

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS BATISTELLA LOPES

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO TURBULENTO DO AR NO INTERIOR
DE AVIÁRIOS INDUSTRIAIS**

CURITIBA

2015

MARCOS BATISTELLA LOPES

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO TURBULENTO DO AR NO INTERIOR
DE AVIÁRIOS INDUSTRIAIS**

Dissertação final apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Viviana Cocco Mariani

CURITIBA

2015

MARCOS BATISTELLA LOPES

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO TURBULENTO DO AR NO INTERIOR
DE AVIÁRIOS INDUSTRIAIS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim
Coordenador do programa

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Viviana Cocco Mariani – orientadora
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Stephan Hennings Och
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Curitiba, 27 de Fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

À professora Viviana Cocco Mariani pela oportunidade e orientação.

Aos professores com quem cursei disciplinas na graduação e mestrado pela contribuição com minha formação.

À CAPES pela bolsa do projeto, à PUCPR e ao PPGEM pela ajuda de custo na minha participação no 15th ENCIT.

Aos funcionários da PUCPR pela eficiência.

Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo.

Aos alunos de iniciação científica e a todos que colaboraram neste trabalho.

Aos amigos e minha namorada pelos momentos de lazer.

A meus pais, minha família e Deus sem os quais não chegaria aonde cheguei e não abriria portas para minhas futuras conquistas

RESUMO

Este trabalho aplica técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) para prever o comportamento aproximado do escoamento no interior de aviários industriais. Os principais objetivos desta pesquisa são fazer a validação de um caso da literatura e propor modificações em um aviário nacional. Foi usado o programa Ansys® CFX versão 14.5 nas simulações computacionais. Resultados desta pesquisa basearam-se na investigação numérica e experimental de Blanes-Vidal *et al.* (2008) e foram estudados numericamente casos em um aviário industrial localizado em Montenegro (RS) verificando a perda de carga no escoamento para certas configurações. Blanes-Vidal *et al.* (2008) decidiram usar o modelo de turbulência k- ϵ padrão e neste trabalho foi investigado mais dois: modelos turbulentos RNG k- ϵ e k- ω . Comparando velocidades em determinados pontos escolhidos pelos autores, verificou-se que o modelo k- ϵ padrão foi o que mais se aproximou da solução experimental. Usando o mesmo problema de Blanes-Vidal *et al.* (2008), decidiu-se estudar mais duas inclinações do telhado do aviário: dividindo a inclinação pela metade, 6°, e dobrando-a, 24°. Verificou-se que a melhor configuração para aumentar a velocidade média do escoamento seria o telhado com menor inclinação, aumentando as trocas convectivas dos frangos. A partir das análises anteriores, decidiu-se estudar numericamente o aviário de Montenegro. Nesse aviário, estudou-se a aplicação de defletores, uma inclinação menor do telhado, a aplicação de forro e o uso de quatro tipos de ventiladores. Verificou-se que o uso de lonas defletoras aumenta a perda de carga, porém não é um aumento expressivo e, portanto, elas são viáveis quando se pretende aumentar a velocidade do escoamento em ventilação do tipo túnel. Em relação aos ventiladores, aquele com menor vazão apresentou maior perda de carga e, portanto, não deve ser usado naquele aviário. Para análise dos resultados usou-se perfis e campos de velocidade e temperatura, intensidade turbulenta, pressão e perda de carga. Houve concordância dos resultados desse trabalho com a pesquisa de Blanes-Vidal *et al.* (2008) e foi observado que lonas defletoras aumentam a velocidade do escoamento elevando a perda de carga do escoamento.

Palavras-chave: Turbulência, modelo k- ϵ , Dinâmica dos Fluidos Computacional, Aviário.

ABSTRACT

This work applies techniques of Computational Fluid Dynamics (CFD) to understand the flow inside industrial poultry houses and predict approximately this kind of flow behavior. The principal purpose of this research is to verify a literature case and to evaluate a Brazilian poultry building by making geometric changes on its domain. It has been used Ansys® CFX version 14.5 to computational simulation. Outcomes has been showed the validation of Blanes-Vidal *et al.* (2008) velocities profiles and numeric study cases of an industrial poultry building located at Montenegro city (Brazil) by verifying the pressure drop for some geometric configurations. Blanes-Vidal *et al.* (2008) have been decided to use k- ϵ standard turbulent model and at this work more two models have been applied: RNG k- ϵ and k- ω . Velocity values at some points have been compared with authors results and these results have been showed the k- ϵ standard turbulent model is more appropriated. More two configurations of that poultry house have been studied at this research: a lower roof inclination (6°) and a higher roof inclination (24°). The better configuration to increase the mean flow velocity was the 6° roof inclination. Moreover, it has been decided to numerically study a poultry building located at Montenegro city (Brazil). For this aviary it has been investigated the deflector application, another roof inclination, without inclination (ceiling) and the application of four different exhauster. The application of deflector increase the pressure drop, however it has been not a higher difference and it is a good option to increase the flow velocity. Regarding to the application of exhausters, it has been observed that a lower mass flow increase the pressure drop and this case it is not recommend to this application. Regarding analysis it has been showed velocity and temperature fields and profiles, turbulent kinematic energy, pressure fields and pressure drop. There was an agreement with Blanes-Vidal *et al.* (2008) results and it was presented that deflectors increase flow velocity consequentially increase the pressure drop and decrease the volumetric exhauster flow.

Key-words: Turbulence, k- ϵ model, Computational Fluid Mechanics, Poultry house.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa com distribuição de frangos no mundo. Fonte: Robinson <i>et al.</i> , 2014.	17
Figura 2 – Temperatura ambiente e umidade relativa recomendadas para aves de corte. Fonte: Coob, 2009.	18
Figura 3 – Zona de teste (a), com dimensões em metros. Validação dos resultados (b). Fonte: Blanes-Vidal <i>et al.</i> , 2008.	23
Figura 4 – Distribuição da temperatura (a) na qual a cor preta corresponde a 30°C e a branca a -1°C. Melhorias na configuração IB-5 (b). Fonte: Seo <i>et al.</i> , 2009.	24
Figura 5 – Casos estudados (a). Concentração de amônia no plano XZ (b). Fonte: Saraz, 2010.	25
Figura 6 – Casos estudados (a). Taxa de ventilação na zona dos frangos (b). Fonte: Mostafa <i>et al.</i> , 2012.	26
Figura 7 – Planos com vetores de velocidade. Fonte: Bustamante <i>et al.</i> , 2013.	27
Figura 8 – Aviário de 12,8x126x3m (a). Distribuição de temperaturas (b). Fonte: Saraz <i>et al.</i> , 2013.	28
Figura 9 – Esquema do sistema de ventilação lateral e localizado na poedeira (a). Contornos de temperatura no plano vertical simétrico (b). Fonte: Fawaz <i>et al.</i> , 2014.	29
Figura 10 – Mapas de krigagem da velocidade em diferentes tipos de aviários (a). Contornos de velocidade e vetores velocidade na altura das aves (b). Fonte: Carvalho-Curi <i>et al.</i> , 2014.	30
Figura 11 – Malha numérica (a). Variação da temperatura dos frangos e velocidade no domínio (b). Fonte: Rocha <i>et al.</i> , 2014.	30
Figura 12 – Representação esquemática do aviário estudado por Blanes-Vidal <i>et al.</i> (2008).	33
Figura 13 – Representação esquemática do aviário da cidade de Montenegro.	33
Figura 14 – Procedimento simplificado para análise DFC usando o Ansys CFX.	38
Figura 15 – Definição do volume de controle. Fonte: Ansys® CFX, 2012.	39
Figura 16 – Elemento de malha. Fonte: Ansys® CFX, 2012.	40
Figura 17 – Domínio computacional de Blanes-Vidal <i>et al.</i> (2008) e condições de contorno.	51
Figura 18 – Variação da inclinação do telhado no problema de Blanes-Vidal <i>et al.</i> (2008).	52
Figura 19 – Domínio computacional do aviário de Montenegro e condições de contorno (a). Dimensões das entradas (b). Posição dos exaustores (c).	53
Figura 20 – Temperaturas média mínima e máxima ao longo do ano para a cidade de Montenegro. Fonte: < www.tempoagora.com.br >, acesso em 27 fev. 2014.	54
Figura 21 – Galpão de frangos de corte em Maringá (PR). Fonte: Bianchi, 2013.	56

Figura 22 – Variação da inclinação do teto para o aviário da cidade de Montenegro (RS): original sem defletor (a), original com defletor (b), com inclinação de 6° (c) e com forro (d).	56
Figura 23 – Tipos mais comuns de sistemas de ventilação em aviários. Fonte: Abreu e Abreu, 2000.	58
Figura 24 – Curvas de ajuste da perda de carga dos ventiladores axiais Munters®.	59
Figura 25 – Elementos com $Quality \leq 0,2$ para malhas grosseiras dos modelos turbulentos: RNG k- ϵ (a) e k- ω (b).	61
Figura 26 – Qualidade das malhas para o caso do modelo turbulento k- ϵ padrão: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).	62
Figura 27 – Qualidade das malhas para do modelo turbulento RNG k- ϵ : malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).	63
Figura 28 – Qualidade das malhas para o caso do modelo turbulento k- ω : malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).	64
Figura 29 – Campos de y^+ dos modelos turbulentos: k- ϵ (a), RNG k- ϵ (a) e k- ω (b).	65
Figura 30 – Comparativo dos modelos turbulentos para validação nas posições: $y=0,2m$ (a), $y=0,6m$ (b) e $y=2,0m$ (c).	68
Figura 31 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para o modelo turbulento k- ϵ padrão nas posições: $y=0,2m$ (a), $y=0,6m$ (b) e $y=2,0m$ (c).	69
Figura 32 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para o modelo turbulento RNG k- ϵ nas posições: $y=0,2m$ (a), $y=0,6m$ (b) e $y=2,0m$ (c).	70
Figura 33 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para o modelo turbulento k- ω nas posições: $y=0,2m$ (a), $y=0,6m$ (b) e $y=2,0m$ (c).	71
Figura 34 – Linhas de corrente nos planos dos pontos analisados para os modelos turbulentos: k- ϵ padrão (a), RNG k- ϵ (b) e k- ω (c).	73
Figura 35 – Parâmetro turbulento nos planos dos pontos analisados usando os modelos turbulentos: k- ϵ padrão (a), RNG k- ϵ (b) e k- ω (c).	74
Figura 36 – Qualidade das malhas para o caso com inclinação 6°: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).	77
Figura 37 – Qualidade das malhas para o caso com inclinação 24°: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).	78
Figura 38 – Concentração dos elementos com $0,3 \leq Quality < 0,4$, para a malha grosseira com 12° de inclinação.	79
Figura 39 – Campos de y^+ para os casos: (a) 12°, (b) 6° e (c) 24°.	80

Figura 40 – Comparativo das inclinações do teto nas alturas $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).....	82
Figura 41 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para inclinação de 6° nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).....	83
Figura 42 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para inclinação de 24° nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).....	84
Figura 43 – Linhas de corrente nos planos dos pontos analisados para os casos: inclinação 6° (a), inclinação 12° (b) e inclinação 24° (c).....	85
Figura 44 – Parâmetro turbulento nos planos dos pontos analisados para os casos: inclinação 6° (a), inclinação 12° (b) e inclinação 24° (c).....	86
Figura 45 – Concentração dos elementos com $Quality \leq 0,2$, para as malhas grosseiras.	89
Figura 46 – Campos de y^+ para os casos: inclinação de 24° (a), defletor (b), inclinação de 6° (c) e forro (d).	90
Figura 47 – Linhas de coletas de dados.....	91
Figura 48 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com inclinação de 24°	92
Figura 49 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com defletores.	92
Figura 50 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com inclinação de 6°	93
Figura 51 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com forro.....	93
Figura 52 – Comparativo dos perfis de velocidade.....	94
Figura 53 – Comparativo dos perfis de temperatura.....	95
Figura 54 – Linhas de corrente para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).....	97
Figura 55 – Campos vetoriais de velocidade para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).....	98
Figura 56 – Isotermas para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).....	100
Figura 57 – Campos de turbulência para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).....	102
Figura 58 – Isobáricas para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).....	103
Figura 59 – Concentração dos elementos com $Quality < 0,3$, para as malhas grosseiras.....	105
Figura 60 – Campos de y^+ para os casos dos exaustores: EM36 (a), EM30 (b) e ED24 (c)..	106

Figura 61 – Linhas de coletas de dados.....	107
Figura 62 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com exaustor EM36.	108
Figura 63 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com exaustor EM30.	108
Figura 64 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com exaustor ED24.	109
Figura 65 – Comparativo dos perfis de velocidade.....	110
Figura 66 – Comparativo dos perfis de temperatura.....	111
Figura 67 – Linhas de corrente para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).....	113
Figura 68 – Campos vetoriais de velocidade para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).....	114
Figura 69 – Isotermas para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).....	116
Figura 70 – Campos de turbulência para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).....	117
Figura 71 – Isobáricas para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).....	118
Figura 72 – Elemento tetraédrico (a) e hexaédrico (b). Fonte: Ansys® CFX, 2012.....	127
Figura 73 – Razão de aspecto para elementos do tipo Tri (a) e Tetra (b). Fonte: adaptado de Ansys® CFX, 2012.....	128
Figura 74 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL <i>et al.</i> (2008), modelo k- ϵ padrão.....	130
Figura 75 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL <i>et al.</i> (2008), modelo RNG k- ϵ	131
Figura 76 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL <i>et al.</i> (2008), modelo k- ω	132
Figura 77 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL <i>et al.</i> (2008), inclinação de 6°.....	133
Figura 78 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL <i>et al.</i> (2008), inclinação de 24°.....	134
Figura 79 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, inclinação de 24°.....	135
Figura 80 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, defletores.....	136

Figura 81 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, inclinação de 6°.....	137
Figura 82 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, forro.....	138
Figura 83 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, exaustor EM36.....	139
Figura 84 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, exaustor EM30.....	140
Figura 85 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, forro exaustor ED24.	141
Figura 86 – Método de interpolação Upwind. Fonte: adaptado de Versteeg e Malalasekera, 2007.....	142
Figura 87 – Método de interpolação Blend Factor. Fonte: adaptado de Versteeg e Malalasekera, 2007.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores da função parede recomendados para os modelos de turbulência. Fonte: Ansys® CFX, 2012.	37
Tabela 2 – Exemplos de modelos turbulentos para RANS. Fonte: Versteeg e Malalasekera, 2007.	46
Tabela 3 – Vazão e diâmetros dos exaustores Munters® para aviários. Fonte: < www.munters.com.br >, acesso 16 fev. 2015.....	58
Tabela 4 – Características numéricas do problema.	60
Tabela 5 – Erro absoluto para (ms^{-1}) para os modelos turbulentos em $y=0,2\text{m}$	66
Tabela 6 – Erro absoluto para (ms^{-1}) para os modelos turbulentos em $y=0,6\text{m}$	67
Tabela 7 – Erro absoluto para (ms^{-1}) para os modelos turbulentos em $y=2,0\text{m}$	67
Tabela 8 – Cálculo do funcional S (m^2s^{-2}) para os modelos turbulentos.....	67
Tabela 9 – Características numéricas do problema.	76
Tabela 10 – Características numéricas do problema.	89
Tabela 11 – Velocidade média nas entradas e saídas.....	99
Tabela 12 – Temperatura média na saída e variação da temperatura no domínio.....	101
Tabela 13 – Perda de carga e vazão.....	103
Tabela 14 – Características numéricas do problema.	104
Tabela 15 – Velocidade média nas entradas e saídas.....	112
Tabela 16 – Temperatura média na saída e variação da temperatura no domínio.....	115
Tabela 17 – Perda de carga e vazão.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Conversão Alimentar
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DEFRA	<i>Department for Environment, Food and Rural Affairs</i>
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
MVFbEF	Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos Finitos
OECD	<i>Organisation for Economics Co-operation and Development</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SC	Superfície de Controle
SST	<i>Shear-Stress Transport</i>
TCI	Temperatura Crítica Inferior
TCS	Temperatura Crítica Superior
UBABEF	União Brasileira de Avicultura
UDS	<i>Upwind Difference Scheme</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
VC	Volume de Controle
ZCT	Zona de Conforto Térmico

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[m ²]
D	Diâmetro	[m]
F_i	Força de campo na direção i	[N]
H	Altura	[m]
k	Energia cinética turbulenta	[m ² s ⁻²]
l	Comprimento característico	[m]
l_{max}	Comprimento da maior aresta do elemento	[m]
L	Comprimento	[m]
m_f	Massa	[kg]
N_i	Função de forma no nó i	[-]
P	Pressão termodinâmica	[Pa]
P_r	Pressão relativa	[Pa]
r_c	Raio da esfera circunscrita	[m]
RA	Razão de aspecto	[-]
q_f	Carga térmica total de um frango	[W]
\dot{q}_i	Taxa de geração de calor por unidade de volume	[W m ⁻³]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ s ⁻¹]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura termodinâmica	[K]
u	Velocidade na direção x	[m s ⁻¹]
U_i	Velocidade na direção i	[m s ⁻¹]
U_j	Velocidade na direção j	[m s ⁻¹]
u^+	Grupo adimensional escala de velocidade	[-]
u_τ	Velocidade de atrito	[m s ⁻¹]
v	Velocidade na direção y	[m s ⁻¹]
\forall	Volume	[m ³]
V	Velocidade normal a superfície ou módulo do vetor velocidade	[m s ⁻¹]
V_0	Velocidade na entrada do domínio	[m s ⁻¹]
w	Velocidade na direção z	[m s ⁻¹]
W	Largura	[m]
y	Distância do primeiro nó a parede	[m]

y^+	Grupo adimensional de escala de comprimento	[-]
z, y, x	Coordenadas espaciais cartesianas	[m]

Letras Gregas

α	Ângulo de inclinação	[rad]
δ_{ij}	Delta de Kronecker	[-]
ΔP	Perda de carga	[Pa]
ΔT_0	Diferença de temperatura entre a entrada e saída do domínio	[°C]
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	[m ² s ⁻³]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa s]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² s ⁻¹]
ρ	Massa específica	[kg m ⁻³]
σ_ρ	Número turbulência de Schimdt	[-]
τ_p	Tensão cisalhante na parede	[Pa]
Φ	Propriedade qualquer	[]
$\bar{\Phi}$	Média da propriedade qualquer	[]
Φ'	Flutuação da propriedade qualquer	[]
ω	Frequência turbulenta	[Hz]

Subíndices

0	Entrada
i, j	Coordenadas genéricas indicando a posição na malha
ip	Ponto de integração
max	Valor máximo
min	Valor mínimo
t	Turbulento
up	<i>Upwind</i> (a montante)
VC	Volume de controle
SC	Superfície de controle

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	17
1.1 INTRODUÇÃO.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	20
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DO MANUSCRITO	20
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 INTRODUÇÃO.....	22
2.2 DFC APLICADA EM AVIÁRIOS.....	22
CAPÍTULO 3. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	32
3.1 INTRODUÇÃO.....	32
3.2 DOMÍNIO COMPUTACIONAL.....	32
3.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES	34
3.4 FUNÇÃO PAREDE.....	35
3.5 DFC E O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS.....	37
3.6 TURBULÊNCIA.....	44
3.6.1 Modelo k-ϵ padrão.....	47
3.6.2 Modelo RNG k-ϵ.....	48
3.6.3 Modelo k-ω.....	49
3.7 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	50
3.7.1 Aviário de Blanes-Vidal <i>et al.</i> (2008)	50
3.7.1.1 Variação da inclinação do telhado.....	52
3.7.2 Aviário de Montenegro	52
3.7.2.1 Inclinação do teto e defletores.....	55
3.7.2.2 Ventiladores.....	57
CAPÍTULO 4. VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA	60
4.1 INTRODUÇÃO.....	60
4.2 ESTUDO DE MALHAS	60
4.3 PERFIS VELOCIDADE E LINHAS DE CORRENTE.....	66
4.4 CAMPOS DE TURBULÊNCIA.....	73

CAPÍTULO 5. VARIAÇÃO DO TETO NA VALIDAÇÃO	76
5.1 INTRODUÇÃO.....	76
5.2 ESTUDO DE MALHAS	76
5.3 PERFIS DE VELOCIDADE E LINHAS DE CORRENTE	81
5.4 CAMPOS DE TURBULÊNCIA.....	85
CAPÍTULO 6. ESTUDO DA APLICAÇÃO DE DEFLETORES EM AVIÁRIOS	88
6.1 INTRODUÇÃO.....	88
6.2 ESTUDO DE MALHAS	88
6.3 PERFIS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA.....	91
6.4 LINHAS DE CORRENTE E CAMPOS VETORIAIS DE VELOCIDADE.....	96
6.5 ISOTERMAS	99
6.6 CAMPOS DE TURBULÊNCIA.....	101
6.7 ISOBÁRICAS E PERDA DE CARGA	102
CAPÍTULO 7. ESTUDO DA APLICAÇÃO DE EXAUSTORES EM AVIÁRIOS ...	104
7.1 INTRODUÇÃO.....	104
7.2 ESTUDO DE MALHAS	104
7.3 PERFIS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA.....	107
7.4 LINHAS DE CORRENTE E CAMPOS VETORIAIS DE VELOCIDADE.....	112
7.5 ISOTERMAS	115
7.6 CAMPOS DE TURBULÊNCIA.....	117
7.7 ISOBÁRICAS E PERDA DE CARGA	118
CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS	122
GLOSSÁRIO	126
APÊNDICE A – MALHAS.....	127
APÊNDICE B – ANÁLISE NUMÉRICA	142
ANEXO A – AVIÁRIO DE MONTENEGRO (RS).....	145
ANEXO B – VENTILADORES/EXAUSTORES MUNTERS®.....	149

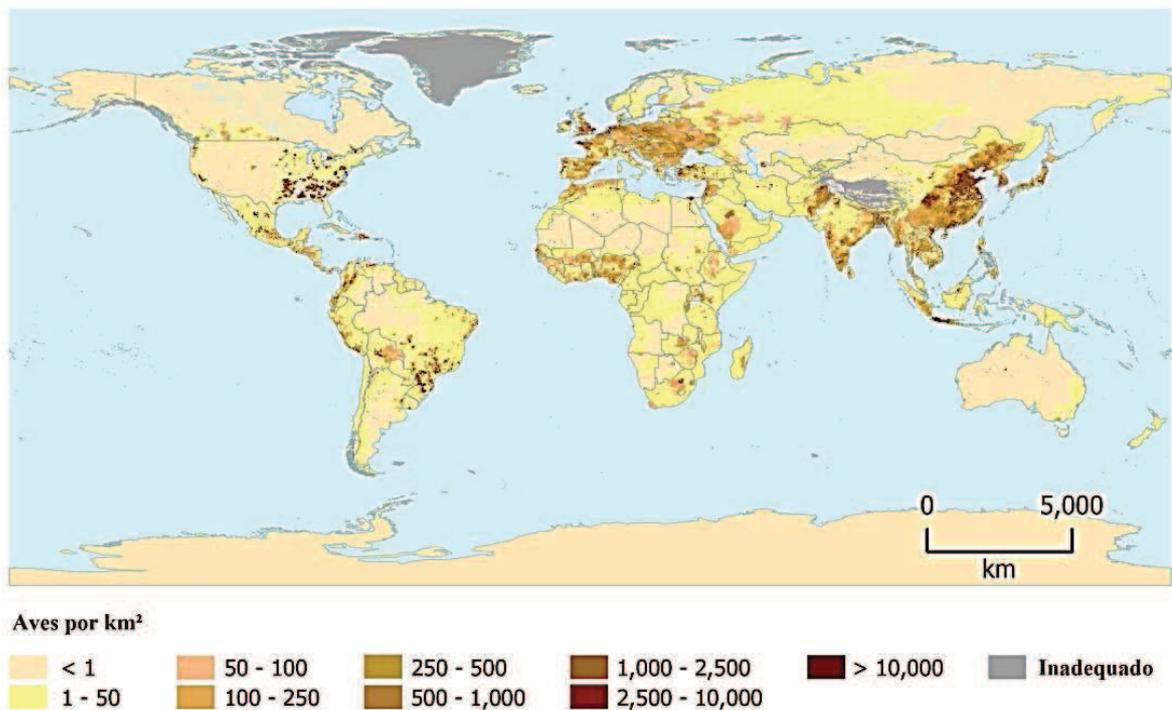
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O relatório *Agricultural Outlook 2014-2023* (2014) elaborado pela OECD (*Organisation for Economics Co-operation and Development*) em colaboração com a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) mostra que a carne de frango será, possivelmente, a principal fonte mundial de proteína animal nos próximos cinco anos por se tratar da mais barata e acessível carne no mundo. Além disso, a produção de carne de frango é, em relação a outras carnes, menos nociva ao meio ambiente uma vez que as emissões de gases estufas são menores (HAMERSCHLAG, 2011) assim como o consumo de água (GERBENS-LEENES *et al.*, 2013).

Há no mundo aproximadamente 19,6 bilhões de frangos cuja distribuição mundial segue as densidades populacionais (ROBINSON *et al.*, 2014), como é apresentado Figura 1. Observe que as principais concentrações encontram-se nos EUA, China e Brasil que são os maiores produtores mundiais.

Figura 1 – Mapa com distribuição de frangos no mundo. Fonte: Robinson *et al.*, 2014.

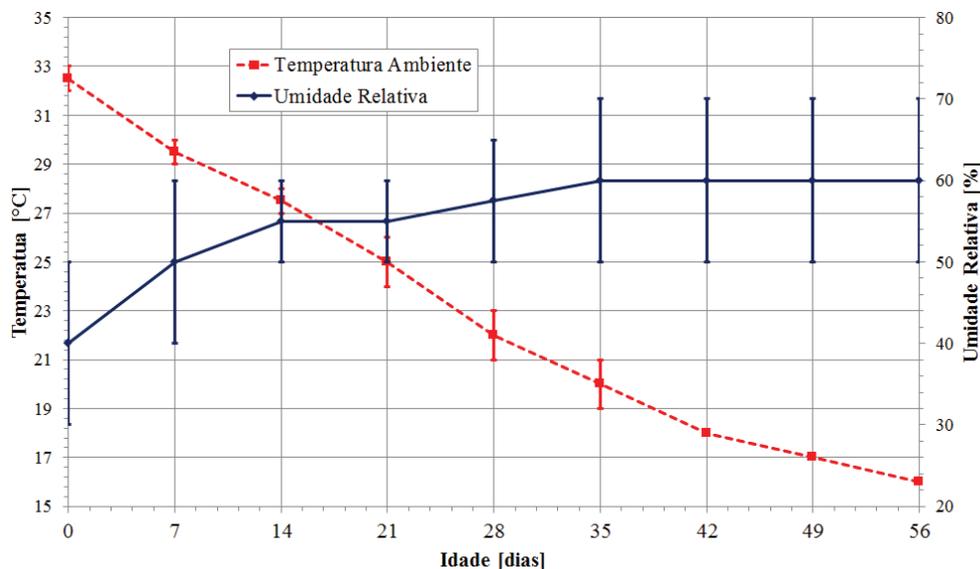


Segundo o Relatório Anual da UBABEF (2014), União Brasileira de Avicultura, a produção de carne de frango no Brasil chegou a 12,3 milhões de toneladas em 2013, mantendo praticamente o mesmo nível que 2012. O Brasil manteve a posição de maior exportador mundial e de terceiro maior produtor de carne de frango, atrás dos Estados Unidos e China. Do volume total de frangos produzidos pelo país, 68% foi destinado ao consumo interno e o restante para exportações. Em 2013, o consumo per capita de frango no Brasil ficou em 41,8 kg/ano registrando uma queda de 7% em relação a 2012. Mais de 60% dos frangos são abatidos nos estados da região sul do Brasil, sendo que cerca da metade desse volume pertence ao Paraná.

Centros de pesquisas, como o *Worldwatch Institute* e o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), vêm publicando relatórios sobre mudanças climáticas e a maior parte da comunidade científica está convencida deste fenômeno e de que ele será intensificado nas próximas décadas. Um dos desafios da produção animal em alojamentos é adaptar, ao clima local, o ambiente em que os animais estão inseridos, buscando o bem-estar e a máxima produtividade (TINÔCO, 2001).

Para um desempenho animal ótimo as aves devem ser mantidas na ZCT (Zona de Conforto Térmico), uma vez que abaixo da TCI (Temperatura Crítica Inferior) a ave pode morrer por hipotermia e acima da TCS (Temperatura Crítica Superior) por hipertermia (VIGODERIS, 2007). A Figura 2 mostra faixas de temperatura ambiente e umidade relativa para a ZCT das aves segundo a Coob (2009).

Figura 2 – Temperatura ambiente e umidade relativa recomendadas para aves de corte. Fonte: Coob, 2009.



A Figura 2 mostra que frangos são sensíveis a variação da temperatura durante todo o ciclo de vida. Em relação a temperatura, uma variação de 1°C poderá prejudicar a produção. Em relação a umidade relativa, as variações podem chegar até 10%. Outro ponto relevante é observar que pintinhos necessitam de altas temperaturas ($T > 29^{\circ}\text{C}$) e baixa umidade relativa ($UR > 30\%$). Essa situação fica invertida para frangos próximo a idade do abate os quais precisam de temperaturas menores ($T < 17^{\circ}\text{C}$) e maior umidade relativa ($UR > 50\%$). Por isso, é delicado o condicionamento de ar em aviários industriais.

No verão, normalmente, as aves são expostas a estresse calórico, ocorrendo queda no consumo de ração, levando a valores baixos de CA (Conversão Alimentar) e maior mortalidade (VIGODERIS, 2007). Nesse caso, uma ventilação adequada (ventilação máxima), artificial e/ou natural, reduz o estresse e aumenta a produtividade. No inverno, quando a temperatura pode ficar próxima da TCI, usam-se aquecedores e um sistema de ventilação (mínima) para renovação do ar.

Para auxiliar esse panorama da indústria avícola, a engenharia é aplicada no condicionamento de ambientes em aviários industriais a fim de proporcionar o bem-estar animal. Para manter frangos de corte na ZCT é preciso considerar alguns fatores técnicos, tais como: a carga térmica, a vazão, a umidade relativa e as impurezas do ar. Sistemas de condicionamento de ar bem projetados permitem garantir o bem-estar animal aproveitando recursos naturais a fim de reduzir o consumo de energia elétrica e aumentar a produção.

De modo geral, há três métodos para resolver um escoamento de fluido (VEERSTEG e MALALASEKERA, 2007): analítico, numérico e experimental. Métodos analíticos são limitados já que muitos problemas ainda não apresentam solução analítica, como o caso do escoamento em aviários industriais, e, portanto, é preciso recorrer aos outros dois métodos. Existe sempre um erro associado aos métodos numéricos, porém é notável a tendência e o esforço de pesquisadores na tentativa de validar ambientes avícolas. A precisão dos resultados nos métodos empíricos depende da incerteza de medição dos instrumentos utilizados.

Métodos numéricos e experimentais são complementares para fins comparativos e tomadas de decisão. Assim, apesar de a proposta deste trabalho ser exclusivamente numérica, foi preciso estudar um problema da literatura para fazer a validação e depois a verificação de outro problema, conforme será visto no decorrer do texto.

1.2 JUSTIFICATIVA

O êxito da cadeia de produção de frangos de corte depende, inclusive, da redução das perdas na produção. Fator que pode ser atenuado quando se controla parâmetros de conforto térmico das aves e técnicas da DFC (Dinâmica dos Fluidos Computacional) são úteis para estudar o escoamento de ar e a transferência de calor em grandes instalações avícolas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Simulação do escoamento em um aviário existente na literatura (BLANES-VIDAL *et al.*, 2008) e verificação numérica em um aviário brasileiro localizado em Montenegro (Rio Grande do Sul), resolvendo o escoamento turbulento e não-isotérmico, utilizando o programa Ansys® CFX versão 14.5.

1.3.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos estão:

- i. investigar a aplicação de diferentes modelos turbulentos em aviários;
- ii. investigar diferentes inclinações no teto de aviários;
- iii. investigar o uso de defletores no teto de aviários;
- iv. investigar diferentes configurações de exaustores aplicados em aviários.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO MANUSCRITO

Este trabalho está dividido em oito capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada uma breve introdução sobre alguns pontos chave da indústria avícola assim como a justificativa e os objetivos desta pesquisa. O estado da arte será apresentado no Capítulo 2. Os fundamentos matemáticos do problema serão apresentados no Capítulo 3, abordando os seguintes itens: equações governantes do escoamento de fluidos, método dos volumes finitos baseado em elementos finitos, modelagem da turbulência, domínio computacional a ser estudado e condições de contorno.

Resultados encontram-se nos Capítulos 4 a 7 que se dividem em quatro estudos realizados. Primeiro (Capítulo 4) foi feito um comparativo entre modelos turbulentos para o

aviário comercial proposto por BLANES-VIDAL *et al.* (2008). Usando esse aviário foram feitas mais duas inclinações para o teto, comparando as diferenças entre elas (Capítulo 5). Depois, foi estudado um aviário industrial nacional localizado na cidade de Montenegro. Neste aviário foram realizadas duas modificações: variação da inclinação no teto (Capítulo 6) e teste de quatro tipos de ventiladores disponíveis no mercado (Capítulo 7). Todas as simulações e malhas foram feitas utilizando o pacote computacional Ansys® CFX versão 14.5. Em todos os estudos foram avaliadas as malhas e as soluções estão na forma de perfis e campos de velocidade e temperatura que formam o corpo principal das discussões.

Conclusões são expostas no Capítulo 8, bem como as possíveis etapas futuras para continuidade deste trabalho.

Nos Apêndices A e B encontram-se, respectivamente, as malhas numéricas utilizadas para resolver os problemas e fatores importantes necessários para uma análise numérica do problema.

Nos Anexos A e B estão, respectivamente, a planta do aviário localizado na cidade Montenegro e o catálogo de ventiladores Munters® para aviários.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

CAMPOS (2000) relata que o final da década de 1940 foi marcado pelo início da exploração de aves em completo confinamento, iniciando com gaiolas de poedeiras providas de comedouros e bebedouros. Em meados da década de 1950, os EUA iniciaram um programa cujo objetivo era estabelecer um número ideal da densidade da produção (aves/m²), conceito ainda empregado nas instalações. Preocupações ambientais em meados da década de 1970 trouxeram inquietações no meio avícola e mostraram que os estudos sobre os ambientes físicos eram insuficientes a nível mundial. Assim, pesquisadores da UNICAMP iniciaram estudos sobre condições de ambiente aplicadas à avicultura, mas somente no início da década de 1990 TINÔCO da UFV (Universidade Federal de Viçosa) trouxe uma colaboração eficiente e objetiva aos conceitos modernos de ambiência na indústria avícola.

O breve relato acima mostra que há aproximadamente 75 anos, iniciou-se o uso de edificações na indústria avícola e com isso observou-se a necessidade de aplicar conhecimentos sobre acondicionamento de ar para compensar as necessidades térmicas das aves. Não demorou muito para que pesquisadores enxergassem a potencial aplicação de DFC (Dinâmica dos Fluidos Computacional) em aviários e é especificamente neste ponto em que se baseia o estado da arte a seguir.

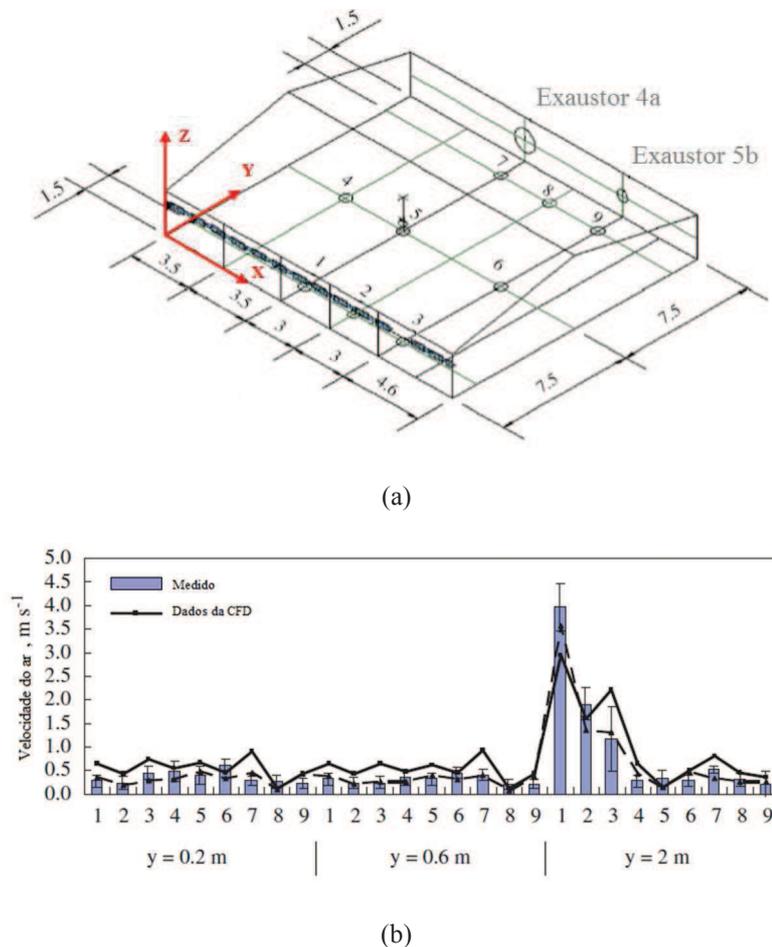
2.2 DFC APLICADA EM AVIÁRIOS

NÓRTON *et al.* (2007) fizeram uma revisão de estudos que aplicaram a DFC na indústria agrícola. Aqueles autores encontraram três trabalhos principais sobre DFC na avicultura, prévio ao deles que são: OUWEKERK *et al.* (1994), WORLEY e MANBECK (1995) e MISTRITIS *et al.* (1997). Os autores justificaram que a falta de pesquisas nessa área devia-se as limitações computacionais e/ou a falta de interesse em investigar esse tipo de escoamento. Eles mencionam outros trabalhos que não são específicos para DFC na avicultura, mas para outros alojamentos semelhantes a aviários, tais como: HARRAL e BOON (1997) que usaram o programa Phoenix[®] com malhas de até 84 mil elementos para modelar uma edificação rural britânica considerando problema isotérmico e usando o modelo turbulento k-ε padrão (o problema tinha um número de Reynolds na entrada de 50.000) a fim de validar a velocidade do ar medida em alguns pontos do ambiente; BJERG *et al.* (2000)

usaram o código CFX4® para estudar três arranjos em um ambiente de teste para suínos, simulando malhas de 210 mil elementos com o modelo turbulento k-ε padrão os autores observaram que resultados numéricos, no arranjo com divisórias e cilindros que modelam a presença dos suínos, previram velocidades menores que os testes experimentais por causa do modelo de turbulência escolhido.

