada fronteira, o tipo de condição de fronteira utilizado e o valor inicial que foi atribuído. A fronteira *fixedWalls* corresponde às paredes, ao tecto e ao chão da arquitectura. A fronteira *arq_ventilador* corresponde à envolvente do ventilador e a fronteira *fan* corresponde ao ventilador em si. As fronteiras *inlet* e *outlet* correspondem às aberturas na arquitectura por onde o fluido entra e sai, sendo estas fronteiras perpendiculares ao eixo ventilador.

As condições de fronteira utilizadas em todas as simulações para a validação, e que são comuns aos vários tipos de modelos de turbulência, estão registadas na tabela 3.1.

Fronteira	Variável	Tipo	Valor Inicial
fixedWalls	alphat	alphatWallFunction	0 kg/m.s
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	buoyantPressure	100 000 Pa
	T	fixedValue	293.15 K
	U	fixedValue	(0 0 0) m/s
arq_ventilador	alphat	alphatWallFunction	0 kg/m.s
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	buoyantPressure	100 000 Pa
	T	zeroGradient	-
	U	fixedValue	(0 0 0) m/s
inlet	alphat	calculated	0 kg/m.s
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	fixedValue	100 000 Pa
	T	fixedValue	293.15 K
	U	pressureInletVelocity	(0 0 0) m/s
outlet	alphat	zeroGradient	-
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	zeroGradient	-
	T	zeroGradient	-
	U	inletOutlet	(0 0 0) m/s
fan	alphat	cyclic	-
	p	fan	378 Pa (a)
	p_rgh	fan	378 Pa (a)
	T	cyclic	-
	U	cyclic	-

Tabela 3.1: Condições de fronteira comuns aos modelos de turbulência.

Para estabelecer-se o escoamento do ventilador de impulso tem-se de introduzir um diferencial de pressão na fronteira *fan*. O valor do diferencial de pressão tem origem no valor do impulso que é obtido das características técnicas do ventilador a simular. No anexo B.1.3 pode-se verificar o cálculo que deu origem ao diferencial de pressão que estão assinalados com (a) na tabela 3.1 para estas simulações.

As condições de fronteira comuns aos modelos de turbulência $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$ e Realizable $k - \varepsilon$ estão resumidas na tabela 3.2.

Fronteira	Variável	Tipo	Valor Inicial
fixedWalls	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	epsilon	compressible::epsilonWallFunction	0.01 m ² /s ³
arq_ventilador	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	epsilon	compressible::epsilonWallFunction	0.01 m ² /s ³
inlet	mut	calculated	0 kg/m.s
	k	turbulentIntensityKineticEnergyInlet	0.05 (b)
	epsilon	compressible::turbulentMixingLengthDissipationRateInlet	0.01 (c)
outlet	mut	zeroGradient	-
	k	zeroGradient	-
	epsilon	zeroGradient	-
fan	mut	cyclic	-
	k	cyclic	-
	epsilon	cyclic	-

Tabela 3.2: Condições de fronteira comuns aos modelos de turbulência $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$ e Realizable $k - \varepsilon$.

As condições de fronteira para o modelo de turbulência SST $k - \omega$ estão resumidas na tabela 3.3.

Nas tabelas 3.2 e 3.3 o valor assinalado com (b) corresponde à intensidade em percentagem da velocidade, que neste caso é de 5 % da velocidade. O valor assinalado com (c) corresponde ao comprimento da mistura (mixingLength), que neste caso é de 10 mm. Estes valores foram retirados do tutorial do *OpenFOAM*, não tendo sido alterados por falta de informação sobre a interferência dos mesmos nas simulações. A falta de tempo para a realização de simulações de teste com o objectivo de se compreender a influência destes valores nas simulações foi outro motivo para se utilizar os valores do tutorial, já que cada simulação leva mais de dois dias a ser realizada e com recurso a seis núcleos do computador a trabalharem em paralelo.

Fronteira	Variável	Tipo	Valor Inicial
fixedWalls	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	omega	compressible::omegaWallFunction	0.01 s ⁻¹
arq_ventilador	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	omega	compressible::omegaWallFunction	0.01 s ⁻¹
inlet	mut	calculated	0 kg/m.s
	k	turbulentIntensityKineticEnergyInlet	0.05 (b)
	omega	compressible:: turbulentMixingLengthFrequencyInlet	0.01 (c)
outlet	mut	zeroGradient	-
	k	zeroGradient	-
	omega	zeroGradient	-
fan	mut	cyclic	-
	k	cyclic	-
	omega	cyclic	-

Tabela 3.3: Condições de fronteira para o modelo de turbulência SST $k - \omega$.

As condições de fronteira para o modelo de turbulência Spalart-Allmaras estão resumidas na tabela 3.4.

Fronteira	Variável	Tipo	Valor Inicial
fixedWalls	mut	mutUSpaldingWallFunction	0 kg/m.s
	nuTilda	fixedValue	0.14 m ² /s
arq_ventilador	mut	mutUSpaldingWallFunction	0 kg/m.s
	nuTilda	fixedValue	0.14 m ² /s
inlet	mut	calculated	0 kg/m.s
	nuTilda	zeroGradient	-
outlet	mut	zeroGradient	-
	nuTilda	zeroGradient	-
fan	mut	cyclic	-
	nuTilda	cyclic	-

Tabela 3.4: Condições de fronteira para o modelo de turbulência Spalart-Allmaras.

3.5 Simulações

As várias simulações foram executadas com o programa *buoyantpimplefoam*, que utiliza o algoritmo para escoamentos transientes, compressíveis de baixa velocidade com transferência de calor. Para analisar-se o comportamento do jacto do ventilador executou-se uma simulação com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ durante 600 segundos. A figura 3.2 apresenta o gráfico com os resultados da velocidade do jacto a diferentes distâncias da sua exaustão no eixo ventilador. Os dados utilizados para a construção do gráfico foram recolhidos de segundo a segundo nos primeiros trinta segundos, passando depois a ser recolhidos de dez em dez segundos.

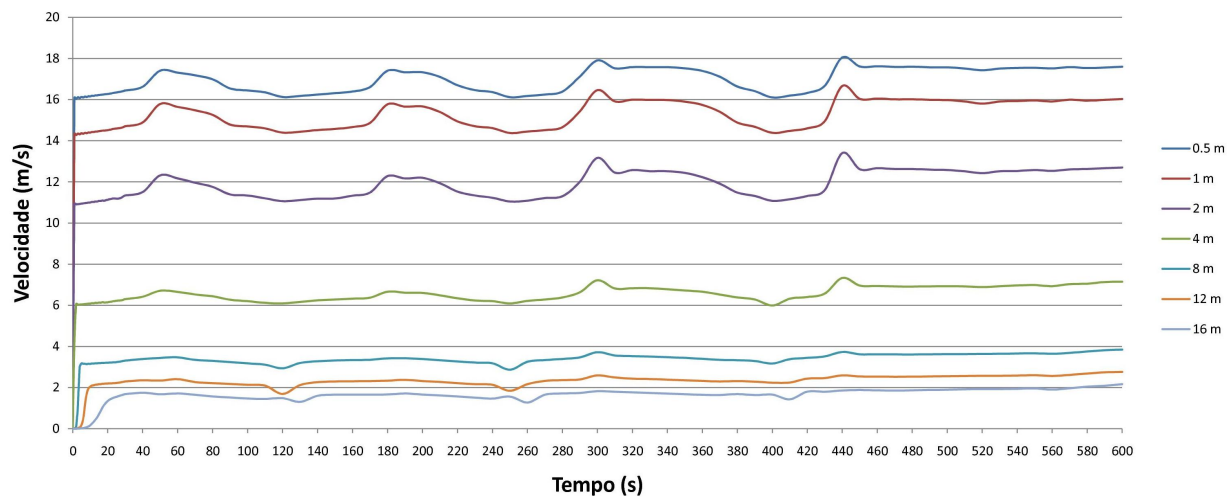


Figura 3.2: Comportamento da velocidade de exaustão a diferentes distâncias com o decorrer do tempo.

Analisado-se o gráfico apresentado na figura 3.2, conclui-se que o fluido que está à distância de 16 m da exaustão do ventilador é perturbado pelo escoamento do ventilador ao fim de 10 segundos e que o escoamento do ventilador deixa de ter grandes oscilações a partir dos 460 segundos. Assim, as cinco simulações com os diferentes modelos de turbulência foram executadas até aos 500 segundos para garantir que não existia grandes oscilações nos escoamentos.

Na figura C.2 pode-se ver a apresentação gráfica dos dados obtidos com a simulação. Nessa figura estão *screen shots* pertencentes ao plano xy que passa no centro do ventilador, com intervalos de tempo de 10 segundos, onde se pode ver o comportamento do jacto e a sua influência no fluido da sala.

3.6 Resultados

A figura 3.3 apresenta os resultados das simulações presentes e resultados obtidos em G2011 para a velocidade do fluido ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso.

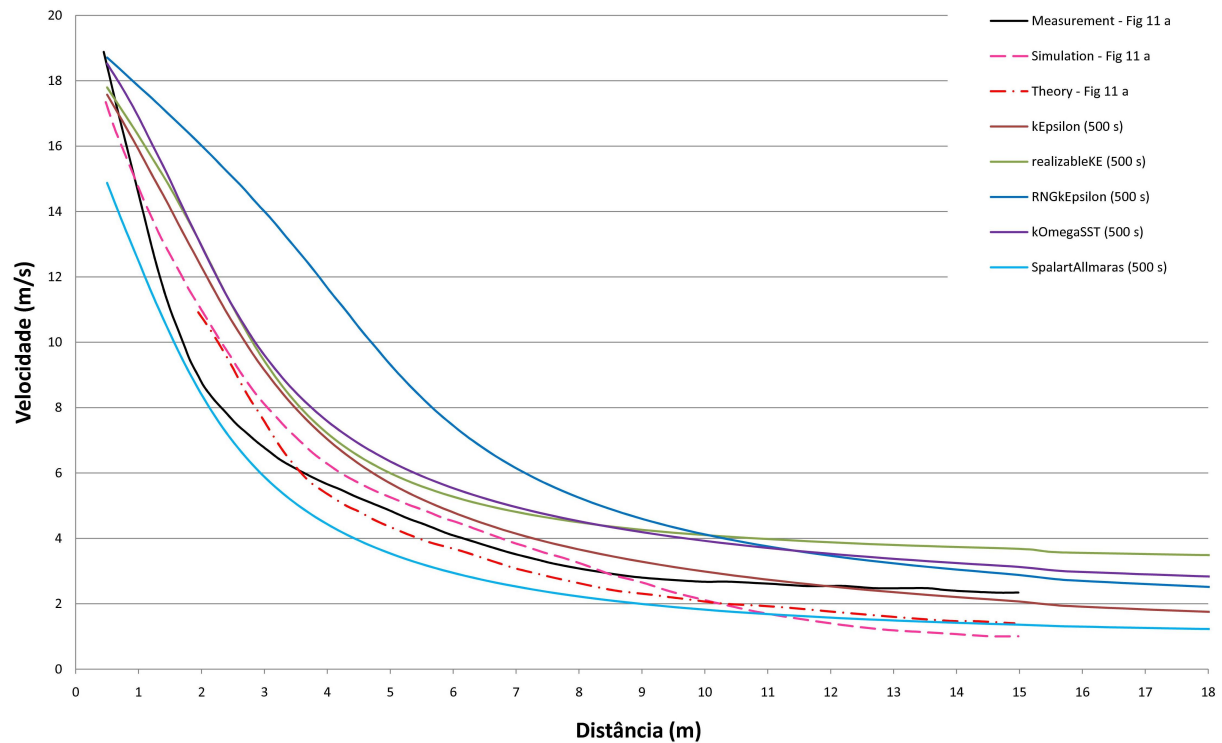


Figura 3.3: Velocidade do fluido ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso.

No gráfico da figura 3.3 a linha contínua a preto representa os valores obtidos da medição da experiência, a linha a traço interrompido cor de rosa representa os valores da simulação e a linha a traço e ponto vermelho representa os valores teóricos, apresentados na figura 11(a) em G2011. As restantes linhas representam os resultados obtidos no trabalho presente para $t = 500$ s e obtidos com diferentes modelos de turbulência.

A figura 3.4 apresenta o gráfico com os resultados das simulações presentes e resultados obtidos em G2011 para a intensidade de turbulência (TI), em percentagem, ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso.

No gráfico da figura 3.4 a linha contínua a preto representa os valores experimentais e a linha a traço interrompido cor de rosa representa os valores da simulação, apresentados na figura 11(c) em G2011. As restantes linhas representam os resultados obtidos no trabalho presente para $t = 500$ s e obtidos com diferentes modelos de turbulência. A intensidade de

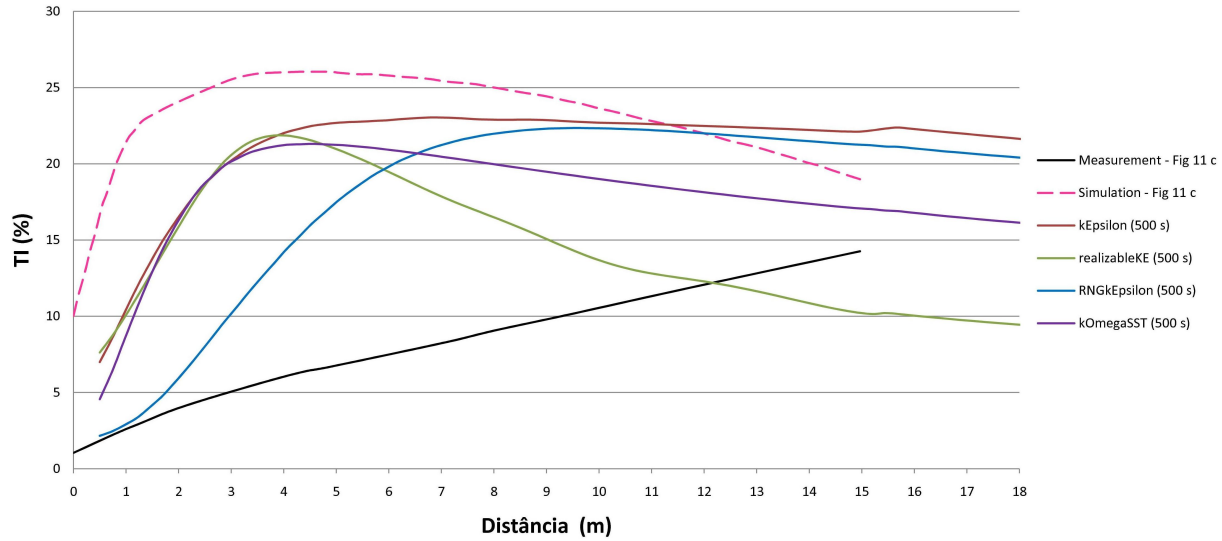


Figura 3.4: Intensidade de turbulência em porcentagem ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso.

turbulência foi calculada com recurso a equação 3 de G2011 e que a seguir se reproduz:

$$TI = 100 \frac{\sqrt{\frac{2k}{3}}}{u}, \quad (3.1)$$

com k a representar a energia cinética da turbulência e u o módulo da velocidade.