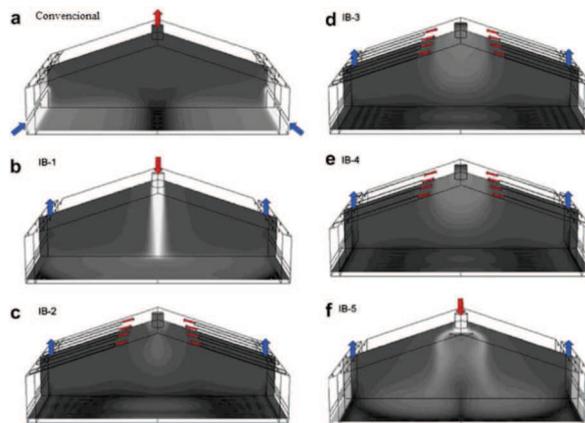
BLANES-VIDAL *et al.* (2008) estudaram um galpão de frangos de corte comercial em Valência (Espanha) validando resultados experimentais com simulação em DFC. A Figura 3a mostra a zona de teste selecionada na qual os autores escolheram nove posições e fizeram medições em três pontos de cada posição (alturas de 0,2, 0,6 e 2,0 m em relação ao solo). Uma validação dos resultados deles é apresentada na Figura 3b. Para simulação os autores usaram o programa Fluent® 6.0 com malhas de 217 mil nós e modelo de turbulência k-ε padrão. Outra pesquisa, BLANES-VIDAL *et al.* (2007), apresenta mais detalhes sobre a análise experimental dos autores.

Figura 3 – Zona de teste (a), com dimensões em metros. Validação dos resultados (b). Fonte: Blanes-Vidal *et al.*, 2008.

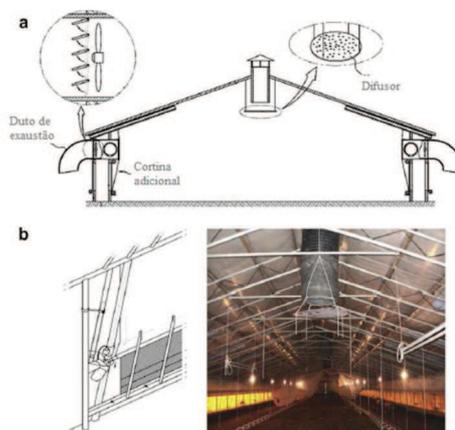


SEO *et al.* (2009) analisaram quantitativamente e qualitativamente a ventilação natural em um galpão de frango de corte durante o inverno na Coreia do Sul, onde temperaturas mínimas podem atingir -20°C . As configurações estudadas para o galpão podem ser vistas na Figura 4a na qual a configuração convencional (a) ar entra pelas laterais e sai pela chaminé, nos modelos designados por IB-1 (b) e IB-5 (f) ar entra pela chaminé enquanto nos modelos IB-2 (c), IB-3 (d) e IB-4 (e) o ar entra por canos no teto. Os autores assumiram que cada galpão foi ventilado com pressão negativa usando exaustores e com mesma vazão, com taxa de renovação de ar de 10% a cada minuto. Eles observaram um resultado ótimo na simulação com um difusor abaixo da entrada da chaminé do aviário (IB-5) que mistura ar quente com ar frio (Figura 4b). Os autores usaram o programa Fluent® 6.2 para simular as malhas com 800 mil elementos usando o modelo turbulento RNG k- ϵ .

Figura 4 – Distribuição da temperatura (a) na qual a cor preta corresponde a 30°C e a branca a -1°C . Melhorias na configuração IB-5 (b). Fonte: Seo *et al.*, 2009.



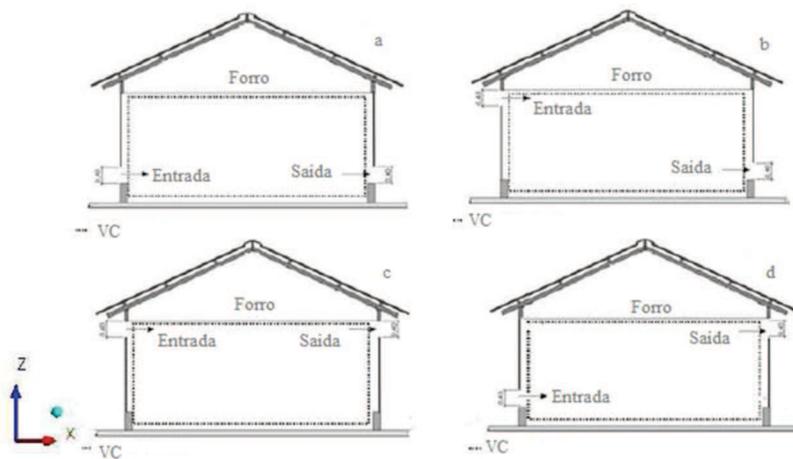
(a)



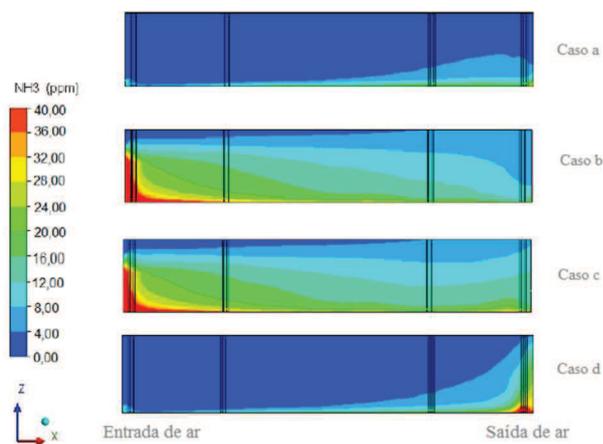
(b)

SARAZ (2010) investigou a concentração de amônia, distribuição da temperatura e velocidade do ar em um aviário brasileiro localizado em Viçosa (MG) validando resultados empíricos com ferramentas da DFC por meio do programa Ansys® CFX usando malhas com aproximadamente 700 mil elementos e o modelo turbulento k- ϵ padrão. Em um dos casos o autor estudou diferentes posições da abertura do aviário (Figura 5a), tendo como um dos resultados a concentração de amônia (Figura 5b). Nesta situação, ele concluiu que quando a temperatura externa está entre 10 e 15 °C o caso b é o melhor para manter o conforto térmico das aves, enquanto que acima de 15°C os casos a e d são os mais adequados. Apesar de o estudo ser sobre o escoamento no interior de aviários, ao menos na configuração do escoamento, assemelha-se aos trabalhos de NIELSEN (1974), NIELSEN (1990) e HOOF *et al.* (2012), exceto pela modelagem de pilares de sustentação no interior do domínio.

Figura 5 – Casos estudados (a). Concentração de amônia no plano XZ (b). Fonte: Saraz, 2010.



(a)

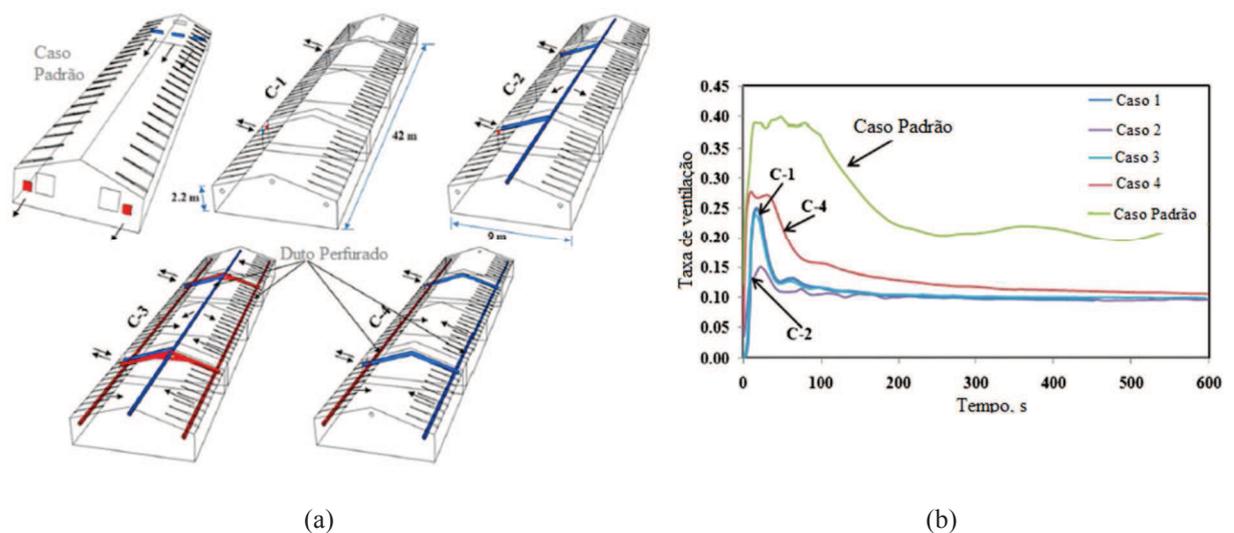


(b)

SARAZ *et al.* (2012) elaboraram um estado da arte da aplicação da DFC em instalações avícolas e suas limitações. Os autores constataram que ainda é baixo o número de pesquisas com DFC em galpões de frangos de corte e que a maioria dos estudos usa o modelo turbulento k- ϵ ou RNG k- ϵ . Verificaram que malhas hexaédricas tridimensionais são mais adequadas para modelar aviários, no entanto, a maior parte dos estudos usa um mesmo tipo de malha em todo o domínio, normalmente com elementos tetraédricos e/ou hexaédricos.

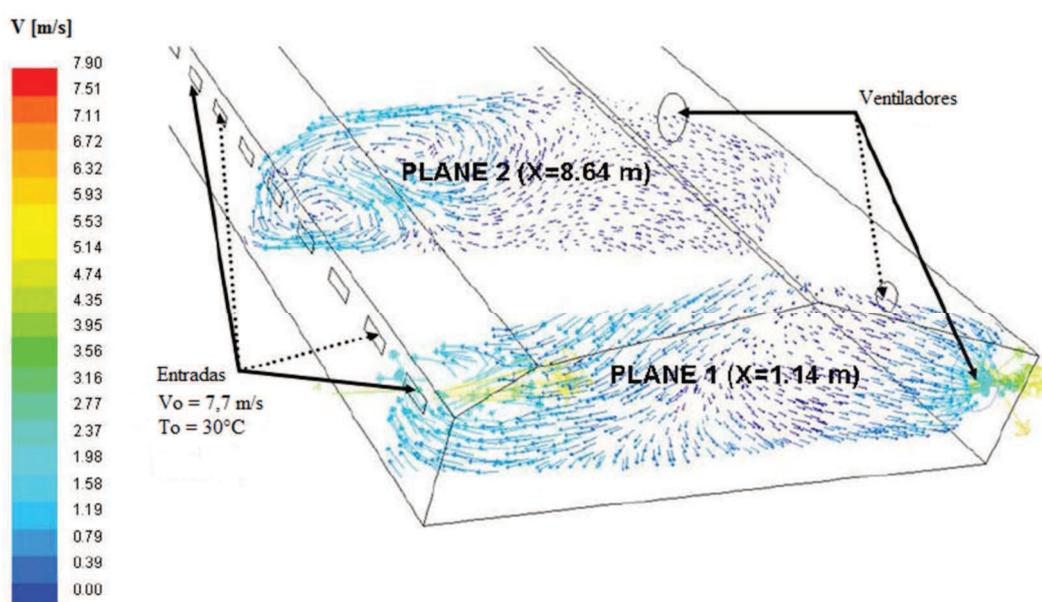
MOSTAFA *et al.* (2012) investigaram o conforto térmico de frangos de corte usando a DFC para desenvolver quatro sistemas de ventilação (Figura 6a) e prever correntes de ar frias durante o inverno. Os autores usaram o programa Fluent® 6.2 considerando o modelo de turbulência RNG k- ϵ e malhas com aproximadamente 3 milhões de elementos. Os casos C-2, C-3 e C-4 usaram dutos perfurados para a entrada de ar no aviário, mas somente os casos C-3 e C-4 usaram dutos perfurados para a saída de ar. Nos casos C-2 e C-3 os dutos de entrada de ar estão localizados no meio do aviário, mas no caso C-4 o duto de entrada ficou próximo da parede lateral. O caso C-2 operou sem um duto de saída de ar. As entradas e saídas do caso C-1 foram diretamente conectadas com um trocador de calor sem usar dutos. Pequenos ventiladores foram instalados no sistema de ventilação. Os autores mostraram resultados da distribuição de temperatura, velocidade (Figura 6b) e concentração de amônia usando ventilador ligado e desligado. Naturalmente, a temperatura do ar e concentração de amônia aumentaram quando os ventiladores estavam desligados.

Figura 6 – Casos estudados (a). Taxa de ventilação na zona dos frangos (b). Fonte: Mostafa *et al.*, 2012.



BUSTAMANTE *et al.* (2013) analisaram, numericamente e experimentalmente, o escoamento em um aviário em Villarreal (Espanha) semelhante aquele de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), conforme pode ser visto na Figura 7. Os autores fizeram experimento validando-o com técnicas de DFC (usando Fluent® 6.0 com modelo turbulento k- ϵ padrão), apresentando campos vetoriais de velocidade e mostrando que o erro relativo, comparando resultados numéricos e experimentais, da velocidade média em todo o domínio não ultrapassou 7%. Assim, eles concluíram que ferramentas DFC são válidas para estudar aviários em operação.

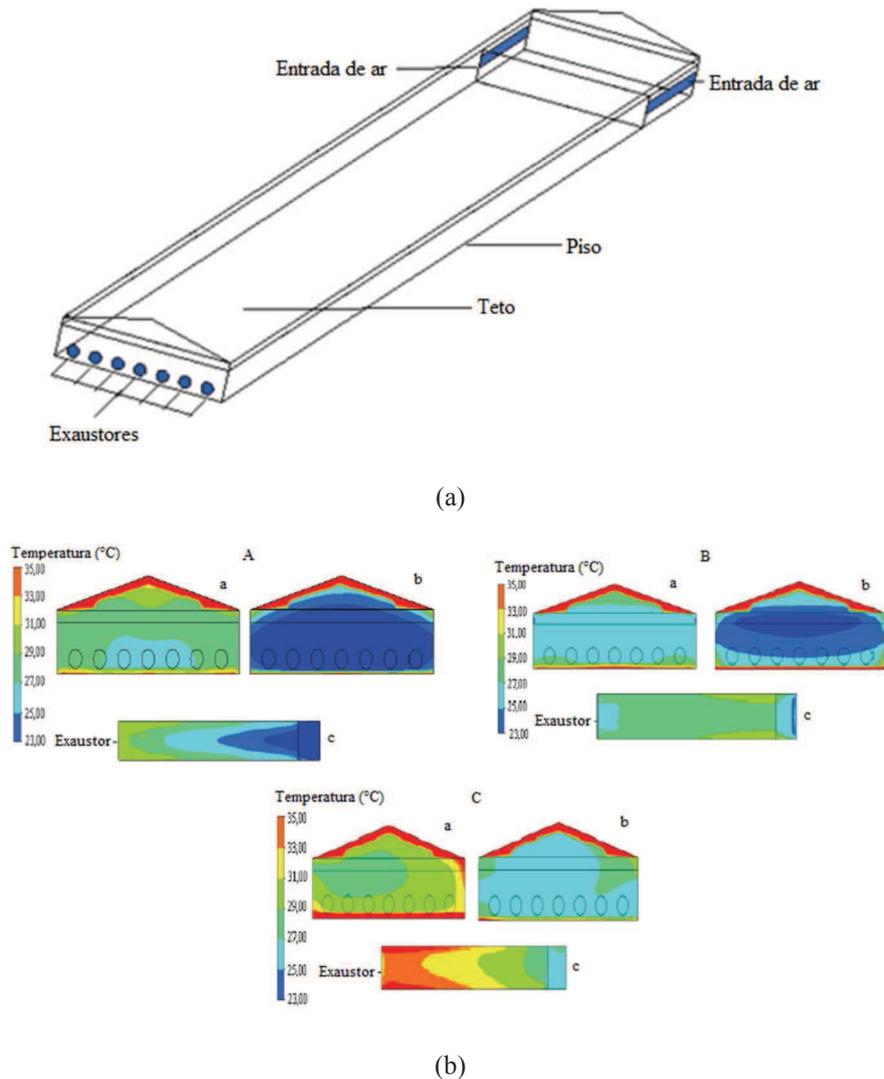
Figura 7 – Planos com vetores de velocidade. Fonte: Bustamante *et al.*, 2013.



SARAZ *et al.* (2013) estudaram o escoamento interno em um galpão de frangos de corte localizado em Rio Verde (GO) submetido à ventilação do tipo túnel (Figura 8a) com pressões negativa e positiva. Os autores fizeram simulações usando o programa Ansys® CFX com malhas hexagonais e modelo turbulento k- ϵ padrão. Eles verificaram a malha por meio do refinamento, comparando malhas com aproximadamente 1,5, 1,8 e 2,0 milhões de elementos. A Figura 8b apresenta o resultado desta pesquisa para três casos: A (pressão negativa com nebulização de vapor d'água), B (pressão positiva com nebulização de vapor d'água) e C (pressão negativa sem nebulização). Ainda na Figura 8b os planos de análise propostos são: a (plano central), b (plano das entradas laterais) e c (plano no nível das aves; distância de 0,3 m do piso). Nota-se que as temperaturas maiores encontram-se no caso C que

não usa nebulização, assim tem-se que, nas condições daquele trabalho, é preciso usar nebulização independente do sistema de ventilação.

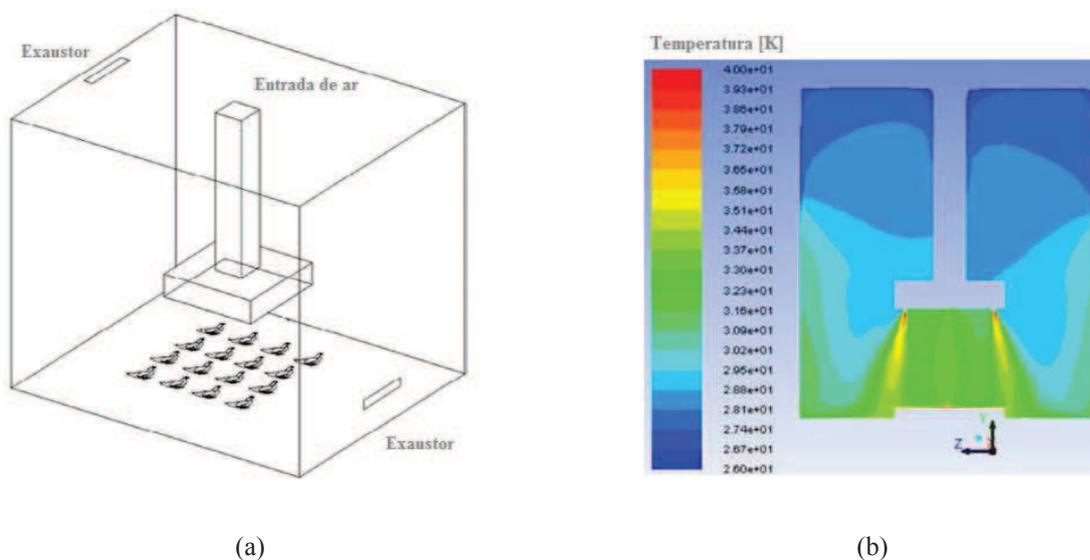
Figura 8 – Aviário de 12,8x126x3m (a). Distribuição de temperaturas (b). Fonte: Saraz *et al.*, 2013.



FAWAZ *et al.* (2014) estudaram o desempenho energético de um sistema localizado para auxiliar o aquecimento e ventilação em poedeiras, conforme pode ser visto na Figura 9a. Para os resultados numéricos os autores utilizaram o programa Ansys® CFX v.14.0 com malhas de cerca de 1,2 milhões de elementos empregando o modelo turbulento k- ϵ padrão. Um dos resultados daqueles autores é apresentado na Figura 9b na qual os contornos de temperatura no plano simétrico mostram que as maiores temperaturas encontram-se na região próxima das galinhas e decresce na medida em que se aproxima do teto. Outras configurações foram estudadas e os autores afirmaram que o sistema de aquecimento e ventilação projetado

pode economizar até 74% da energia elétrica necessária, no entanto o sistema é capaz de fornecer até 84% da energia necessária para o condicionamento do ambiente e o retorno do investimento é maior que 4 anos.

Figura 9 – Esquema do sistema de ventilação lateral e localizado na poedeira (a). Contornos de temperatura no plano vertical simétrico (b). Fonte: Fawaz *et al.*, 2014.



CARVALHO-CURI *et al.* (2014) mostraram um apanhado de alguns trabalhos em que eles usam geoestatística, termografia e DFC no estudo de aviários. Na Figura 10 pode-se observar a distribuição de velocidade do ar na altura dos frangos usando métodos empíricos (Figura 10a) e DFC (Figura 10b), considerando ventilação (máxima) de verão, apresentando distribuição desuniforme do ar e zonas sem nenhuma ventilação (zonas mortas). Isto causa um impacto na CA e consumo de água das aves, assim os autores reforçam que é necessário usar conceitos sobre ventilação de precisão para projetos de aviários.

ROCHA *et al.* (2014) usaram o programa Ansys® CFX para simular malhas de aproximadamente 2 milhões de elementos (Figura 11a) com modelo turbulento k-ε padrão. Para modelagem, os autores consideraram a produção de calor total dos animais assim como a taxa de emissão de amônia, baseados em dados experimentais. Os autores avaliaram que a distribuição de temperatura dos frangos (Figura 11b) manteve-se dentro da ZCT das aves, apesar de a temperatura aumentar na direção da saída de ar, isto é, aves próximas às entradas de ar têm temperaturas menores que aves próximas aos exaustores. Eles concluíram que o modelo é adequado para melhorar o aviário uma vez que dados experimentais e numéricos apresentam uma boa correlação.

Figura 10 – Mapas de krigagem da velocidade em diferentes tipos de aviários (a). Contornos de velocidade e vetores velocidade na altura das aves (b). Fonte: Carvalho-Curi *et al.*, 2014.

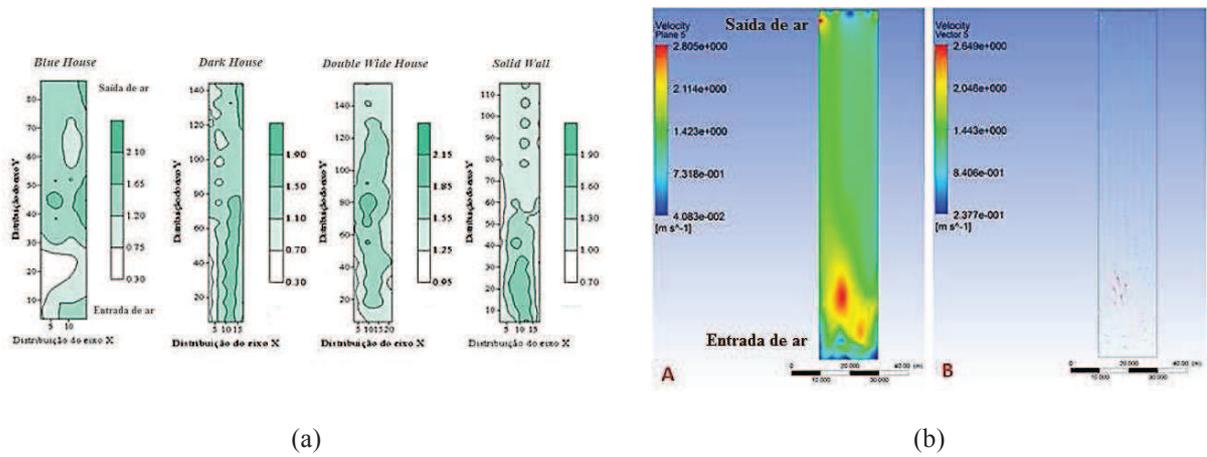
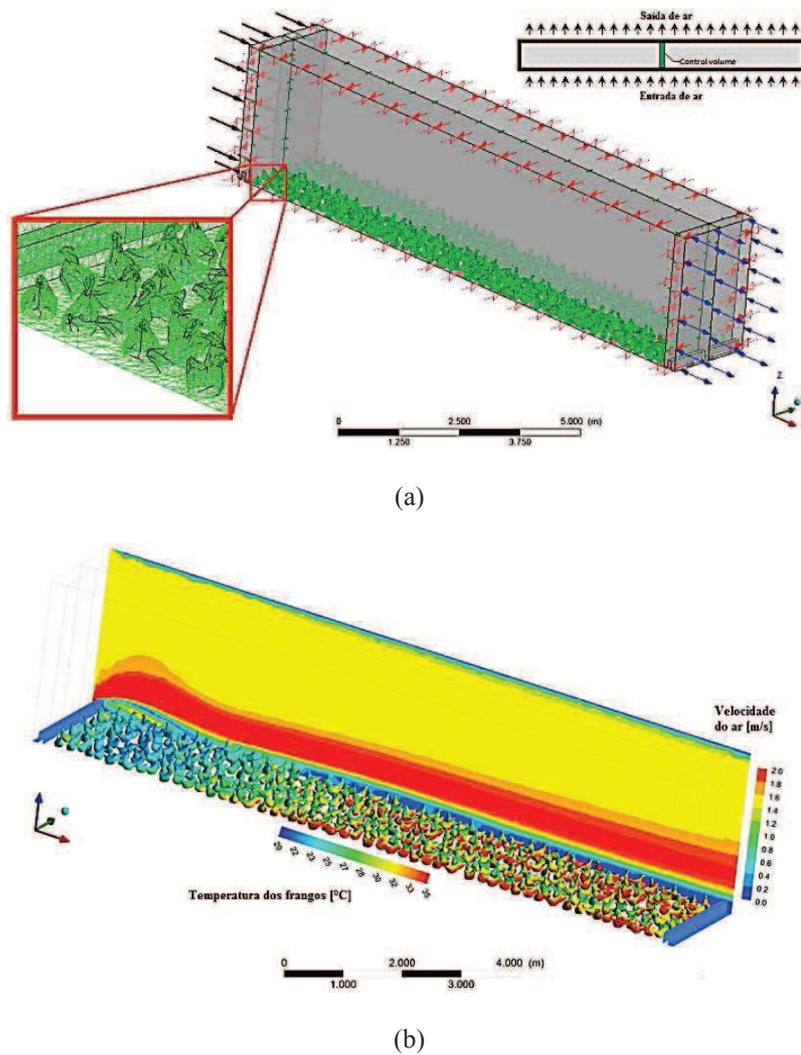


Figura 11 – Malha numérica (a). Variação da temperatura dos frangos e velocidade no domínio (b). Fonte: Rocha *et al.*, 2014.



Conforme foi visto ainda é incipiente o uso efetivo da DFC em aplicações na avicultura, principalmente no que tange o estudo do escoamento em galpões de frangos de corte cujos alojamentos são semelhantes a outras edificações rurais (como para suínos e ovinos), mas com necessidades térmicas e sanitárias diferentes.

Pesquisadores tentam fazer simulações complexas a fim de aproximar os modelos de aplicações reais em que vários fatores influenciam o escoamento do ar no interior dos aviários, tais como: a localização (clima e posição geográfica), acessórios para a produção (comedouros, bebedouros, lâmpadas e sistemas de aquecimento) e presença dos frangos devido à produção de calor (sensível e latente) e amônia (oriunda, principalmente, da cama). Além disso, deve-se considerar que galpões envolvem dimensões relativamente grandes o que dificulta a vedação total da construção.

Por outro lado, verifica-se uma carência de trabalhos que mostrem alguma precisão de engenharia no sentido de usar os métodos numéricos para validar um experimento, propor alguma alteração efetiva que melhore o sistema de ventilação, aplicá-la e fazer novamente uma verificação através de índices adicionais de conforto térmico em ambientes avícolas (NÃÃS, 1989, e BAÊTA e SOUZA, 1997).

CAPÍTULO 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 INTRODUÇÃO

O escopo deste capítulo é apresentar, superficialmente, o conjunto de equações diferenciais parciais usadas em alguns modelos turbulentos incorporados ao Ansys® CFX versão 14.5 e aplicados neste trabalho. Para isso, é preciso conhecer as equações governantes do escoamento, o Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos Finitos (MVFbEF) e apresentar noções sobre o fenômeno da turbulência em escoamentos de fluidos.

Neste capítulo serão apresentados os domínios computacionais usados nas simulações deste trabalho, as hipóteses simplificativas dos problemas e as respectivas condições de contorno.

3.2 DOMÍNIO COMPUTACIONAL

Para todos os casos estudados neste trabalho, as hipóteses simplificativas do domínio, usadas para fazer as simulações são:

- i. Regime permanente;
- ii. Fluido: ar seco (gás ideal);
- iii. Pressão de referência: 1 atm;
- iv. Fluido incompressível com massa específica de $1,166 \text{ kg m}^{-3}$;

A hipótese de regime permanente (i) é válida quando os exaustores estão em pleno funcionamento, porém é uma simplificação considerar que as paredes são isotérmicas uma vez que na realidade a temperatura média delas é uma função do tempo local; além de desconsiderar processos convectivos e radiativos de transferência de calor.

Considerar que o fluido é um gás ideal (ii) é uma hipótese válida já que ar seco ou úmido respeitam as leis dos gases ideais em determinadas condições de pressão e temperatura (MORAN e SHAPIRO, 2013).

A pressão de referência de 1 atm (iii) é válida já que as cidades nas quais estão instalados os aviários encontram-se basicamente ao nível do mar; Montenegro (Brasil) e Valência (Espanha) têm, respectivamente, altitude de 34m e 15m.

Tratar o ar como fluido incompressível (iv) faz sentido para baixos valores do número de Mach que é o caso do escoamento em ambientes avícolas, uma vez que para o número de Mach inferior a 0,3 o escoamento de gases pode ser tratado como incompressível (FOX *et al.*, 2014).

Uma representação esquemática indicando as entradas e saídas de ar dos aviários encontram-se nas Figuras 12 e 13. O aviário localizado na cidade de Valência (Espanha) estudado por Blanes-Vidal *et al.* (2008), Figura 12, possui ventilação mecânica negativa transversal na qual ar entra por janelas de ventilação e é retirado do ambiente por exaustores com capacidades diferentes. Já o aviário localizado na cidade de Montenegro (Brasil) opera com ventilação mecânica negativa do tipo túnel no qual o ar entra por dois painéis evaporativos com dimensões iguais e é succionado por seis exaustores de mesma capacidade, Figura 13. Mais detalhes destes aviários serão apresentados na seção 3.7 deste capítulo.

Figura 12 – Representação esquemática do aviário estudado por Blanes-Vidal *et al.* (2008).

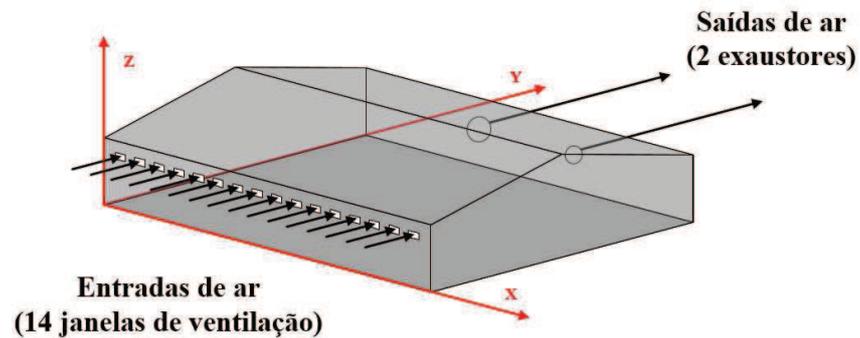
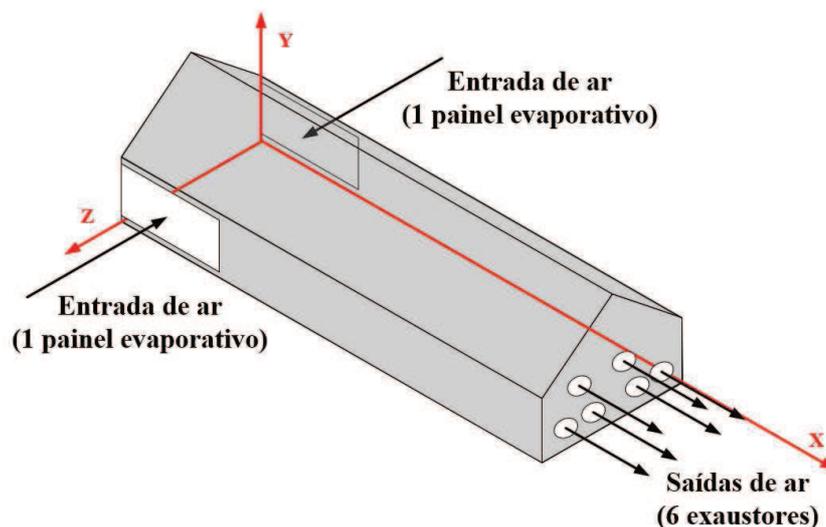


Figura 13 – Representação esquemática do aviário da cidade de Montenegro.



3.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Objetivando entender os fenômenos naturais cientistas buscam relações matemáticas que descrevem o comportamento físico destes fenômenos. Não é diferente com a mecânica dos fluidos cujas equações largamente conhecidas (PATANKAR, 1980; GRANGER, 1995; MALISKA, 1995; POPE, 2000; FOX *et al.*, 2006; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007) podem ser escritas da seguinte forma (notação de Einstein ou indicial):

Balanço de Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0, \quad (1)$$

(I) (II)

Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] + F_i, \quad (2)$$

(III) (IV) (V) (VI) (VII)

Conservação da Energia

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_{T,eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \dot{q}_i. \quad (3)$$

(VIII) (IX) (X) (XI)

Na Equação (1), ρ é a massa específica do fluido e U_i é o vetor de velocidade instantânea do fluido. Esta equação é conhecida como equação da conservação da massa (ou da continuidade). O termo (I) representa a taxa de variação da massa no tempo por unidade de volume e o termo (II) a taxa de fluxo de massa por unidade de volume através da superfície de controle.

Aplicando a segunda lei de Newton em um volume de controle do fluido, chega-se a Equação (2) conhecida como equação da quantidade de movimento linear ou Navier-Stokes. Nesta equação P é a pressão, F_i é a força de corpo e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Os termos (III) e (IV) são, respectivamente, as acelerações local e advectiva de uma partícula infinitesimal. Os termos (V), (VI) e (VII) são forças que agem nas partículas sendo, respectivamente, o gradiente de pressão, forças viscosas na superfície e a força de empuxo.

A Equação (3) é conhecida como equação da conservação da energia. Os termos (VIII), (IX), (X) e (XI) são a taxa de variação da energia interna com o tempo, o fluxo líquido advectivo de energia interna, fluxo líquido difusivo de energia interna e fonte de energia interna devido a sua dissipação, respectivamente. Nesta equação T é a temperatura termodinâmica do fluido, \dot{q}_i é a taxa de geração de calor e $\tau_{T,eff}$ é o coeficiente de difusão turbulento, definido como:

$$\tau_{T,eff} = \nu + \frac{\nu_t}{Pr_t}, \quad (4)$$

sendo, Pr_t é o número de Prandtl turbulento ($Pr_t = \nu_t/\alpha$), razão entre as difusividades de momento turbulento e térmica.

Considerando que as variações de massa específica e viscosidade sejam suficientemente pequenas de maneira que seus efeitos sobre a turbulência possam ser negligenciados, que o escoamento é incompressível, sem geração de calor e em regime permanente, as Equações (1) a (3) podem ser reescritas do seguinte modo:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + F_i, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_{T,eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right). \quad (7)$$

O conjunto de Equações (5) a (7) e as equações do modelo de turbulência adotado (seção 3.6) são aplicadas na solução numérica dos problemas deste trabalho.

3.4 FUNÇÃO PAREDE

Geralmente, o escoamento longe das paredes é dominado por efeitos inerciais e para camadas finas próximas a parede os efeitos viscosos predominam. Próximo da parede a velocidade média depende da distância y a partir da parede, tensão cisalhante, massa específica e viscosidade do fluido (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007):

$$U = f(y, \rho, \mu, \tau_p). \quad (8)$$

A análise dimensional mostra que:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) = f(y^+) , \quad (9)$$

definindo a velocidade de atrito como:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} . \quad (10)$$

A Equação (9) é conhecida como lei da função parede. Na prática, a subcamada limite viscosa é muito fina ($5 < y^+ \leq 30$) e a Equação (11) é aplicada.

$$u^+ = y^+ \quad (11)$$

Fora da subcamada viscosa ($30 < y^+ < 500$) tanto os efeitos viscosos como os turbulentos são importantes (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007). A tensão cisalhante varia pouco com a distância da parede e considerando a escala de comprimento turbulento $l_m = \kappa y$ (SCHLICHTING, 1979) tem-se que:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) , \quad (12)$$

sendo que a constante de von Karman, κ , vale, aproximadamente, 0,4 e a constante adicional $B \approx 5,5$, ou $E \approx 9,8$, para paredes lisas; paredes rugosas diminuem o valor de B . Valores de κ e B são válidos para escoamento turbulento com alto número de Reynolds. Valores de y^+ recomendados para os modelos de turbulência, assim como o respectivo número mínimo de nós (Ansys® CFX, 2012), encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores da função parede recomendados para os modelos de turbulência. Fonte: Ansys® CFX, 2012.

Modelo de Turbulência	Valores para y^+
Modelo 0-equação	Aceitável $y^+ < 200$
k-ϵ	
RNG k-ϵ	$Re > 10^5$
<i>LRR Reynolds Stress</i>	$20 < y^+ < 100$
<i>QI Reynolds Stress</i>	$N_y^* = 10$
<i>SSG Reynolds Stress</i>	
k-ω	
k- ω SST	$2 \times 10^3 < Re < 10^5$
<i>Omega Reynolds Stress</i>	$1 < y^+ < 2$
<i>BSL Reynolds Stress</i>	$N_y^* = 15$

*Número mínimo de nós nas fronteiras na direção normal.

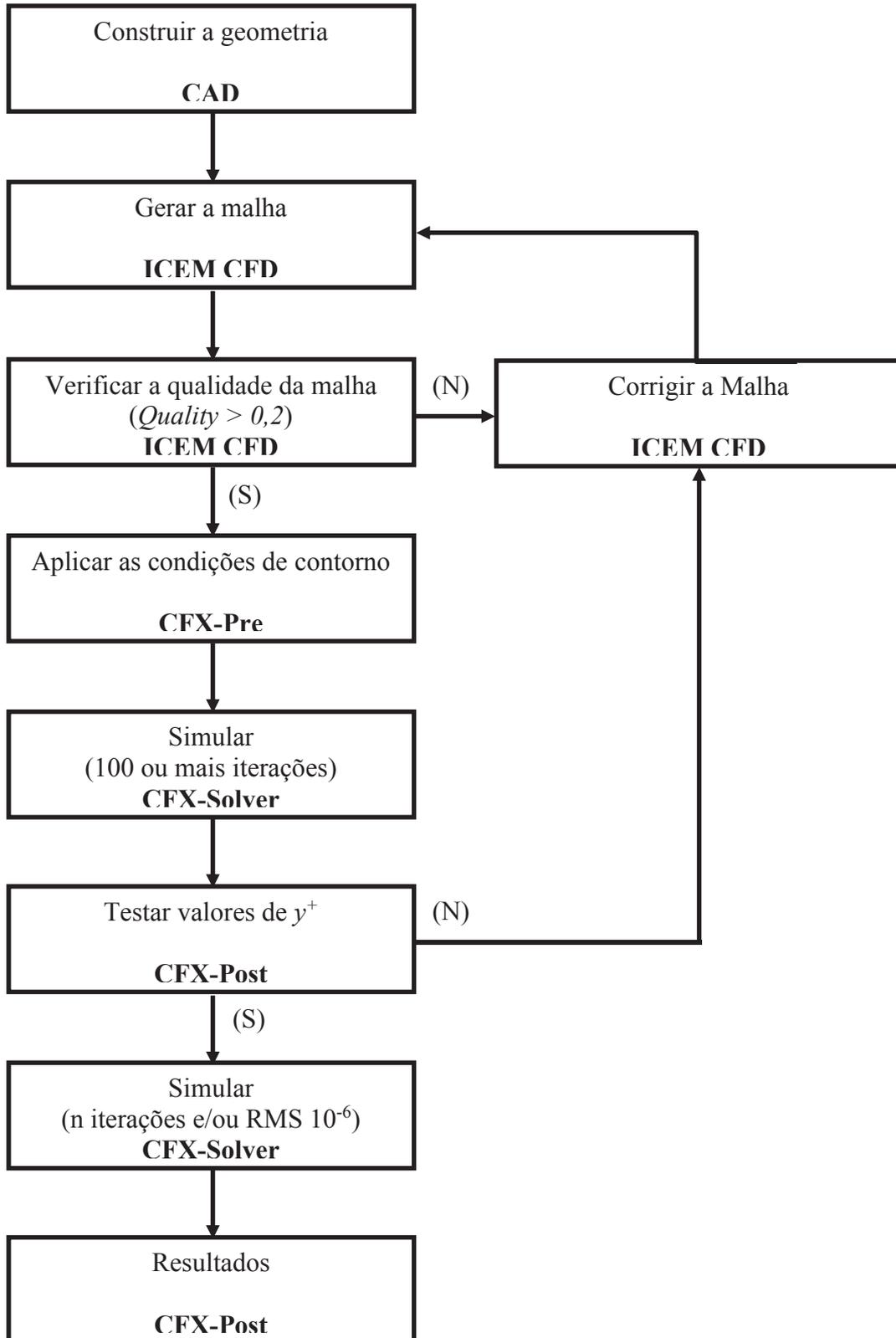
3.5 DFC E O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS

O código utilizado neste trabalho, Ansys® CFX, baseia-se no MVFbEF (Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos Finitos) que é um método numérico usado para resolver as equações de Navier-Stokes, ainda sem solução analítica genérica.

A Figura 14 apresenta um fluxograma de como o Ansys® CFX foi empregado para resolver os problemas deste trabalho. A primeira etapa consiste em construir a geometria do problema. O Ansys® CFX possui ferramentas CAD (*Computer Aided Design*), porém é melhor construir a geometria do problema em um software CAD específico (neste trabalho usou-se o SolidWorks®) e exportá-la para o Ansys® CFX. A geometria deve ser discretizada, ou seja, dividida em pequenos volumes de controle. O melhor gerador de malha, para a DFC, que a Ansys® CFX versão 14.5 dispõe é o ICEM CFD e, portanto, ele foi utilizado para geração da malha. O ICEM CFD permite avaliar a qualidade da malha e neste trabalho usou-se o critério *Quality*. Aplicam-se as condições de contorno no CFX-Pre e a simulação é feita no CFX-Solver para 100 ou mais iterações. No CFX-Post deve-se avaliar o parâmetro y^+ e se ele estiver dentro de uma faixa aceitável de valores (Tabela 1) pode-se continuar a simulação até o critério de convergência escolhido.

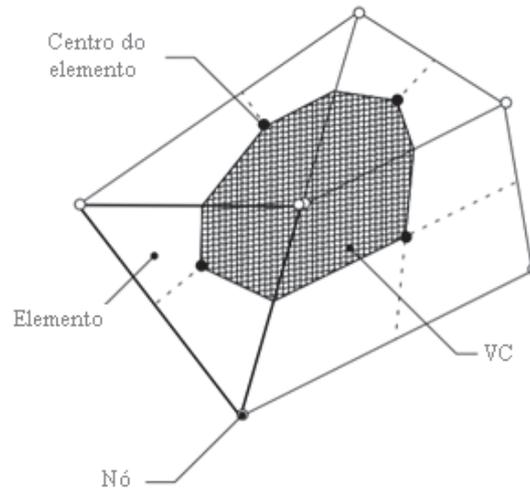
Visto que o MVFbEF tem base teórica no MVF (Método dos Volumes Finitos) (ROSA, 2014) cuja literatura é vasta (PATANKAR, 1980; MALISKA, 1995; BORTOLI, 2000; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007), não se pretende fazer um tratado extenso aqui, mas uma noção sobre o assunto é fundamental uma vez que ele é a base deste estudo.

Figura 14 – Procedimento simplificado para análise DFC usando o Ansys CFX.



O MVF consiste em discretizar o domínio (volume de controle) usando uma malha composta por volumes finitos que armazenam quantidades relevantes como massa, momento e energia. A Figura 15 apresenta uma malha bidimensional.

Figura 15 – Definição do volume de controle. Fonte: Ansys® CFX, 2012.



No MVFbEF todas as propriedades do fluido e as variáveis da solução são armazenadas nos nós, os vértices das malhas indicado na Figura 15. A área hachurada da Figura 15 é o volume de controle construído ao redor de cada nó da malha usando a mediana dupla. As Equações (5) a (7) são integradas em cada volume de controle e o Teorema de Gauss é aplicado para converter integrais volumétricas envolvendo operadores divergentes e gradientes em integrais de superfície. Se o volume de controle é indeformável no tempo, então as derivadas temporais podem ser retiradas das integrais volumétricas e as Equações (5) a (7) tornam-se:

$$\int_{SC} \rho U_j dn_j = 0, \quad (13)$$

$$\int_{SC} \rho U_j U_i dn_j = - \int_{SC} P dn_j + \int_{SC} \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_{VC} S_{U_i} dV, \quad (14)$$

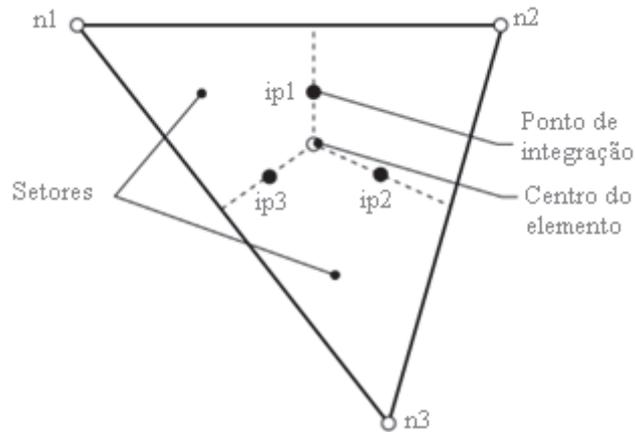
$$\int_{SC} \rho U_j T dn_j = \int_{SC} \tau_{T,eff} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_{VC} S_T dV, \quad (15)$$

onde, n_j é o vetor direção normal a superfície, μ_{eff} é a viscosidade efetiva ($\mu_{eff} = \mu + \mu_t$), S_{U_i} é o termo fonte da equação de Navier-Stokes e S_T o termo fonte da equação da

conservação de energia. As integrais de volume (em VC) são os termos acumulativos e as integrais de superfície (em SC) são os somatórios dos fluxos que atravessam as superfícies.

A Figura 16 ilustra o próximo passo no algoritmo numérico no qual as integrais volumétricas e superficiais, Equações (13) a (15), são discretizadas.

Figura 16 – Elemento de malha. Fonte: Ansys® CFX, 2012.



As aproximações discretas das equações governantes baseiam-se em séries de expansão, como a série Taylor. O maior termo da expansão determina a ordem do erro de truncamento. A discretização das Equações (13) a (15) resultam nas seguintes equações:

$$\sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 , \quad (16)$$

$$\sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_j)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} \Psi , \quad (17)$$

$$\sum_{ip} \dot{m}_{ip} T_{ip} = \sum_{ip} \left(\tau_{T,eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_T} \Psi , \quad (18)$$

onde Δn_j é o incremento espacial. A vazão mássica discreta pela superfície de controle é dada como:

$$\dot{m}_{ip} = (U_j \Delta n_j)_{ip} . \quad (19)$$

A partir das Equações (16) a (18) são construídos sistemas de equações cujo termo fonte pode ou não ser constante e a matriz de coeficientes varia a cada iteração. A precisão da aproximação é determinada pelo tamanho dos elementos da malha ou pelo fator de passo de

tempo (Ansys® CFX, 2012). Assim, um refinamento da malha ou do passo de tempo implica numa redução mais acelerada dos erros durante a convergência da solução numérica.

No MVFbEF, o campo do escoamento e outras propriedades são armazenados nos nós da malha (Figura 15). No entanto, pontos de integração são necessários para aproximação desses termos (Figura 16). Para isso, o Ansys® CFX usa funções de forma que representam uma variável genérica de transporte variável no interior de um elemento:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N_{\text{nós}}} N_i \Phi_i, \quad (20)$$

onde N_i é a função de forma e Φ_i o valor da propriedade no nó i .

O somatório é feito sobre todos os nós do elemento e uma propriedade chave das funções de forma é a seguinte:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{nós}}} N_i = 1, \quad (21)$$

onde, no nó j :

$$N_i = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}. \quad (22)$$

Coordenadas paramétricas são utilizadas para representar as funções de forma. Para cada tipo de elemento existe uma respectiva função de forma. Neste trabalho foram construídas malhas não estruturadas com elementos prismáticos próximos as superfícies e tetraédricos no interior do volume, assim as funções de forma destes elementos encontram-se no Apêndice A.

Em algumas situações, é necessário calcular termos gradientes nos nós. No Ansys® CFX esses termos são calculados usando o teorema da divergência de Gauss através da seguinte equação:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = \frac{1}{V} \sum_{ip} (\Phi \Delta n_j)_{ip}, \quad (23)$$

onde Δn_j é o incremento espacial e Φ é calculado pela Equação (20).

Termos advectivos são calculados de acordo com os métodos de interpolação apresentados no Apêndice B deste trabalho.

Seguindo a abordagem de elementos finitos padrão, as funções de forma são usadas para avaliar derivadas espaciais para todos os termos difusivos conforme a seguinte relação:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_j}\right)_{ip} = \sum_n \left(\frac{\partial N_n}{\partial x_j}\right)_{ip} \Phi_n . \quad (24)$$

O somatório da Equação (24) refere-se a todas as funções de forma para cada elemento. A matriz Jacobiana transformada pode ser usada para calcular as derivadas das funções de forma conforme a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial s} \\ \frac{\partial N}{\partial t} \\ \frac{\partial N}{\partial u} \end{bmatrix} . \quad (25)$$

Gradientes da função de forma podem ser avaliados de duas formas: na posição atual de cada ponto de integração (interpolação tri-linear) ou onde cada superfície ip faz intersecção com a aresta do elemento (interpolação linear-linear). A interpolação linear-linear melhora a robustez da solução.

No gradiente de pressão da Equação (17), termo $(P\Delta n_j)_{ip}$, a pressão na superfície ip é avaliada usando funções de forma:

$$P_{ip} = \sum_n N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip}) P_n , \quad (26)$$

Assim como nos termos difusivos, pode-se calcular a pressão na superfície ip na posição atual de cada ponto de integração ou na intersecção da superfície ip com a aresta do elemento. Na configuração padrão do Ansys® CFX, o segundo método é empregado.

O acoplamento pressão-velocidade no Ansys® CFX usa o método proposto por RHIE e CHOW (1983) que faz uma discretização no fluxo mássico para evitar o desacoplamento. Para os termos advectivos é considerada a seguinte expressão:

$$\bar{u}_{i,ip} = \bar{u}_{i,ip} + f_{ip} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_i} \right)_{ip} - f_{ip} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} \right)_{ip} \right] - c_{ip} f_{ip} (\bar{u}_{i,ip}^0 - \bar{u}_{i,ip}^0), \quad (27)$$

Sendo ,

$$f_{ip} = \frac{d_{ip}}{1 - c_{ip} d_{ip}}, \quad (28)$$

$$d_{ip} = -\frac{\Psi}{A}, \quad (29)$$

$$c_{ip} = \frac{1}{\Delta t}. \quad (30)$$

A barra dupla na variável velocidade da Equação (27) representa uma média entre os vértices adjacentes ao ponto de integração.

O sistema de equações resultante da discretização pode ser descrito do seguinte modo:

$$\sum_{viz} a_i^{viz} \Phi_i^{viz} = b_i, \quad (31)$$

onde Φ é a solução do sistema, b é normalmente associado aos termos fonte e a é a matriz de coeficientes associada aos parâmetros da malha e do fluido. O índice i é o número do elemento ou nó em que a equação é calculada e a vizinhança é a soma dos nós vizinhos. Por exemplo, um esquema matricial resultante pode ser representado da seguinte

$$a_i^{viz} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{uP} & a_{uk} & a_{u\omega} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vP} & a_{vk} & a_{v\omega} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wP} & a_{wk} & a_{w\omega} \\ a_{Pu} & a_{Pv} & a_{Pw} & a_{PP} & a_{Pk} & a_{P\omega} \\ a_{ku} & a_{kv} & a_{kw} & a_{kP} & a_{kk} & a_{k\omega} \\ a_{\omega u} & a_{\omega v} & a_{\omega w} & a_{\omega P} & a_{\omega k} & a_{\omega \omega} \end{bmatrix}_i^{viz}, \quad (32)$$

$$\Phi_i^{viz} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ P \\ k \\ \omega \end{bmatrix}_i^{viz}, \quad (33)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \\ b_k \\ b_{\omega} \end{bmatrix}_i \quad \text{viz} \quad (34)$$

As Equações (32) a (34) formam um sistema que é resolvido de forma independente para os nós da malha e caso o critério de convergência não seja atingido os coeficientes são atualizados e resolvidos para o próximo passo de tempo utilizando a solução do passo anterior.

3.6 TURBULÊNCIA

Escoamento laminar é aquele no qual partículas fluidas movem-se na forma de camadas; no escoamento turbulento essas partículas rapidamente se misturam devido a oscilações aleatórias no campo tridimensional de velocidades. A transição laminar/turbulento é definida pelo número de Reynolds ($Re_L = \bar{V}L/\nu$) e este limite varia de acordo com as condições do escoamento (geometria, rugosidade da parede, viscosidade do fluido, velocidade e temperatura). Por exemplo, em tubulações a transição para turbulência acontece para um número de Reynolds de aproximadamente 2.300 e numa placa plana pode chegar a 91.000 (FOX *et al.*, 2014).

As principais características da turbulência (TENNEKES, 1972 e POPE, 2000) são: irregularidade, difusividade, elevado número de Reynolds, flutuações tridimensionais na forma de vórtices, dissipação e continuidade.

Quatro estágios básicos originam a turbulência (GRANGER, 1995):

1. desenvolvimento de uma camada de cisalhamento instável;
2. crescimento de perturbações bidimensionais com flutuações periódicas de vórtice;
3. transformações das perturbações para tridimensional conduzem para um alongamento espectral de um filamento na forma de vórtice;
4. desenvolvimento de um comportamento aleatório no qual o espectro acontece em escalas cada vez menores.

As propriedades de um escoamento turbulento podem ser representadas do seguinte modo (conhecido como modelo de Reynolds):

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' , \quad (35)$$

onde Φ é a quantidade instântanea de uma propriedade qualquer, $\bar{\Phi}$ é o valor médio dessa propriedade (Equação (36)) e Φ' é a flutuação em torno do valor médio.

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \Phi dt \quad (36)$$

Escalas na ordem de 10^{-1} a 10^{-2} mm e frequências de aproximadamente 10 kHz são típicas em escoamentos turbulentos para aplicações de engenharia (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). Reynolds (1895) decompôs as equações governantes em um valor médio do vetor velocidade e outro relacionado a sua flutuação. Essas equações são conhecidas como Equações Médias de Reynolds (RANS).

Métodos para solução de escoamentos turbulentos podem ser classificados do seguinte modo: DNS (*Direct Numeric Simulation*), LES (*Large Eddy Simulation*) e RANS (*Reynolds Avaraged Navier-Stokes*). No escoamento turbulento as escalas temporais e espaciais diminuem com o aumento da velocidade. A DNS foi aplicada em situações simples, porém, devido às pequenas escalas das discretizações espaciais e temporal, logo foram usadas as LES que demandam menor custo computacional. No entanto, modelos baseados em RANS são usados nos códigos atuais de DFC por resolverem problemas de engenharia mais rápido que os dois grupos citados anteriormente (SUSIN, 2007 e GUIMARÃES, 2012). Algumas características desses métodos são (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007):

- RANS: efeitos da turbulência nas propriedades médias do escoamento. Recursos computacionais modestos para razoável precisão do escoamento, por isso nas últimas três décadas aplicações de engenharia usam modelos desta categoria;
- LES: efeitos da turbulência para grandes vórtices;
- DNS: resolve o escoamento médio e toda flutuação da velocidade. Alto custo computacional; modelos desta categoria não tem aplicação industrial.

A maioria dos modelos turbulentos para as Equações Médias de Reynolds (RANS) são classificados de acordo com o número de equações adicionais de transporte, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplos de modelos turbulentos para RANS. Fonte: Versteeg e Malalasekera, 2007.

Número de equações de transportes extra	Nome
Zero	<i>Mixing length model</i>
Uma	Modelo Spalart-Allmaras
Duas	Modelo k-ε Modelo k-ω <i>Algebraic stress model</i>
Seis	Modelo da tensão de Reynolds

Nos modelos a duas equações aplicam-se uma equação para a energia cinética turbulenta, k , que representa a energia cinética das flutuações de velocidade (definido pela Equação (37)), e outra para uma variável que combina k e uma escala de comprimento L (m).

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2), \quad (37)$$

sendo u' , v' e w' são as flutuações da velocidade nas direções x , y e z , respectivamente.

Há várias propostas para a segunda variável, três delas serão descritas brevemente a seguir: modelo k-ε de LAUNDER e SPALDING (1974), modelo RNG k-ε (YAKHOT *et al.*, 1992) e o modelo k-ω de WILCOX (1988).

A maioria dos modelos de turbulência baseia-se na hipótese de Boussinesq (1887) que propôs um modelo para avaliar as tensões de Reynolds baseado em escoamentos paralelos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). Este modelo considera um escoamento unidirecional ao longo de uma placa plana infinita supondo que a tensão turbulenta poderia ser modelada como sendo diretamente proporcional à taxa de deformação do escoamento médio, assim:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (38)$$

Equanto ν é a viscosidade cinemática, ν_t é uma propriedade do escoamento que indica o nível de turbulência local e é calculado diferentemente em cada modelo de turbulência. A hipótese de Boussinesq é adequada para escoamentos próximos às superfícies sólidas, no entanto longe destas regiões a Equação (38) é inadequada. Uma forma generalizada foi proposta por Kolmogorov (1942):

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} , \quad (39)$$

sendo k é a energia cinética turbulenta (Equação (37)) e δ_{ij} é o delta de Kronecker.

3.6.1 Modelo k- ϵ padrão

Modelo a duas equações é recomendado quando a aplicação apresenta altos valores do número de Reynolds ($Re \geq 10^5$). Proposto por LAUNDER e SPALDING (1974), o modelo manipula algebricamente as equações de Navier-Stokes e propõe as seguintes equações (aplicadas às hipóteses simplificativas deste trabalho):

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \epsilon , \quad (40)$$

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_1 \nu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} , \quad (41)$$

sendo as constantes empíricas iguais a:

$$c_1 = 1,42 ,$$

$$c_2 = 1,92 ,$$

$$\sigma_k = 2 ,$$

$$\sigma_\epsilon = 1,22 .$$

A segunda variável das equações, ε , é a taxa da dissipação de energia cinética, definida por:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l}, \quad (42)$$

onde l (m) é uma escala de comprimento característica.

A viscosidade turbulenta, ν_t , é definida como:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (43)$$

sendo a constante empírica igual a: $c_\mu = 0,09$. Este modelo é válido para regiões onde o escoamento é plenamente turbulento.

3.6.2 Modelo RNG k- ε

Denominado *Re-normalization Group k- ε* este modelo foi criado por YAKHOT *et al.* (1992). Baseado na Teoria do Grupo de Renormalização, este modelo introduz efeitos de pequena escala do modelo k- ε padrão (CHEN, 1995).

Neste modelo as constantes e funções são determinadas teoricamente, podendo ser aplicado à subcamada limite viscosa, sendo desnecessário incluir correções nas constantes ou funções nas equações de transporte.

Aplicam-se aqui as mesmas equações do modelo k- ε padrão (Equações (40) e (41)), porém as constantes a serem usadas são diferentes:

$$c_\mu = 0,0845 ,$$

$$c_2 = 1,68 ,$$

$$\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0,7194 ,$$

A constante c_1 é modificada do seguinte modo:

$$c_1 = 1,42 - f_\eta, \quad (44)$$

sendo,

$$f_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38}\right)}{1 + \beta \eta^3}, \quad (45)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]}{\rho c_\mu \varepsilon}}, \quad (46)$$

e sendo $\beta = 0,012$.

3.6.3 Modelo k- ω

Modelo a duas equações recomendado quando a aplicação apresenta baixos valores do número de Reynolds ($Re \leq 10^5$). Este modelo não utiliza complexas funções de amortecimento não lineares, por isso é um modelo mais preciso. Nesta modelagem a viscosidade turbulenta está associada à energia cinética turbulenta por meio da seguinte relação:

$$v_t = \frac{k}{\omega}. \quad (47)$$

WILCOX (1988) desenvolveu esse modelo, chegando as seguintes equações:

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \beta_1 k \omega, \quad (48)$$

$$U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha v_t \frac{\omega}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \beta_2 \omega^2, \quad (49)$$

sendo as constantes empíricas valem:

$$\beta_1 = 0,09,$$

$$\beta_2 = 0,075,$$

$$\sigma_k = \sigma_\omega = 2 ,$$

$$\alpha = 5/9 .$$

A segunda variável das equações é a frequência turbulenta, ω (1/s), definida por:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} . \quad (50)$$

O modelo k- ω é muito sensível ao valor especificado para ω na região da entrada do fluido, já que uma variação significativa nos resultados pode ser observada. Por outro lado, uma vantagem deste modelo é o tratamento próximo a parede para simulações com baixos número de Reynolds, porém o modelo possui deficiências em regiões longe das paredes (SUSIN, 2007).

MENTER (1992) formulou o modelo de turbulência k- ω SST (*Shear-Stress Transport*) que combina os modelos turbulentos k- ε e k- ω , o qual não será investigado neste trabalho.

3.7 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Conforme foi visto neste capítulo, dois aviários industriais serão estudados: um localizado na cidade de Valência (Espanha) e outro em Montenegro (Brasil). Nesta seção serão apresentadas as condições de contorno que complementam as hipóteses simplificativas (seção 3.2) e possibilitam resolver uma simplificação razoável do problema físico.

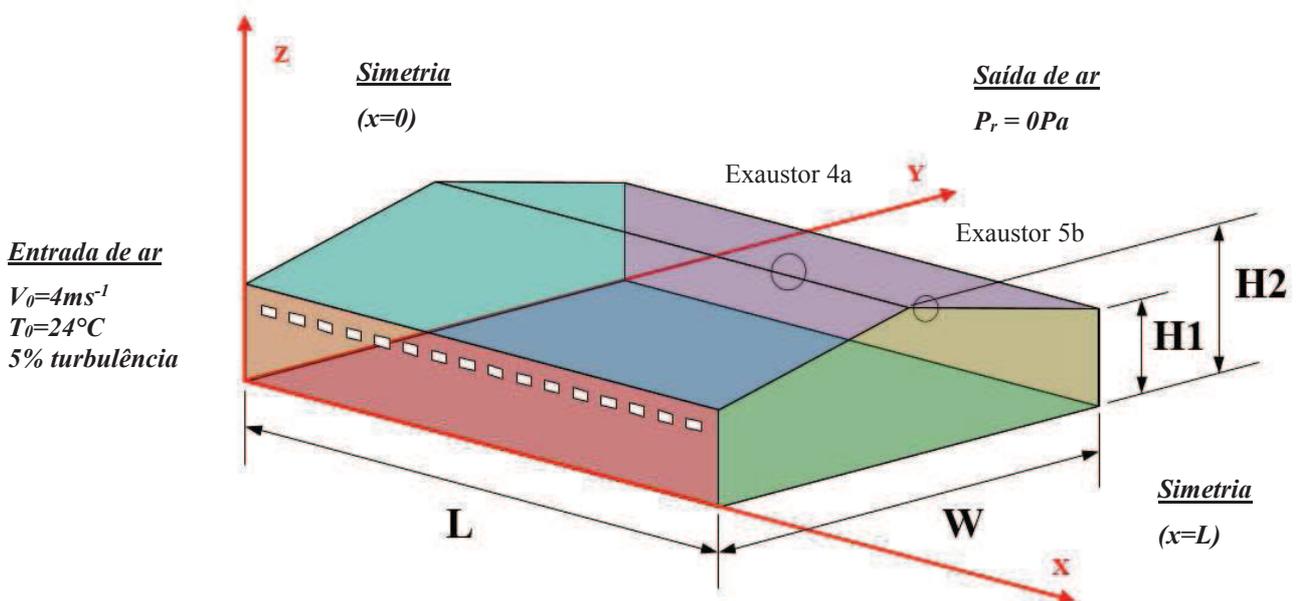
3.7.1 Aviário de Blanes-Vidal *et al.* (2008)

A Figura 3a apresenta a geometria do aviário comercial estudado por BLANES-VIDAL *et al.* (2008) assim como as condições de contorno aplicadas. Este aviário tem pé direito de 2,36m e altura do piso ao topo do telhado de 3,94m. Os autores escolheram uma seção do aviário para estudo. Esta seção possui 14 entradas retangulares com dimensões de 0,27x0,81m cada, dispostas a 1,80m do piso. Os ventiladores 4a e 5b têm, respectivamente, 0,63 e 0,32m de diâmetro cuja especificação técnica encontra-se em BLANES-VIDAL *et al.*

(2007). Uma ilustração da geometria do problema é apresentada na Figura 17, cujas dimensões descritas são: $L=17,60$ m, $W=15,00$ m, $H1=2,36$ m e $H2=3,94$ m.

Figura 17 – Domínio computacional de Blanes-Vidal *et al.* (2008) e condições de contorno.

Temperatura (°C)	
Piso ($z=0$)	26
Teto próximo à entrada ($0 \leq y \leq W/2$ e $H1 \leq z \leq H2$)	27
Teto próximo à saída ($W/2 \leq y \leq W$ e $H1 \leq z \leq H2$)	28
Parede entrada ($y=0$)	27
Parede saída ($y=W$)	28



Baseando-se em BLANES-VIDAL *et al.* (2008), as paredes do domínio foram consideradas lisas e com temperatura prescrita. No plano $y=0$ foi prescrito uma temperatura de 27°C , em $y=W$ de 28°C , em $z=0$ de 26°C , em $0 \leq y \leq W/2$ e $H1 \leq z \leq H2$ de 27°C e, finalmente, em $W/2 \leq y \leq W$ e $H1 \leq z \leq H2$ de 28°C .

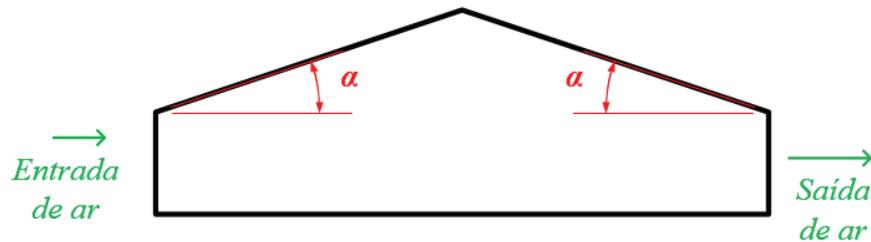
Para assumir que o avião tem extensão infinita na direção x os autores usaram simetria nos planos $x=0$ e $x=L$. Nas saídas é assumida uma pressão relativa nula e nas entradas os seguintes valores são usados: $V_0 = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (somente a componente normal da velocidade tem valor não nulo), $T_0 = 24^{\circ}\text{C}$ e 5% de turbulência.

O modelo de transferência de calor disponível no Ansys® CFX versão 14.5 adequado para baixas velocidades é o *Thermal Energy* e por isso ele foi empregado para resolver a equação do balanço de energia.

3.7.1.1 Variação da inclinação do telhado

Além de validar a solução de BLANES-VIDAL *et al.* (2008) decidiu-se fazer uma variação na inclinação do telhado, α (Figura 18), a fim de verificar a influência desse parâmetro no escoamento. Serão assumidos três valores para α : 6° , 12° (aviário original) e 24° .

Figura 18 – Variação da inclinação do telhado no problema de Blanes-Vidal *et al.* (2008).



3.7.2 Aviário de Montenegro

O aviário industrial escolhido para estudo está instalado na cidade de Montenegro ($29^\circ\text{S } 51^\circ\text{W}$, altitude 34 m)¹, Rio Grande do Sul. Detalhes construtivos deste aviário estão no Anexo A; trata-se de um aviário com orientação Leste-Oeste e ventilação mecânica tipo túnel que usa resfriamento evaporativo para condicionar o ambiente. Na Figura 19 encontra-se uma representação simplificada do domínio cujas distâncias indicadas valem: $L=80$ m, $W=12$ m, $H=2,7$ m, $H_{\max}=5,4$ m e $D=1,3$ m. As Figuras 19b e 19c mostram, respectivamente, as posições das entradas e saídas do domínio.

Originalmente, o aviário industrial de Montenegro possui um defletor a cada treliça da instalação, totalizando 19 defletores, no entanto, somente em um dos casos estudados serão usados estes defletores. Todas as paredes do domínio são consideradas lisas e isotérmicas: $T=30^\circ\text{C}$ para os planos $z=0$, $x=0$ e $x=L$; e $T=25^\circ\text{C}$ para os planos $y=0$ e $H \leq y \leq H_{\max}$ e $0 \leq z \leq W/2$ (Figura 19a).

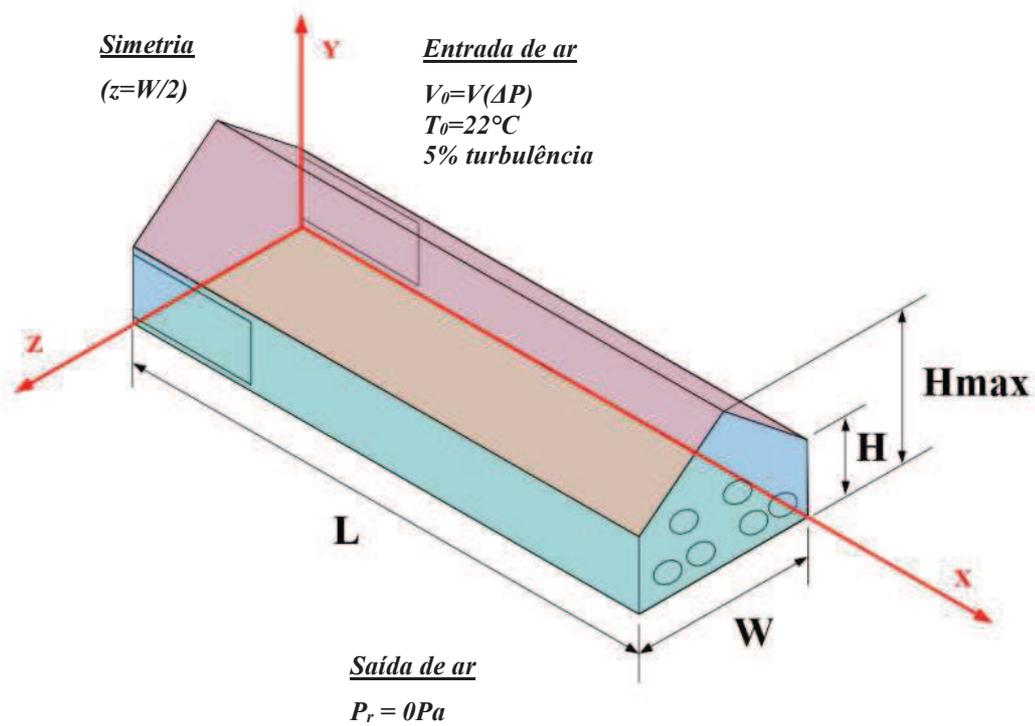
Como pode ser notada a temperatura no telhado é baixa, visto que é considerado o uso de um isolamento de EPS (como as telhas da Isoeste® ou isolantes da Owens Corning®). A escolha dessas temperaturas está baseada em dados da SOMAR Meteorologia (Figura 20), indicando que durante o verão austral (entre 21 de dezembro e 20 de março,

¹ Fonte: < www.montenegro.rs.gov.br >. Acesso em: 16 fev. 2015.

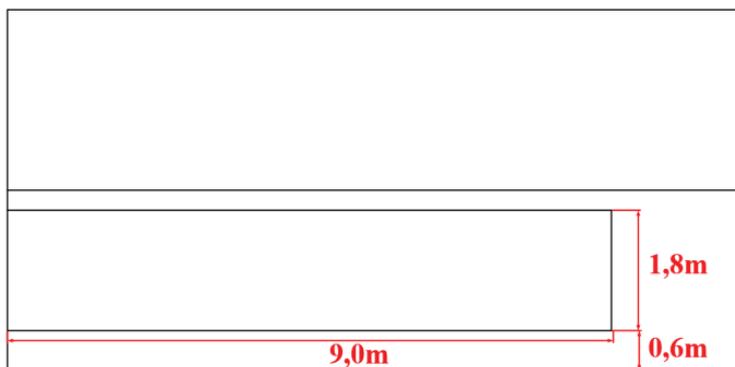
aproximadamente) a temperatura média máxima na cidade de Montenegro fica entre 25°C e 30°C.

Figura 19 – Domínio computacional do aviário de Montenegro e condições de contorno (a). Dimensões das entradas (b). Posição dos exaustores (c).

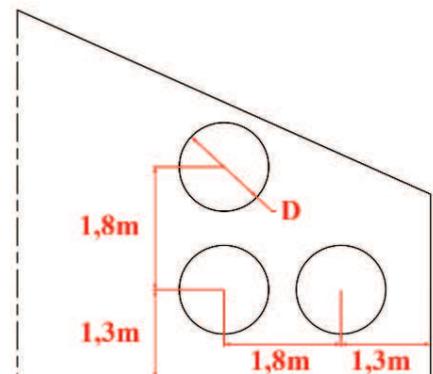
Temperatura (°C)	
Piso ($y=0$)	25
Teto ($0 \leq z \leq W/2$ e $H \leq y \leq H_{max}$)	25
Paredes ($y=W$)	30



(a)

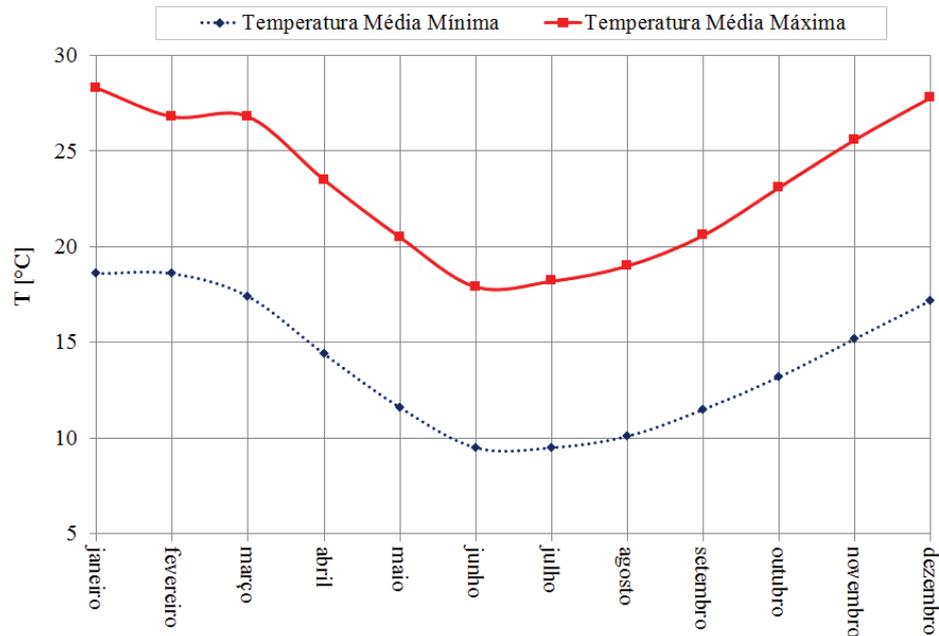


(b)



(c)

Figura 20 – Temperaturas média mínima e máxima ao longo do ano para a cidade de Montenegro.
 Fonte: < www.tempoagora.com.br >, acesso em 27 fev. 2014.



É importante ressaltar que a carga térmica de frangos em atividade é elevada e deveria ser incorporada ao modelo. BIANCHI (2013) afirma que frangos em atividade intensa produzem cerca de 4 Wkg^{-1} de calor, ou seja, considerando uma densidade de 12 aves/ m^2 (para frangos pesados varia em torno de 10 a 12 aves/ m^2 ; MACARI e MENDES, 2005), frangos de 2,25 kg e sabendo que a área do aviário em questão (Figura 19a) é 960 m^2 então o fluxo de calor seria, aproximadamente, 108 Wm^{-2} .

Não há um acordo na literatura sobre a carga térmica das aves. O manual da GSI® (2012) indica que a UBABEF recomenda considerar 39 kg/m^2 e a DEFRA (*Department for Environment, Food and Rural Affairs*) 34 kg/m^2 correspondendo, respectivamente, a uma carga térmica de 156 W/m^2 e 136 W/m^2 no aviário de Montenegro.

CURTIS (1983) propõe a seguinte equação para calcular a carga térmica total de um frango:

$$q_f = am_f^b, \quad (51)$$

onde q_f é o calor total de um frango (W), m_f a massa do frango (kg), a e b constantes que valem 2,90 e 0,75, respectivamente.

Empregando a Equação (51) para as mesmas condições apresentadas acima resultará numa carga térmica total de 64 W/m², ou seja, um valor consideravelmente menor quando comparado com as cargas térmicas anteriores.