3.7 Conclusões

No gráfico da figura 3.3 verifica-se que todos resultados apresentados têm comportamento de uma função logarítmica decrescente. A linha dos resultados da medição experimental tem nos primeiros dois metros um grande declive, diminuindo esse declive após os dois metros até ficar bastante reduzido a partir do dez metros. No mesmo gráfico verifica-se que o modelo Spalart-Allmaras sobrestima a redução de velocidade, ficando assim a velocidade desta simulação abaixo do valor medido em G2011. Em sentido contrário tem-se o modelo RNG $k - \varepsilon$ que subestima a redução da velocidade dando como resultado uma velocidade bastante elevada relativamente ao valor da medição. As simulações dos modelos $k - \varepsilon$, Realizable $k - \varepsilon$ e SST $k - \omega$ apresentam resultados equivalentes entre si nos primeiros 5 m sendo que têm uma velocidade um pouco superior a velocidade medida. A partir dos 5 m a velocidade do modelo $k - \varepsilon$ aproxima-se gradualmente da velocidade medida. Os outros dois modelos a partir dos 5 m mantêm-se com a velocidade superior à velocidade medida. Da análise deste gráfico verifica-se que o modelo $k - \varepsilon$ é o que mais se aproxima dos valores medidos em G2011.

No gráfico da figura 3.4 verifica-se que a linha dos resultados experimentais tem o comportamento de uma função linear crescente. No mesmo gráfico verifica-se que para os restantes resultados a intensidade de turbulência nos primeiros metros têm um incremento bastante acentuado, sendo que a partir de uma determinada distância (aproximadamente 8 m para o modelo RNG $k - \varepsilon$ e 4 m para os restantes modelos) mantêm-se estável ou com um pequeno decréscimo. Este gráfico mostra que todas as simulações que utilizam a energia cinética da turbulência nos modelos, em regra geral, sobrestimam o valor da intensidade de turbulência relativamente ao medido em G2011. A única exceção é o modelo Realizable $k - \varepsilon$ que a partir de aproximadamente dos 12 m subestima esse valor. Da análise do gráfico verifica-se que nenhum dos resultados das simulações se aproxima dos resultados experimentais de G2011.

Neste capítulo só se abordou a validação do funcionamento dos ventiladores de impulso porque a versão utilizada do *OpenFOAM* não tinha tutoriais para este tipo de ventiladores. Para a utilização da temperatura existe vários tutoriais, assim assumiu-se que já foram validados.

Da figura 3.2 conclui-se que o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ é o que melhor se adequa para a simulação de ventiladores de impulso.

Capítulo 4

Procedimento Computacional

4.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o procedimento computacional para a análise e verificação do funcionamento de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso para parques de estacionamento, recorrendo ao software de mecânica dos fluidos computacional *OpenFOAM*.

O procedimento foi desenvolvido utilizando uma arquitectura de um parque de estacionamento que se encontrava em fase de construção. Na secção 4.2 descreve-se a arquitectura que foi utilizada neste estudo, bem como dos equipamentos para movimentação de fluido. Na secção 4.3 menciona-se os pressupostos assumidos e as alterações efectuadas para simplificação da arquitectura e dos ventiladores. Nesta secção descreve-se também criação dos ficheiros de formato STL para serem utilizados pelo programa *snappyHexMesh*.

O procedimento para a geração da malha que vai ser utilizada na simulação é descrito na secção 4.4. Na secção 4.5 indica-se as condições fronteira iniciais e os valores iniciais atribuídos para se efectuar a simulação.

Na secção 4.6 descreve-se como se efectuou a simulação de validação do procedimento computacional. Nesta secção estipula-se o tempo de funcionamento da simulação, bem como a sequência dos acontecimentos a ocorrer. Na secção seguinte, a 4.7, apresenta-se os resultados da simulação. Os resultados incidem sobre o campo velocidade e o campo temperatura, existido uma apresentação em 3D com os dois campos já mencionados.

Por fim, na secção 4.8, apresenta-se uma análise dos resultados obtidos.

A simulação foi efectuada num computador com sistema operativo *GNU/Linux 2.6.38-16-generic / Ubuntu 11.04*, com 12 núcleos *Intel Xeon X5650 @2.67 GHz* e com 12 GB RAM. A visualização gráfica dos resultados foi efectuada com o programa *ParaView 4.0.1*.

4.2 Parque de estacionamento

A arquitectura do parque de estacionamento utilizada faz parte de um projecto de um grande edifício de serviços. Na figura 4.1 pode-se ver a planta do parque de estacionamento utilizada. Na planta pode-se ver a localização das entradas e saídas das viaturas e pessoas, a localização dos ventiladores de impulso (representados a azul) e dos ventiladores axiais da rede de desenfumagem/ventilação. Esta arquitectura foi disponibilizada pela co-orientadora deste estudo, a Eng. Isabel Sarmento.



Figura 4.1: Planta da arquitectura do parque de estacionamento.

Foram propostos para o projecto de desenfumagem do parque de estacionamento 16 ventiladores de impulso da marca FRANCE AIR, modelo AXALU TR 31 octogonal de duas velocidades (figura C.3), em que 7 são unidireccionais e 9 reversíveis. Na velocidade máxima estes ventiladores têm 22 N de impulso e produzem $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal volúmico. Os ventiladores reversíveis têm o comprimento total de 2,235 m, os unidireccionais têm 2,175 m e ambos têm 0,315 m de diâmetro de boca de exaustão. Nas figuras C.4 e C.5 pode-se ver as características destes ventiladores.

Os ventiladores axiais para a desenfumagem/ventilação do parque de estacionamento propostos foram os da marca FRANCE AIR, modelo AXALU 2 1000 AXTS 31 4 9 32 reversíveis e foram propostos 4 ventiladores. Cada ventilador produz um caudal volúmico de $56\,250 \text{ m}^3/\text{h}$ ($15,625 \text{ m}^3/\text{s}$). Cada par de ventiladores está ligado a uma grelha que tem de área útil 5 m^2 e que estão representadas a castanho na planta da figura 4.1.

4.3 Modelação do parque de estacionamento em 3D

Este parque de estacionamento tem aproximadamente 99 m de comprimento por 54 m de largura com uma geometria bastante complexa. Assim, e devido à necessidade de racionalização dos recursos computacionais, simplificou-se a arquitectura retirando-se pormenores que não interferem significativamente nos resultados. As alterações efectuadas foram as seguintes:

- Os pilares de suporte de carga deixaram de ser ovais e passaram a ser rectangulares;
- As portas de acesso ao piso assumiu-se como estando encerradas, incluindo os locais de acesso das viaturas pelas rampas.
- Os ventiladores de impulso foram considerados todos como tendo o mesmo comprimento total (igual ao dos reversíveis) e foram modificados para secção rectangular.
- O par de ventiladores axiais de desenfumagem/ventilação foi transformado numa secção rectangular para entrada/saída de fluido.

Na figura 4.2 pode-se ver a planta do parque de estacionamento com as alterações da arquitectura anteriormente mencionadas, a numeração dada aos ventiladores de impulso e as referências dadas a localização dos ventiladores axiais.

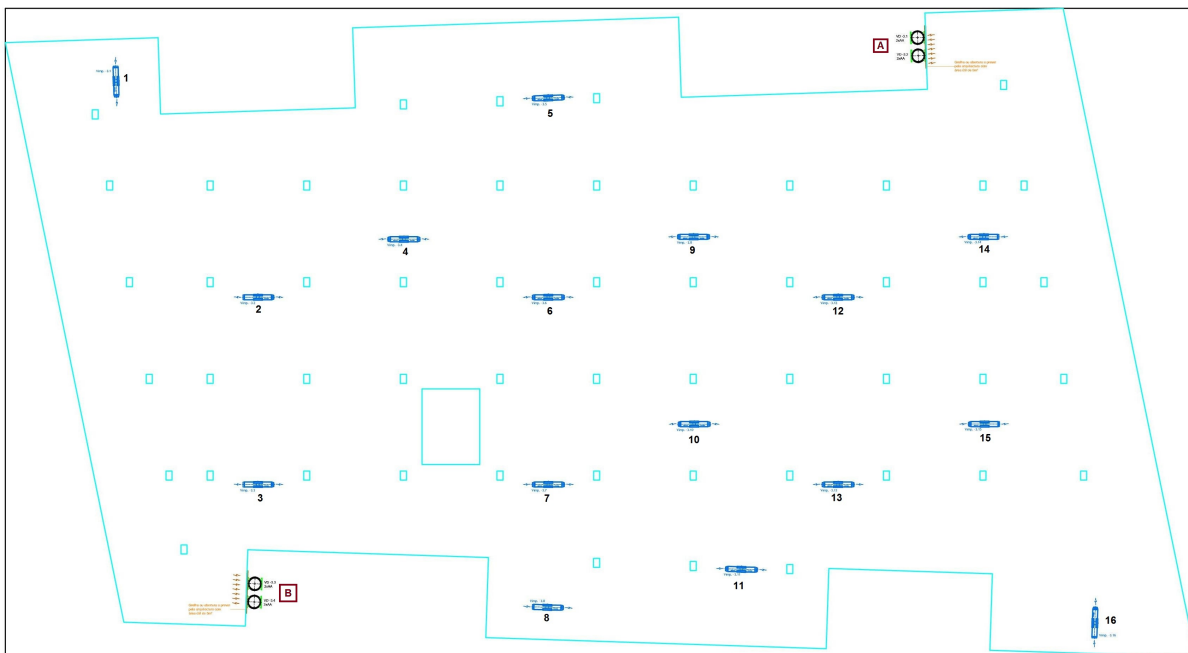


Figura 4.2: Planta simplificada da arquitectura do parque de estacionamento.

No anexo B.2.2 pode-se analisar a transformação da secção dos ventiladores de impulso de circular para quadrada.

O parque de estacionamento (representado a verde na planta da figura 4.2) foi convertido para 3D recorrendo-se ao software *SolidWorks*. Os ventiladores também foram criados com o mesmo software e têm a dimensão interior de 0,28 x 0,28 x 2,235 m (anexo B.2.2) com uma espessura de parede de 0,05 m. Os ventiladores foram criados de forma a ficar colocados no espaço como estão representados na planta da figura 4.2. Foi criada também uma viatura que foi colocada na arquitectura do parque de estacionamento conforme se pode ver na figura C.6 e que será a vítima do incêndio. Todos os ficheiros foram convertidos para o formato STL.

4.4 Geração da malha

Devido à complexidade da arquitectura do parque de estacionamento com os ventiladores de impulso, a geração da malha foi efectuada em duas fases. Na primeira fase criou-se uma malha com uma arquitectura da forma paralelepípedica com a dimensão do parque. Na segunda fase inseriu-se a arquitectura do parque, os ventiladores de impulso e a viatura na malha da primeira fase.

A malha da primeira fase foi gerada com o programa *BlockMesh* em que utilizou o dicionário *blockMeshDict* (anexo A.8.2) que contém a informação sobre a arquitectura do espaço da primeira fase e do tipo de fronteiras. A arquitectura do espaço gerado tem a dimensão de 98,599 m de comprimento (x) por 2,4 m de altura (y) por 53,663 m de largura (z), sendo criados 296 volumes de controlo na direcção de x , 8 na direcção y e 161 na direcção z , o que prefaz um total de 381 248 volumes de controlo. Esta malha é aproximadamente regular com volumes de controlo com 0,333 x 0,3 x 0,333 m. O rectângulo representado a preto na figura 4.2 corresponde à arquitectura a criar nesta primeira fase.

A inserção da arquitectura do parque, dos ventiladores e da viatura na malha já criada na primeira fase foi efectuada com recurso ao programa *snappyHexMesh*, que leu o dicionário *snappyHexMeshDict* onde estava a informação referente aos ficheiros em STL dos objectos a inserir e ao refinamento da malha. Com a utilização do programa *snappyHexMesh* a quantidade, a forma e o tamanho dos volumes de controlo é alterado, ficando-se com um total de 544 392 volumes de controlo.

4.5 Condições de fronteira iniciais

As condições de fronteira iniciais estão resumidas nas tabelas 4.1 e 4.2, onde se indicam os nomes dados às fronteiras, as variáveis utilizadas em cada fronteira, o tipo de condição de fronteira utilizado e o valor inicial que foi atribuído. As fronteiras *fixedWalls* e *arg_arquitectura* correspondem às paredes, ao tecto, aos pilares e ao chão da arquitectura.

A fronteira *ven_ventilador* corresponde à envolvente dos ventiladores de impulso e as fronteiras *fan* correspondem aos ventiladores em si. A fronteira *car_carro* corresponde a uma viatura. As fronteiras *inlet* e *outlet* correspondem às aberturas na arquitectura por onde o fluido entra e sai, e simulam os ventiladores axiais de desenfumagem/ventilação.

Fronteira	Variável	Tipo	Valor Inicial
fixedWalls	alphat	alphatWallFunction	0 kg/m.s
	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	epsilon	compressible::epsilonWallFunction	0.01 m ² /s ³
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	buoyantPressure	100 000 Pa
	T	fixedValue	293.15 K
	U	fixedValue	(0 0 0) m/s
arq_arquitectura	alphat	alphatWallFunction	0 kg/m.s
	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	epsilon	compressible::epsilonWallFunction	0.01 m ² /s ³
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	buoyantPressure	100 000 Pa
	T	fixedValue	293.15 K
	U	fixedValue	(0 0 0) m/s
ven_ventilador	alphat	alphatWallFunction	0 kg/m.s
	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	epsilon	compressible::epsilonWallFunction	0.01 m ² /s ³
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	buoyantPressure	100 000 Pa
	T	zeroGradient	-
	U	fixedValue	(0 0 0) m/s
car_carro	alphat	alphatWallFunction	0 kg/m.s
	mut	mutkWallFunction	0 kg/m.s
	k	compressible::kqRWallFunction	0.1 m ² /s ²
	epsilon	compressible::epsilonWallFunction	0.01 m ² /s ³
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	buoyantPressure	100 000 Pa
	T	fixedValue	293.15 K
	U	fixedValue	(0 0 0) m/s

Tabela 4.1: Condições de fronteira iniciais.

Fronteira	Variável	Tipo	Valor Inicial
inlet	alphanut	calculated	0 kg/m.s
	mut	calculated	0 kg/m.s
	k	turbulentIntensityKineticEnergyInlet	0.05
	epsilon	compressible:: turbulentMixingLengthDissipationRateInlet	0.01
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	fixedValue	100 000 Pa
	T	fixedValue	293.15 K
	U	fixedValue	(-3.125 0 0) m/s
outlet	alphanut	zeroGradient	-
	mut	zeroGradient	-
	k	zeroGradient	-
	epsilon	zeroGradient	-
	p	calculated	100 000 Pa
	p_rgh	zeroGradient	-
	T	zeroGradient	-
	U	fixedValue	(-3.125 0 0) m/s
fan	alphanut	cyclic	-
	mut	cyclic	-
	k	cyclic	-
	epsilon	cyclic	-
	p	fan	0.0001 Pa (a)
	p_rgh	fan	0.0001 Pa (a)
	T	cyclic	-
	U	cyclic	-

Tabela 4.2: Condições de fronteira iniciais (continuação).

4.6 Simulação

A simulação para a validação do procedimento computacional foi executada com o programa *buoyantpimplefoam* que utiliza o algoritmo para escoamentos transientes, compressíveis de baixa velocidade com transferência de calor. O modelo de turbulência utilizado foi o $k - \epsilon$ conforme seleccionado no capítulo 3.

Para esta simulação considerou-se que durante os primeiros 120 segundos só existe ventilação do parque de estacionamento. Assim, considerou-se que só estão dois ventiladores axiais ligados, um para a extracção (localizado em **A** na figura 4.2) e outro para a insuflação (localizado em **B** na figura 4.2), que os ventiladores de impulso estão desligados e que não existe qualquer foco de incêndio. A velocidade do fluido na grelha de insuflação e na de extracção foi calculada no anexo B.2.3.

Após os 120 segundos inicia-se um incêndio na viatura que só é detectado ao fim de 10 segundos. Para a taxa de liberação de calor (HRR - heat release rate) analisou-se a figura C.2.3 que reproduz um gráfico obtido em Klote and Milke (2002) e estimou-se um valor médio de 2000 kW para o HRR. A temperatura que se estima que o veículo atinja é de 1273,15 K como se pode verificar nos cálculos efectuados no anexo B.2.4. Nesta simulação a localização da viatura foi aleatória.

A partir da detecção do foco de incêndio, ou seja aos 130 segundos, entram em funcionamento todos os ventiladores axiais e os ventiladores de impulso que direccionam o fluido para a exaustão (que neste caso são todos excepto os ventiladores de impulso 14 e 15). Assim, nas grelhas de entrada/saída do fluido, a velocidade passa para o dobro ou seja 6,25 m/s e os ventiladores de impulso que direccionam o fluido passam a funcionar com uma pressão de 283 Pa (anexo B.2.5).

O incêndio é dado como extinto ao fim de 300 segundos, ou seja aos 430 segundos do início da simulação, mas a simulação continua com todos ventiladores ligados até aos 600 segundos.

4.7 Resultados

A simulação demorou aproximadamente oito dias a ser processada com recurso a dez núcleos do computador a trabalharem em paralelo.

Para análise do sistema de desenfumagem, considera-se de enorme relevo a localização do fumo que fique a uma cota inferior de 1,8 m do pavimento porque dificulta a evacuação e o salvamento dos ocupantes.

O programa *buoyantpimplefoam* da versão utilizada do *Openfoam* não cria informação da dispersão do fumo. Contudo, e conforme mencionado em Klote and Milke (2002), existe uma relação entre a temperatura e a localização do fumo devido à sua flutuabilidade (*buoyancy*). Assim, e mesmo que a relação não seja linear, vai-se assumir que a localização do fumo é onde existe a pluma térmica.

4.7.1 Resultados em 3D da simulação

Na figura 4.3 apresentam-se os resultados em 3D da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento. Os *screen shots* apresentados nesta figura são de tempos com relevância para a simulação. Nestes *screen shots*, o movimento do fluido está representado a azul e a pluma térmica está representada a vermelho.

No anexo C.2.4 apresentam-se várias figuras com *screen shots* que abrangem toda a simulação com intervalos de tempo de 10 segundos.

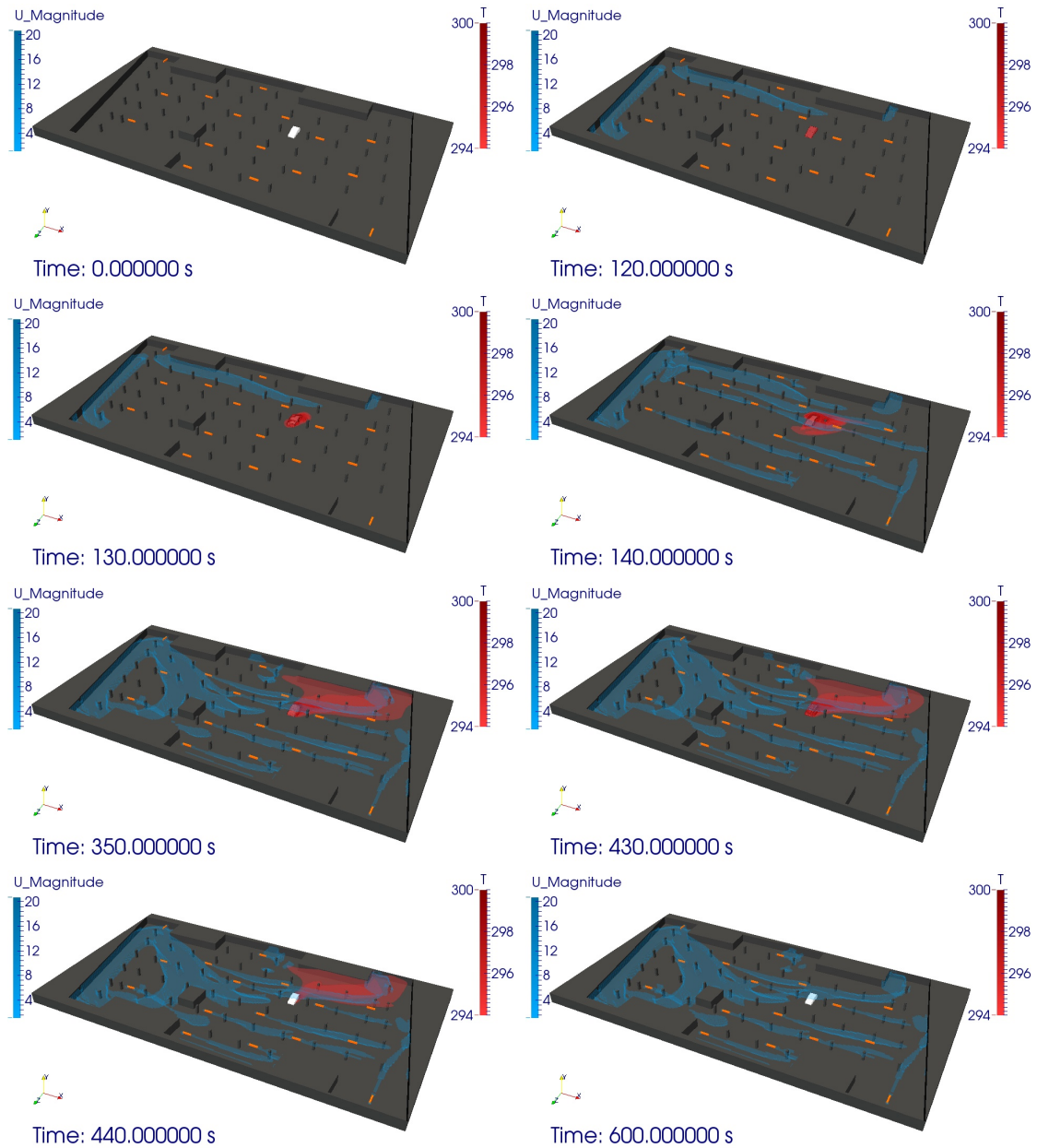


Figura 4.3: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento.

4.7.2 Resultados do campo velocidade

As figuras 4.4 e 4.5 apresentam *screen shots* com os resultados do campo de velocidade no plano xz que passa no centro dos ventiladores ($y = 2,2$ m). Nestas figuras estão *screen shots* com intervalos de tempo de 60 segundos onde se pode ver o comportamento dos jactos e a sua influência no fluido do parque de estacionamento.

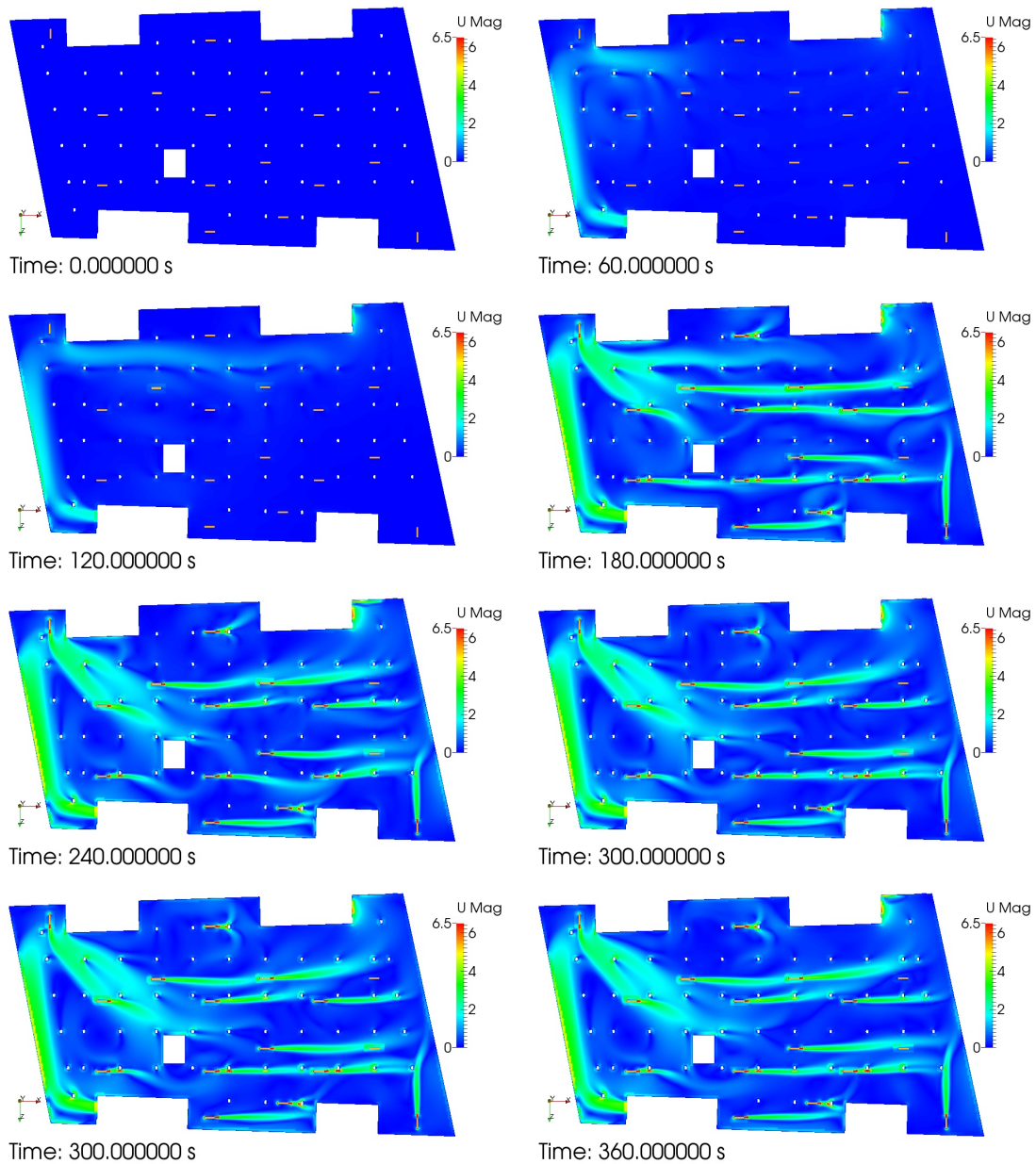


Figura 4.4: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo velocidade de $t = 0$ s a $t = 360$ s.

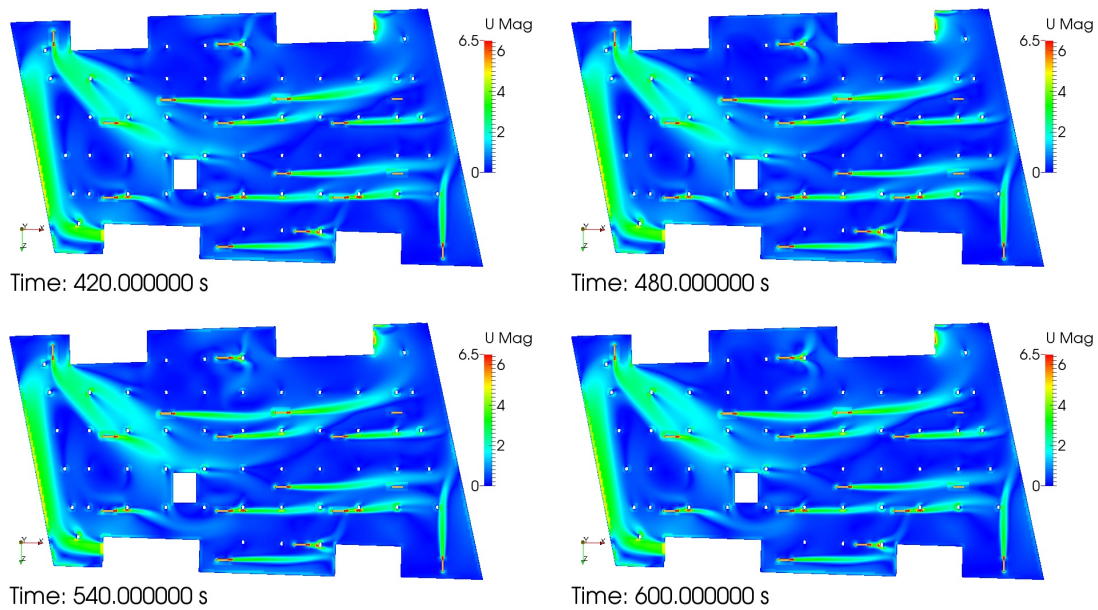


Figura 4.5: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo velocidade de $t = 420$ s a $t = 600$ s.

Nestas figuras pode-se ver os ventiladores que estão em funcionamento e a influência dos obstáculos no jacto dos ventiladores de impulso.

4.7.3 Resultados do campo temperatura

A figura 4.6 apresenta o resultado do campo temperatura. Nos *screen shots* apresentam-se vários planos que são paralelos ao plano xy e ao plano zy , que iniciam na origem do referencial e estão espaçados de 5 m. Estes planos têm a altura de 1,8 m, ou seja, vão de $y = 0$ m até $y = 1,8$ m. Nesta figura exibem-se *screen shots* com intervalos de tempo de 60 segundos, com início no segundos 120 e término no segundo 540, já que antes do segundo 120 não existe transferência de calor e após o segundo 540 o parque está sem fumo.

No anexo C.2.4 apresentam-se várias figuras com *screen shots* que abrangem toda a simulação com intervalos de tempo de 10 segundos.