XIN *et al.* (2001) propõe a seguinte equação para o cálculo da carga térmica:

$$q_{tot} = 9,84m_f^{0,75}[4 \cdot 10^{-5}(20 - T_a)^3 + 1] , \quad (52)$$

sendo q_{tot} é o calor total produzido (W/m²), m_f é a massa do frango (kg) e T_a é a temperatura média do ambiente (°C). A desvantagem da Equação (52) em relação à Equação (51) é que ela depende da temperatura. Considerando um mesmo frango de 2,25 kg e um ambiente a 18°C (frango com 42 dias, Figura 2) chega-se a uma carga térmica total de 18 W/m². Visto que não há um consenso sobre o assunto, não foi implementada a carga térmica dos frangos nos modelos deste trabalho.

O plano $z=W/2$ (Figura 19a) é o plano de simetria e todas as saídas foram consideradas como tendo pressão relativa nula.

A velocidade na entrada foi calculada a partir de informações técnicas da Munters® para o ventilador EM50 (Anexo B) cuja vazão nominal é 35.300 m³h⁻¹, como há 6 ventiladores e 2 entradas de ar (com área conhecida, Figura 19b) pode-se calcular a velocidade nominal na entrada², obtendo 0,605 ms⁻¹. No entanto, foi decidido implementar nos modelos as curvas de perda de carga conforme será visto na seção 3.7.2.2. Além disso, uma turbulência de 5% foi considerada e a temperatura do ar de 22°C (temperatura ideal para um frango de 28 dias; Figura 2) na região de entrada de ar, considerando que o sistema de resfriamento evaporativo consiga atingir essa temperatura.

A seguir serão apresentados brevemente os casos estudados e suas respectivas condições de contorno específicas.

3.7.2.1 Inclinação do teto e defletores

Teoricamente, a velocidade do escoamento em um aviário que dispõe de um sistema de ventilação do tipo túnel pode ser aumentada utilizando lonas defletoras (Figura 21) ou reduzindo a inclinação do teto para valores inferiores a 10%.

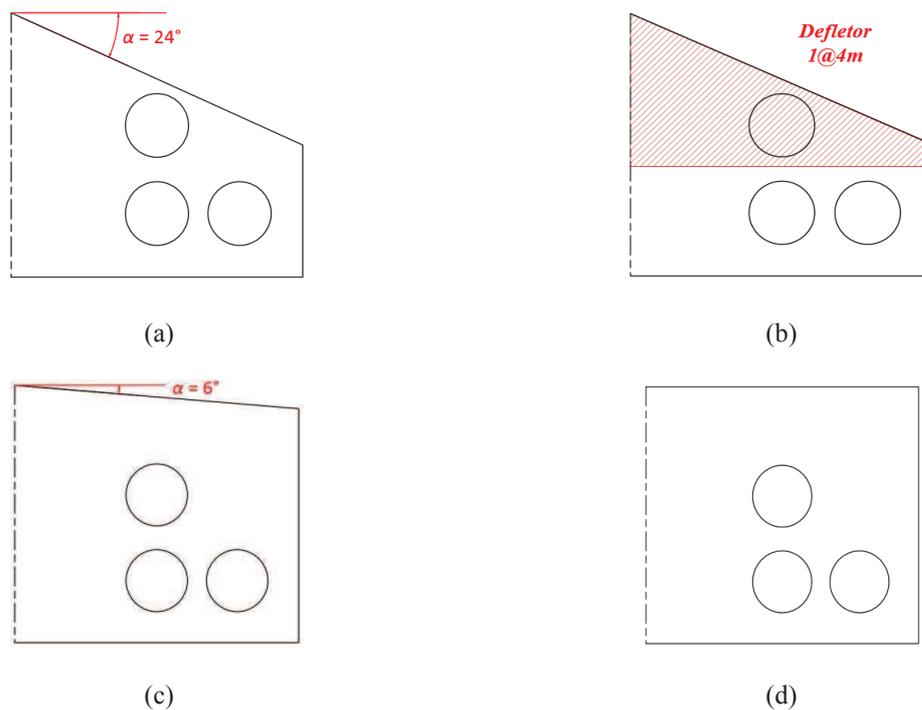
² Para o cálculo da velocidade na entrada, o aviário de Montenegro é considerado totalmente vedado com fluxo de ar somente nas entradas e saídas do domínio.

Figura 21 – Galpão de frangos de corte em Maringá (PR). Fonte: Bianchi, 2013.



Neste trabalho decidiu-se usar as configurações apresentadas na Figura 22. No aviário original da cidade de Montenegro (RS) são empregados defletores e uma inclinação de 24° , assim optou-se por estudar este aviário sem defletores, com uma inclinação menor de 6° e aplicação de forro. Os defletores são modelados como paredes lisas e isotérmicas (mesma temperatura que o teto).

Figura 22 – Variação da inclinação do teto para o aviário da cidade de Montenegro (RS): original sem defletor (a), original com defletor (b), com inclinação de 6° (c) e com forro (d).



3.7.2.2 Ventiladores

Alguns motivos do uso de ventiladores em aviários climatizados são (ABREU e ABREU, 2000):

- Atingir temperaturas da ZCT;
- Eliminar o excesso de umidade do ambiente e da cama;
- Permitir a renovação do ar regulando o nível de oxigênio, eliminando CO₂ e gases de fermentação.

Vantagens (ABREU e ABREU, 2000):

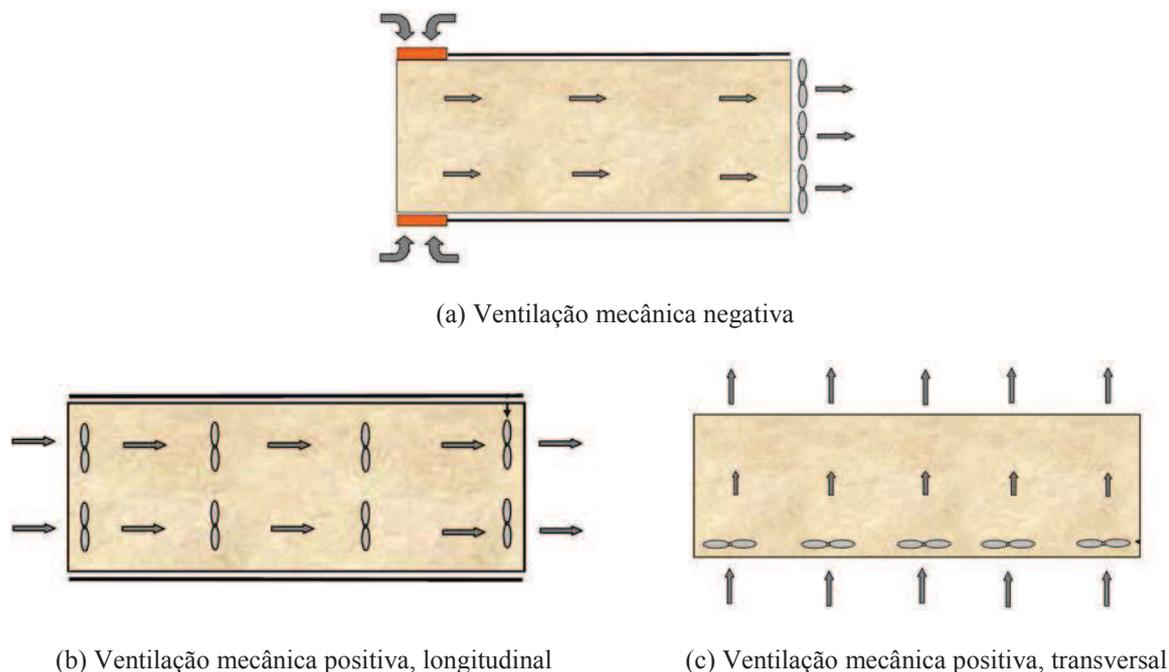
- Permitir a filtragem do ar;
- Distribuição uniforme e suficiente do ar no aviário;
- Independência das condições atmosféricas.

Desvantagens:

- Baixo aproveitamento e/ou interferência da ventilação natural;
- Custo relativamente maior.

Os tipos mais comuns de ventilação mecânica em aviários encontram-se na Figura 23. Um bom dimensionamento do aviário atenua zonas de baixa movimentação do ar. No sistema de pressão negativa (Figura 23a) o ar é forçado do interior para o exterior do aviário e a eficiência do processo depende da boa vedação do aviário. Já no sistema de pressão positiva (Figuras 23b e 23c) o ar é forçado do exterior para o interior da instalação. No sistema de fluxo transversal (Figura 23c) as cortinas laterais permanecem abertas, tornando-se difícil o controle da ventilação devido à interferência da ventilação natural. Quando o fluxo é longitudinal (Figura 23b) as cortinas laterais devem ser fechadas e bem vedadas (ABREU e ABREU, 2000).

Figura 23 – Tipos mais comuns de sistemas de ventilação em aviários. Fonte: Abreu e Abreu, 2000.



Neste estudo, propõem-se modificar os ventiladores do aviário da cidade de Montenegro (Anexo A) usando quatro configurações disponíveis pela empresa Munters® (Anexo B) cuja síntese das informações utilizadas neste trabalho encontra-se na Tabela 3. O projeto original do aviário de Montenegro sugere o uso do EM50 com potência de 1 hp; o que proporciona maior vazão de ar, porém com maior custo e dimensões.

Tabela 3 – Vazão e diâmetros dos exaustores Munters® para aviários. Fonte: < www.munters.com.br >, acesso 16 fev. 2015.

Código Munters®	Diâmetro (m)	Vazão nominal (m³h⁻¹)	Velocidade nominal na entrada (ms⁻¹)
EM50	1,270	35.300	0,605
EM36	0,915	19.880	0,341
EM30	0,760	13.500	0,231
ED24	0,600	10.600	0,182

Note que a única diferença nas condições de contorno é a velocidade de entrada do ar, calculada a partir da vazão, e nas dimensões do diâmetro das saídas de ar. Considerando que o aviário é inteiramente vedado, pelo balanço de massa e dispondo das informações

geométricas, é possível determinar a velocidade nas entradas, conforme apresentado na última coluna da Tabela 3.

Para considerar o efeito da perda de carga no escoamento foram coletados 30 ou mais pontos das curvas de perda de carga dos ventiladores axiais Munters® (Anexo B) e os ajustes polinomiais das curvas para os exaustores EM50, EM36, EM30 e ED24 estão nas Equações (53) a (56), respectivamente.

$$Q_{EM50} = -2,3 \cdot 10^{-3} \Delta P^2 - 1,322 \cdot 10^{-1} \Delta P + 35,782 , \quad (53)$$

$$Q_{EM36} = -10^{-3} \Delta P^2 - 6,51 \cdot 10^{-2} \Delta P + 19,792 , \quad (54)$$

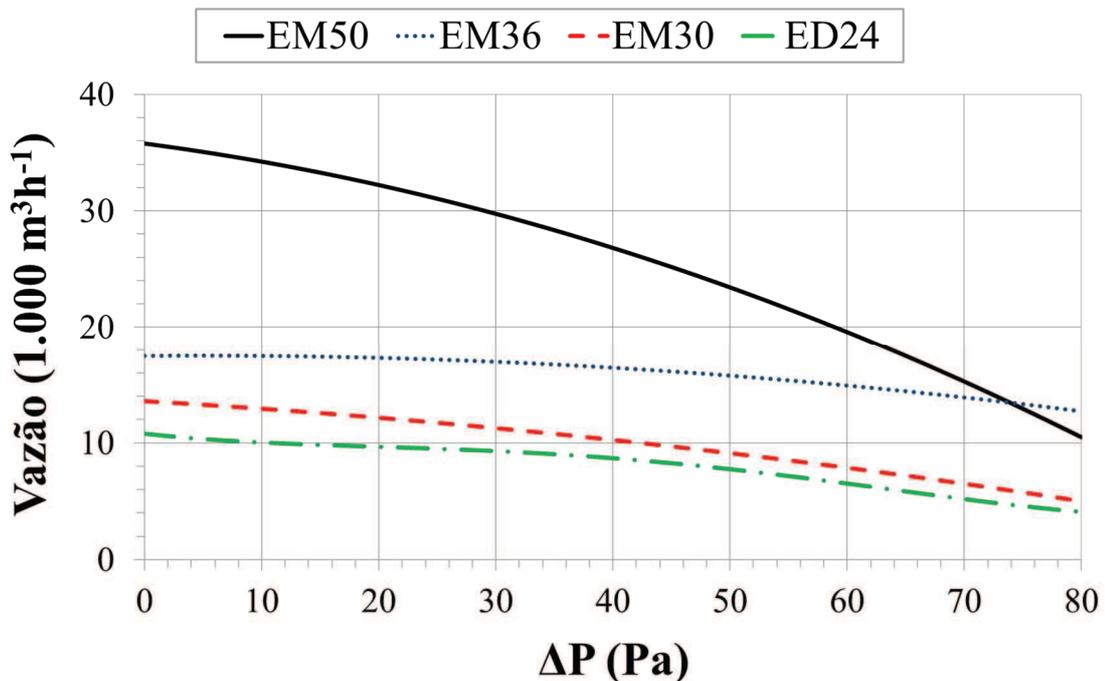
$$Q_{EM30} = -6 \cdot 10^{-4} \Delta P^2 - 5,92 \cdot 10^{-2} \Delta P + 13,583 , \quad (55)$$

$$Q_{ED24} = 6 \cdot 10^{-7} \Delta P^4 - 10^{-4} \Delta P^3 + 4,5 \cdot 10^{-3} \Delta P^2 - 1,108 \cdot 10^{-1} \Delta P + 10,792 , \quad (56)$$

onde Q é a vazão volumétrica ($1.000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$) e ΔP é a perda de carga do escoamento (Pa).

Os ajustes das equações prévias são representados na Figura 24. Todos os perfis são de segundo grau, exceto a curva para o exaustor ED24 porque a curva original possui uma inflexão e, portanto, é preciso um polinômio de grau maior.

Figura 24 – Curvas de ajuste da perda de carga dos ventiladores axiais Munters®.



CAPÍTULO 4. VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados da validação do aviário estudado por BLANES-VIDAL *et al.* (2008) aplicando três modelos turbulentos na solução do problema: k- ϵ padrão (usado pelos autores), RNG k- ϵ e k- ω para o problema cujo número de Reynolds na entrada é, aproximadamente, 212.000 (considerando ar seco na CNTP, velocidade na entrada de 4ms^{-1} e a largura da entrada, 0,81m, como a dimensão característica). Serão apresentados estudos de refino de malhas e as análises serão baseadas em: perfis de velocidade, linhas de corrente e campos turbulência. Perfis temperaturas e isotermas não são apresentados porque, apesar do problema ser não isotérmico, a temperatura predominante no domínio é a da entrada (24°C) e não há variação significativa da temperatura. Detalhes das malhas encontram-se no Apêndice A.

4.2 ESTUDO DE MALHAS

As informações das malhas numéricas para os casos estudados neste capítulo encontram-se na Tabela 4. Procurou-se conservar um fator de multiplicação de 8 da malha grosseira a refinada e o critério de convergência adotado foi $RMS \leq 10^{-5}$ para equação da energia e $RMS \leq 10^{-6}$ para as demais equações governantes.

Tabela 4 – Características numéricas do problema.

Caso	Malha	Número de elementos	Número de nós	y^+ médio	y^+ máximo	Interpolação
k- ϵ padrão	Grosseira	138.401	37.905	21	58	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	1.056.439	222.265	29	71	<i>High Resolution</i>
	Refinada	7.919.452	1.455.432	34	82	<i>High Resolution</i>
RNG k- ϵ	Grosseira	200.958	74.998	10	61	<i>Blend Factor 0,2</i>
	Intermediária	1.190.799	353.004	14	70	<i>Blend Factor 0,2</i>
	Refinada	7.783.533	1.795.297	15	70	<i>Blend Factor 0,2</i>
k- ω	Grosseira	233.238	88.061	0,79	4,60	<i>Upwind</i>
	Intermediária	1.788.464	515.175	1,25	4,91	<i>Upwind</i>
	Refinada	8.820.211	2.090.708	1,41	5,04	<i>Upwind</i>

O critério de qualidade de malha utilizado foi o *Quality* no qual o valor 1 significa um elemento com ótima qualidade e 0 um elemento degenerado. Para esse critério de qualidade de malha cada tipo de elemento possui um critério diferente, por exemplo, elementos tetraedros são avaliados por meio da razão de aspecto (Apêndice A). Histogramas com o critério *Quality* avaliado para todas as malhas para os casos com modelos turbulentos k-ε padrão, RNG k-ε e k-ω encontram-se nas Figuras 26 a 28, respectivamente.

Analisando os histogramas abaixo (Figuras 26 a 28) nota-se que para as malhas grosseiras mais de 60% dos elementos têm $Quality \geq 0,9$, enquanto que para as malhas intermediária e refinada essa razão aumenta para 74% e 86%, respectivamente. Verificou-se que para os modelos turbulentos k-ε e RNG k-ε os piores elementos encontram-se na região de transição entre as camadas prismáticas e os tetraedros, como mostra a Figura 25a. As malhas usadas no modelo turbulento k-ω apresentaram os piores elementos próximos às arestas do domínio (Figura 25b) uma vez que nessas regiões há elementos hexaédricos cuja relação entre as dimensões de base e altura são muito grandes, logo o elemento ficou deformando. Apesar disso, a maioria dos elementos apresentou qualidade superior a 1/5 o que pode ser considerado aceitável.

Figura 25 – Elementos com $Quality \leq 0,2$ para malhas grosseiras dos modelos turbulentos: RNG k-ε (a) e k-ω (b).

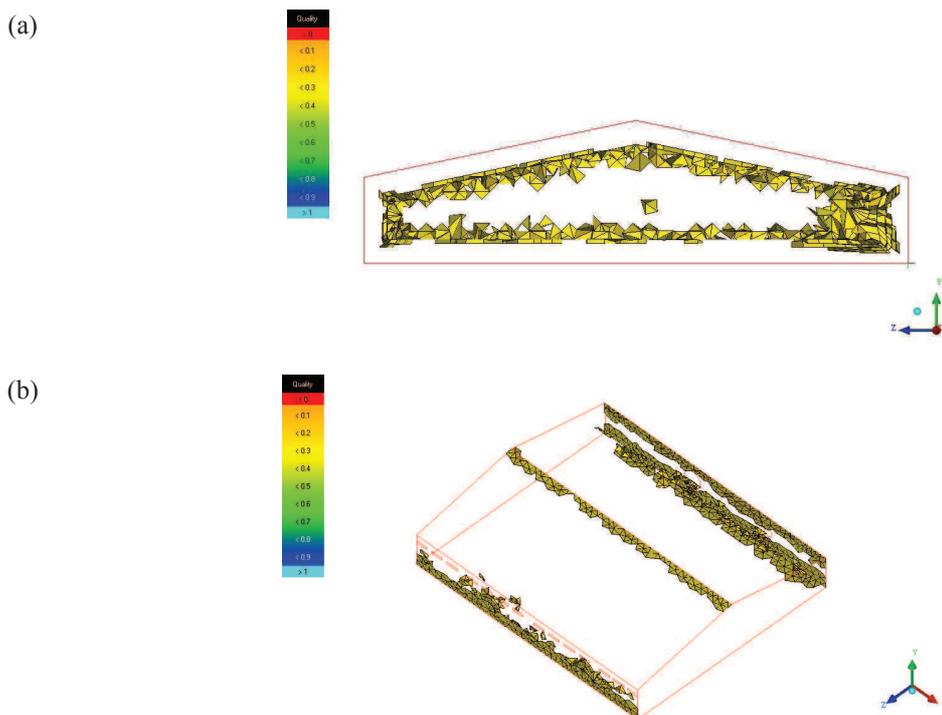


Figura 26 – Qualidade das malhas para o caso do modelo turbulento k-ε padrão: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).

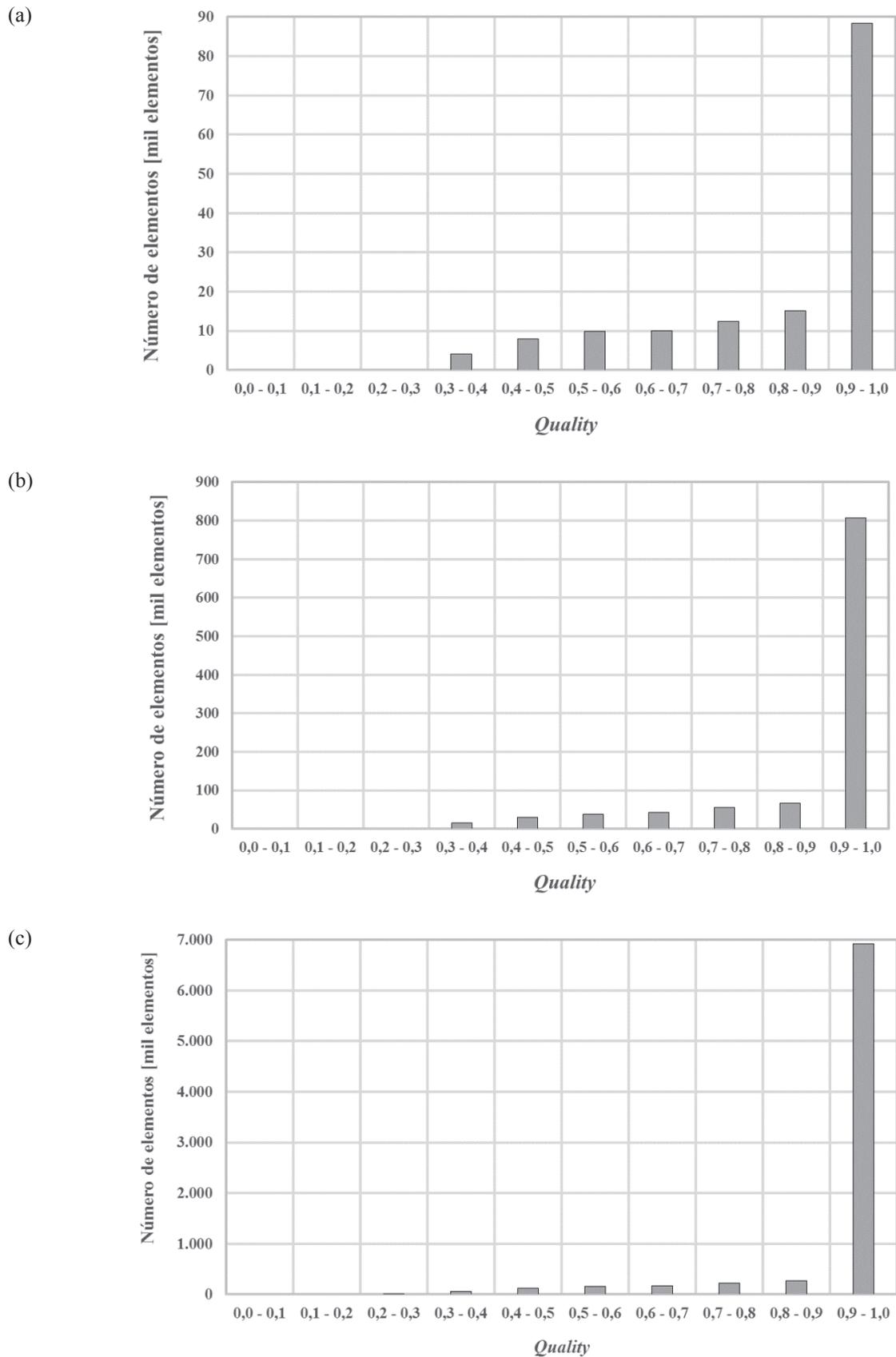


Figura 27 – Qualidade das malhas para do modelo turbulento RNG k- ϵ : malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).

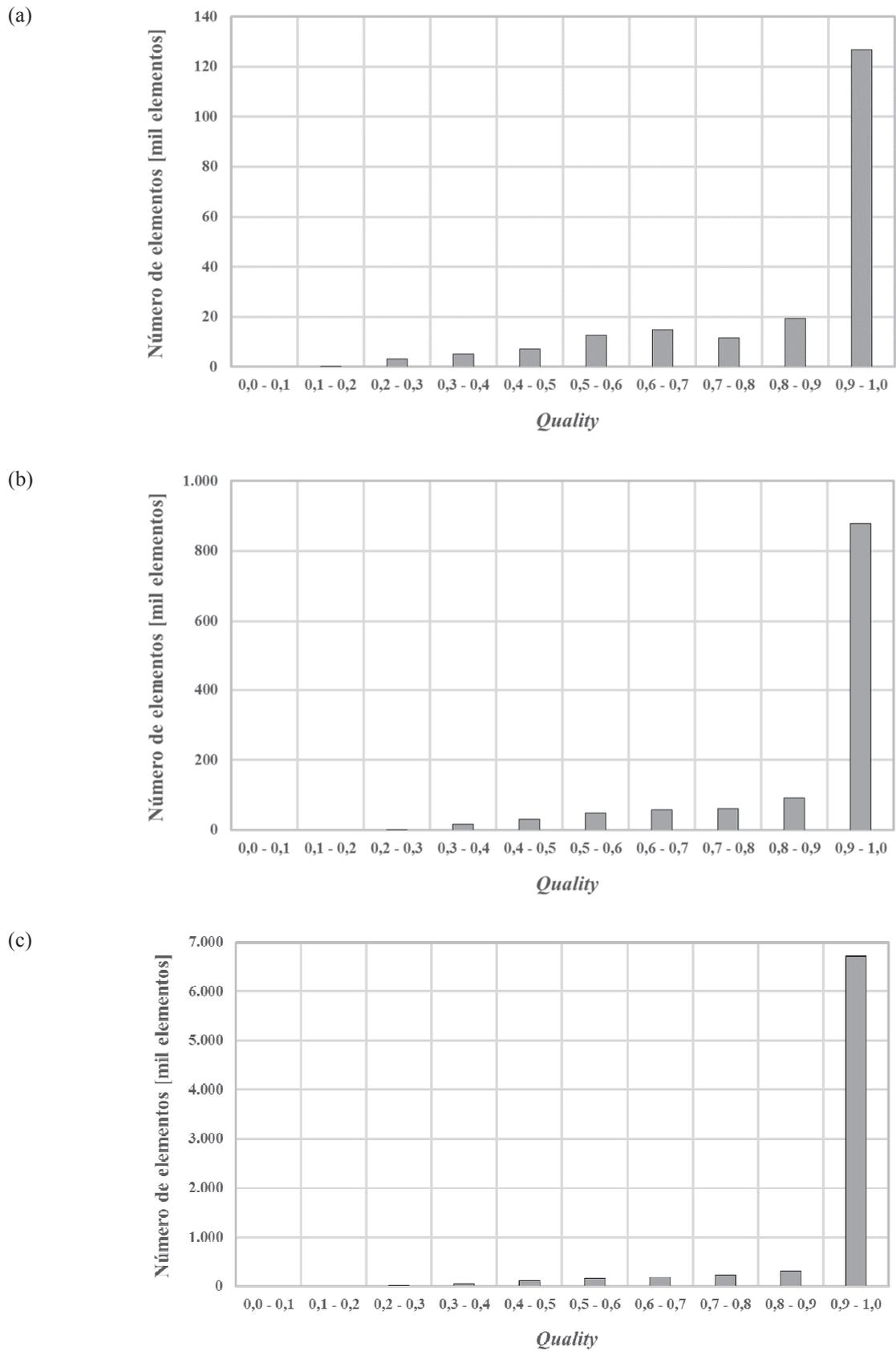
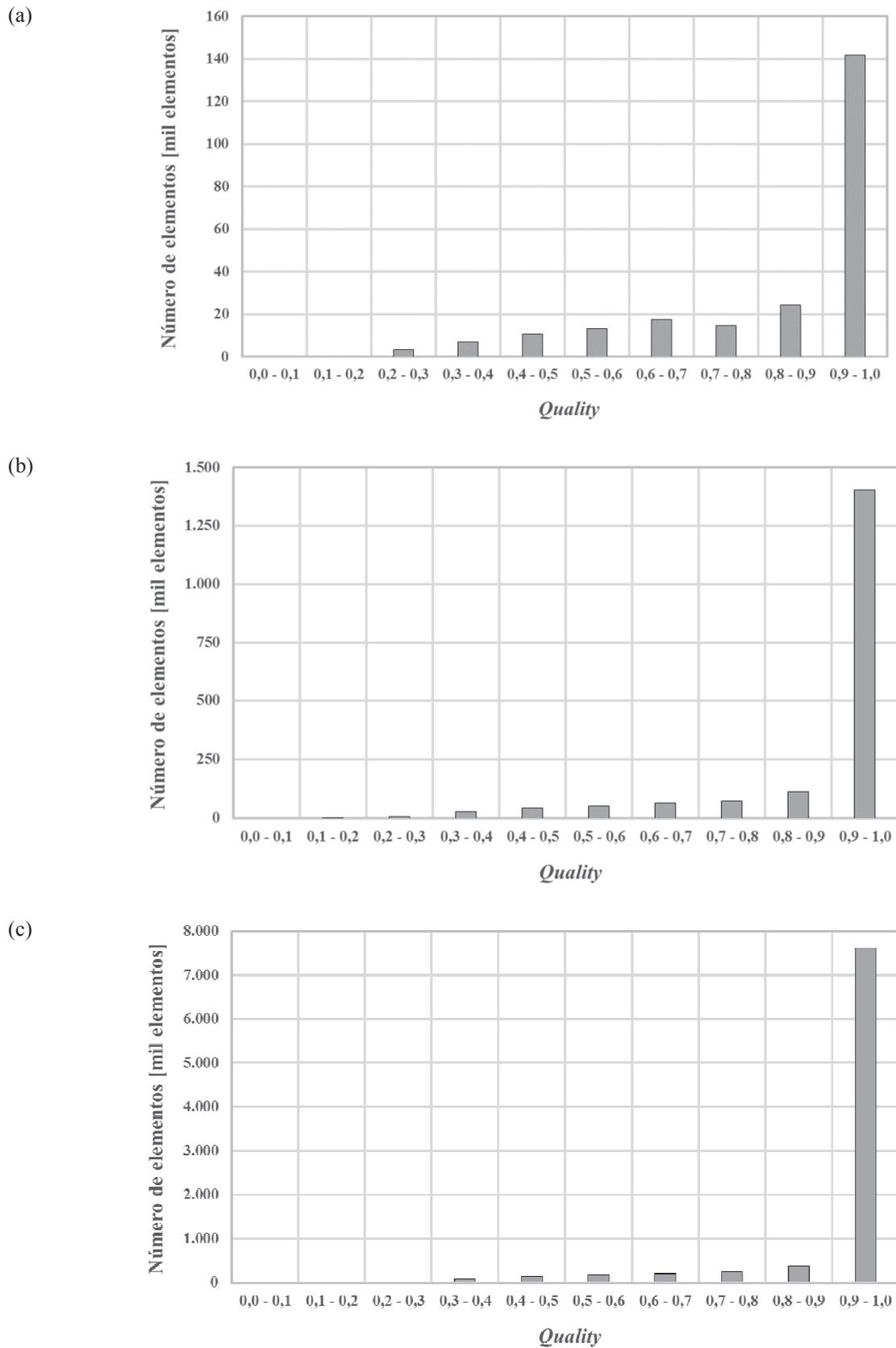


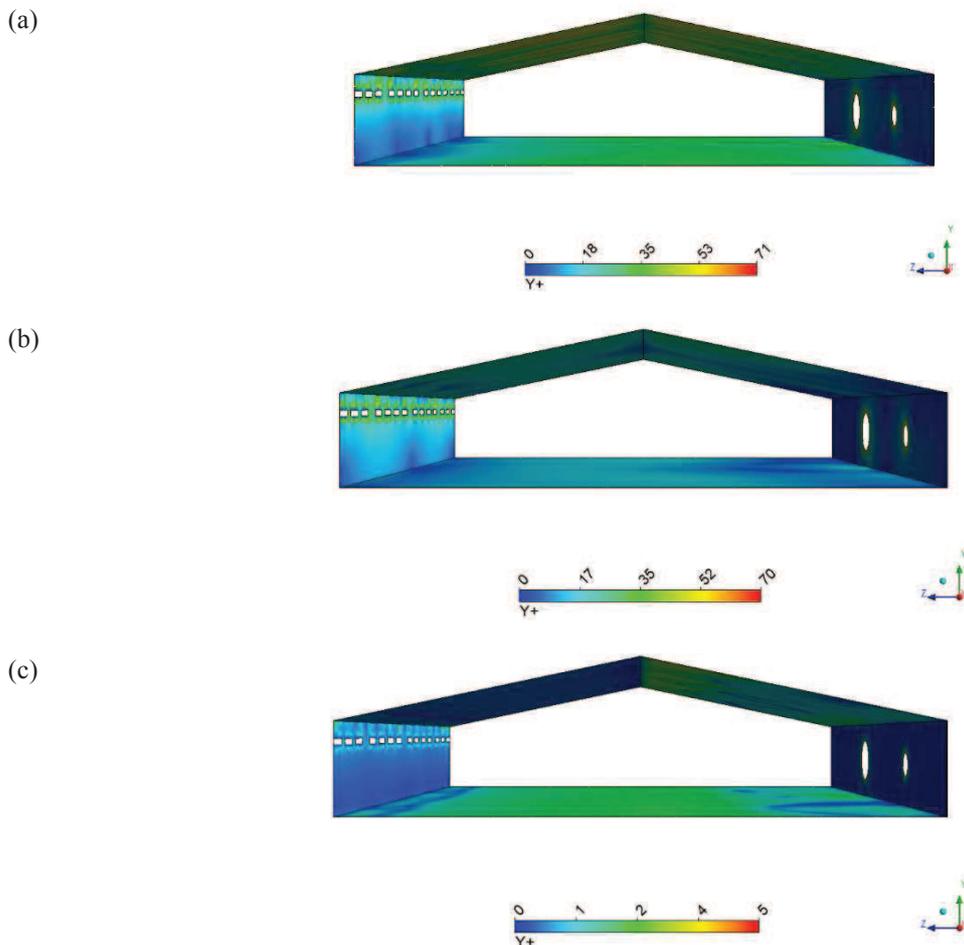
Figura 28 – Qualidade das malhas para o caso do modelo turbulento $k-\omega$: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).



Outro parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da malha foi o y^+ , função parede que é usada na solução numérica de escoamentos turbulentos. A Tabela 4 mostra que o valor da função parede aumenta com o refinamento na malha. Visto que a distância do primeiro nó a parede, y , é conservada e que o fluido é o mesmo (Equação (9)), a única explicação para variação desse valor é que malhas mais refinada resultam em velocidades maiores próximas às paredes. Campos de y^+ em todas as paredes do domínio para as malhas intermediárias são apresentados na Figura 28.

Observe na Figura 28 que, para todos os casos, o ajuste do valor de y^+ é mais complicado nas paredes nas quais se encontram as entradas e saídas do problema, uma vez que as maiores velocidades seguramente estão próximas a essas regiões. Piso e teto têm valores quase constantes. As malhas foram consideradas adequadas uma vez que os valores médio e máximo ficam dentro da faixa de valores aceitáveis para os respectivos modelos de turbulência (Tabela 1).

Figura 29 – Campos de y^+ dos modelos turbulentos: k- ϵ (a), RNG k- ϵ (a) e k- ω (b).



4.3 PERFIS VELOCIDADE E LINHAS DE CORRENTE

As Figuras 31 a 33 apresentam as verificações das malhas usando perfis de velocidade para avaliar o grau de independência de malha do problema. Os pontos selecionados referem-se aqueles escolhidos por BLANES-VIDAL *et al.* (2008), Figura 2a. Conforme esperado, as soluções das malhas grosseiras estão afastadas das malhas intermediárias que por sua vez têm soluções mais próximas das malhas refinadas, verificando a independência da malha.

A validação dos resultados, usando as malhas intermediárias, encontram-se na Figura 30. Observe que tanto para o modelo turbulento k- ϵ como para o RNG k- ϵ cerca de 22/27 pontos ficaram dentro da dispersão dos dados experimentais, já para o modelo turbulento k- ω esta razão é reduzida para 17/27. Os três modelos fizeram uma boa predição das velocidades nas posições $y=0,2m$ e $y=0,6m$. No entanto, o maior erro absoluto encontrado foi no ponto 1 da posição $y=2,0m$ (Tabela 7). Trata-se de um ponto que fica 1,5m distante da parede das entradas e aproximadamente 0,1m acima delas. Como o trabalho de BLANES-VIDAL *et al.* (2008) não informa as distâncias entre as entradas, não foi possível reduzir o erro desse ponto.

O erro absoluto em cada ponto para cada modelo turbulento nas posições $y=0,2m$, $y=0,6m$ e $y=2,0m$ encontra-se nas Tabelas 5 a 7, respectivamente. Para auxiliar o comparativo entre esses erros, foi usado o conceito do funcional S (BECK e ARNOLD, 1977) que é o somatório de todos os resíduos, erros absolutos, ao quadrado, i.e., $S = \sum_i \text{resíduo}_i^2$. Resultados do cálculo do funcional S encontram-se na Tabela 8. Analisando estes valores junto com os gráficos da Figura 30, pode-se afirmar que o modelo turbulento k- ϵ é o que melhor se ajusta para o problema analisado, seguido do modelo turbulento RNG k- ϵ e k- ω , nesta ordem.

Tabela 5 – Erro absoluto para (ms^{-1}) para os modelos turbulentos em $y=0,2m$.

Ponto	y = 0,2m		
	k- ϵ	RNG k- ϵ	k- ω
1	0,031	-0,021	0,144
2	0,004	0,041	0,195
3	-0,237	-0,145	-0,134
4	0,100	0,048	0,063
5	0,160	-0,074	0,218
6	-0,035	-0,115	-0,029
7	0,088	0,161	0,166
8	0,237	-0,222	-0,036
9	0,063	0,060	-0,014

Tabela 6 – Erro absoluto para (ms^{-1}) para os modelos turbulentos em $y=0,6\text{m}$.

Ponto	y = 0,6 m		
	k- ϵ	RNG k- ϵ	k- ω
1	0,004	-0,088	0,077
2	0,013	0,026	0,158
3	-0,017	0,090	0,042
4	0,103	0,115	-0,007
5	0,226	-0,117	0,241
6	0,013	-0,034	-0,059
7	0,014	0,126	0,115
8	0,210	-0,074	0,084
9	0,006	0,051	-0,022

Tabela 7 – Erro absoluto para (ms^{-1}) para os modelos turbulentos em $y=2,0\text{m}$.

Ponto	y = 2,0 m		
	k- ϵ	RNG k- ϵ	k- ω
1	-2,310	-2,340	-2,760
2	-0,300	-0,640	-0,690
3	0,130	0,050	-0,100
4	-0,189	-0,226	0,022
5	-0,174	0,176	-0,264
6	-0,138	-0,185	0,068
7	-0,079	0,190	-0,058
8	0,169	0,114	0,045
9	0,334	0,002	-0,155

Tabela 8 – Cálculo do funcional S (m^2s^{-2}) para os modelos turbulentos.