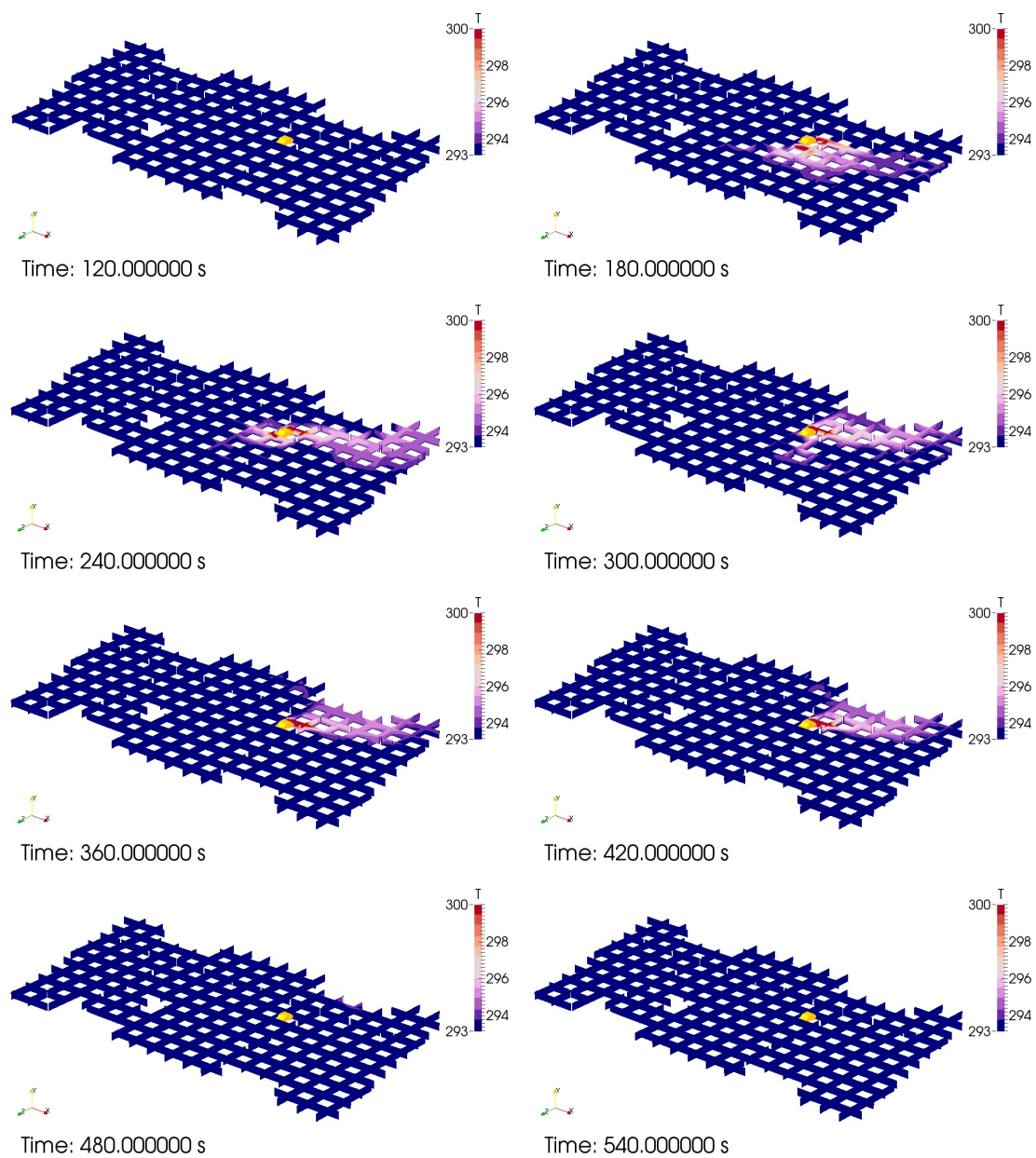


Figura 4.6: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 120$ s a $t = 540$ s.

4.8 Análise de resultados

A análise que se vai efectuar à figura 4.3 é complementada com a sequência de figuras do anexo C.2.4 (da figura C.8 à figura C.14).

Na figura 4.3 apresenta-se o *screen shot* para $t = 0$ s onde observa-se a condição inicial da simulação com a ausência do movimento do fluido e da pluma térmica. O *screen shot* seguinte é para $t = 120$ s. Neste *screen shot* é visível a movimentação do ar devido à ventilação, que deve ser permanente. Neste *screen shot* também é visível o início do incêndio na viatura, em que a mesma passa a cor vermelha. No *screen shot* com $t = 130$ s já é visível a pluma térmica. É neste segundo que se considera que é detetado o incêndio, dando assim início à ventilação de desenfumagem. No *screen shot* seguinte pode-se observar os ventiladores de impulso em funcionamento e os ventiladores axiais na velocidade máxima.

Para $t = 350$ s pode-se observar no *screen shot* a pluma térmica a entrar numa fase em que se pode considerar estacionária. No *screen shot* seguinte, para $t = 430$ s, pode-se verificar que a pluma térmica é idêntica à do *screen shot* anterior. É no segundo 430 que se considera que o incêndio é extinto. Assim, no *screen shot* para $t = 440$ s já é visível a viatura com a cor inicial. No último *screen shot*, para $t = 600$ s, observa-se só o sistema de desenfumagem em funcionamento, não existindo pluma térmica.

Nas figuras 4.4 e 4.5 pode-se verificar que não existem pontos de estagnação à cota dos eixos dos ventiladores de impulso. Nestas figuras verifica-se também que os ventiladores de impulso 14 e 15 não estão em funcionamento.

Nas figuras anteriormente mencionadas verifica-se que a localização de alguns dos ventiladores de impulso é deficiente. Os casos de maior relevo são as localizações dos ventiladores 5 e 11. Os eixos destes ventiladores estão colocados no plano criado pelo centro de dois pilares, e que estão próximos da admissão/exaustão. Existem outros ventiladores que estão próximos do plano criado pelos pilares, sendo que os jactos desses ventiladores sofrem a influência desses pilares.

Como já mencionado anteriormente, a pluma térmica com cota inferior a 1,8 m merece grande atenção. Assim, na figura 4.6 verifica-se que até ao segundo 300 a pluma térmica com cota inferior a 1,8 m está bastante dispersa. A partir desse segundo a pluma térmica fica concentrada na direcção dos ventiladores de desenfumagem de exaustão. Após o segundo 480, a pluma térmica praticamente desaparece da cota inferior a 1,8 m. Esta análise é complementada com as figuras do anexo C.2.4 (da figura C.15 à C.19).

Com todas figuras já dissecadas, pode-se concluir que o procedimento computacional apresentado cumpre a função pretendida, ou seja, serve para simular sistemas de desenfumagem em parques de estacionamento, para analisar e verificar do funcionamento do sistema.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Introdução

Este último capítulo conclui a dissertação sobre o desenvolvimento do procedimento computacional para a análise e verificação do funcionamento de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso para parques de estacionamento, recorrendo ao software de mecânica dos fluidos computacional *OpenFOAM* e está dividido em duas secções.

Na secção 5.2 apresentam-se as conclusões obtidas com este estudo. Na secção 5.3 mencionam-se sugestões para trabalho futuro.

5.2 Conclusões

Nesta dissertação procurou-se efectuar o desenvolvimento de um procedimento computacional para a análise e verificação do funcionamento de sistemas de desenfumagem com ventiladores de impulso para parques de estacionamento, recorrendo ao software de mecânica dos fluidos computacional *OpenFOAM*. Também se procurou avaliar se o software *OpenFOAM* pode ser utilizado para simular com confiança o funcionamento de ventiladores de impulso.

Com os resultados obtidos no capítulo 3 pode-se afirmar que o programa *buoyantpimplefoam* do software *OpenFOAM*, com o modelo de turbulência $k - \epsilon$, simula quase na perfeição o funcionamento de ventiladores de impulso.

No capítulo 4 apresenta-se um procedimento computacional para sistemas de desenfumagem em parques de estacionamento, que em simultâneo é testado num parque com uma arquitectura complexa e se verifica que é exequível. Assim, conclui-se que o programa *buoyantpimplefoam* do software *OpenFOAM* pode ser utilizado para a análise e verificação do funcionamento de sistemas de desenfumagem em parques de estacionamento. Nesse mesmo capítulo, em simultâneo com a apresentação do procedimento computacional, efectua-se a

simulação para o parque de estacionamento que faz parte do projecto de um grande edifício de serviços. Com os resultados obtidos nessa simulação pode-se concluir que a localização dos ventiladores de impulso no parque de estacionamento não está bem projectada, já que se verifica que a localização de alguns dos ventiladores de impulso é deficiente por estar bastante próxima dos pilares de suporte da estrutura.

5.3 Trabalho futuro

Desenvolver-se procedimento para a utilização do programa *snappyHexMesh*, já que este programa é de uma enorme complexidade. Propõem-se principalmente que se explore o funcionamento do comando *SurfaceFeatureExtract* do mesmo programa, de forma a se obter uma malha com melhor resolução nos contornos.

Os resultados obtidos com a simulação executada neste estudo não proporciona uma conclusão definitiva sobre a localização de todos ventiladores de impulso. Assim, propõem-se que se execute uma simulação do sistema de desenfumagem com o parque de estacionamento completamente cheio de viaturas. Também se deve executar outra simulação com a viatura numa localização oposta.

Bibliografia

- S. P. I. Carvalho. Desenfumagem em edifícios – parque de estacionamento coberto (retail - oeiras parque). Master’s thesis, ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- F. A. Castro. Mecânica dos fluidos computacional. Apontamentos da Unidade Curricular de Mecânica dos Fluidos Computacional, Novembro 2012.
- J. H. Ferziger and M. Perić. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 3rd edition, 2002.
- B. J. M. Giesen, S. H. A. Penders, M. G. L. C. Loomans, P. G. S. Rutten, and J. L. M. Hensen. Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures. Technical report, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Holanda, 2011.
- F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley, 6th edition, 2006.
- J. H. Klote and J. A. Milke. *Principles of Smoke Management*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc, 2002.
- B. E. Launder and D. B. Spalding. *Mathematical models of turbulence*. Academic Press, London, 1972.
- OpenFOAM - User Guide. OpenFOAM Foundation, 2.2.0 edition, 2013. URL <http://www.openfoam.org/docs/>.
- M. Sass-Tisovskaya. The buoyantfoam solver, March 2008. URL http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2007/MargaritaSassTisovskaya/buoyantFoamTutorial.ppt.
- N. G. Veiga. Simulação computacional do escoamento induzido por um incêndio num parque de estacionamento coberto. Master’s thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- D. C. Wilcox. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, 2 edition, 1994.

V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Technical report, NASA, Virginia, USA, 1991. URL <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA240395>.


```
deltaT          .001;

writeControl    adjustableRunTime;

writeInterval   1;

purgeWrite      0;

writeFormat     ascii;

writePrecision  6;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable true;

adjustTimeStep  yes;

maxCo           0.95;

// ***** //
```

A.2 fvSchemes

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.0.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSchemes;
}
// ***** //

ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   Gauss upwind;
    div(phi,h)   Gauss upwind;
    div(phi,k)   Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div(phi,R)   Gauss upwind;
    div(phiU,p)  Gauss linear;
    div(R)       Gauss linear;
    div((muEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

```

```
laplacianSchemes
{
    default          none;
    laplacian(muEff,U) Gauss linear corrected;
    laplacian((rho*(1|A(U))),p_rgh) Gauss linear corrected;
    laplacian(alphaEff,h) Gauss linear corrected;
    laplacian(DkEff,k) Gauss linear corrected;
    laplacian(DepsilonEff,epsilon) Gauss linear corrected;
    laplacian(DREff,R) Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default          linear;
}

snGradSchemes
{
    default          corrected;
}

fluxRequired
{
    default          no;
    p_rgh;
}
// ***** //
```

A.3 fvSolution

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O p e r a t i o n | Version: 2.0.0 |
| \\      / A n d           | Web:      www.OpenFOAM.com |
|  \\    / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSolution;
}
// * * * * * //

solvers
{
    "rho.*"
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       0;
        relTol          0;
    }

    p_rgh
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0.01;
    }

    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        relTol          0;
    }
}

```

```
"(U|h|k|epsilon|R)"
{
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance       1e-6;
    relTol          0.1;
}

"(U|h|k|epsilon|R)Final"
{
    $U;
    relTol          0;
}
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor yes;
    nOuterCorrectors 1;
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}
// ***** //
```


A.5 thermophysicalProperties

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O p e r a t i o n      | Version: 2.0.0 |
| \\      / A n d      | Web: www.OpenFOAM.com |
|  \\    / M a n i p u l a t i o n      |
\*-----*- C++ -*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       thermophysicalProperties;
}
// ***** //

thermoType      hRhoThermo<pureMixture<constTransport<specieThermo<hConstThermo
<perfectGas>>>>>>;

pRef            100000;
mixture
{
    specie
    {
        nMoles      1;
        molWeight    28.9;
    }
    thermodynamics
    {
        Cp          1000;
        Hf          0;
    }
    transport
    {
        mu          1.8e-05;
        Pr          0.7;
    }
}
// ***** //

```

A.6 turbulenceProperties

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.0.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       turbulenceProperties;
}
// * * * * * //

simulationType RASModel;

// ***** //

```

A.7 RASProperties

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.0.0 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.com |
| \\ / M anipulation |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       RASProperties;
}
// ***** //

RASModel      kEpsilon;

turbulence    on;

printCoeffs   on;

// ***** //

```

A.8 blockMeshDict

A.8.1 Para a validação do Software OpenFOAM

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O p e r a t i o n      | Version: 2.0.0 |
| \\      / A n d      | Web: www.OpenFOAM.com |
|  \\\\   M a n i p u l a t i o n   | |
/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format        ascii;
    class         dictionary;
    object        blockMeshDict;
}
// * * * * * //

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0 0) // 0
    (34 0 0) // 1
    (34 6.5 0) // 2
    (0 6.5 0) // 3
    (0 0 32) // 4
    (34 0 32) // 5
    (34 6.5 32) // 6
    (0 6.5 32) // 7
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (102 20 96) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);

```

```
boundary
(
  fixedWalls
  {
    type wall;
    faces
    (
      (0 3 2 1)
      (4 5 6 7)
      (3 7 6 2)
      (0 1 5 4)
    );
  }
  inlet
  {
    type patch;
    faces
    (
      (0 4 7 3)
    );
  }
  outlet
  {
    type patch;
    faces
    (
      (1 2 6 5)
    );
  }
  fan_half0
  {
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half1;
  }
  fan_half1
  {
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half0;
  }
);
```

```
mergePatchPairs
```

```
(  
);
```

```
// ***** //
```

A.8.2 Para o parque de estacionamento

```

/*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.0.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// ***** //

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0.001 0) // 0
    (98.599 0.001 0) // 1
    (98.599 2.4 0) // 2
    (0 2.4 0) // 3
    (0 0.001 53.663) // 4
    (98.599 0.001 53.663) // 5
    (98.599 2.4 53.663) // 6
    (0 2.4 53.663) // 7
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (296 8 161) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);

boundary
(

```

```
fixedWalls
{
    type wall;
    faces
    (
        (0 3 2 1)
        (4 5 6 7)
        (3 7 6 2)
        (0 1 5 4)
        (0 4 7 3)
        (1 2 6 5)
    );
}
fan_half10
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half11;
}
fan_half11
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half10;
}
fan_half20
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half21;
}
fan_half21
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half20;
}
fan_half30
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half31;
}
```

```
fan_half31
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half30;
}
fan_half40
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half41;
}
fan_half41
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half40;
}
fan_half50
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half51;
}
fan_half51
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half50;
}
fan_half60
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half61;
}
fan_half61
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half60;
}
fan_half70
```

```
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half71;
}
fan_half71
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half70;
}
fan_half80
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half81;
}
fan_half81
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half80;
}
fan_half90
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half91;
}
fan_half91
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half90;
}
fan_half100
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half101;
}
fan_half101
{
```

```
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half100;
}
fan_half110
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half111;
}
fan_half111
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half110;
}
fan_half120
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half121;
}
fan_half121
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half120;
}
fan_half130
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half131;
}
fan_half131
{
    type cyclic;
    faces ();
    neighbourPatch fan_half130;
}
fan_half140
{
    type cyclic;
```

```
        faces ();
        neighbourPatch fan_half141;
    }
    fan_half141
    {
        type cyclic;
        faces ();
        neighbourPatch fan_half140;
    }
    fan_half150
    {
        type cyclic;
        faces ();
        neighbourPatch fan_half151;
    }
    fan_half151
    {
        type cyclic;
        faces ();
        neighbourPatch fan_half150;
    }
    fan_half160
    {
        type cyclic;
        faces ();
        neighbourPatch fan_half161;
    }
    fan_half161
    {
        type cyclic;
        faces ();
        neighbourPatch fan_half160;
    }
);
```

```
mergePatchPairs
(
);
```

```
// ***** //
```


Apêndice B

Cálculos

B.1 Validação do Software OpenFOAM

B.1.1 Características técnicas do ventilador de impulso utilizado em G2011

Velocidade	18 m/s
Caudal	1 m ³ /s
Impulso	21 N

B.1.2 Dimensões para o ventilador de impulso

Cálculo do área do ventilador

$$Q = A.u \quad \Rightarrow \quad 1 = A.18 \quad \Leftrightarrow \quad A \approx 0,0556 \text{ m}^2,$$

em que Q representa o caudal volúmico, A a área e u a velocidade.

Cálculo do lado do secção quadrada do ventilador

$$A = L.L \quad \Rightarrow \quad 0,0556 = L^2 \quad \Leftrightarrow \quad L \approx 0,24 \text{ m},$$

em que L representa o lado da secção do ventilador.

B.1.3 Pressão

$$P = \frac{I}{A} \Rightarrow P = \frac{21}{0,0556} \Leftrightarrow P \approx 378 \text{ Pa},$$

em que P representa a pressão, I o impulso e A a área do ventilador.

B.2 Procedimento Computacional

B.2.1 Características técnicas dos ventiladores propostos para o parque de estacionamento

Diâmetro	0,315 m
Caudal	1,2 m ³ /s
Impulso	22 N

B.2.2 Dimensões para os ventiladores de impulso

Cálculo do área do ventilador

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Rightarrow A = \pi \cdot \left(\frac{0,315}{2}\right)^2 \Leftrightarrow A \approx 0,0779 \text{ m}^2,$$

em que A representa a área e D o diâmetro do ventilador.

Cálculo do lado do secção quadrada do ventilador

$$A = L.L \Rightarrow 0,0779 = L^2 \Leftrightarrow L \approx 0,28 \text{ m},$$

em que L representa o lado da secção do ventilador.

B.2.3 Velocidade do fluido na grelha de entrada/saída

$$Q = A.u \Rightarrow 15,625 = 5.u \Leftrightarrow u = 3,125 \text{ m/s},$$

em que Q representa o caudal volúmico do ventilador axial, A a área da grelha de entrada/saída e u a velocidade do fluido na grelha.

B.2.4 Temperatura atingida pela viatura

$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_\infty) \quad \Rightarrow \quad \frac{2000000}{27,578} = 74(T_s - 293,15) \quad \Leftrightarrow \quad T_s \approx 1273,15 \text{ K},$$

em que q representa a taxa de transferência de calor, A a área da viatura (obtida com recurso ao software *SolidWorks*), T_s a temperatura da superfície da viatura e T_∞ a temperatura do fluido. h é o coeficiente de convecção do escoamento, que neste caso atribuiu-se o valor de $74 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ porque se considerou que o escoamento de convecção é ligeiramente forçado (para mais informação consultar [Incropera et al. \(2006\)](#)).

B.2.5 Pressão

$$P = \frac{I}{A} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{22}{0,0779} \quad \Leftrightarrow \quad P \approx 283 \text{ Pa},$$

em que P representa a pressão, I o impulso e A a área do ventilador.

Apêndice C

Figuras

C.1 Validação do Software OpenFOAM

C.1.1 Geração da malha

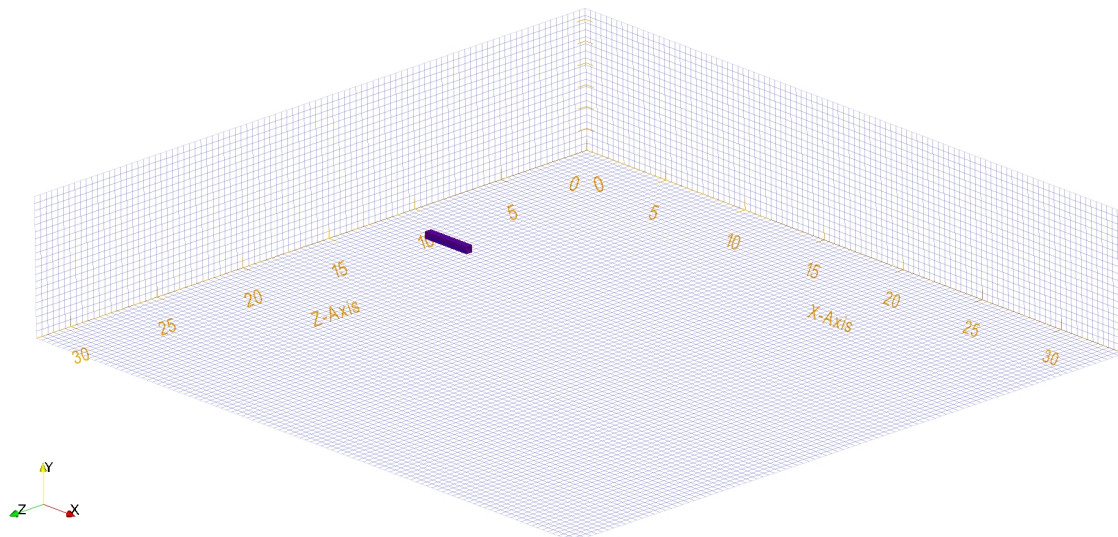


Figura C.1: Malha da arquitectura com o ventilador.

C.1.2 Simulações

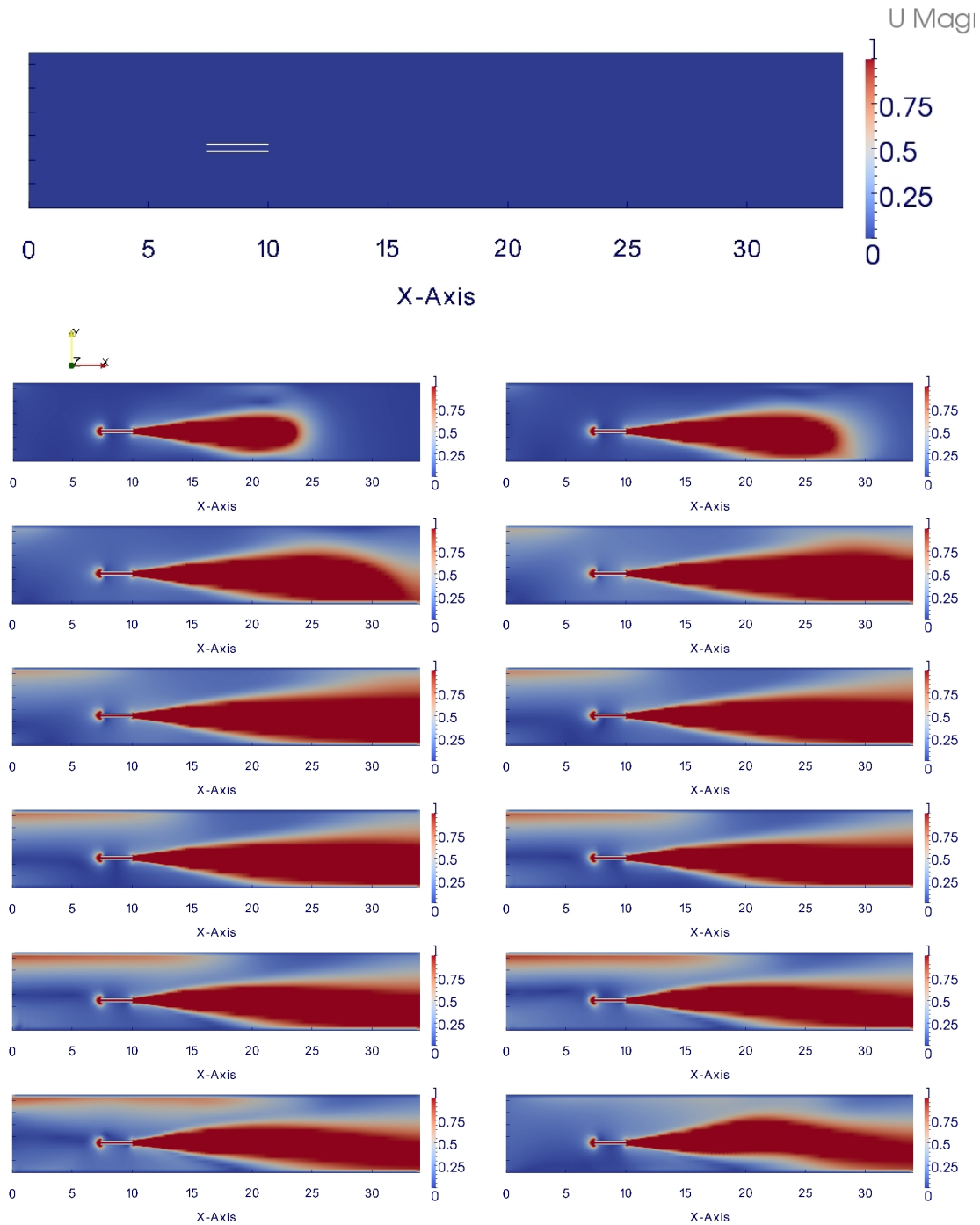


Figura C.2: Resultado da simulação para verificação da estabilidade da velocidade do jacto. A primeira figura (a maior) é para $t = 0$ s, as restantes têm um Δt de 10 s, sendo a sequência da esquerda para a direita de cima para baixo, terminado em $t = 120$ s.

C.2 Procedimento Computacional

C.2.1 Parque de estacionamento

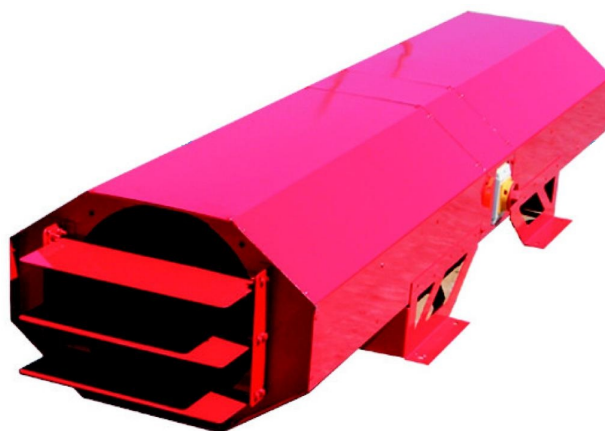


Figura C.3: Imagem dos ventiladores de impulso.

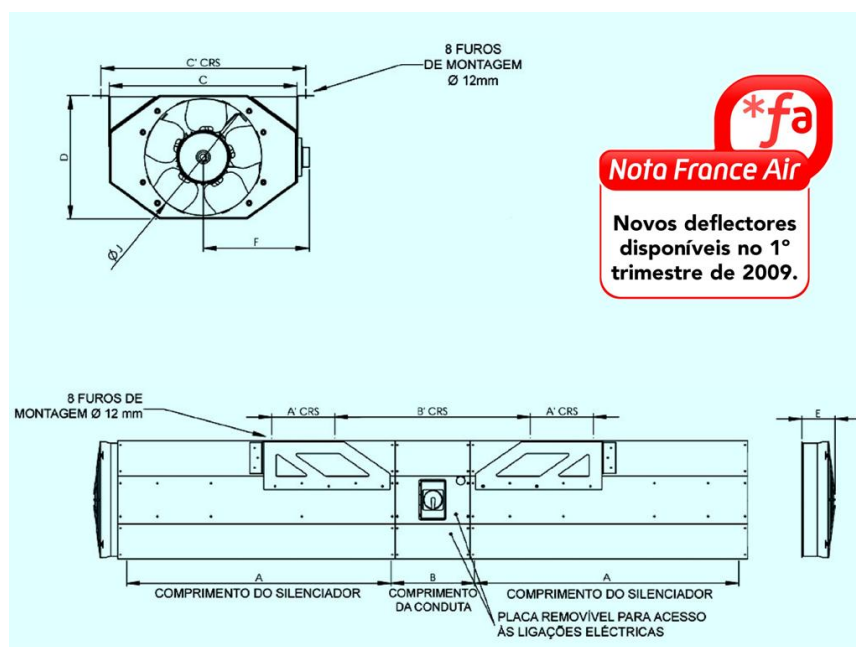


Figura C.4: Atravancamentos dos ventiladores de impulso.

ventilação		Ventilação em ambientes industriais >							france AIR PORTUGAL			
		ventiladores helicoidais										
descrição técnica												
• Unidireccional												
Modelos	A	A'	B	B'	C'	D	E	Comprimento total (mm)	Pesos (kg)	Aspiração	Descarga	
AXALU TR 31 UO	835	200	265	620	580	335	90	2175	90	PA	D	
AXALU TR 35 UO	835	200	265	620	580	375	105	2190	95	PA	D	
AXALU TR 40 UO	835	200	265	620	670	420	113	2198	106	PA	D	
• Reversível												
Modelos	A	A'	B	B'	C'	D	E	Comprimento total (mm)	Pesos (kg)	Aspiração	Descarga	
AXALU TR 31 RO	835	200	265	620	580	335	90	2235	89	D	D	
AXALU TR 35 RO	835	200	265	620	580	375	105	2235	94	D	D	
AXALU TR 40 RO	835	200	265	620	670	420	113	2235	105	D	D	
UO –unidireccional octogonal						PA – pavilhão de aspiração						
RO –reversível octogonal						D - deflector						
Características												
Modelos	Unidireccional											
	Potência do motor (kW)	Impulso (N)	Caudal (m3/s)	Pressão sonora (dB(A))*								
AXALU TR 31 UO	0,8/0,1	22/6	1,2/0,61	80/62								
AXALU TR 35 UO	1,1/0,14	38/10	1,9/0,97	84/66								
AXALU TR 40 UO	1,4/0,17	57/14	2,4/1,22	87/68								
Modelos	Reversível											
	Potência do motor (kW)	Impulso (N)	Caudal (m3/s)	Pressão sonora (dB(A))*								
AXALU TR 31 RO	0,8/0,1	22/6	1,2/0,61	81/65								
AXALU TR 35 RO	1,1/0,14	34/9	1,7/0,86	85/70								
AXALU TR 40 RO	1,4/0,17	54/14	2,3/1,16	87/71								
* níveis de pressão sonora a 1m e 45° directividade												

Figura C.5: Características dos ventiladores de impulso.

C.2.2 Modelação do parque de estacionamento em 3D

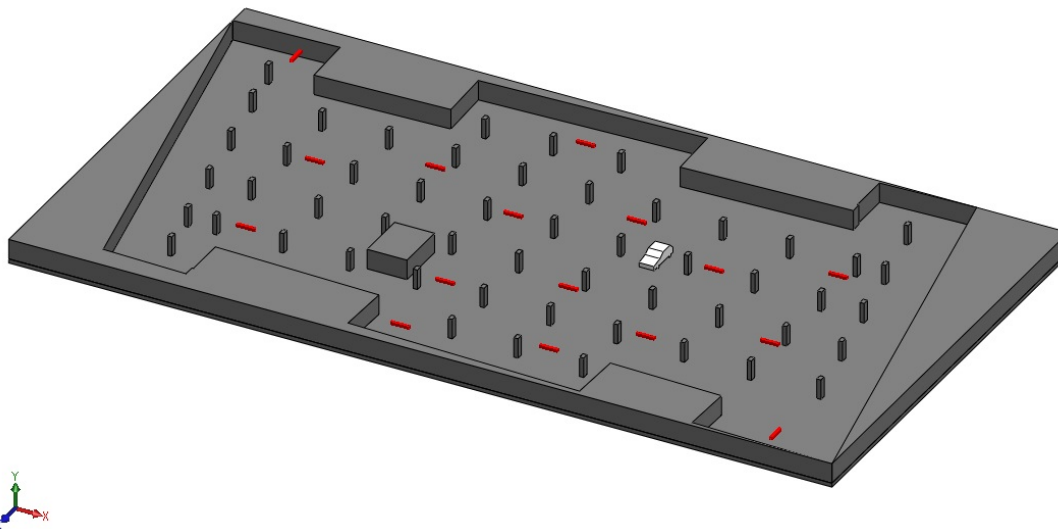


Figura C.6: Arquitectura do parque de estacionamento em 3D.