Modelo turbulento	Posição			S_{total}
	y = 0,2m	y = 0,6m	y = 2,0	
k- ϵ	0,162	0,107	5,674	5,943
RNG k- ϵ	0,123	0,069	6,053	6,245
k- ω	0,158	0,115	8,208	8,481

A média aritmética da velocidade nos pontos do trabalho de BLANES-VIDAL *et al.* (2008) resulta em $0,56\text{ms}^{-1}$, enquanto que nas simulações deste trabalho usando os modelos k- ϵ , RNG k- ϵ e k- ω resulta em $0,50\text{ms}^{-1}$, $0,45\text{ms}^{-1}$ e $0,46\text{ms}^{-1}$, respectivamente. Esses valores são próximos à média experimental, porém é o modelo k- ϵ o qual mais se aproxima.

Figura 30 – Comparativo dos modelos turbulentos para validação nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

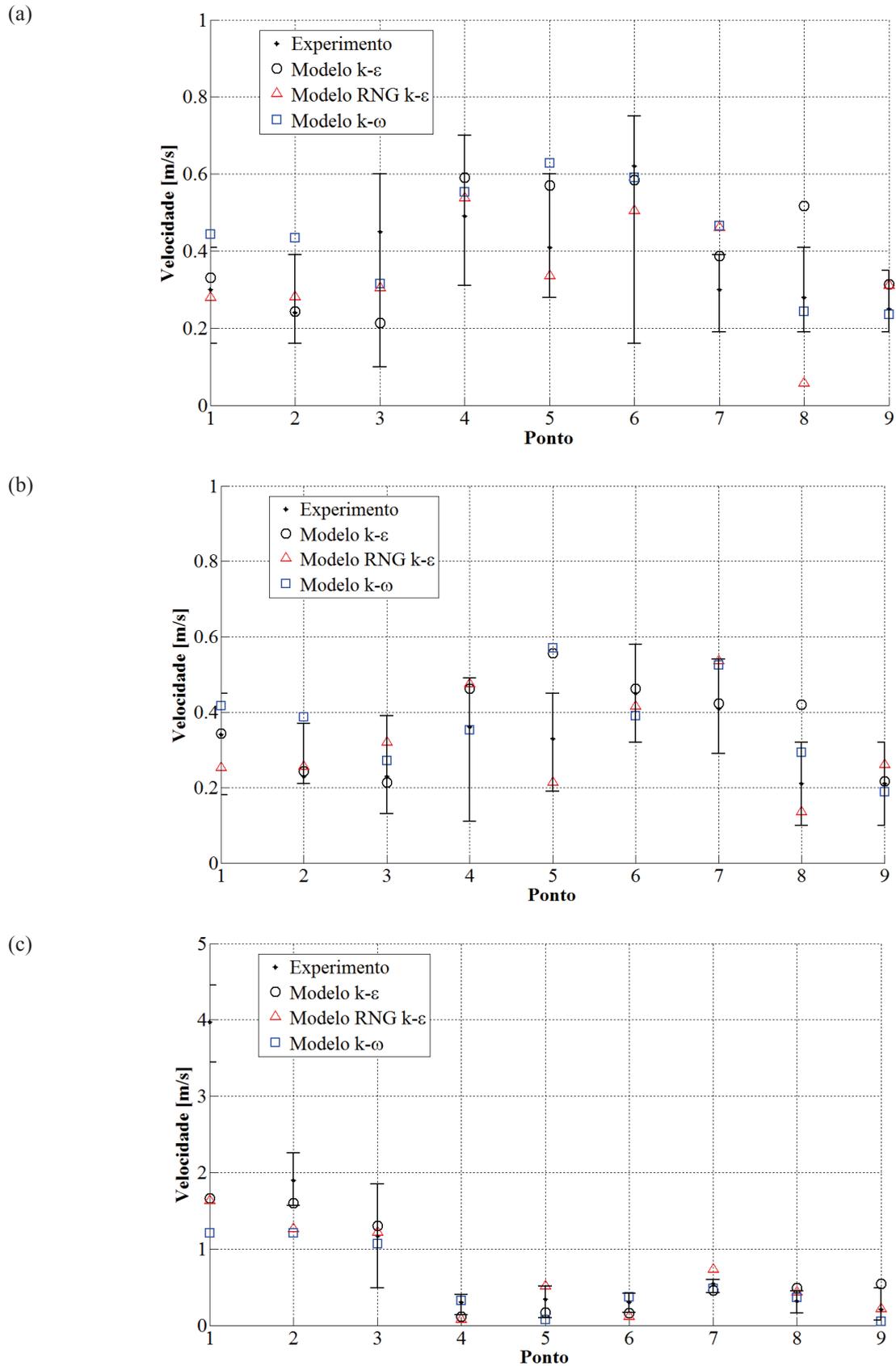


Figura 31 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para o modelo turbulento k-ε padrão nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

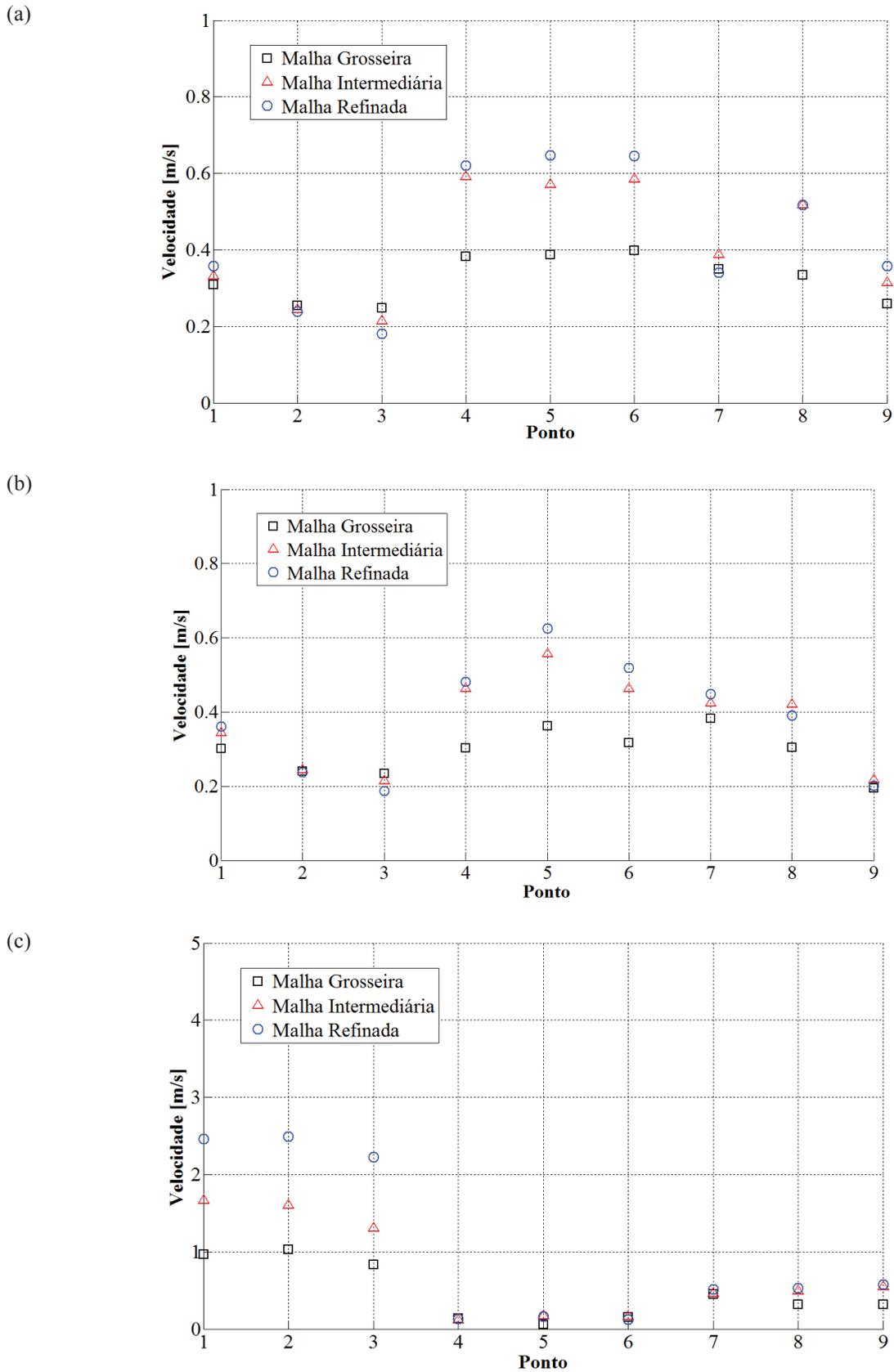


Figura 32 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para o modelo turbulento RNG k- ϵ nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

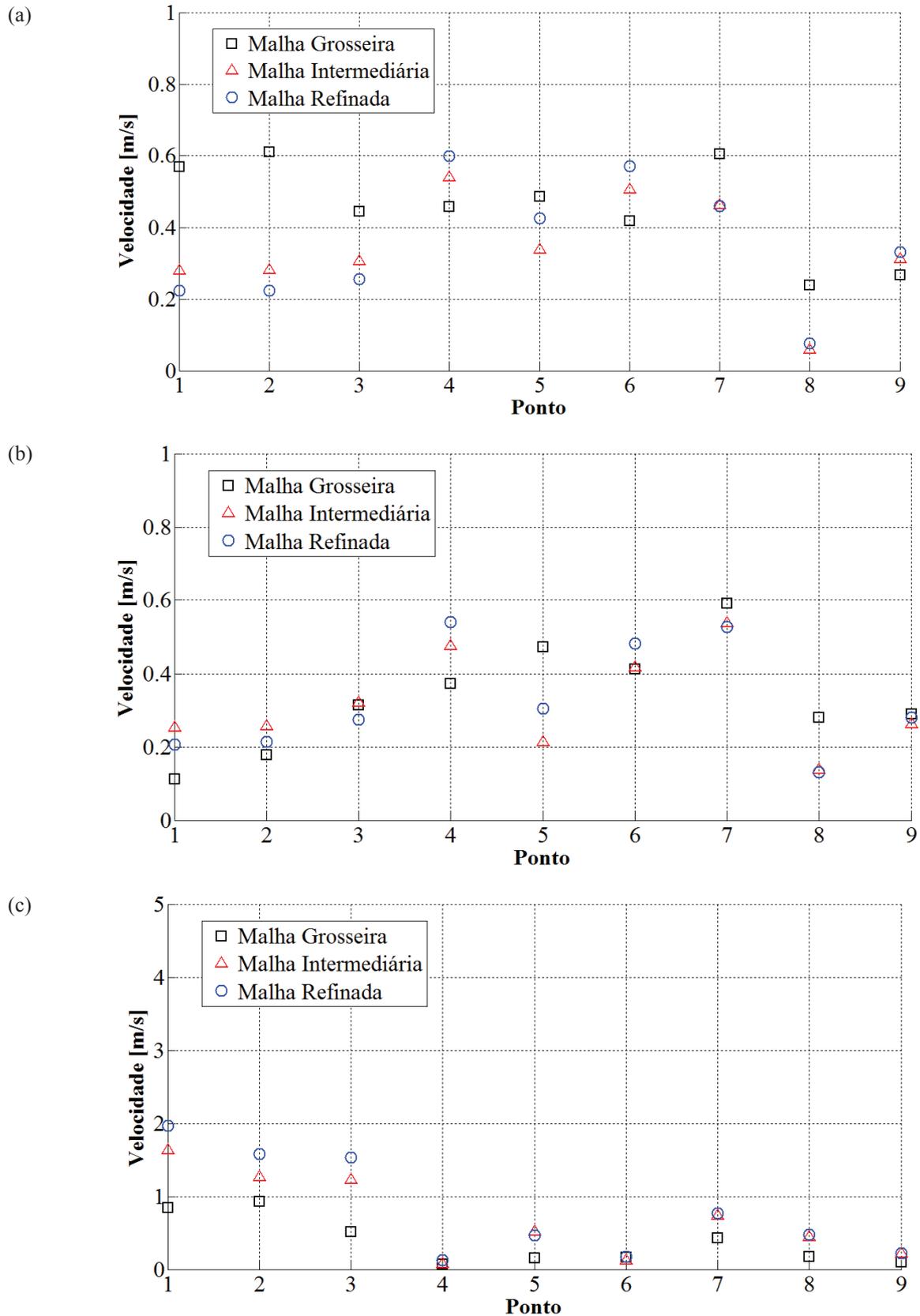
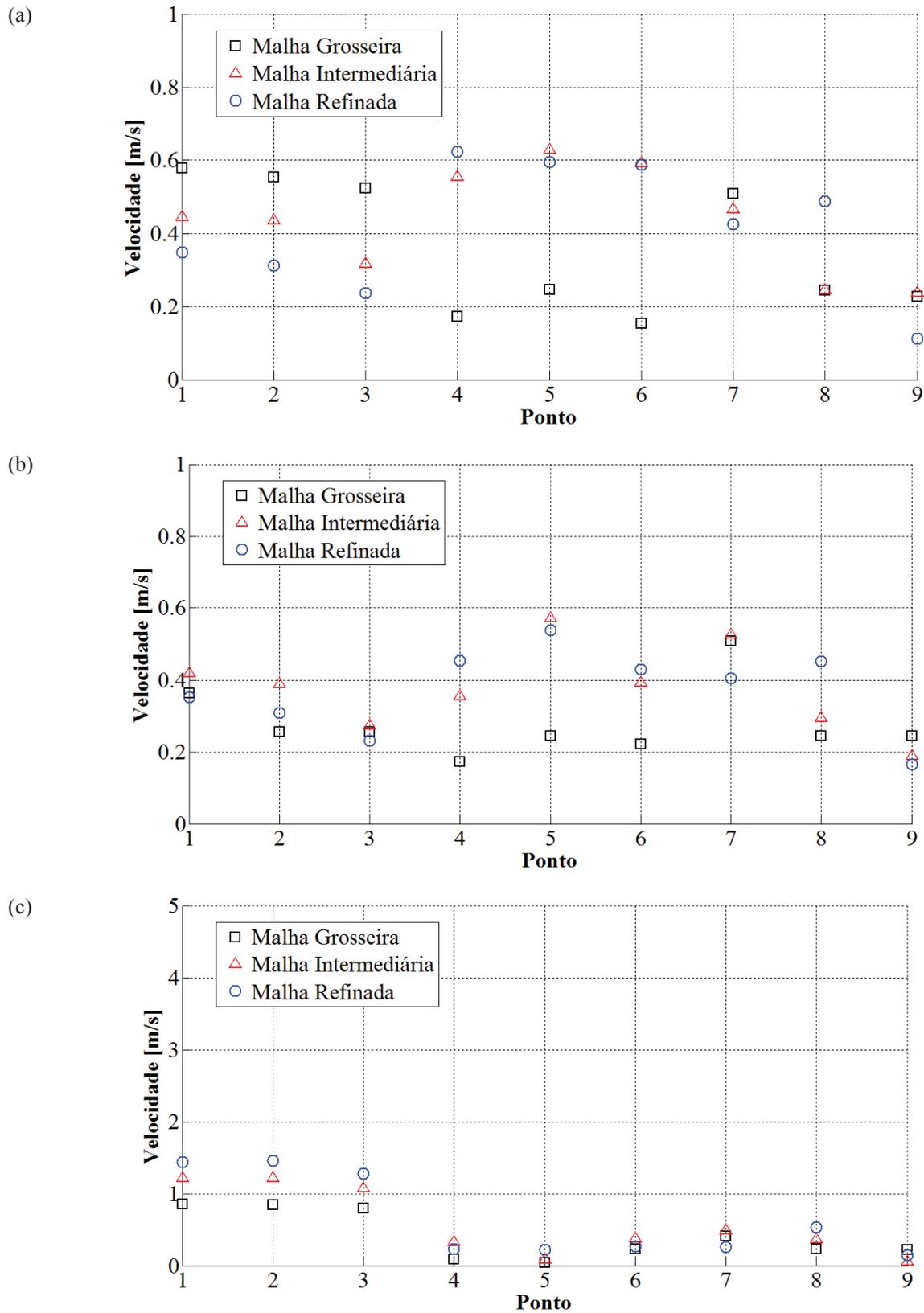


Figura 33 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para o modelo turbulento k- ω nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

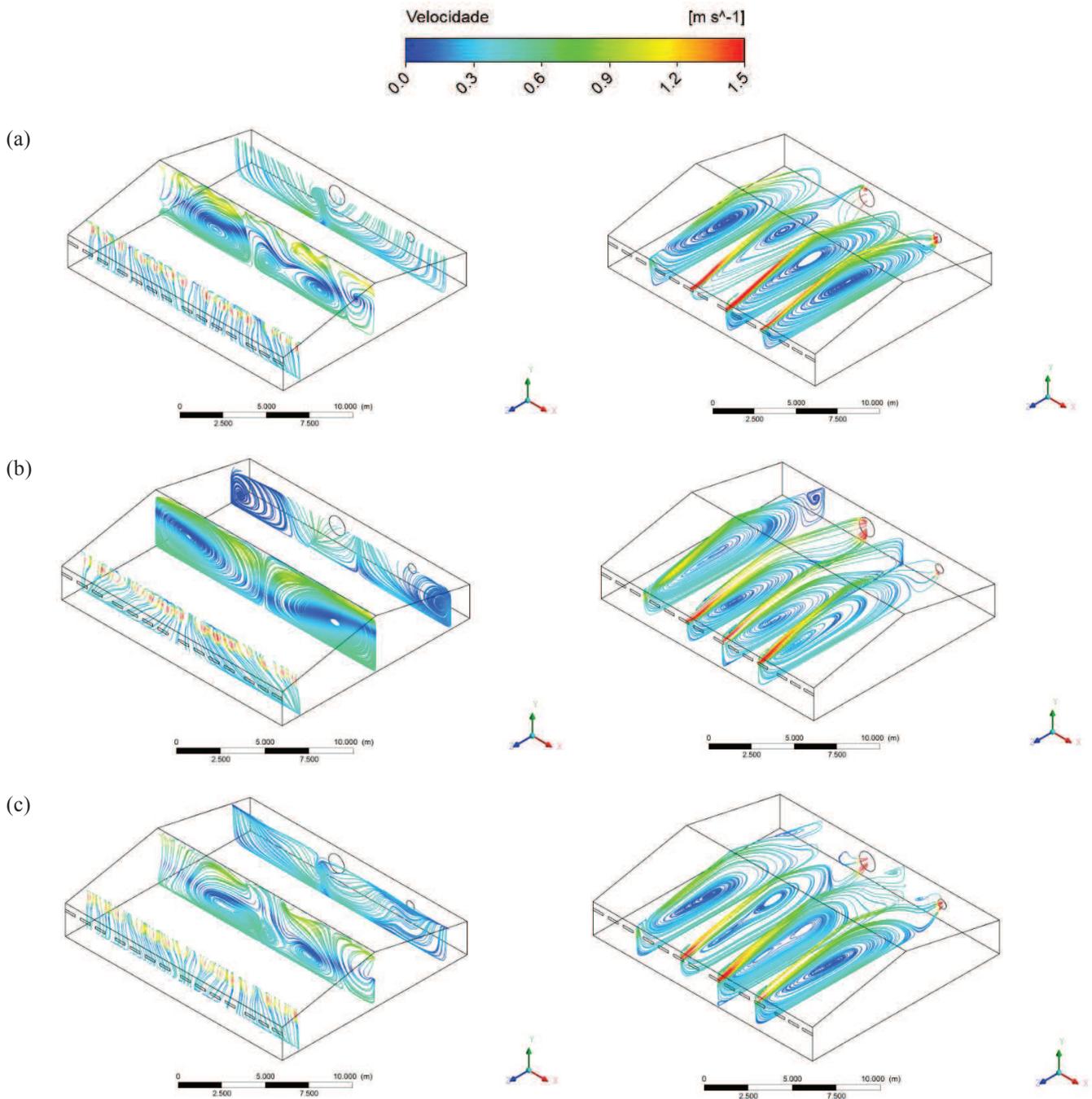


Outro ponto relevante de um escoamento são as linhas de corrente, traçadas a partir da derivada do vetor velocidade em uma direção específica. Considerando as direções z e x do aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008) foram traçadas linhas de corrente em planos que cruzam os pontos de medição (planos XY em $z=1,5m$, $z=7,5m$ e $z=13,5m$; planos YZ em $x=3,5m$, $x=7,0m$, $x=13,0m$ e $x=13,5m$), conforme pode ser visto na Figura 33 para soluções das malhas intermediárias.

Os modelos RNG k- ϵ e k- ω predizem recirculações secundárias nos planos da direção x próximas à parede da saída, enquanto que no modelo k- ϵ há apenas uma recirculação principal em cada plano (Figura 33). Em todos os casos, observou-se a formação de um jato na entrada pela ação dos exaustores. O alcance desse jato é maior no modelo k- ϵ e menor nos outros modelos.

Os planos na direção z da Figura 33 apresentam perfis diferentes de recirculação previstas, apesar de todos os modelos apresentarem recirculações secundárias próximas ao teto nos planos próximos às entradas. No plano central (em $z=W/2$) o modelo RNG k- ϵ prediz duas recirculações principais (Figura 33b), enquanto nos outros modelos aparecem somente recirculações secundárias em regiões distintas. Planos próximo às saídas mostram que os modelos RNG k- ϵ e k- ω predizem grandes regiões de estagnação do ar (zonas mortas), já no modelo k- ϵ estas regiões são praticamente inexistentes.

Figura 34 – Linhas de corrente nos planos dos pontos analisados para os modelos turbulentos: k-ε padrão (a), RNG k-ε (b) e k-ω (c).

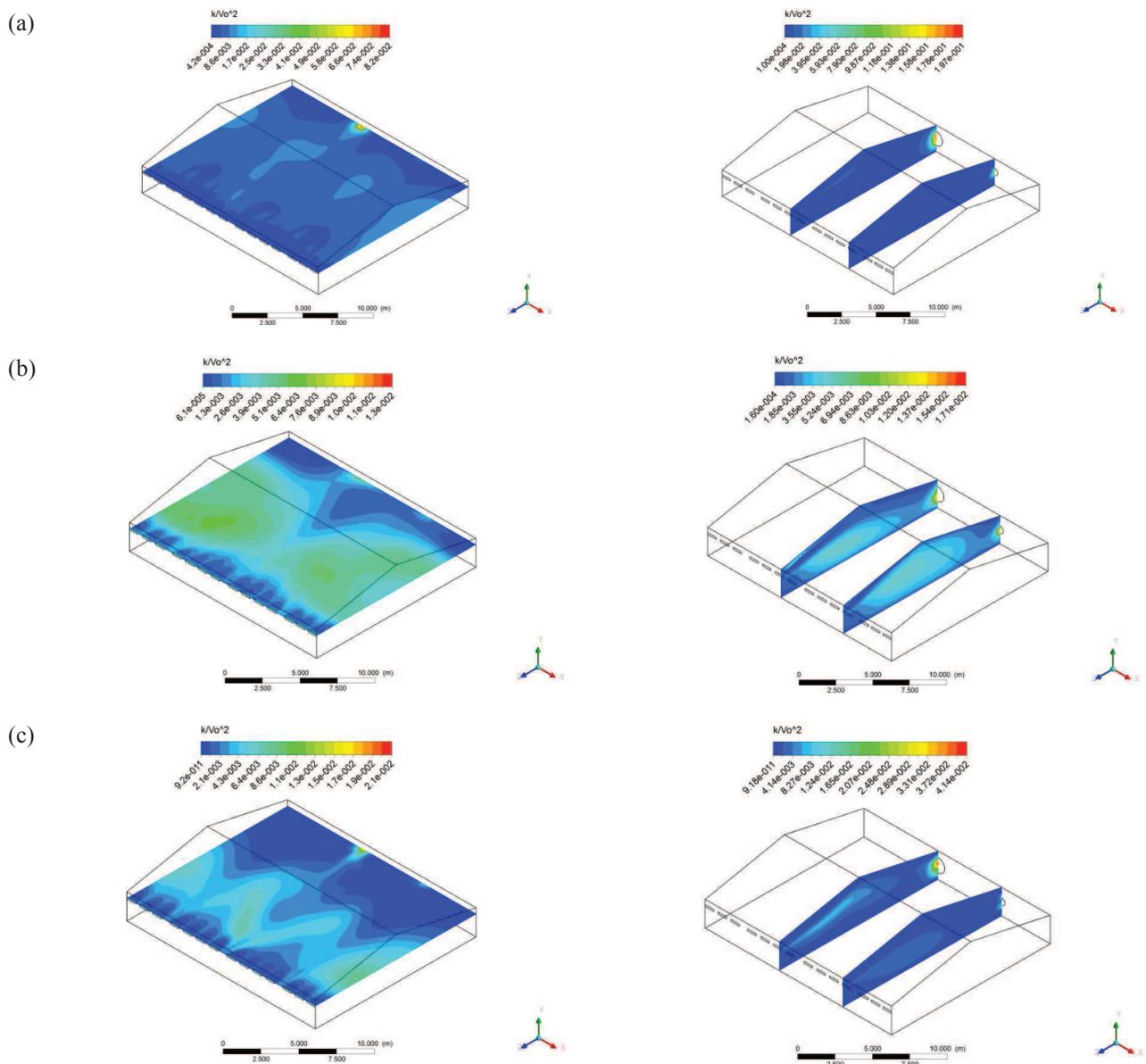


4.4 CAMPOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência foi analisada por meio do parâmetro adimensional k/V_0^2 , onde k é a energia cinética turbulenta (Equação (37)) e V_0 é a velocidade média nas entradas de ar. Foram selecionados dois planos, um que passa pela altura média das entradas de ar ($y=1,8m$)

e outro que cruza o centro dos exaustores ($x=7m$ e $x=13m$) conforme pode ser visto na Figura 35 (resultados para as malhas intermediárias). Calculando-se os valores máximos chega-se a energia cinética turbulenta de $3,15m^2s^{-2}$, $0,27m^2s^{-2}$ e $3,06m^2s^{-2}$ para os modelos turbulentos k- ϵ , RNG k- ϵ e k- ω , respectivamente, indicando que o modelo RNG k- ϵ apresentou turbulência significativamente menor que os outros modelos uma vez que ele introduz efeitos de pequenas escalas no modelo k- ϵ padrão.

Figura 35 – Parâmetro turbulento nos planos dos pontos analisados usando os modelos turbulentos: k- ϵ padrão (a), RNG k- ϵ (b) e k- ω (c).



* O valores de cada plano referem-se aos máximos e mínimos locais dos planos selecionados.

A Figura 35 mostra que nos planos $x=7m$ e $x=13m$, os quais cruzam os centros dos exaustores, as curvas de níveis para os modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ são semelhantes, exceto pelo fato do modelo $k-\omega$ não predizer grandes turbulências na saída do maior exaustor. Já no modelo turbulento RNG $k-\varepsilon$, para essas mesmas posições, aparecem curvas de níveis com valores maiores na região central do domínio.

Nos planos $y=1,8m$ (Figura 35) o único padrão observado dos três modelos são curvas de nível que identificam as 14 entradas de ar das janelas de ventilação na região da entrada. No entanto, nesse mesmo plano, há uma diferença significativa das curvas de nível no interior do domínio.

CAPÍTULO 5. VARIACÃO DO TETO NA VALIDAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados de como a variação da inclinação do teto influencia o escoamento turbulento de ar no interior do aviário estudado por BLANES-VIDAL *et al.* (2008), analisando: o refino de malhas, os campos de turbulência, perfis de velocidade e linhas de corrente. O modelo turbulento adotado neste capítulo é o modelo k-ε padrão. Detalhes das malhas encontram-se no Apêndice A.

5.2 ESTUDO DE MALHAS

As informações das malhas numéricas para os casos estudados neste capítulo encontram-se na Tabela 9. Procurou-se conservar um fator de multiplicação de 8 da malha grosseira a refinada e o critério de convergência adotado foi $RMS \leq 10^{-5}$ para equação da energia e $RMS \leq 10^{-6}$ para as demais equações governantes. As malhas para o caso com inclinação 12° (aviário original) são as mesmas do modelo turbulento k-ε padrão do Capítulo 4 e os detalhes da mesma encontram-se na Tabela 4.

Tabela 9 – Características numéricas do problema.

Caso	Malha	Número de elementos	Número de nós	y^+ médio	y^+ máximo	Interpolação
Inclinação de 6°	Grosseira	134.670	35.970	20	56	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	922.231	194.732	30	68	<i>High Resolution</i>
	Refinada	6.879.670	1.265.139	36	91	<i>High Resolution</i>
Inclinação de 24°	Grosseira	182.942	44.367	15	60	<i>Blend Factor 0,2</i>
	Intermediária	1.330.551	270.726	22	66	<i>Blend Factor 0,2</i>
	Refinada	10.078.518	1.825.426	25	77	<i>Blend Factor 0,2</i>

O critério de qualidade de malha utilizado foi o *Quality* (Apêndice A) no qual o valor 1 significa um elemento com ótima qualidade e 0 um elemento degenerado. Histogramas com o critério *Quality* avaliado para o caso com inclinação de 12° encontram-se na Figura 26 e os casos com 6° e 24° nas Figuras 36 e 37, respectivamente.

Figura 36 – Qualidade das malhas para o caso com inclinação 6°: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).

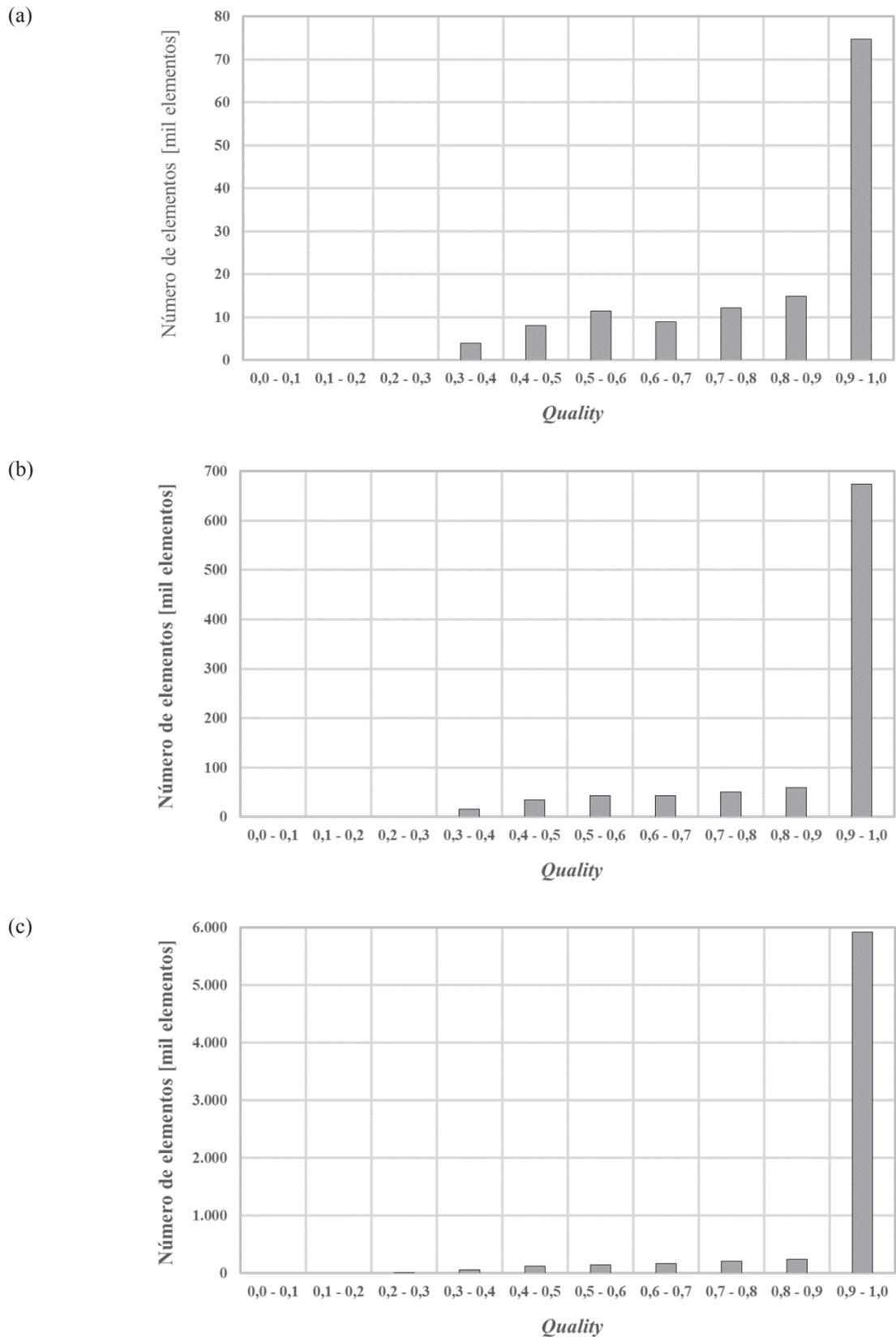
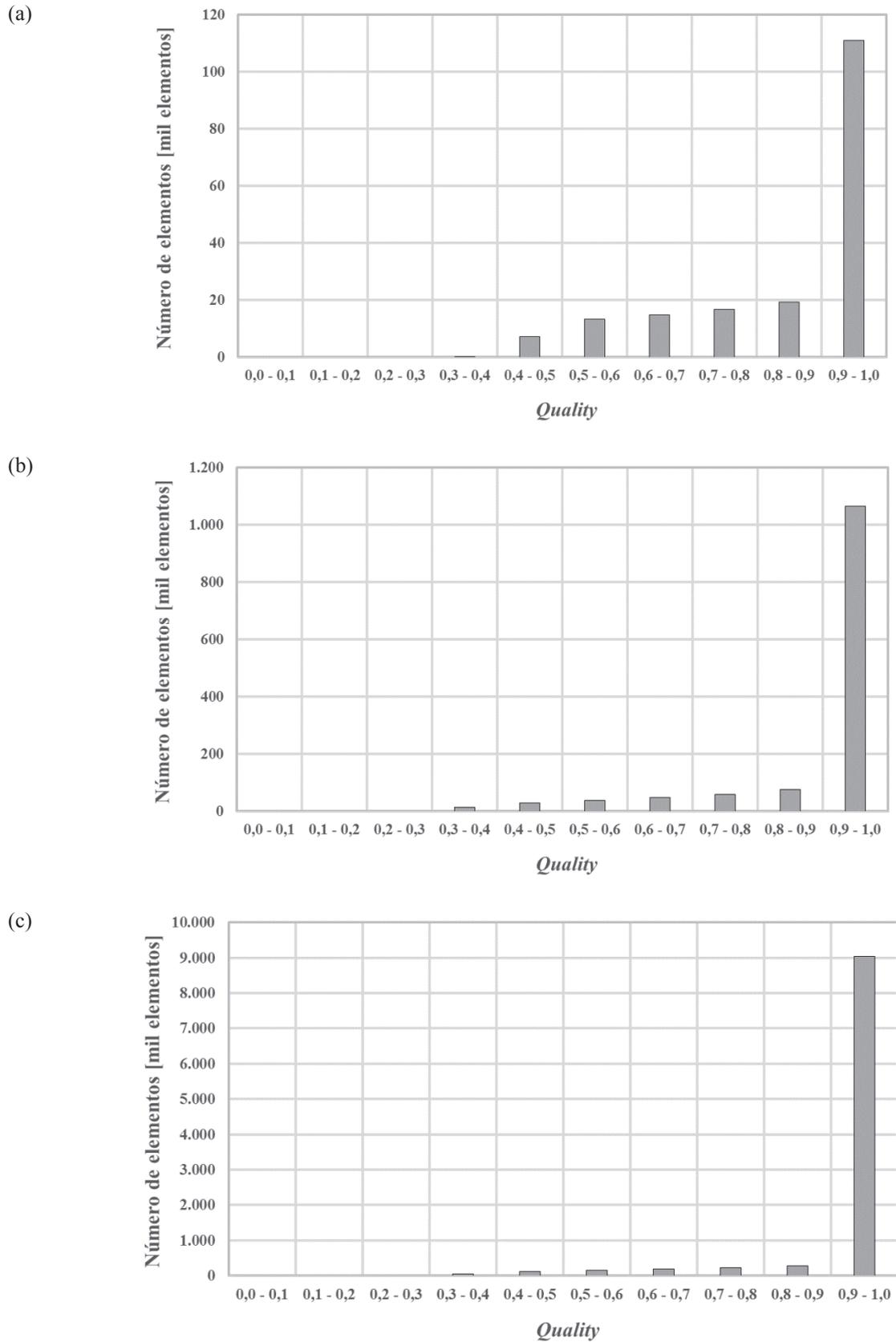
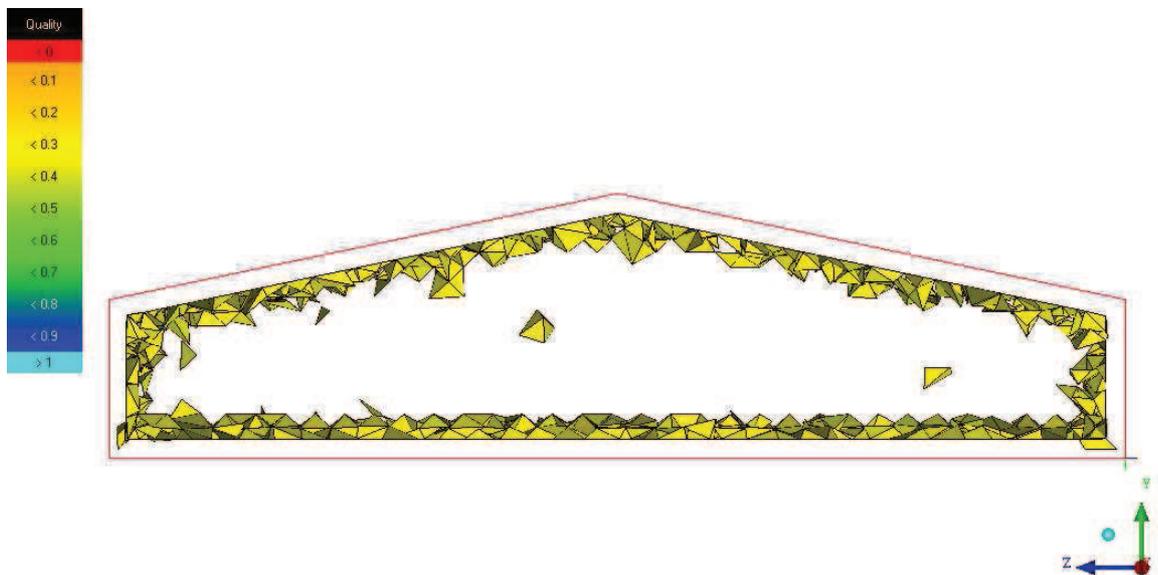


Figura 37 – Qualidade das malhas para o caso com inclinação 24°: malha grosseira (a), intermediária (b) e refinada (c).