C.2.3 Taxa de libertação de calor

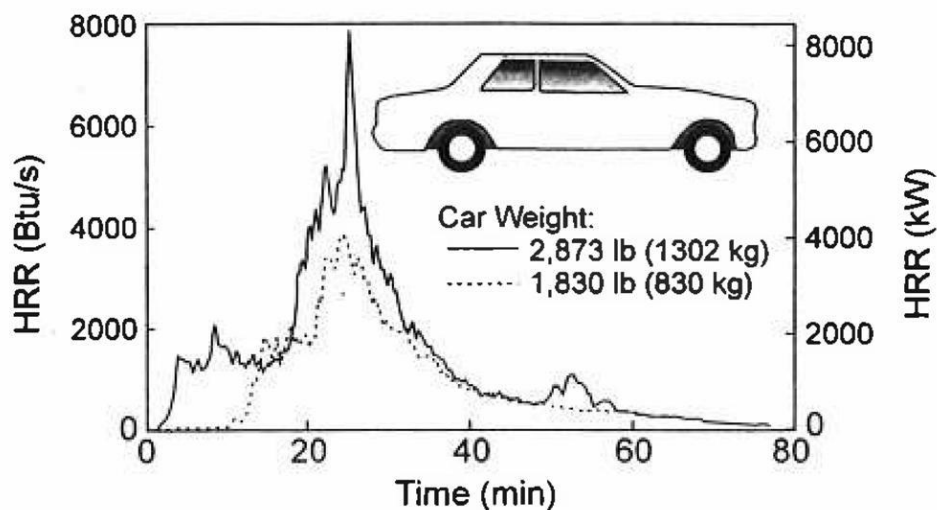


Figura C.7: Taxa de libertação de calor para viaturas (figura 2.19 de [Klote and Milke \(2002\)](#)).

C.2.4 Resultados

Resultados em 3D da simulação

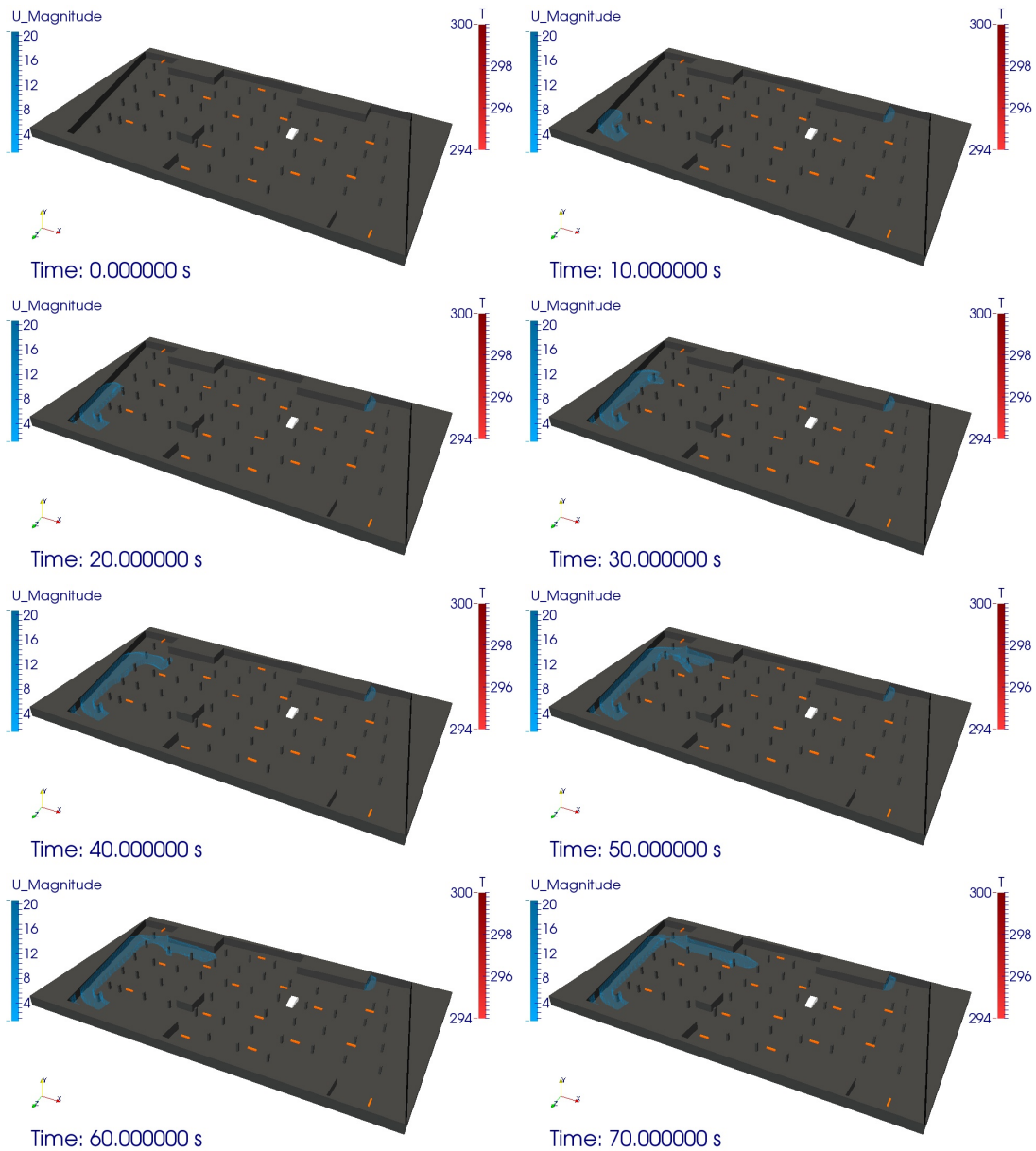


Figura C.8: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 0$ s a $t = 70$ s.

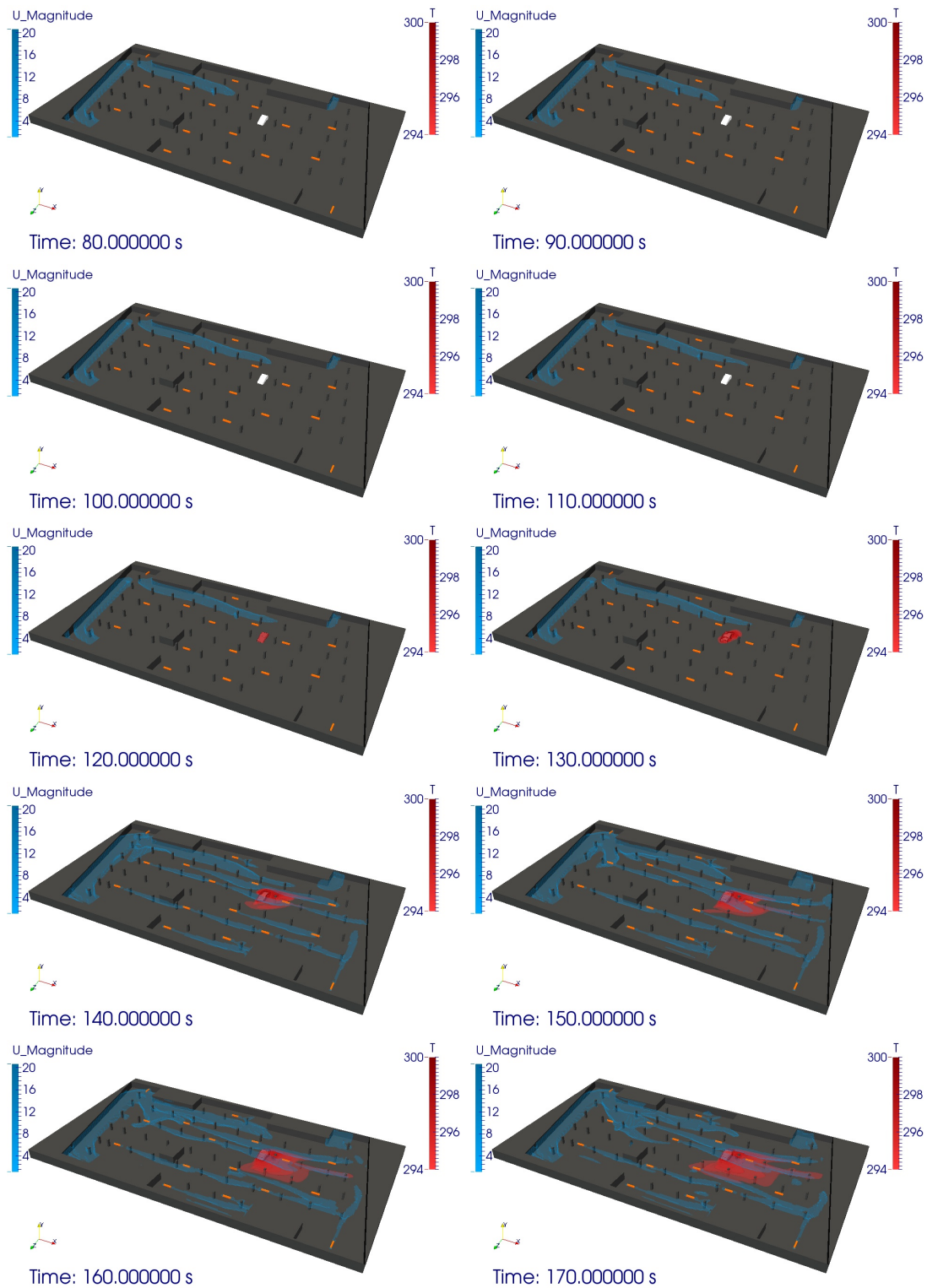


Figura C.9: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 80$ s a $t = 170$ s.

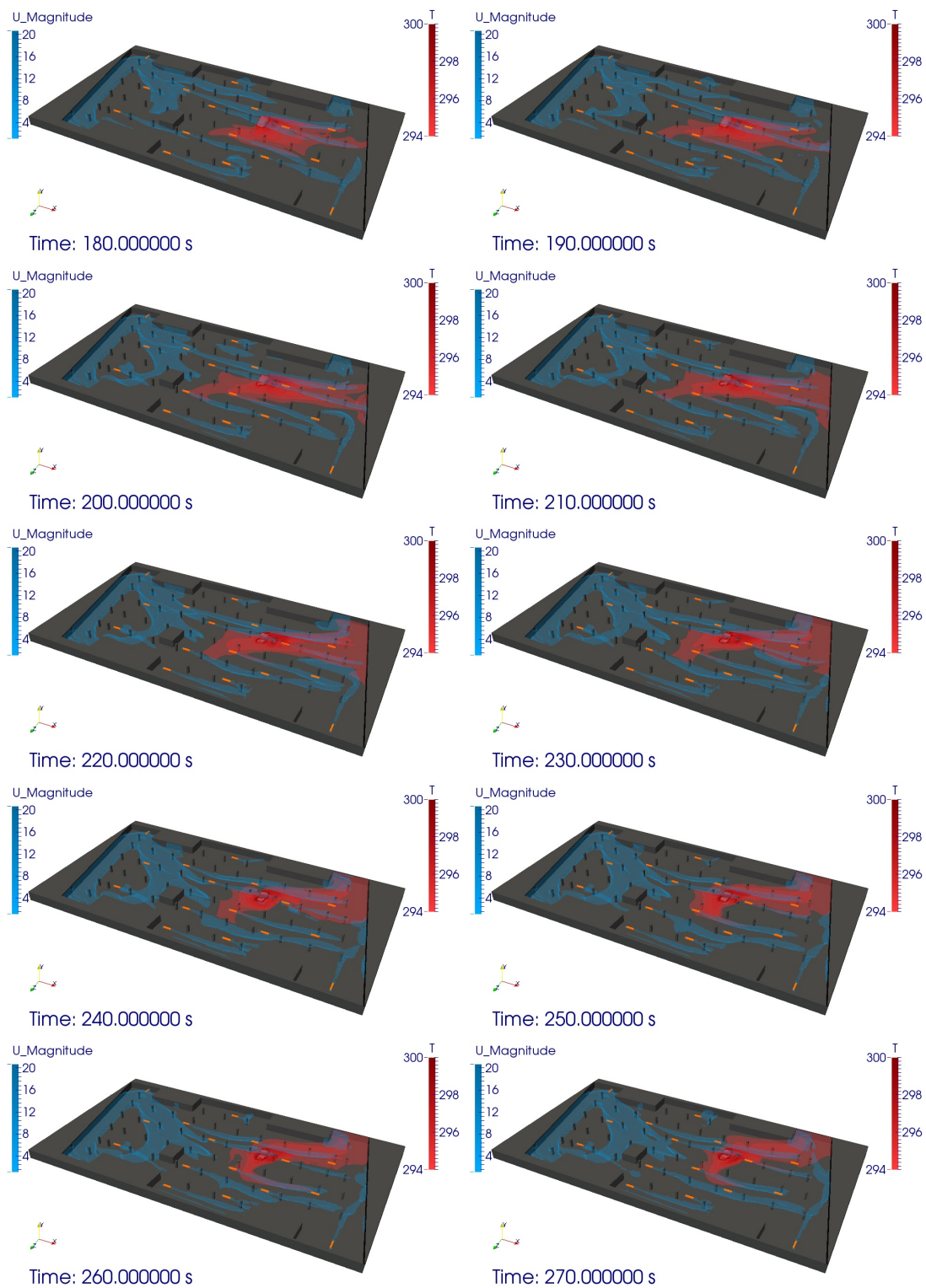


Figura C.10: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 180$ s a $t = 270$ s.

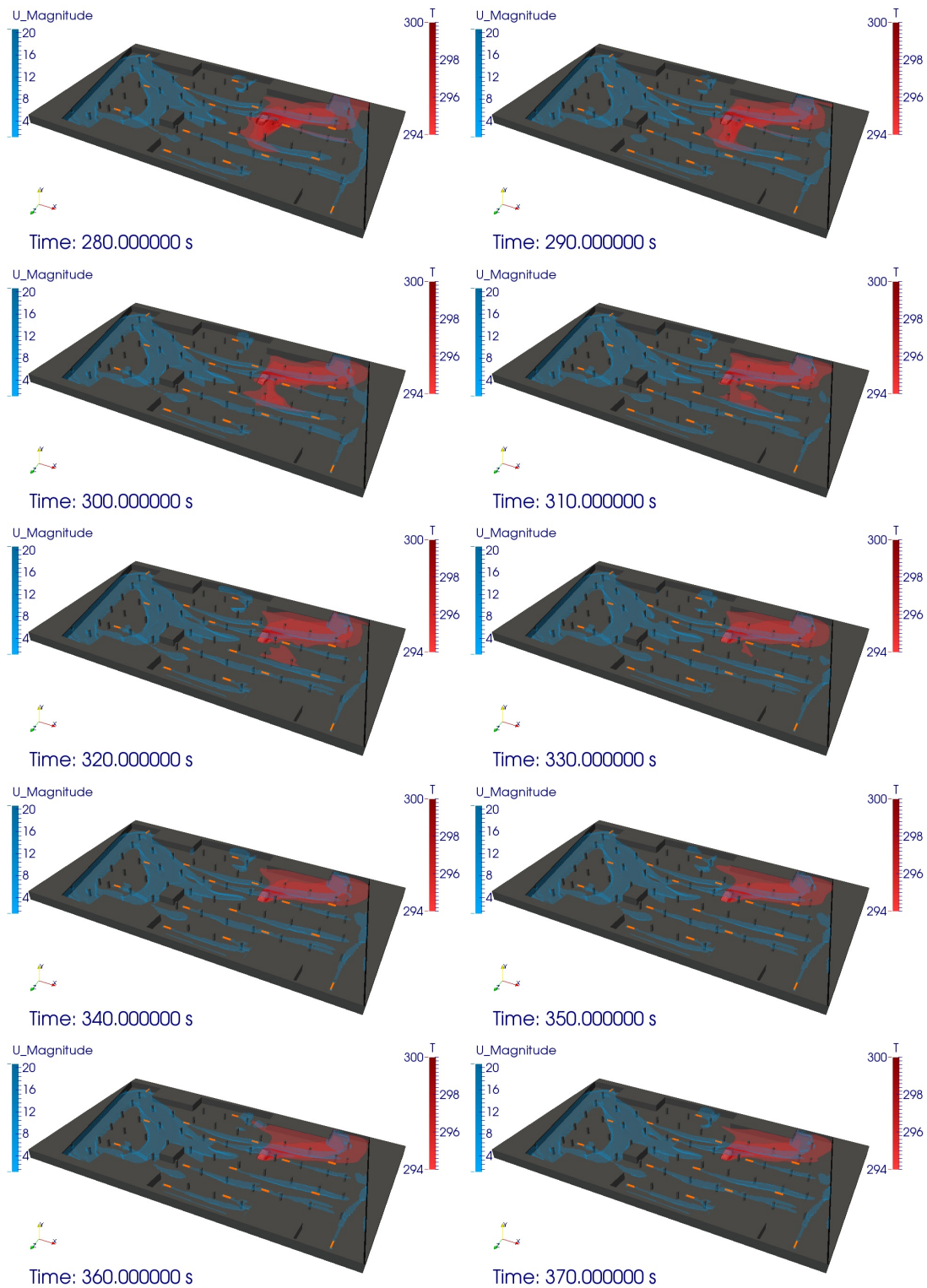


Figura C.11: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 280$ s a $t = 370$ s.

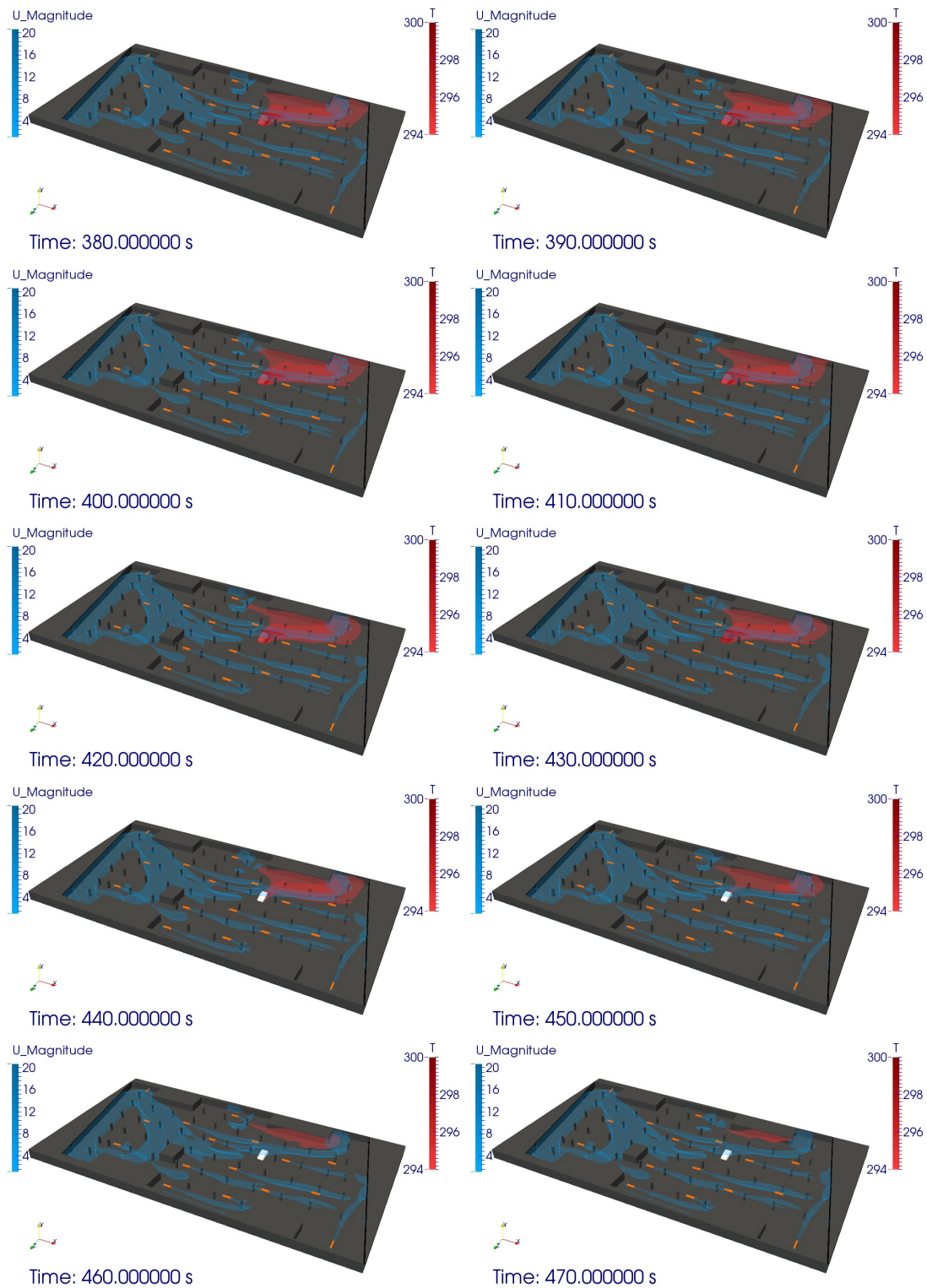


Figura C.12: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 380$ s a $t = 470$ s.

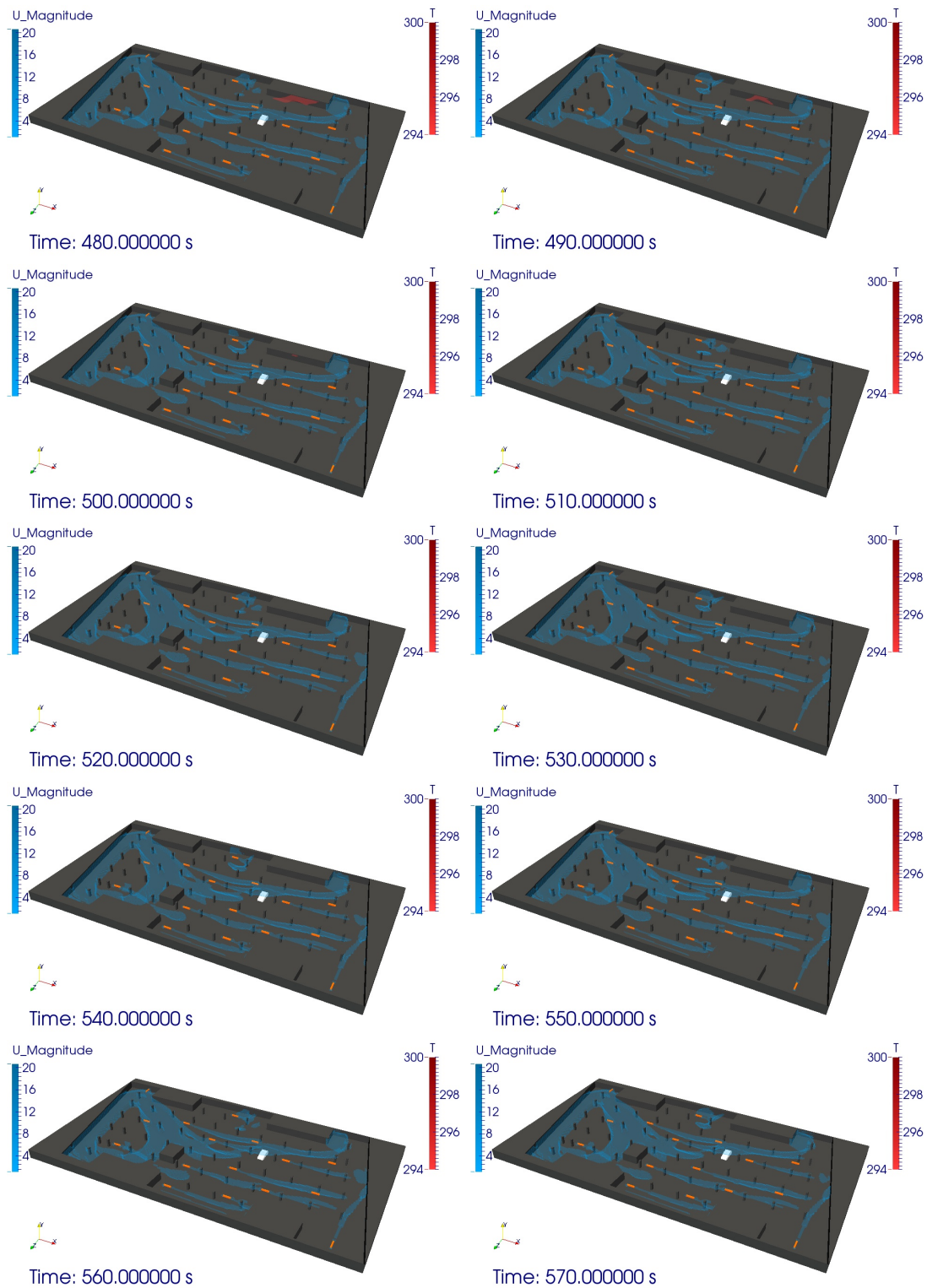


Figura C.13: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 480$ s a $t = 570$ s.

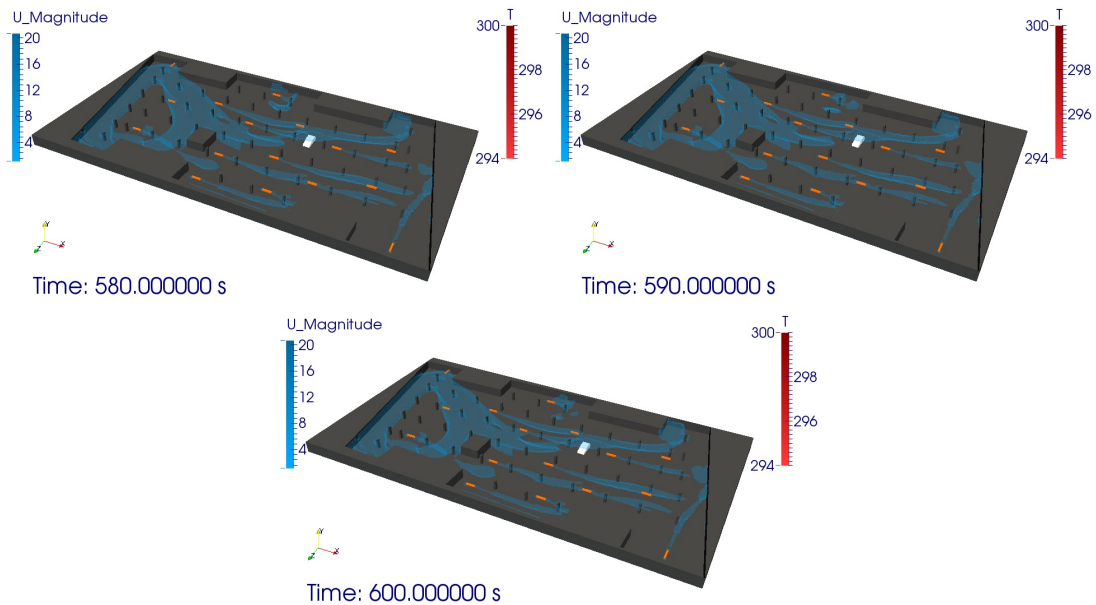


Figura C.14: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento de $t = 580$ s a $t = 600$ s.

Resultados do campo temperatura

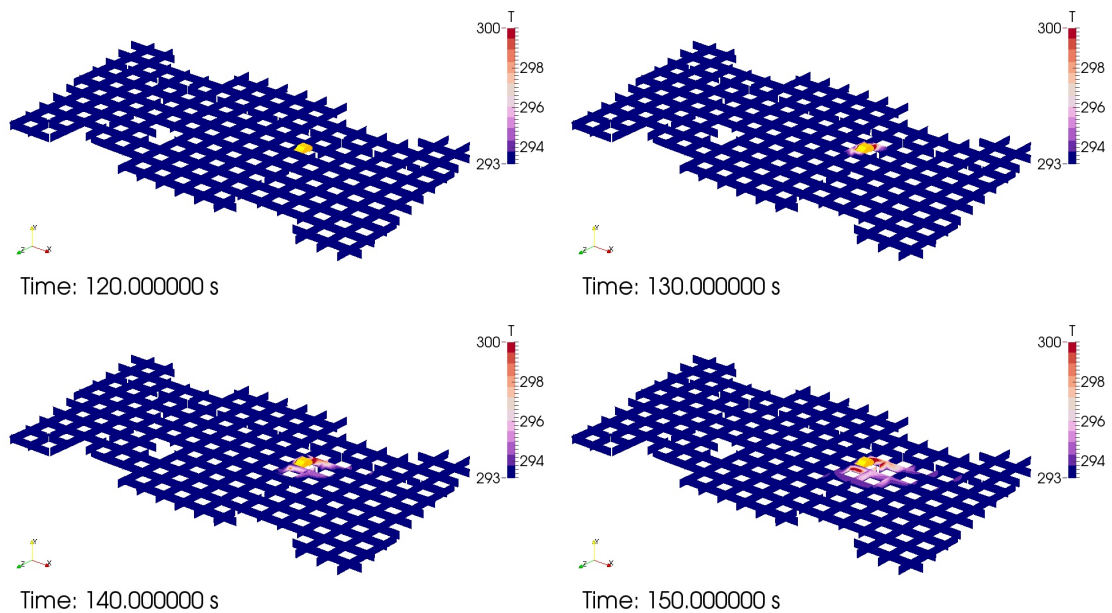


Figura C.15: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 120$ s a $t = 150$ s.