Analisando os histogramas acima (Figuras 36 e 37) nota-se que para as malhas grosseiras mais de 56% dos elementos têm $Quality \geq 0,9$, enquanto que para as malhas intermediárias e refinadas esta razão aumenta para 73% e 86%, respectivamente. Verificou-se que para todos os casos os piores elementos encontram-se na região de transição entre as camadas prismáticas e os tetraedros, como mostra a Figura 37. Apesar disso, todos os elementos apresentaram qualidade superior a 1/5 o que pode ser considerado aceitável.

Figura 38 – Concentração dos elementos com $0,3 \leq Quality < 0,4$, para a malha grosseira com 12° de inclinação.

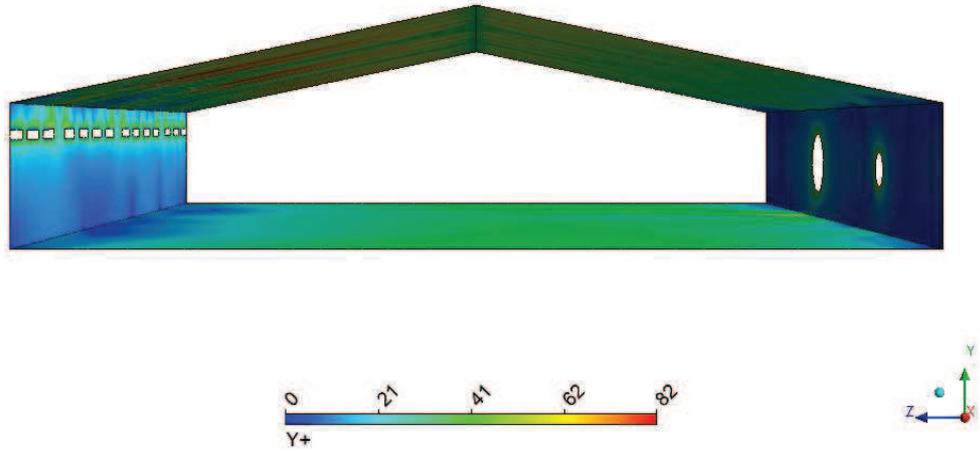


Outro parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da malha foi o y^+ . Conforme apresentado na Tabela 9, o valor da função parede aumenta com o refinamento na malha uma vez que malhas mais refinadas predizem velocidades maiores próximas às paredes. Campos de y^+ em todas as paredes do domínio para as malhas refinadas são apresentados na Figura 39.

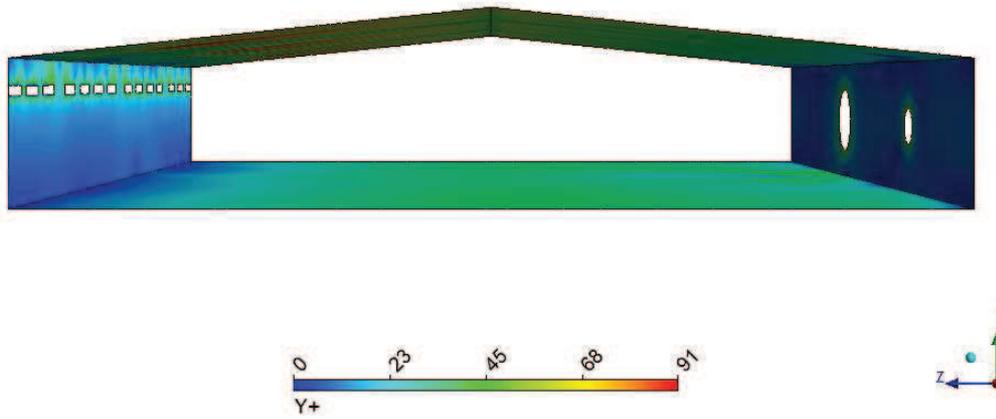
Observe na Figura 39 que em todos os casos as regiões em que o ajuste do valor de y^+ é mais complicado nas paredes aonde se encontram as entradas e saídas do problema, uma vez que as maiores velocidades estão próximas a essas regiões. Piso e teto têm valores quase constantes. Apesar da malha apresentar regiões em que y^+ fica abaixo ou próximo de 1, as malhas foram consideradas adequadas uma vez que os valores médio e máximo ficam dentro da faixa de valores aceitáveis para o modelo turbulento $k-\epsilon$ padrão (Tabela 1).

Figura 39 – Campos de y^+ para os casos: (a) 12° , (b) 6° e (c) 24° .

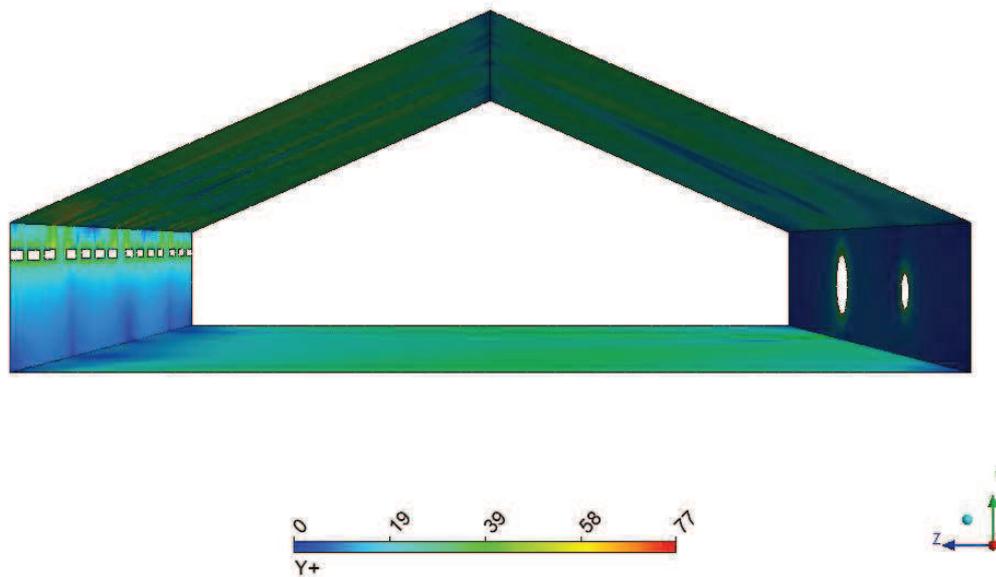
(a)



(b)



(c)



5.3 PERFIS DE VELOCIDADE E LINHAS DE CORRENTE

As Figuras 41 e 42 apresentam as verificações das malhas para os casos 6° e 24° , respectivamente, usando perfis de velocidade para avaliar o grau de independência da malha do problema. Para o caso com 12° a verificação foi feita no capítulo anterior (Figura 31). Os pontos selecionados referem-se aqueles escolhidos por BLANES-VIDAL *et al.* (2008), Figura 3a. Conforme esperado, as soluções das malhas grosseiras estão afastadas das malhas intermediárias que por sua vez têm soluções mais próximas das malhas refinadas, assim as malhas estão verificadas e não é necessário um refinamento adicional.

Para estabelecer um comparativo foram escolhidas as malhas intermediárias cujas curvas de perfis de velocidade encontram-se na Figura 40. Nota-se que a variação da inclinação do telhado tem pouca influência nos valores das velocidades nos pontos. Calculando a média aritmética da velocidade nos pontos para os casos com inclinação de 6° , 12° e 24° chega-se aos seguintes valores: $0,421 \text{ ms}^{-1}$, $0,417 \text{ ms}^{-1}$ e $0,384 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. Portanto, é possível afirmar que para inclinações entre 6° e 12° os valores das velocidades são mais próximos e maiores que para uma inclinação de 24° . Reduzir a inclinação de um telhado de um aviário implica, necessariamente, um menor volume de ar que os exaustores devem renovar e, assim, as velocidades serão conseqüentemente maiores.

Considerando as direções z e x do aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008) foram traçadas linhas de corrente em planos que cruzam os pontos de medição (planos XY em $z=1,5m$, $z=7,5m$ e $z=13,5m$; planos YZ em $x=3,5m$, $x=7,0m$, $x=13,0m$ e $x=13,5m$), conforme pode ser visto na Figura 43 para soluções das malhas refinadas.

Todos os planos na direção x da Figura 43 apresentam uma recirculação principal aproximadamente na mesma posição na medida em que se desloca de uma região de simetria (em $x=0$) a outra (em $x=L$). Além disso, é possível perceber a formação de um jato na entrada devido a ação dos exaustores. O alcance do jato fica mais próximo às entradas a medida que a inclinação do telhado aumenta, i.e., o alcance do jato diminui com o aumento da inclinação do telhado.

Os planos na direção z da Figura 43 também apresentam perfis semelhantes de recirculação previstas. Nota-se diversas recirculações secundárias próximas ao teto para todos os casos nos planos próximos às entradas. No plano central (em $z=W/2$) surge recirculações principais no escoamento que ficam próximas ao piso. Planos próximos às saídas praticamente não apresentam recirculação alguma.

Figura 40 – Comparativo das inclinações do teto nas alturas $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

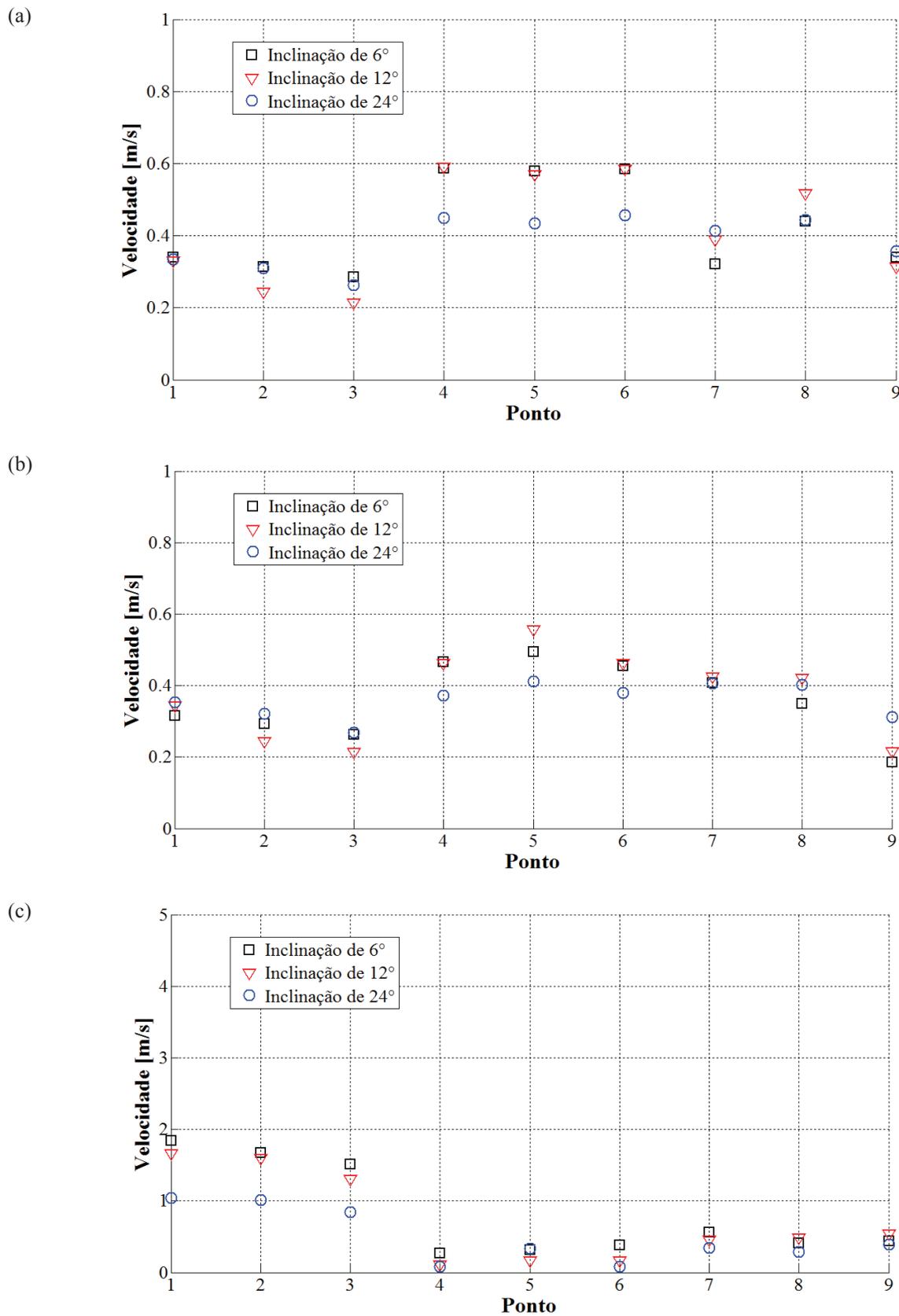


Figura 41 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para inclinação de 6° nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

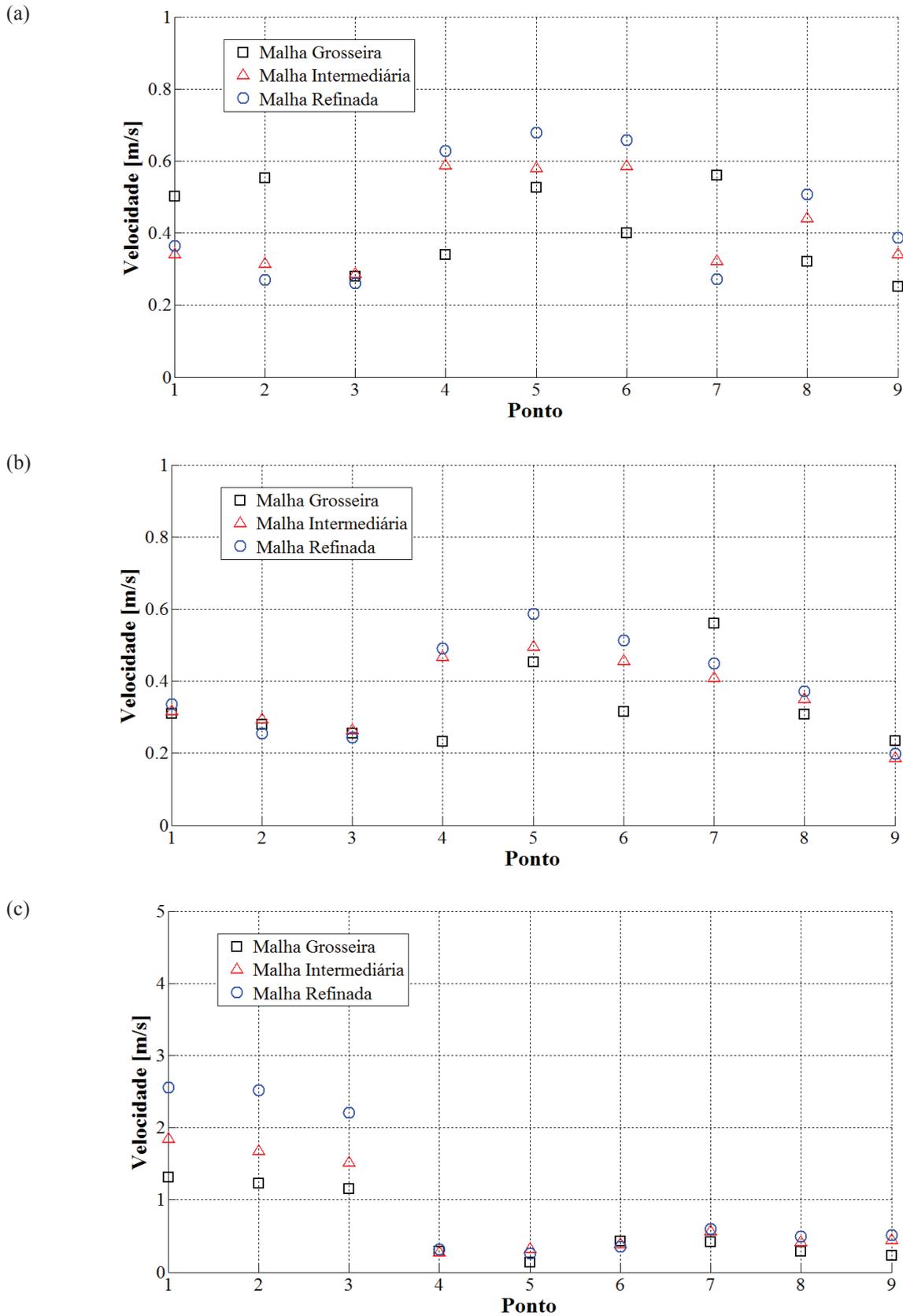


Figura 42 – Perfis de velocidade: verificação das malhas para inclinação de 24° nas posições: $y=0,2\text{m}$ (a), $y=0,6\text{m}$ (b) e $y=2,0\text{m}$ (c).

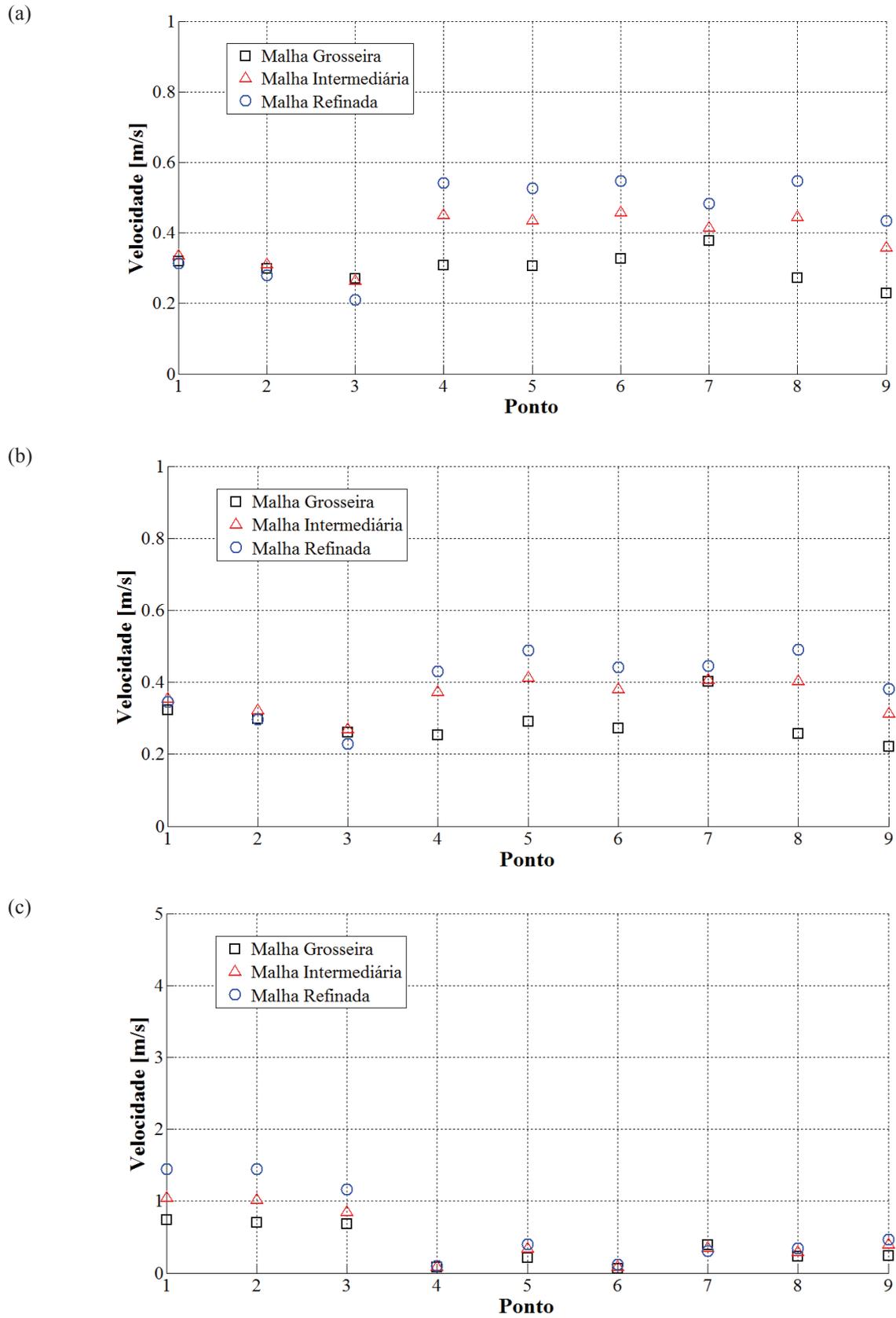
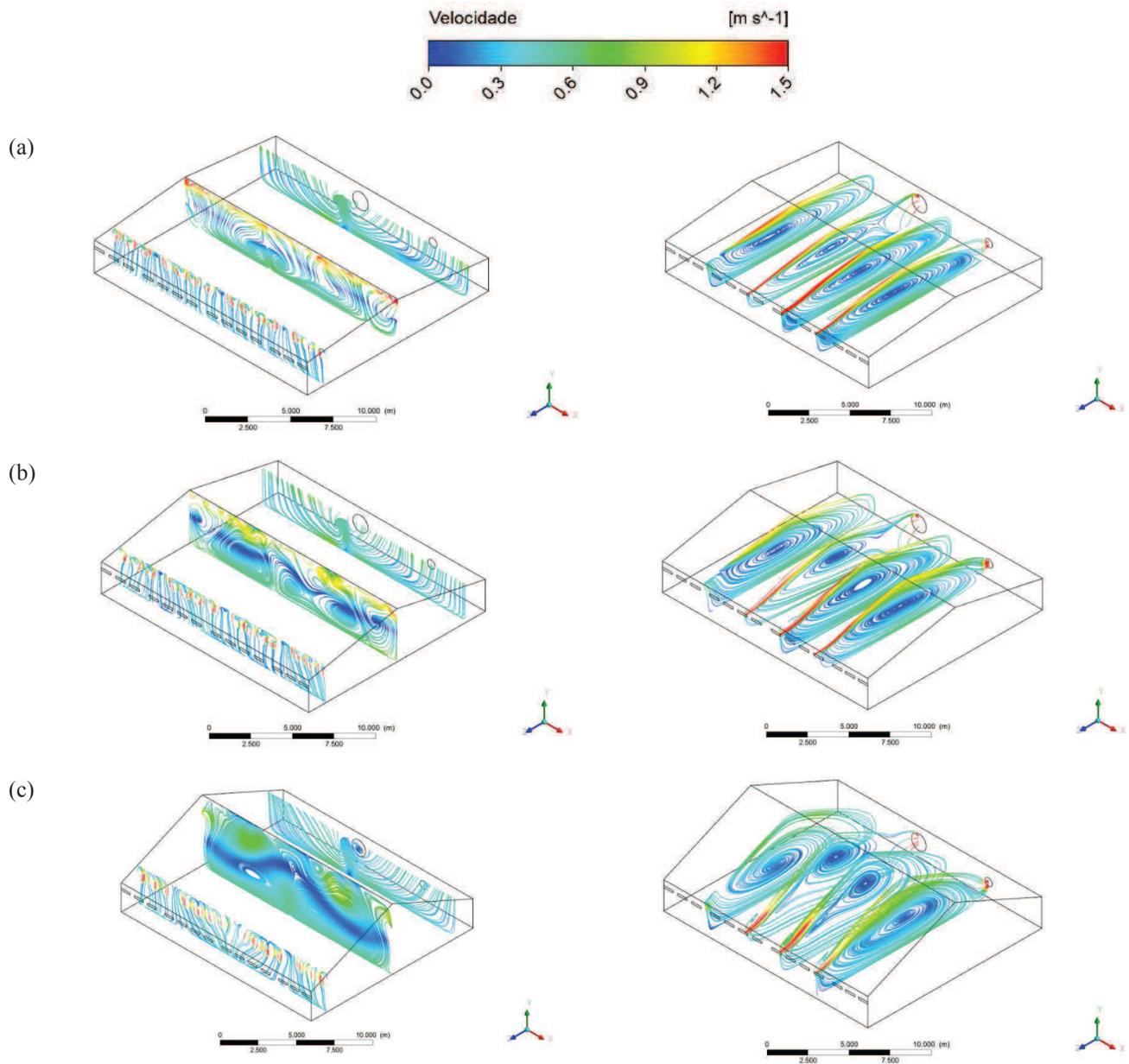


Figura 43 – Linhas de corrente nos planos dos pontos analisados para os casos: inclinação 6° (a), inclinação 12° (b) e inclinação 24° (c).

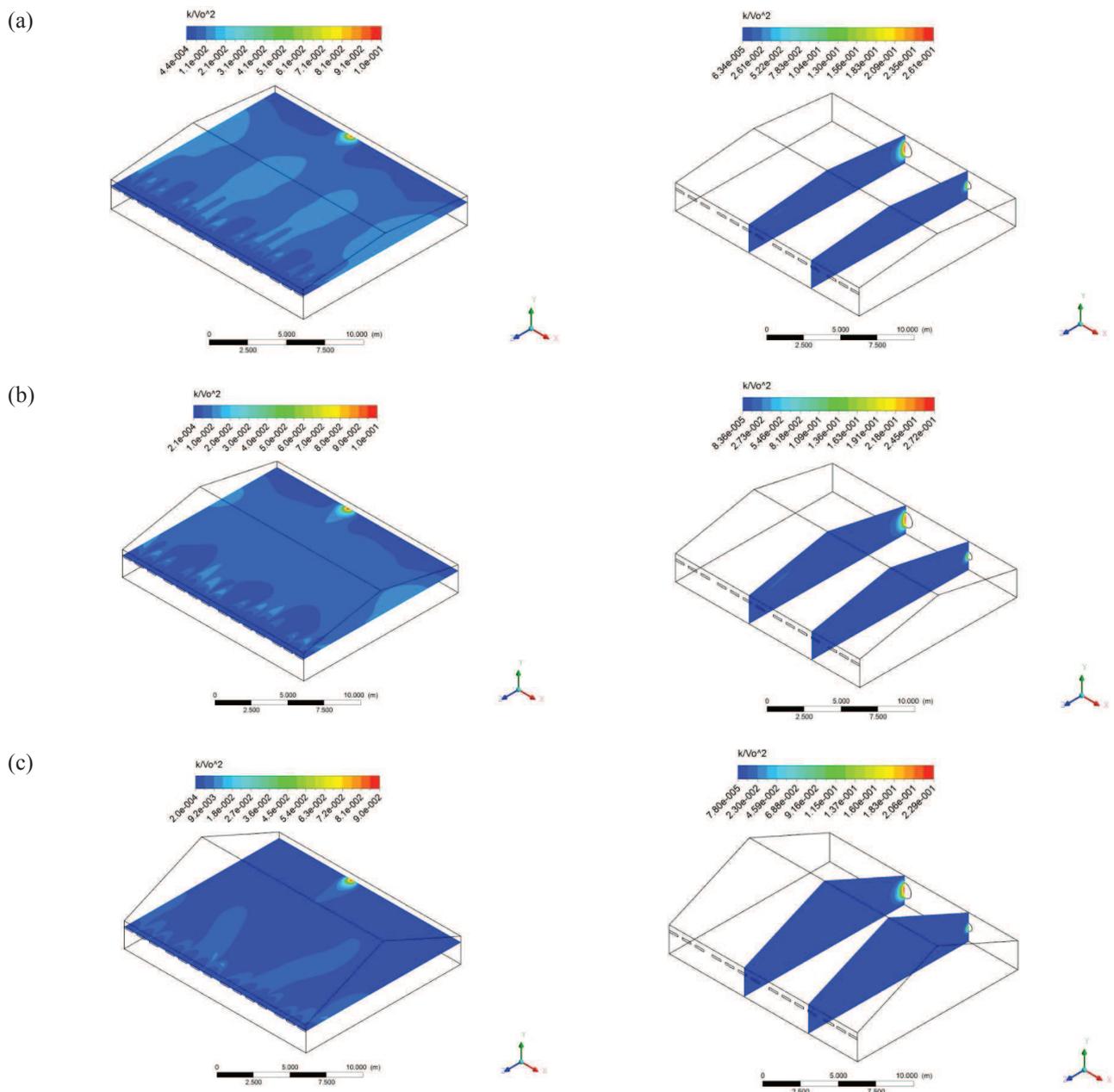


5.4 CAMPOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência foi analisada por meio do parâmetro adimensional k/V_0^2 , onde k é a energia cinética turbulenta (Equação (37)) e V_0 é a velocidade média nas entradas de ar. Foram selecionados dois planos, um que passa pela altura média das entradas de ar ($y=1,8m$) e outro que cruza o centro dos exaustores ($x=7m$ e $x=13m$) conforme pode ser visto na Figura 44 (resultados para as malhas refinadas). Estes resultados sugerem que a maior intensidade da

turbulência encontra-se próximo aos exaustores, o que é coerente uma vez que as velocidades naquela região (e portando a flutuação da velocidade) são as maiores de todo o domínio. Calculando-se os valores máximos chega-se a energia cinética turbulenta de $4,18\text{m}^2\text{s}^{-2}$, $4,35\text{m}^2\text{s}^{-2}$ e $4,18\text{m}^2\text{s}^{-2}$ para os casos com inclinação de 6° , 12° e 24° , respectivamente, indicando que com a inclinação de 12° o escoamento turbulento é maior na região do exaustor.

Figura 44 – Parâmetro turbulento nos planos dos pontos analisados para os casos: inclinação 6° (a), inclinação 12° (b) e inclinação 24° (c).



* O valores de cada plano referem-se aos máximos e mínimos locais dos planos selecionados.

Analisando a Figura 44 observa-se, ainda, que nos planos $x=7m$ e $x=13m$, os quais cruzam os centros dos exaustores, as curvas de níveis dos três casos são praticamente idênticas, exceto por uma pequena região próxima à entrada no plano $x=7m$ onde a turbulência aumenta ligeiramente e cai a medida que a inclinação do telhado aumenta.

Nos planos $y=1,8m$ (Figura 44) dos três casos é possível reparar nitidamente as curvas de nível que identificam as 14 entradas de ar das janelas de ventilação na região da entrada. No entanto, nesse mesmo plano, há uma diferença significativa das curvas de nível no interior do domínio as quais diminuem de intensidade na medida em que a inclinação do telhado aumenta.

CAPÍTULO 6. ESTUDO DA APLICAÇÃO DE DEFLETORES EM AVIÁRIOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados de soluções numéricas para o aviário localizado na cidade de Montenegro (RS). Foi estudada a aplicação de defletores no teto, uma inclinação do teto inferior ao aviário original e a aplicação de forro. Para isto, foram analisados: o refino de malhas, os perfis de velocidade e temperatura, as linhas de corrente, os campos vetoriais de velocidade, as isotermas, os campos de turbulência e as isobáricas. Para todos os casos, foi inserida a perda de carga do escoamento para o exaustor Munters® EM50 (Figura 24). O modelo turbulento aplicado neste capítulo é o modelo k-ε padrão. Detalhes das malhas encontram-se no Apêndice A. Plantas do aviário da cidade de Montenegro (RS) e especificações técnicas do exaustor Munters® EM50 encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

6.2 ESTUDO DE MALHAS

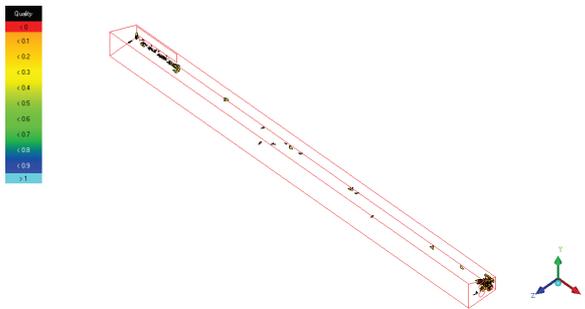
As informações das malhas numéricas para os casos estudados neste capítulo encontram-se na Tabela 10. Procurou-se conservar um fator de multiplicação de 8 da malha grosseira a refinada e o critério de convergência adotado foi um erro máximo de 10^{-4} para todas as equações governantes, resultando em um $RMS < 10^{-5}$. Os casos estudados neste capítulo foram vistos no final do Capítulo 3, Figura 22.

O critério de qualidade de malha utilizado foi o *Quality* (Apêndice A). Histogramas com o critério *Quality* avaliando os casos não serão apresentados uma vez que eles têm aspecto muito semelhante àqueles apresentados nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho. Foi observado que as malhas grosseiras apresentaram mais de 45% dos elementos com $Quality \geq 0,8$, enquanto que nas malhas intermediárias e refinadas esta razão aumenta para 60% e 78%, respectivamente.

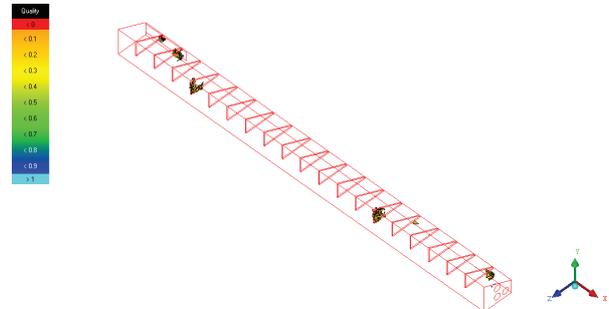
Verificou-se que para todos os casos os piores elementos encontram-se na região de transição entre as camadas prismáticas e os tetraedros, como mostra a Figura 45. No caso da aplicação de defletores, foi observado concentração de piores elementos próximos aos defletores. Apesar disso, praticamente todos os elementos (mais de 99% para todos os casos) apresentaram qualidade superior a 1/5 o que pode ser considerado aceitável.

Tabela 10 – Características numéricas do problema.

Caso	Malha	Número de elementos	Número de nós	y^+ médio	y^+ máximo	Interpolação
Inclinação de 24° (original)	Grosseira	102.848	39.344	51	117	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	761.629	191.104	52	114	<i>Blend Factor 0,5</i>
	Refinada	5.879.906	1.152.674	54	117	<i>Blend Factor 0,5</i>
Defletor	Grosseira	320.948	114.258	41	105	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	1.028.232	344.090	43	117	<i>High Resolution</i>
	Refinada	7.070.139	1.691.899	42	121	<i>Blend Factor 0,5</i>
Inclinação de 6°	Grosseira	122.476	42.848	44	117	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	935.328	220.508	45	117	<i>Blend Factor 0,5</i>
	Refinada	7.394.880	1.414.208	49	141	<i>Blend Factor 0,5</i>
Forro	Grosseira	117.039	39.866	52	122	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	966.430	224.685	59	157	<i>High Resolution</i>
	Refinada	7.646.347	1.457.640	62	147	<i>High Resolution</i>

Figura 45 – Concentração dos elementos com $Quality \leq 0,2$, para as malhas grosseiras.

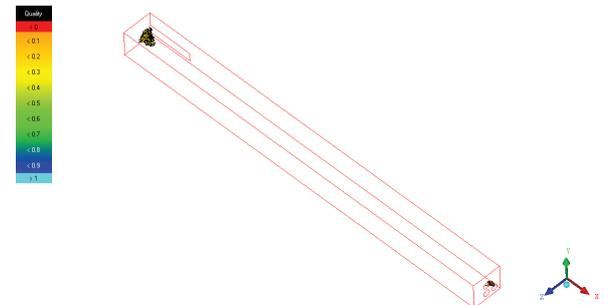
(a) Inclinação 24°



(b) Defletor

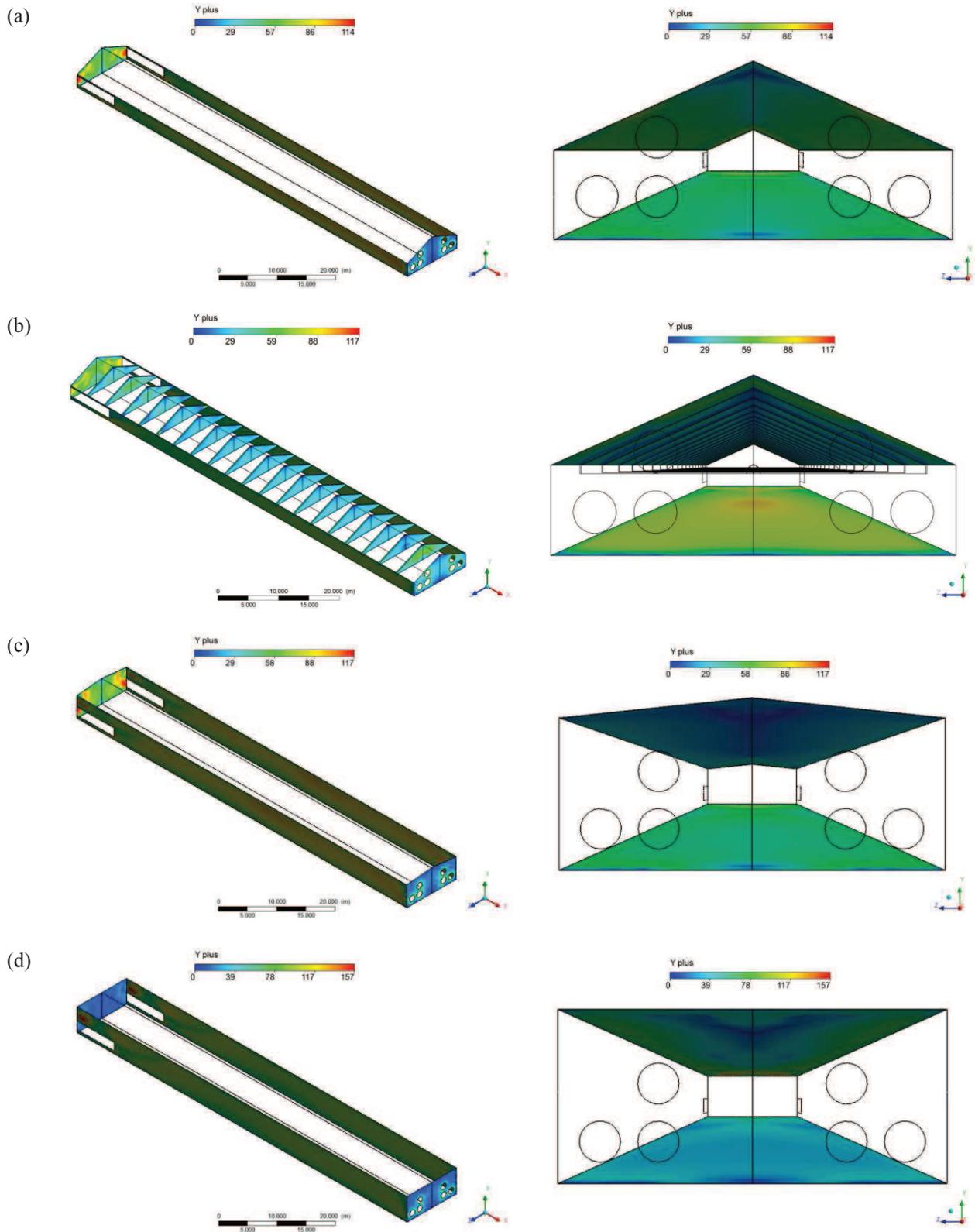


(c) Inclinação 6°



(d) Forro

Figura 46 – Campos de y^+ para os casos: inclinação de 24° (a), defletor (b), inclinação de 6° (c) e forro (d).



Outro parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da malha foi o y^+ . Conforme apresentado na Tabela 10, o valor da função parede aumenta com o refinamento na malha uma vez que malhas mais refinadas predizem velocidades maiores próximas às paredes.

Campos de y^+ em todas as paredes do domínio para as malhas intermediárias são apresentados na Figura 46. Observou-se que as regiões em que o ajuste do valor de y^+ é mais complicado são as paredes aonde se encontram as entradas e saídas do problema, uma vez que as maiores velocidades estão próximas a essas regiões. Piso e teto têm valores quase constantes. Apesar da malha apresentar regiões em que y^+ fica abaixo ou próximo de 1, as malhas foram consideradas adequadas uma vez que os valores médio ficaram dentro da faixa de valores aceitáveis para o modelo turbulento k- ϵ padrão (Tabela 1), sendo que somente pequenas regiões ficaram acima do limite superior aceitável ou abaixo do limite inferior.

6.3 PERFIS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA

Foi decidido usar as linhas indicadas na Figura 47 para traçar perfis de velocidade e temperatura que verificaram a independência de malha e estabeleceram um comparativo entre os casos. Ambas as linhas encontram-se no plano de simetria do problema ($z=W/2$), a linha horizontal ($y=0,25m$) foi escolhida por estar próxima a altura média dos frangos e a linha vertical ($x=42m$) por estar próxima a metade da largura do aviário (não foi escolhido exatamente a metade, $x=L/2$, porque há um defletor nesta posição). A verificação das malhas para os casos inclinação de 24° , defletor, inclinação de 6° e forro encontram-se nas Figuras 48 a 51, respectivamente.

Figura 47 – Linhas de coletas de dados.

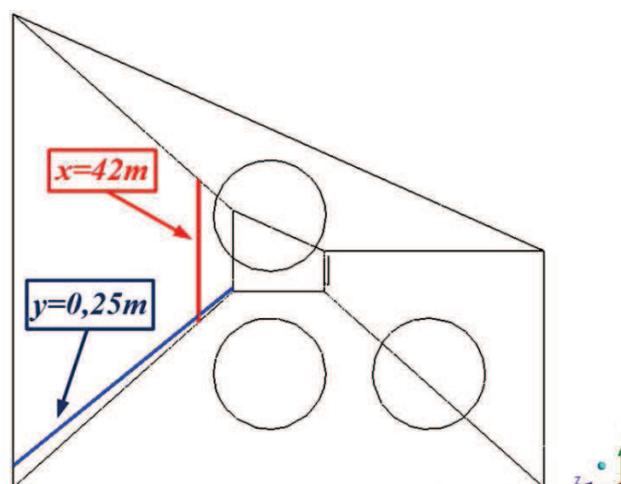
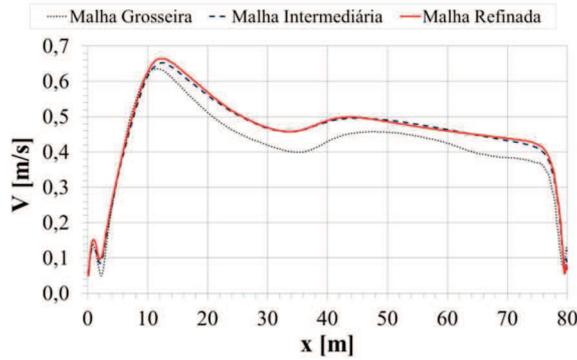
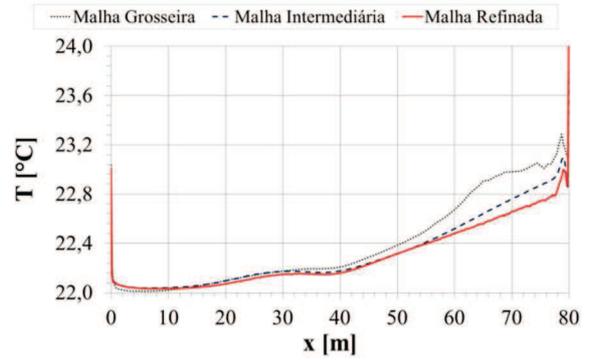


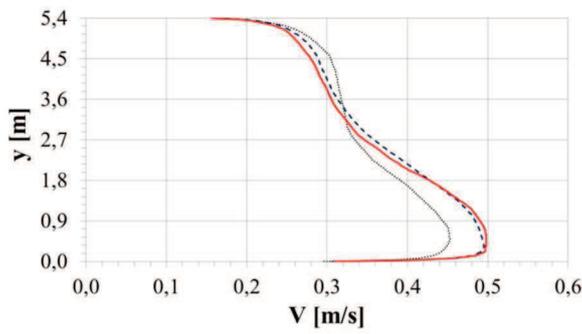
Figura 48 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com inclinação de 24°.



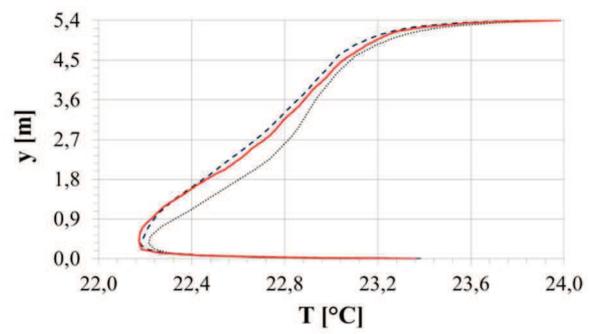
(a) Linha $y=0,25m$



(c) Linha $y=0,25m$

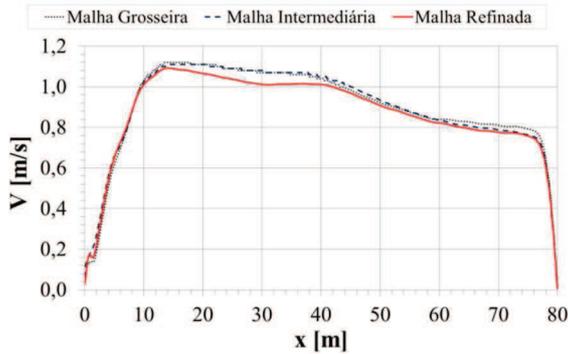


(b) Linha $x=42m$

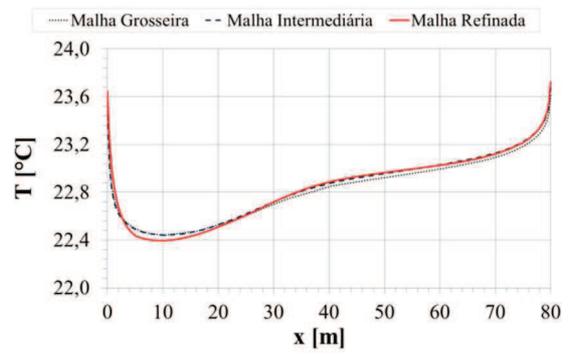


(d) Linha $x=42m$

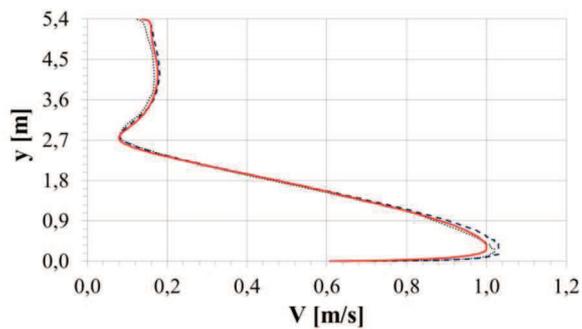
Figura 49 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com defletores.



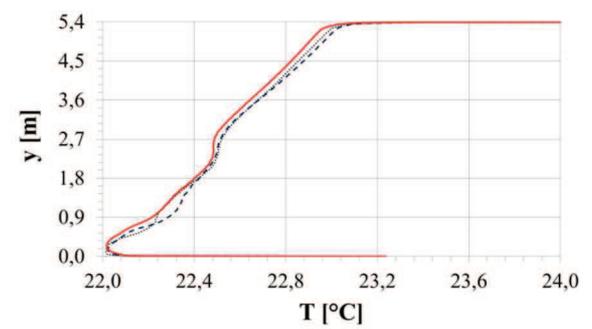
(a) Linha $y=0,25m$



(c) Linha $y=0,25m$

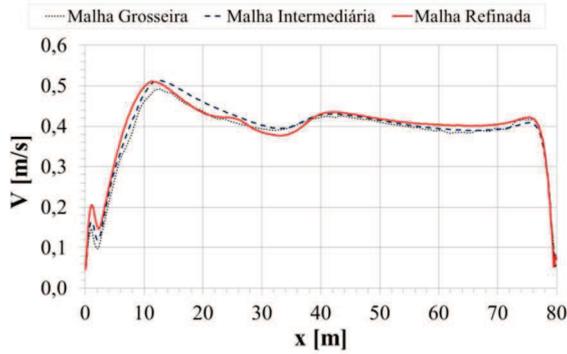


(b) Linha $x=42m$

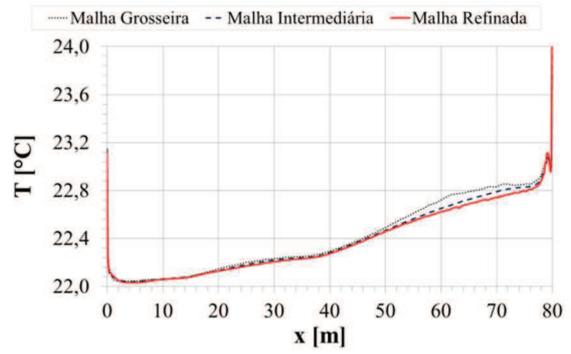


(d) Linha $x=42m$

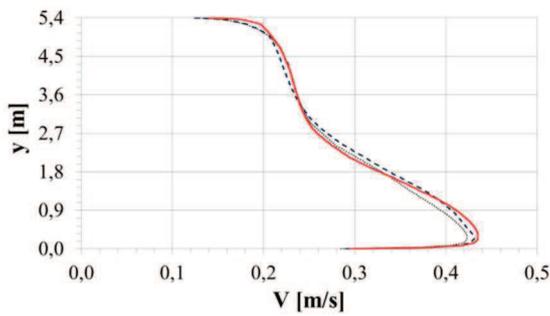
Figura 50 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com inclinação de 6°.



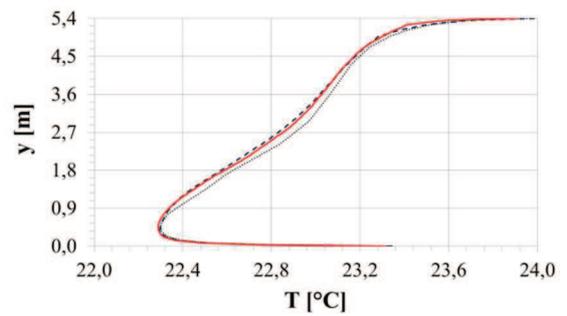
(a) Linha $y=0,25m$



(c) Linha $y=0,25m$

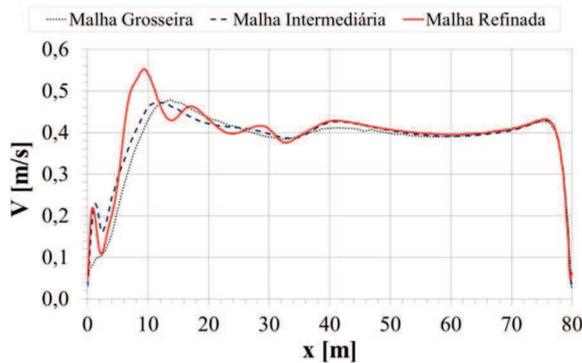


(b) Linha $x=42m$

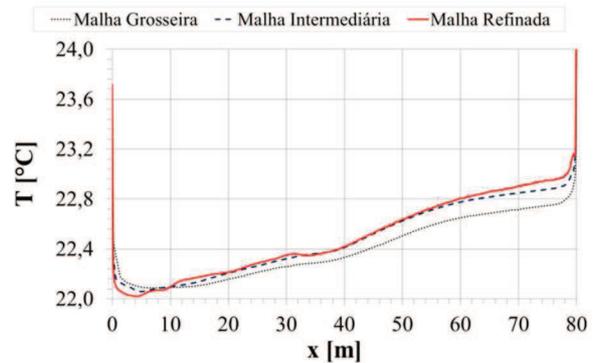


(d) Linha $x=42m$

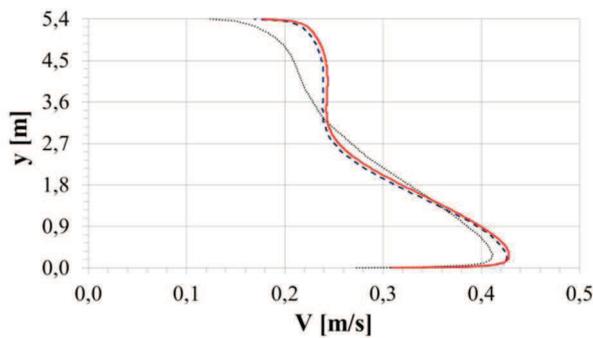
Figura 51 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com forro.



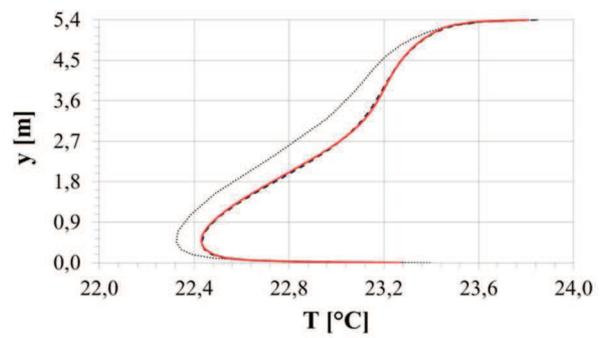
(a) Linha $y=0,25m$



(c) Linha $y=0,25m$



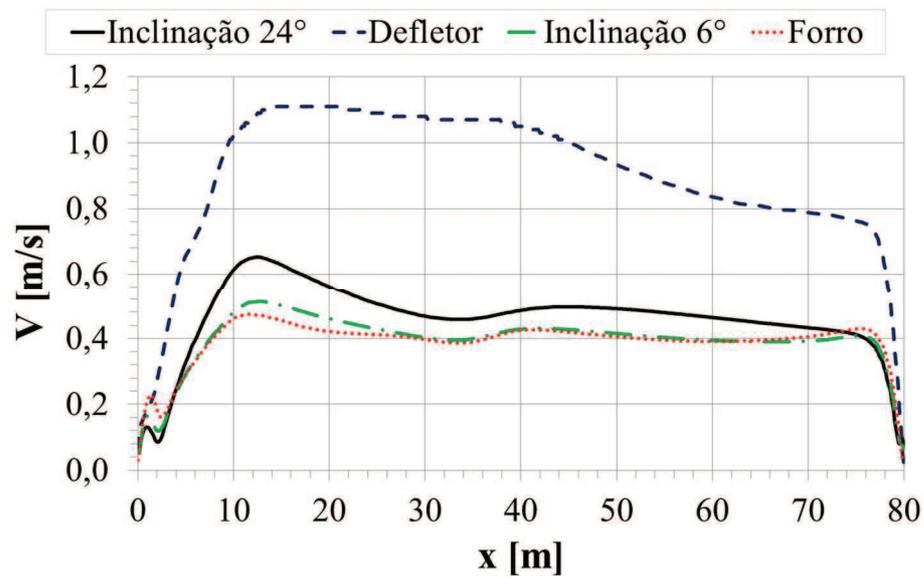
(b) Linha $x=42m$



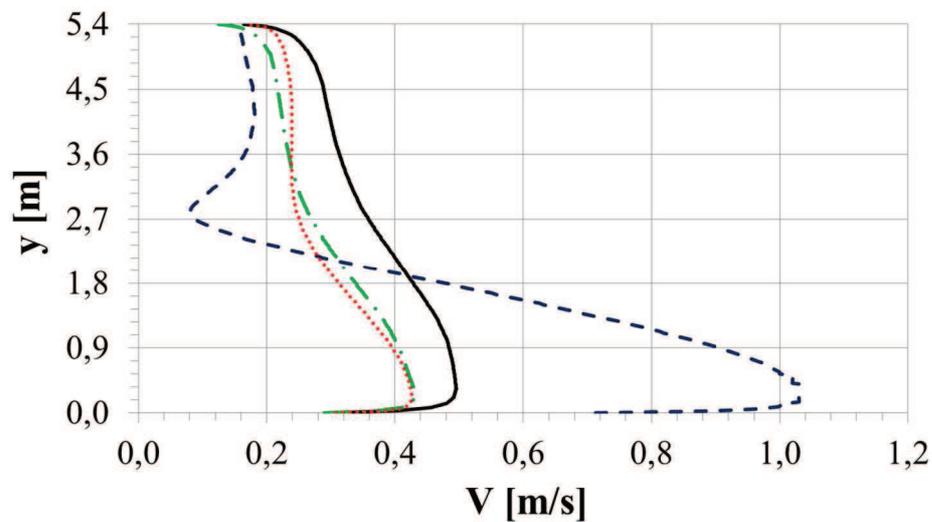
(d) Linha $x=42m$

Verificou-se que a maioria das curvas das malhas intermediárias aproximou-se mais da solução das malhas refinadas do que as malhas grosseiras (Figuras 48 a 51). Por outro lado, não foi observada significativa diferença entre essas curvas e, portanto, pode-se afirmar que as malhas foram verificadas e que não há necessidade de um maior grau de refinamento para obter uma solução melhor. Para comparar esses perfis foram escolhidas as soluções das malhas intermediárias e o comparativo dos perfis de velocidade e temperatura encontram-se nas Figuras 52 e 53, respectivamente.

Figura 52 – Comparativo dos perfis de velocidade.

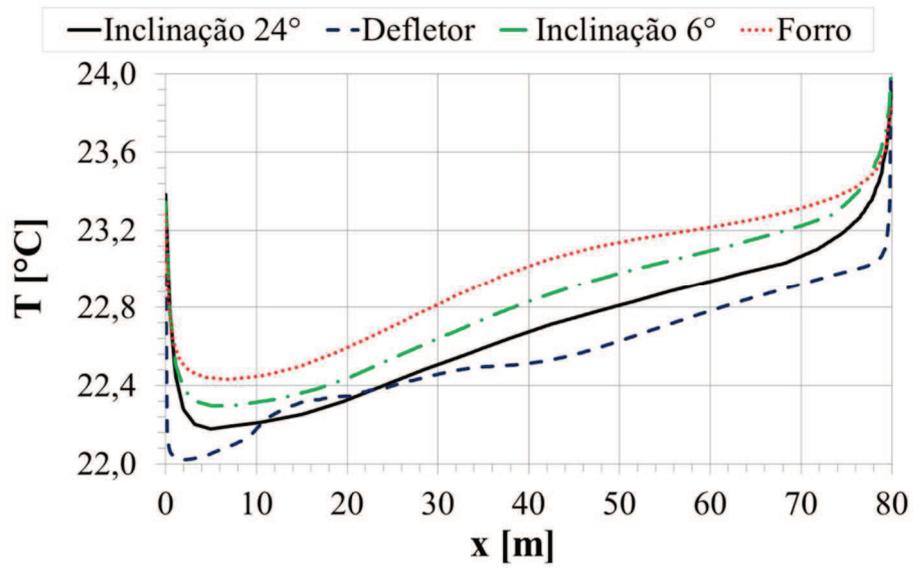
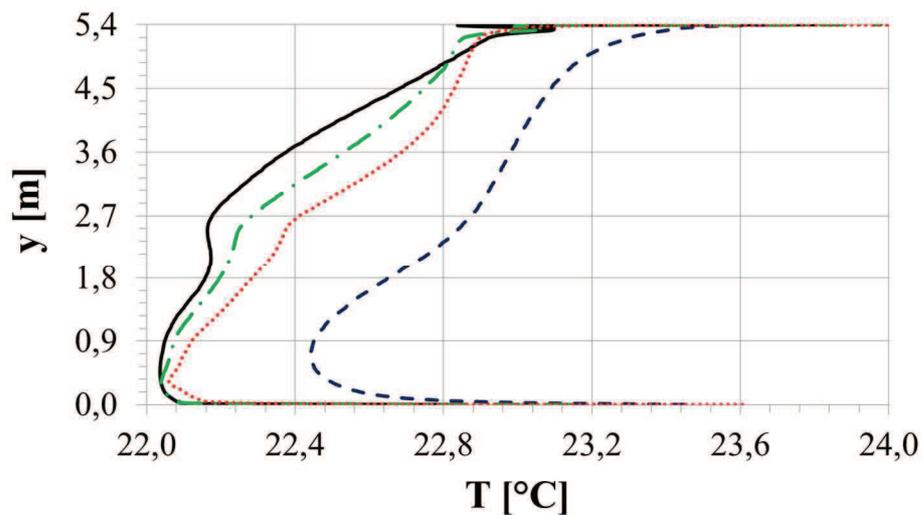


(a) Linha $y=0,25m$



(b) Linha $x=42m$

Figura 53 – Comparativo dos perfis de temperatura.

(a) Linha $y=0,25m$ (b) Linha $x=42m$

Analisando os perfis de velocidade (Figura 52), observou-se que somente o caso de aplicação de defletores alterou significativamente estes perfis. Todos os casos apresentaram coerência em relação à física do problema. A linha horizontal, $y=0,25m$ (Figura 52a), apresentou um acréscimo dos valores da velocidade média do escoamento até, aproximadamente, a posição $x=10m$ que fica a distância de 1m após a entrada de ar. Em seguida, o perfil teve um leve decréscimo dos valores de velocidade, devido à perda de carga do escoamento, até próximo às saídas de ar, $x=80m$, aonde a velocidade apresentou uma queda acentuada e aproximou-se de zero na parede onde se encontram os exaustores. O

mesmo comportamento foi observado na linha vertical, $x=42m$ (Figura 52b), na qual a velocidade aumentou próximo ao piso ($y=0$), manteve um valor de velocidade quase constante, devido ao achatamento do perfil ocasionado por efeitos turbulentos, e a velocidade ficou próximo à zero no teto ($y=5,4m$).

Observou-se que a aplicação do defletor aumentou a velocidade ao longo do comprimento do aviário (Figura 52a), uma vez que, naquela posição, a velocidade média do perfil ficou em $0,46ms^{-1}$, $0,90ms^{-1}$, $0,40ms^{-1}$ e $0,39ms^{-1}$ para os casos inclinação de 24° , defletor, inclinação de 6° e forro, respectivamente. Ou seja, a aplicação de defletores pode dobrar a velocidade ao longo do comprimento do aviário, tornando-se uma solução prática. Porém, deve-se comprovar na prática se esta teoria realmente é válida.

Não foi observado grande variação da temperatura do domínio, assim os perfis de temperatura (Figura 53) ficaram próximos à temperatura da entrada de ar, $22^\circ C$. No entanto, pode-se afirmar que, por conta das maiores velocidades proporcionadas pelo uso dos defletores, as temperaturas permaneceram menores ao longo do domínio, Figura 53a, enquanto que na aplicação de forro as temperaturas permaneceram um pouco maiores. Já na linha vertical, Figura 53b, as temperaturas com a aplicação de defletores ficaram maiores porque foi considerado que os defletores são isotérmicos e têm temperatura igual a do teto, assim as menores temperaturas observadas foram para o caso com inclinação de 24° .

6.4 LINHAS DE CORRENTE E CAMPOS VETORIAIS DE VELOCIDADE

Linhas de corrente e campos vetoriais de velocidade em determinados planos, para as malhas intermediárias, são apresentados nas Figuras 54 e 55, respectivamente.

As linhas de corrente mostraram que há poucas zonas mortas (com baixa recirculação de ar) em todos os domínios, Figura 54. É possível perceber que o modelo k- ϵ padrão prescreveu uma recirculação de ar próximo ao teto no plano de simetria ($z=W/2$). Esta recirculação é muito semelhante nos casos com inclinação de 24° , 6° e forro. Porém, no caso do uso de defletores a recirculação ficou maior assim como a velocidade naquela região.

Os campos vetoriais de velocidade, Figura 55, sugeriram que a velocidade é praticamente uniforme, no plano da região dos frangos ($y=0,25m$), para todos os casos. Naturalmente, vetores com maior módulo encontram-se na aplicação de defletores. As direções dos vetores são muito semelhantes em todos os casos. O desafio de um aviário é manter uma velocidade uniforme na região dos frangos e muito embora a solução numérica aponte isso, um problema real será menos uniforme.

Figura 54 – Linhas de corrente para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).

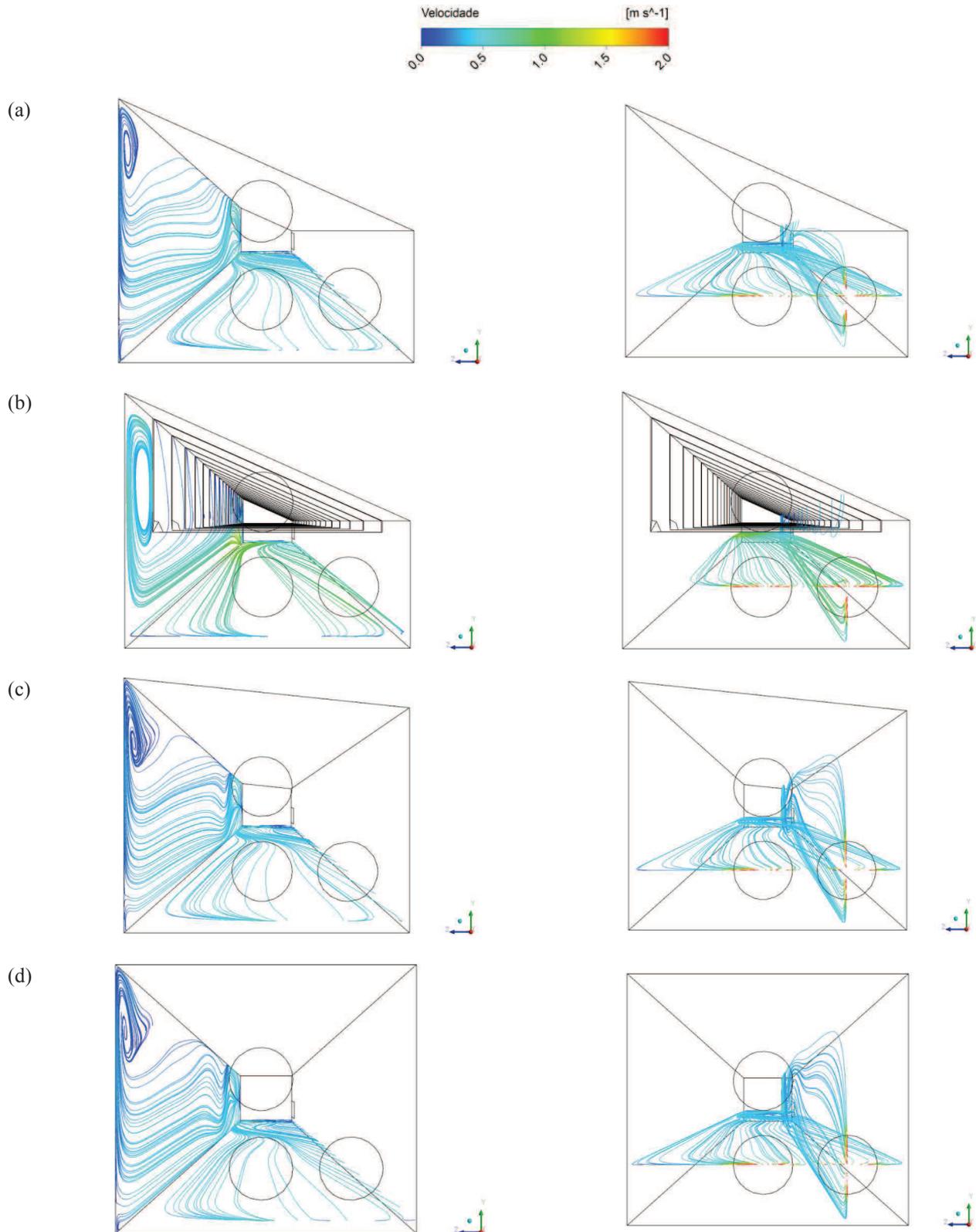
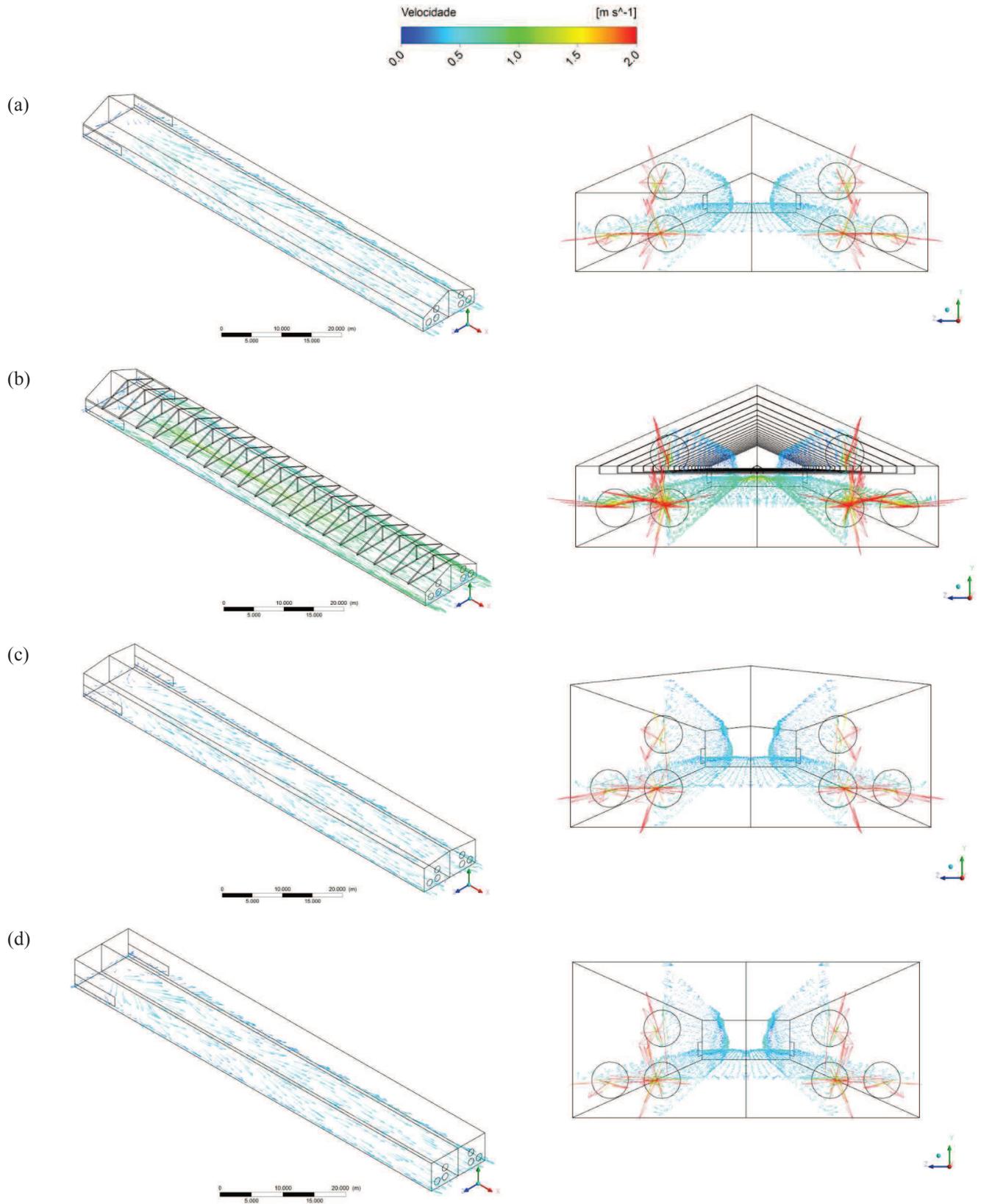


Figura 55 – Campos vetoriais de velocidade para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (c) e forro (d).



As velocidades médias na entrada e saída do domínio, para as três malhas, encontram-se na Tabela 11. Observando esses valores, pode-se dizer que há pouca variação entre as malhas para os quatro casos estudados e que estas velocidades aumentam no sentido de aumentar o refinamento. Verificou-se que a velocidade média na saída no caso com defletor é cerca de 8% maior que o menor valor encontrado (inclinação 6°), enquanto que a velocidade na entrada do caso com inclinação de 24° é cerca de 1% maior que o menor valor encontrado (inclinação de 6°).

Tabela 11 – Velocidade média nas entradas e saídas.

Caso		Tipo de malha		
		Grosseira	Intermediária	Refinada
Inclinação de 24°	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,584	0,585	0,588
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,66	2,64	2,70
Defletor	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,572	0,579	0,586
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,73	2,87	2,91
Inclinação de 6°	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,580	0,582	0,582
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,62	2,66	2,69
Forro	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,582	0,581	0,583
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,64	2,71	2,71

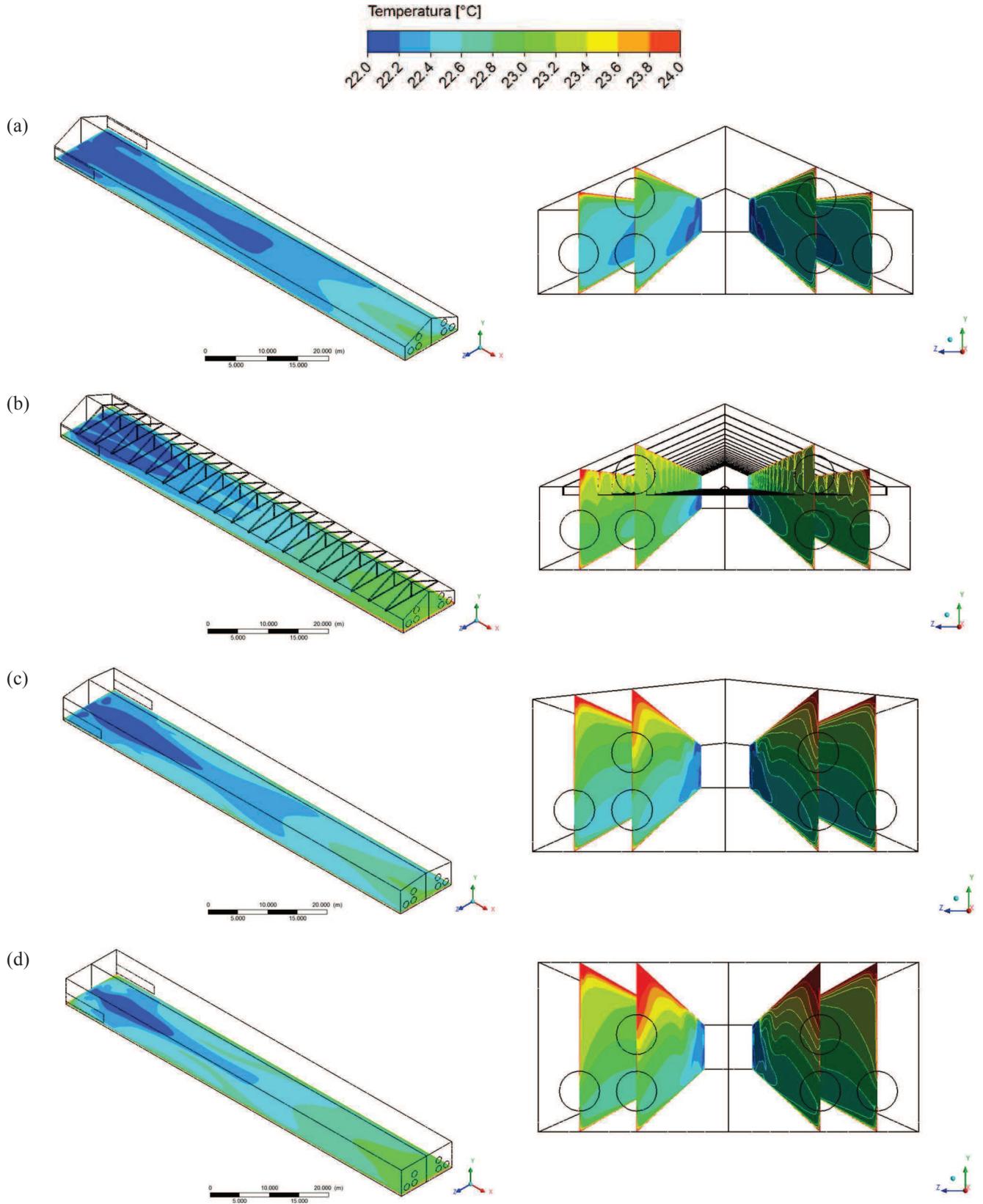
6.5 ISOTERMAS

Conforme foi visto a variação da temperatura do domínio é pequena, por isso são apresentados na Figura 56 isotermas entre 22°C e 24°C para as malhas intermediárias dos casos estudados. Os planos escolhidos para análise foram um plano XZ na altura dos frangos, $y=0,25m$, e dois planos XY que cruzam os centros dos exaustores, em $z=1,3m$ e $z=3,1m$.

Observou-se que, em todos os casos, as isotermas têm temperaturas menores próximos à entrada e aumentam na medida em que se aproximam da saída de ar (Figura 56). No nível dos frangos, $y=0,25m$, o melhor caso foi o aviário com inclinação de 24° (Figura 56a) uma vez que nesta situação isotermas com temperaturas mais amenas são mantidas ao longo de todo o aviário.

Verificou-se também que isotermas com temperaturas maiores surgem próximas ao teto para os aviários com inclinação 6° e forro, como pode ser visto nas Figuras 56c e 56d, respectivamente. Isto acontece devido a baixa recirculação de ar nessas regiões, limitando as trocas térmicas convectivas.

Figura 56 – Isotermas para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).



Na Tabela 12 são apresentados os valores da temperatura média na saída e a variação da temperatura no domínio ($\Delta T_0 = T_{saída} - T_{entrada}$). Pode-se observar que há pouca diferença destes valores conforme se refina a malha. Observou-se uma maior variação de temperatura para o caso com forro ($\Delta T_0 = 1,4^\circ\text{C}$) e menor para a inclinação de 24° ($\Delta T_0 = 0,9^\circ\text{C}$), uma diferença de aproximadamente 55%.

Tabela 12 – Temperatura média na saída e variação da temperatura no domínio.