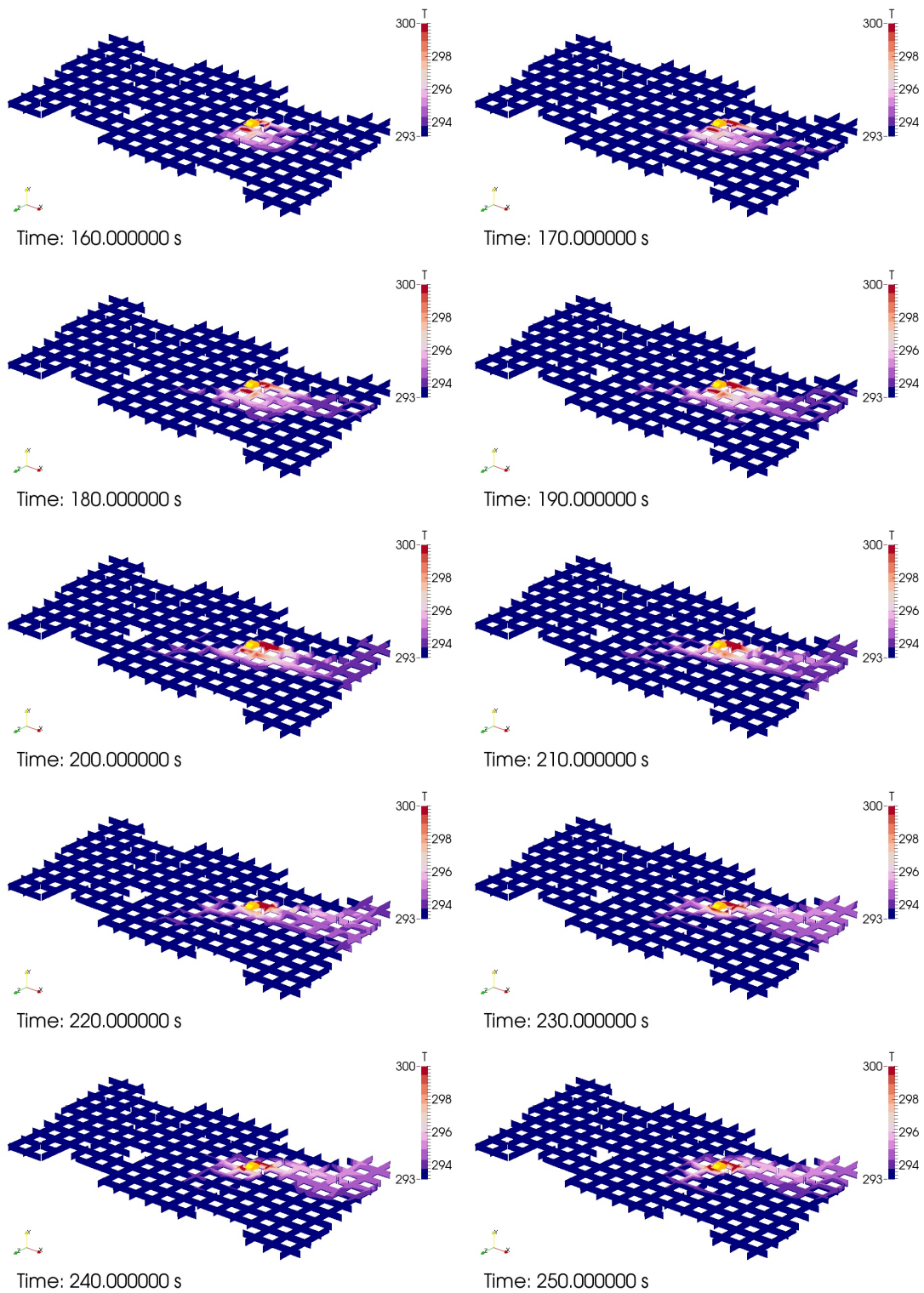


Figura C.16: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 160$ s a $t = 250$ s.

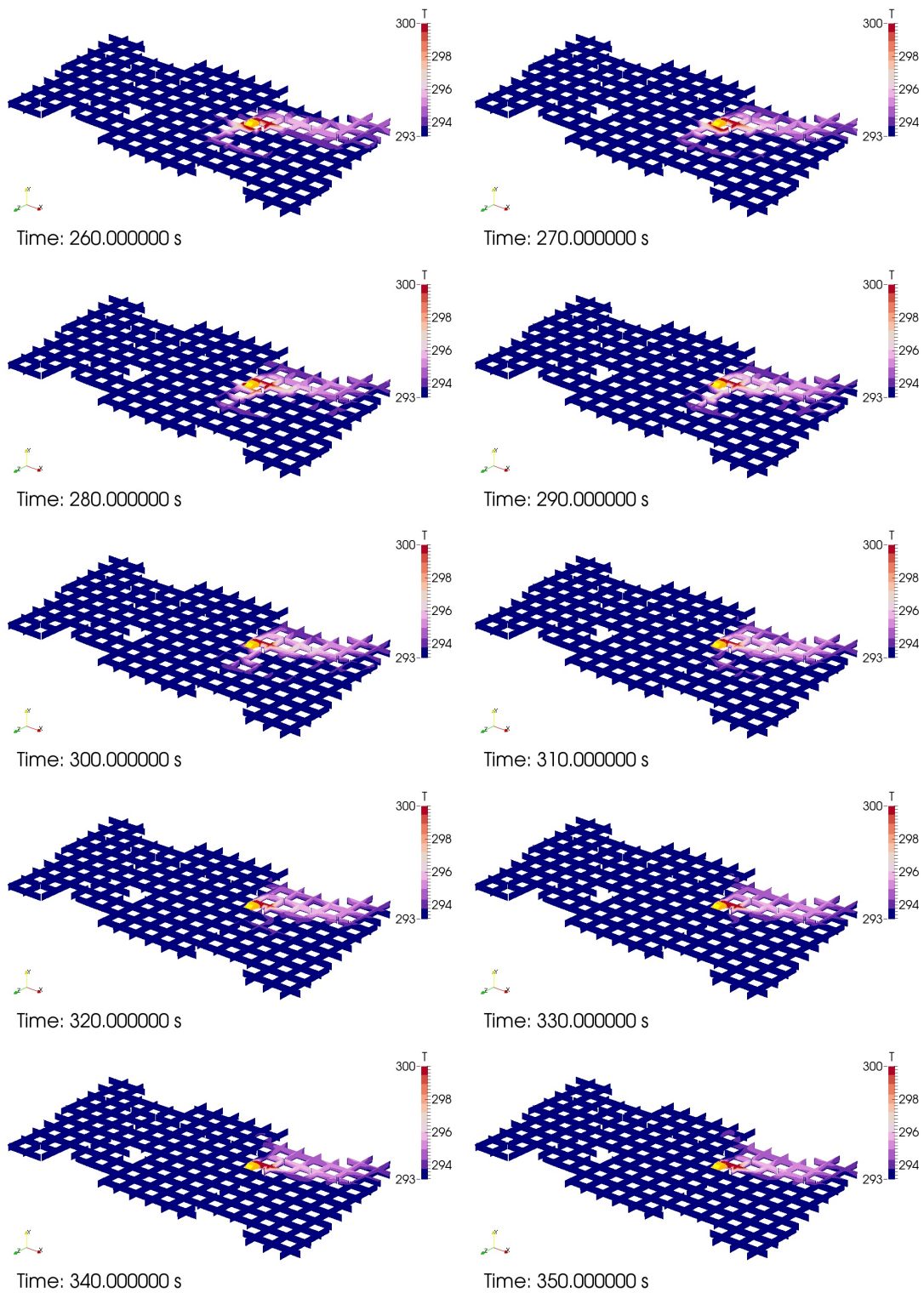


Figura C.17: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 260$ s a $t = 350$ s.

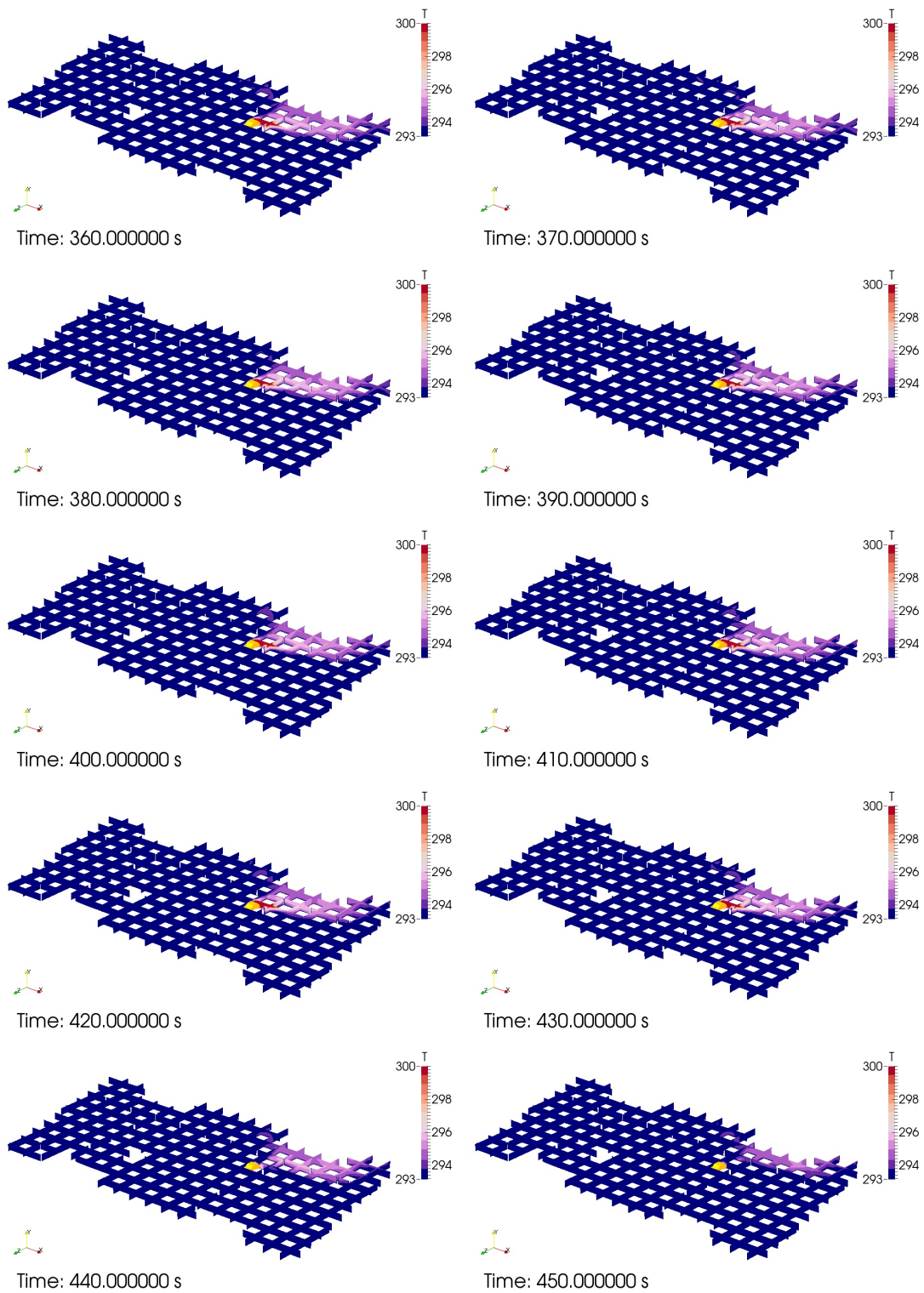


Figura C.18: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 360$ s a $t = 450$ s.

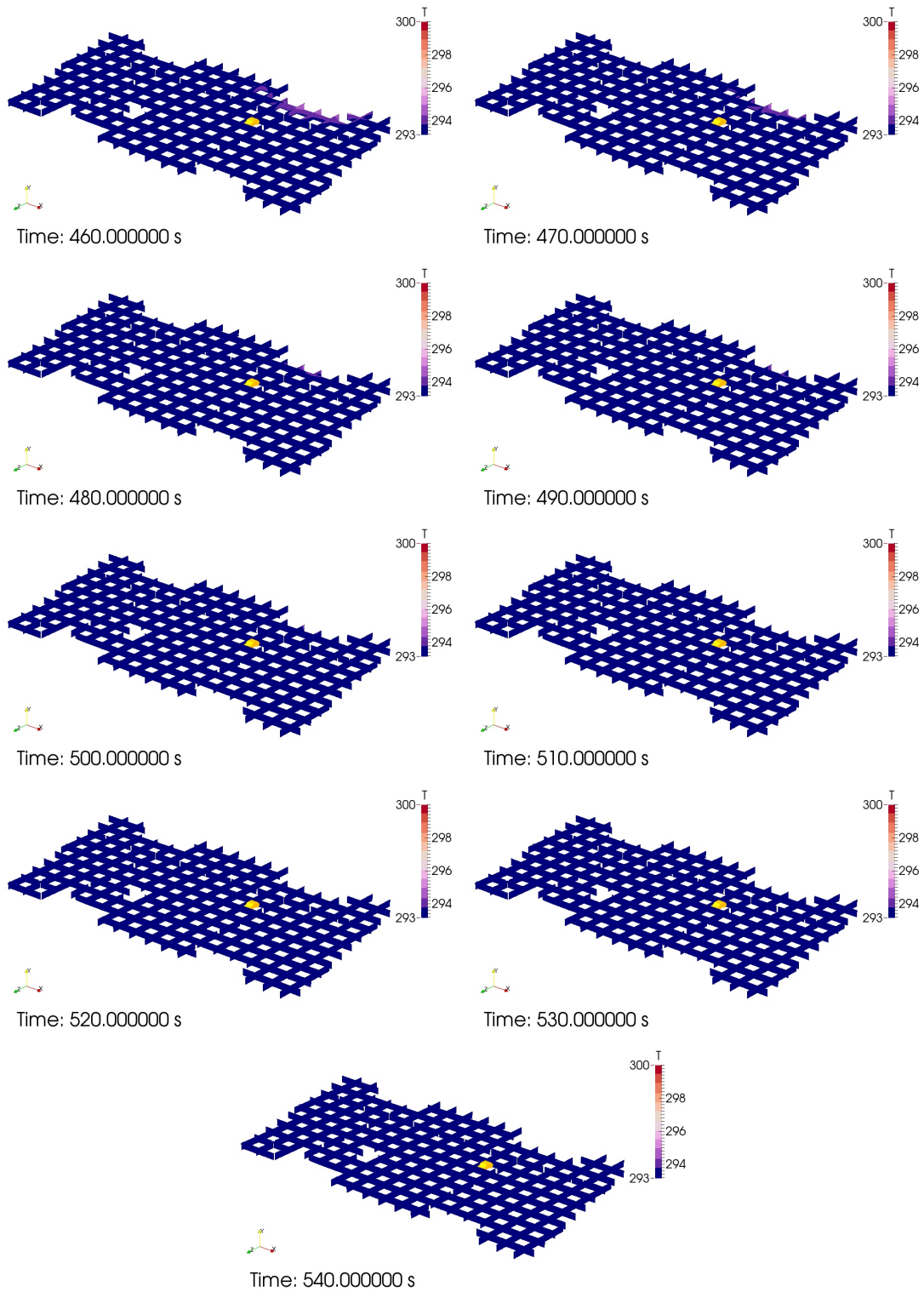


Figura C.19: Resultados da simulação da desenfumagem do parque de estacionamento para verificação do campo temperatura de $t = 460$ s a $t = 540$ s.