Caso		Tipo de malha		
		Grosseira	Intermediária	Refinada
Inclinação de 24°	$T_{saída}$ [$^\circ\text{C}$]	23,0	22,8	22,9
	ΔT_0 [$^\circ\text{C}$]	1,0	0,8	0,9
Defletor	$T_{saída}$ [$^\circ\text{C}$]	23,3	23,2	23,1
	ΔT_0 [$^\circ\text{C}$]	1,3	1,2	1,1
Inclinação de 6°	$T_{saída}$ [$^\circ\text{C}$]	23,2	23,1	23,1
	ΔT_0 [$^\circ\text{C}$]	1,2	1,1	1,1
Forro	$T_{saída}$ [$^\circ\text{C}$]	23,3	23,4	23,4
	ΔT_0 [$^\circ\text{C}$]	1,3	1,4	1,4

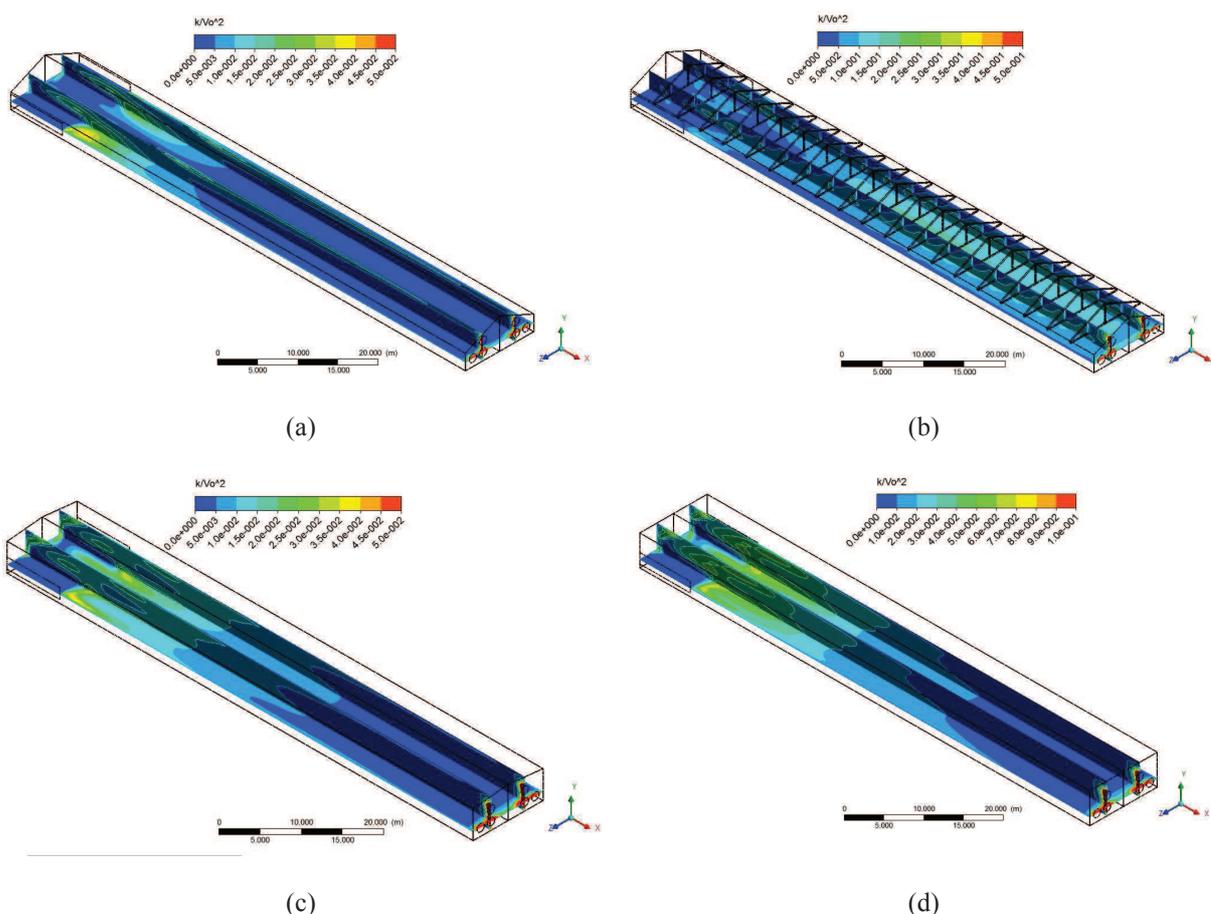
6.6 CAMPOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência foi analisada por meio do parâmetro adimensional k/V_0^2 , onde k é a energia cinética turbulenta (Equação (37)) e V_0 é a velocidade média na entrada de ar. Foram selecionados dois planos que cruzam os centros dos exaustores, um plano XZ ($y=1,3m$) e um plano XY ($z=3,1m$), conforme pode ser visto na Figura 57 (resultados para as malhas intermediárias). Estes resultados mostraram que a maior intensidade da turbulência encontra-se próximo aos exaustores. Calculando-se os valores máximos chega-se a energia cinética turbulenta de $0,13\text{m}^2\text{s}^{-2}$, $0,90\text{m}^2\text{s}^{-2}$, $0,23\text{m}^2\text{s}^{-2}$ e $0,40\text{m}^2\text{s}^{-2}$ para os casos com inclinação de 24° , defletor, inclinação de 6° e forro, respectivamente, indicando que a aplicação de defletores pode aumentar a turbulência em até sete vezes, em relação à inclinação de 24° .

Nos casos da inclinação de 24° , inclinação de 6° e forro (Figuras 57a, 57c e 57d, respectivamente), observou-se que logo após a entrada de ar surge uma região cuja turbulência aumenta e diminui na medida em que se afasta da entrada. Após certa distância da entrada, surge uma região praticamente laminar até próxima aos exaustores aonde aparecem as curvas de nível com maiores intensidade turbulenta do domínio. O comportamento no caso com defletor (Figura 57b) é diferente, umas vez que apareceram intensidades turbulentas ao

longo de todo o domínio e, aparentemente, não há nenhuma região laminar. No entanto, a região aonde a os valores de intensidade turbulenta são maiores é a mesma que dos outros casos.

Figura 57 – Campos de turbulência para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (c) e forro (d).



6.7 ISOBÁRICAS E PERDA DE CARGA

Finalmente, campos com pressão relativa nos planos XZ ($y=1,3m$) e XZ ($z=3,1m$) são apresentados na Figura 58 (resultado para as malhas intermediárias). Verificou-se que não há grande variação da pressão no domínio e as isobáricas mostram que somente próximo aos exaustores a pressão diminui, uma vez que nesta região foi imposto pressão relativa nula e sabe-se que o escoamento tem sentido da maior pressão (na entrada) para menor pressão (na saída).

A perda de carga e sua respectiva vazão encontram-se na Tabela 13. Observou-se que a maior perda de carga aconteceu no caso dos defletores ($\Delta P=6,86Pa$). A vazão nominal do

exaustor Munters® EM50 é $9,939 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ou seja, a maior perda de carga observada forneceu um valor aproximadamente 3% menor. Assim, seguir a recomendação do fabricante e considerar uma perda de carga de 20Pa (Anexo B) é uma ótima opção para o projetista.

Figura 58 – Isobáricas para os casos do aviário de Montenegro com: inclinação de 24° (a), defletores (b), inclinação de 6° (d) e forro (d).

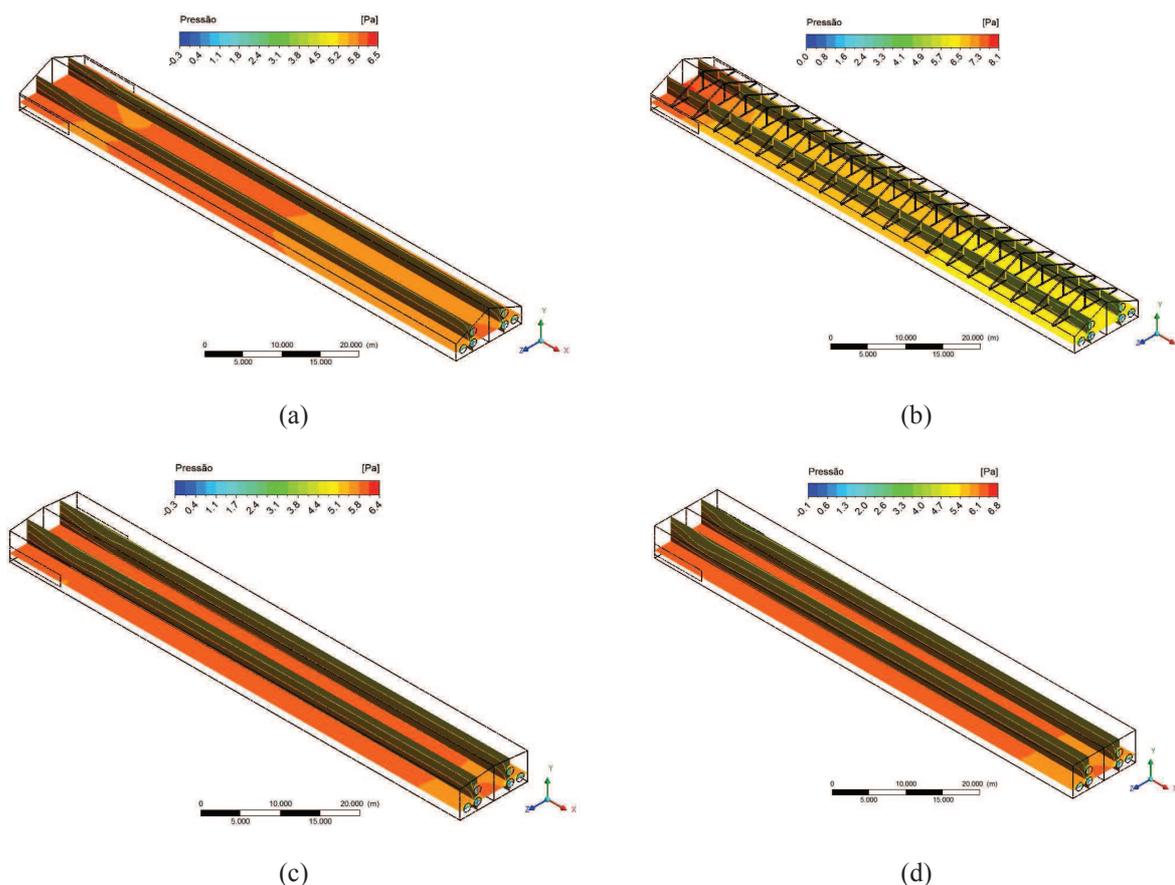


Tabela 13 – Perda de carga e vazão.

Caso		Tipo de malha		
		Grosseira	Intermediária	Refinada
Inclinação de 24°	ΔP [Pa]	4,81	4,79	4,98
	Q [m^3s^{-1}]	9,748	9,749	9,741
Defletor	ΔP [Pa]	5,94	6,81	6,86
	Q [m^3s^{-1}]	9,699	9,660	9,657
Inclinação de 6°	ΔP [Pa]	4,80	4,82	4,93
	Q [m^3s^{-1}]	9,748	9,748	9,743
Forro	ΔP [Pa]	4,95	5,23	5,32
	Q [m^3s^{-1}]	9,742	9,730	9,726

CAPÍTULO 7. ESTUDO DA APLICAÇÃO DE EXAUSTORES EM AVIÁRIOS

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados de soluções numéricas para o aviário localizado na cidade de Montenegro (RS). Foi estudada a aplicação de quatro exaustores do fabricante Munters®: EM50 (avaliado no Capítulo 6, caso com inclinação de 24°), EM36, EM30 e ED24. Para isto, foram analisados: o refino de malhas, os perfis de velocidade e temperatura, as linhas de corrente, os campos vetoriais de velocidade, as isotermas, os campos de turbulência e as isobáricas. Para todos os casos, foi inserida a perda de carga do escoamento para o respectivo exaustor (Figura 24). O modelo turbulento aplicado neste capítulo é o modelo k-ε padrão. Detalhes das malhas encontram-se no Apêndice A. Plantas do aviário da cidade de Montenegro (RS) e especificações técnicas dos exaustores encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

7.2 ESTUDO DE MALHAS

As informações das malhas numéricas para os casos estudados neste capítulo encontram-se na Tabela 14. Procurou-se conservar um fator de multiplicação de 8 da malha grosseira a refinada e o critério de convergência adotado foi um erro máximo de 10^{-4} para todas as equações governantes, resultando em um $RMS < 10^{-5}$.

Tabela 14 – Características numéricas do problema.

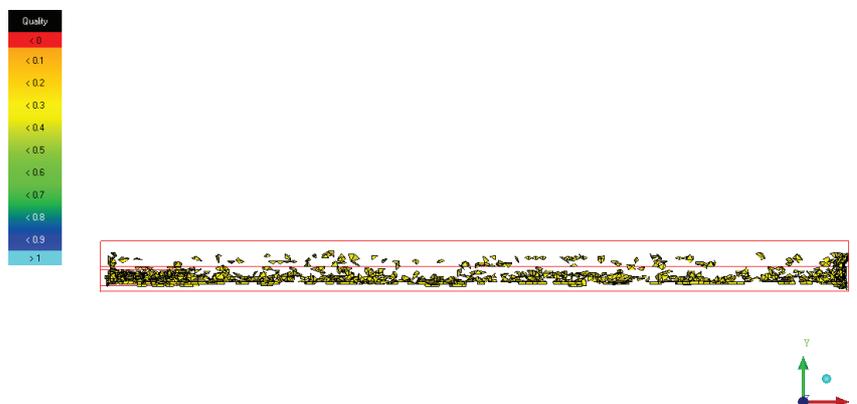
Caso	Malha	Número de elementos	Número de nós	y^+ médio	y^+ máximo	Interpolação
Exaustor EM36	Grosseira	117.039	39.866	39	126	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	966.430	224.685	39	130	<i>High Resolution</i>
	Refinada	7.646.347	1.457.640	40	134	<i>High Resolution</i>
Exaustor EM30	Grosseira	109.588	40.428	42	177	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	527.682	138.293	42	173	<i>Blend Factor 0,5</i>
	Refinada	3.824.712	799.086	42	194	<i>Blend Factor 0,5</i>
Exaustor ED24	Grosseira	115.912	40.645	34	260	<i>High Resolution</i>
	Intermediária	567.672	144.456	32	253	<i>Blend Factor 0,5</i>
	Refinada	3.931.368	789.536	31	255	<i>Blend Factor 0,5</i>

O critério de qualidade de malha utilizado foi o *Quality* (Apêndice A). Histogramas com o critério *Quality* avaliando os casos não serão apresentados uma vez que eles têm aspecto muito semelhante àqueles apresentados nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho. Foi observado que as malhas grosseiras apresentaram mais de 50% dos elementos com $Quality \geq 0,8$, enquanto que nas malhas intermediárias e refinadas esta razão aumenta para 73% e 85%, respectivamente.

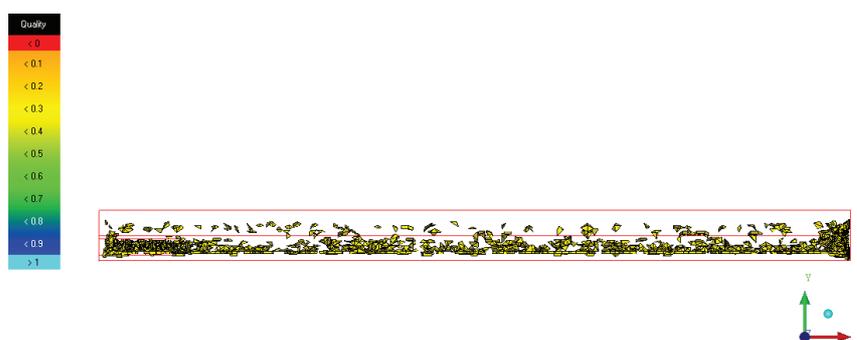
Figura 59 – Concentração dos elementos com $Quality < 0,3$, para as malhas grosseiras.



(a) Exaustor EM36



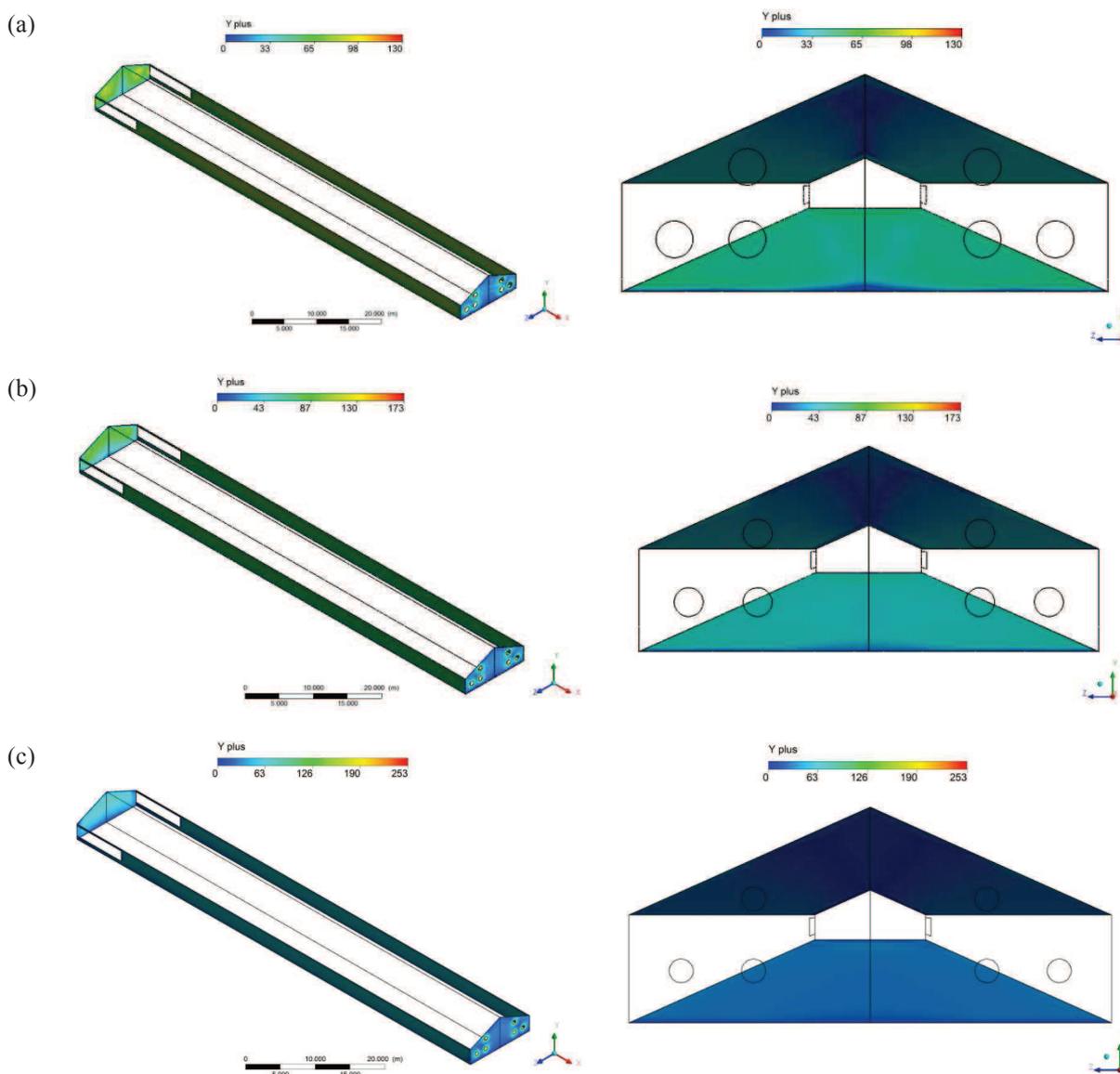
(b) Exaustor EM30



(c) Exaustor ED24

Verificou-se que para todos os casos os piores elementos encontram-se na região de transição entre as camadas prismáticas e os tetraedros, como mostra a Figura 59. Praticamente todos os elementos (mais de 99,9% para todos os casos) apresentaram qualidade superior a $1/5$, o que pode ser considerado aceitável.

Figura 60 – Campos de y^+ para os casos dos exaustores: EM36 (a), EM30 (b) e ED24 (c).



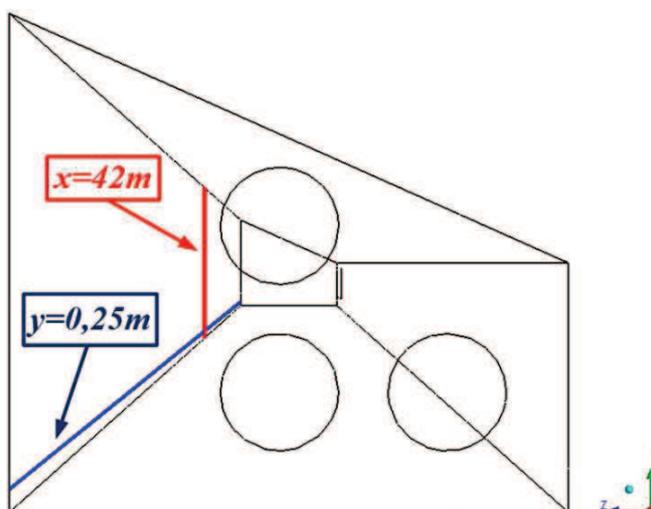
Outro parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da malha foi o y^+ cujos valores médio e máximo do domínio foram apresentados na Tabela 14. Campos de y^+ em todas as paredes do domínio, para as malhas intermediárias, são apresentados na Figura 60. Observou-se que as regiões em que o ajuste do valor de y^+ é mais complicado são as paredes aonde se encontram as entradas e saídas do problema, uma vez que as maiores velocidades estão

próximas a essas regiões. Piso e teto têm valores quase constantes. Apesar da malha apresentar regiões em que y^+ fica abaixo ou próximo de 1, as malhas foram consideradas adequadas uma vez que os valores médio ficaram dentro da faixa de valores aceitáveis para o modelo turbulento k- ϵ padrão (Tabela 1), sendo que somente pequenas regiões ficaram acima do limite superior aceitável ou abaixo do limite inferior.

7.3 PERFIS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA

Foi decidido usar as linhas da Figura 61 para traçar perfis de velocidade e temperatura que verificaram a independência de malha e estabeleceram um comparativo entre os casos. Ambas as linhas encontram-se no plano de simetria do problema ($z=W/2$), a linha horizontal ($y=0,25m$) foi escolhida por estar próxima a altura média dos frangos e a linha vertical ($x=42m$) por estar próxima a metade da largura do aviário. A verificação das malhas para os casos do exaustor EM36, EM30 e ED24 encontram-se nas Figuras 62 a 64, respectivamente (a verificação do exaustor EM50 foi feita no Capítulo 6 deste trabalho, Figura 48).

Figura 61 – Linhas de coletas de dados.



Verificou-se que a maioria das curvas das malhas intermediárias aproximou-se mais da solução das malhas refinadas do que as malhas grosseiras (Figuras 62 a 64). Não foi observada significativa diferença entre esses perfis e, portanto, pode-se afirmar que as malhas foram verificadas e que não há necessidade de um maior grau de refinamento para obter uma solução melhor.

Figura 62 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com exaustor EM36.

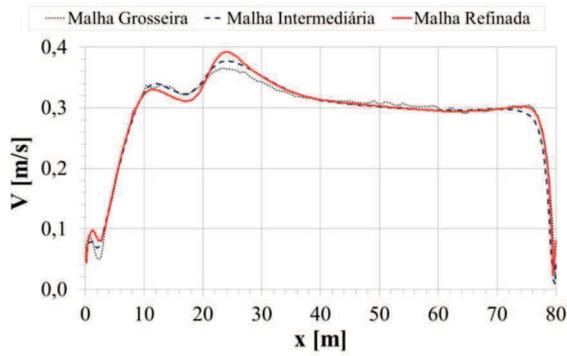
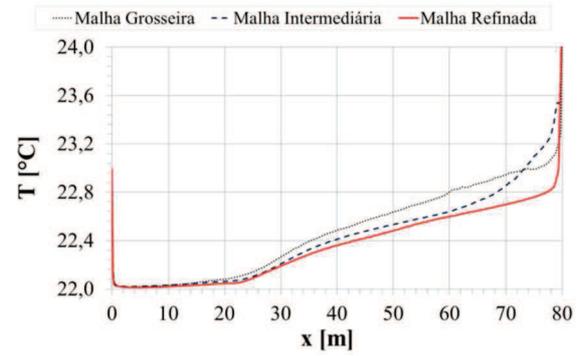
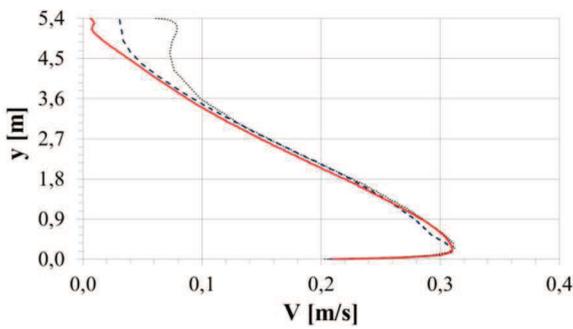
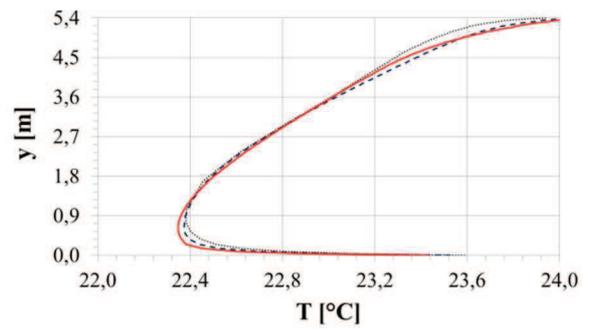
(a) Linha $y=0,25m$ (c) Linha $y=0,25m$ (b) Linha $x=42m$ (d) Linha $x=42m$

Figura 63 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com exaustor EM30.

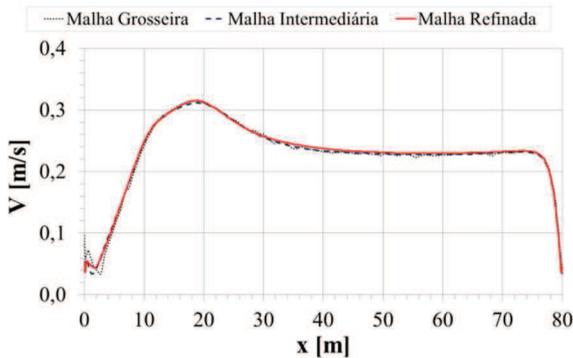
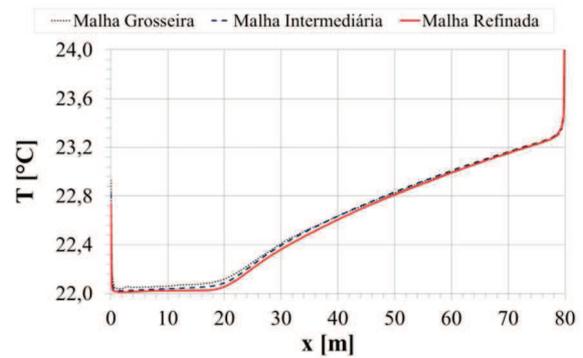
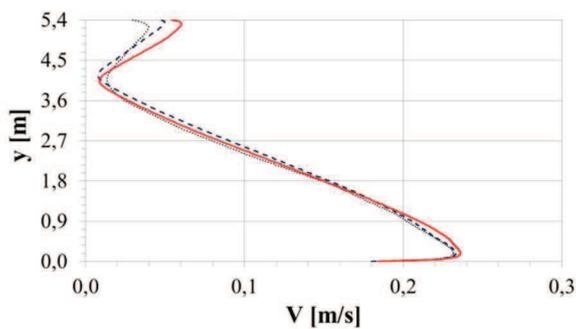
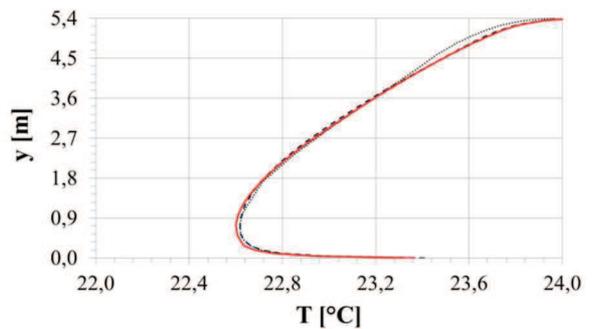
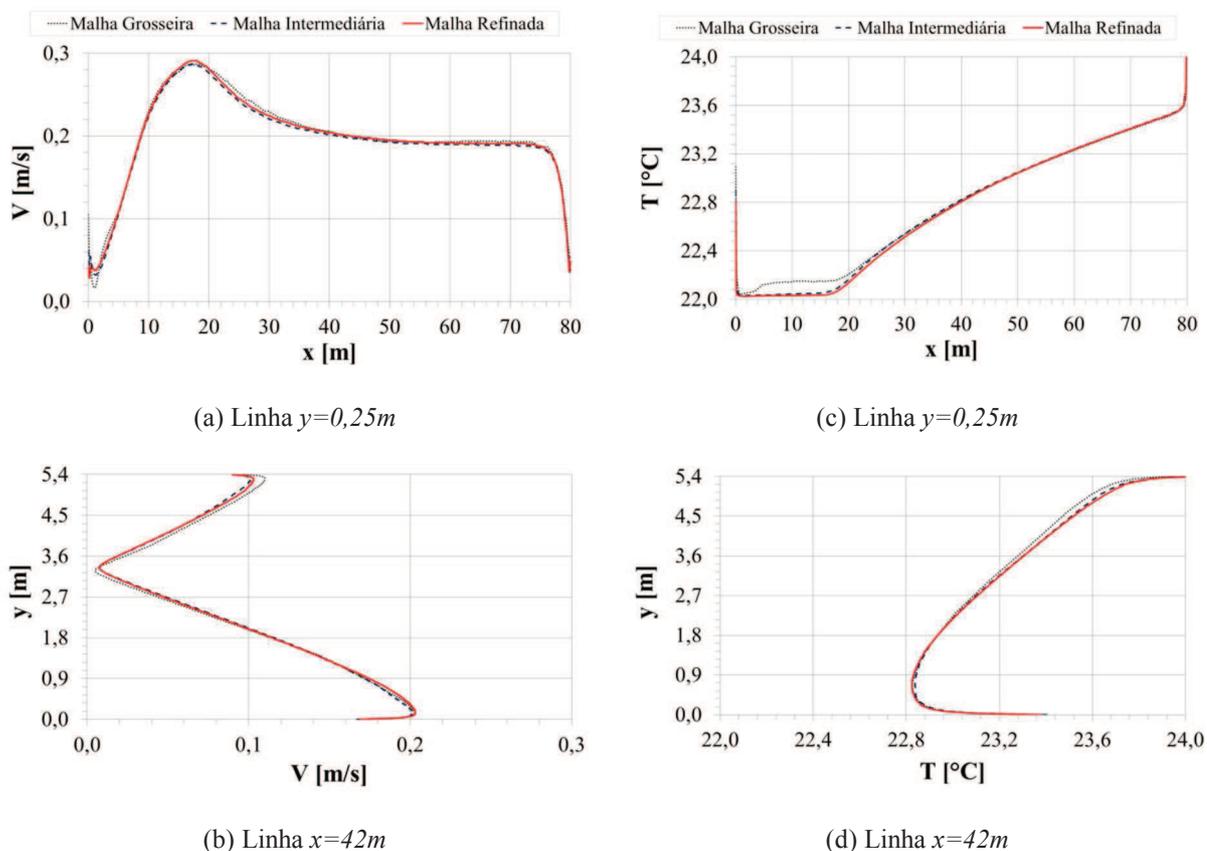
(a) Linha $y=0,25m$ (c) Linha $y=0,25m$ (b) Linha $x=42m$ (d) Linha $x=42m$

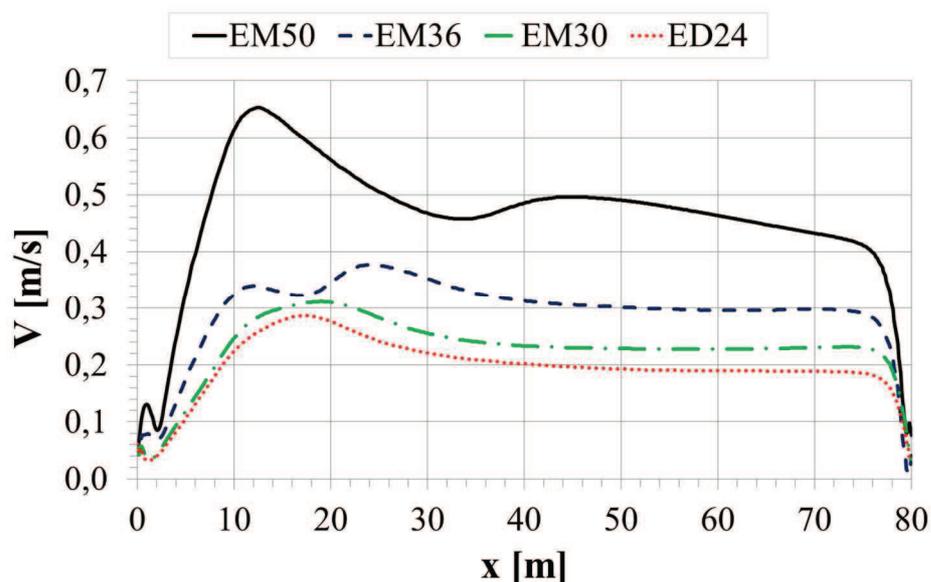
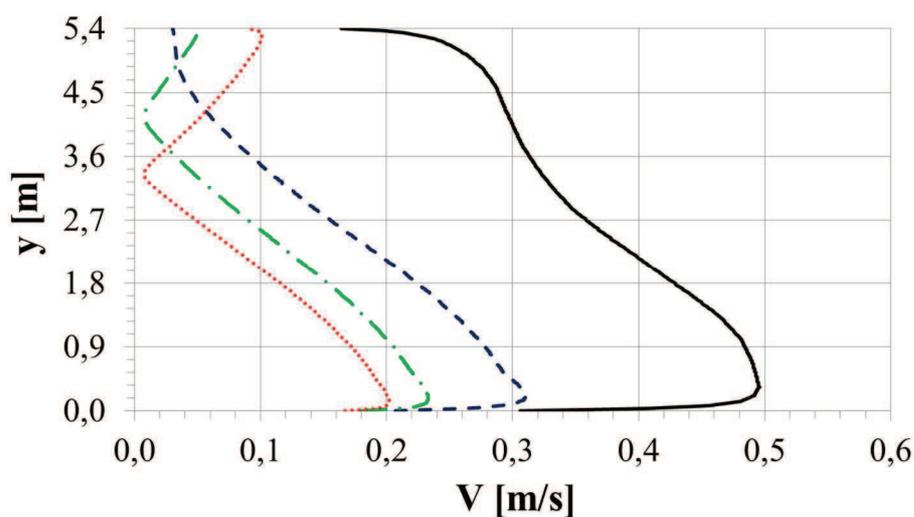
Figura 64 – Perfis de velocidade e temperatura: verificação das malhas com exaustor ED24.



Para comparar os perfis anteriores (Figuras 62 a 64) foram escolhidas as soluções das malhas intermediárias e o comparativo dos perfis de velocidade e temperatura encontram-se nas Figuras 65 e 66, respectivamente.

Analisando os perfis de velocidade da linha horizontal, $y=0,25m$ (Figura 65a), observou-se que a partir da posição $x=10m$, que fica a distância de 1m após a entrada de ar, velocidade média do escoamento tem um acréscimo significativo. A partir deste ponto, o perfil apresenta um leve decréscimo dos valores de velocidade, devido à perda de carga do escoamento, até próximo às saídas de ar, $x=80m$, aonde a velocidade apresentou uma queda acentuada e aproximou-se de zero na parede onde se encontram os exaustores. Um comportamento semelhante foi observado na linha vertical, $x=42m$ (Figura 65b), na qual a velocidade aumentou próximo ao piso ($y=0$), apresentou um leve decréscimo, devido ao achatamento do perfil ocasionado por efeitos turbulentos, e a velocidade ficou próximo à zero no teto ($y=5,4m$).

Figura 65 – Comparativo dos perfis de velocidade.

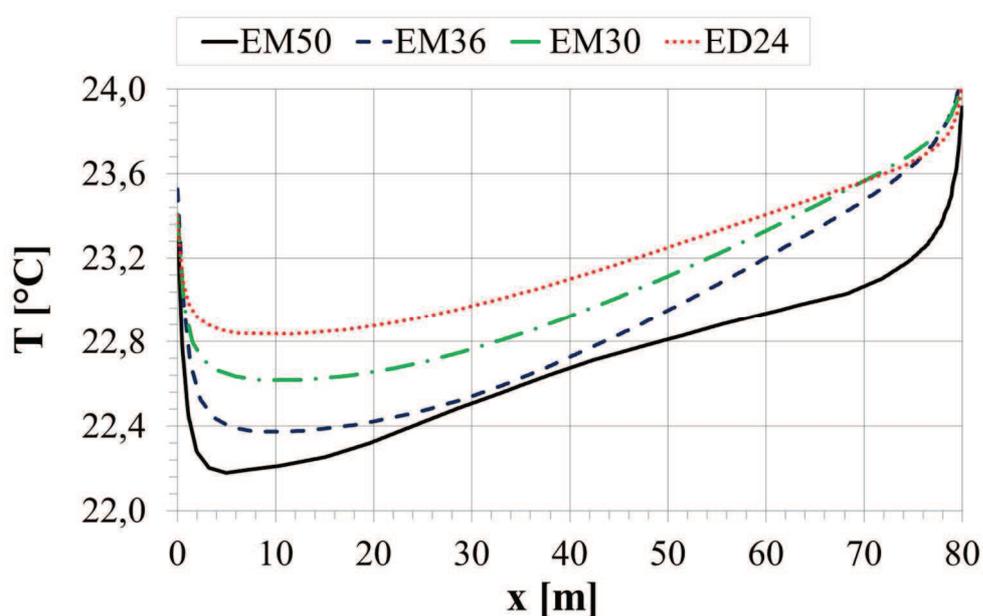
(a) Linha $y=0,25m$ (b) Linha $x=42m$

A velocidade média do perfil de velocidade ao longo do comprimento do aviário (Figura 65a) ficou em $0,46\text{ms}^{-1}$, $0,29\text{ms}^{-1}$, $0,23\text{ms}^{-1}$ e $0,20\text{ms}^{-1}$ para os exaustores EM50, EM36, EM30 e ED24, respectivamente. Ou seja, o exaustor com maior vazão (EM50) dobra a velocidade ao longo do comprimento do aviário em relação ao exaustor com menor vazão (ED24). No entanto, sabe-se que o exaustor EM50 tem o dobro do tamanho do exaustor ED24 e, para uma potência de 1 hp, fornece uma vazão nominal três vezes maior.

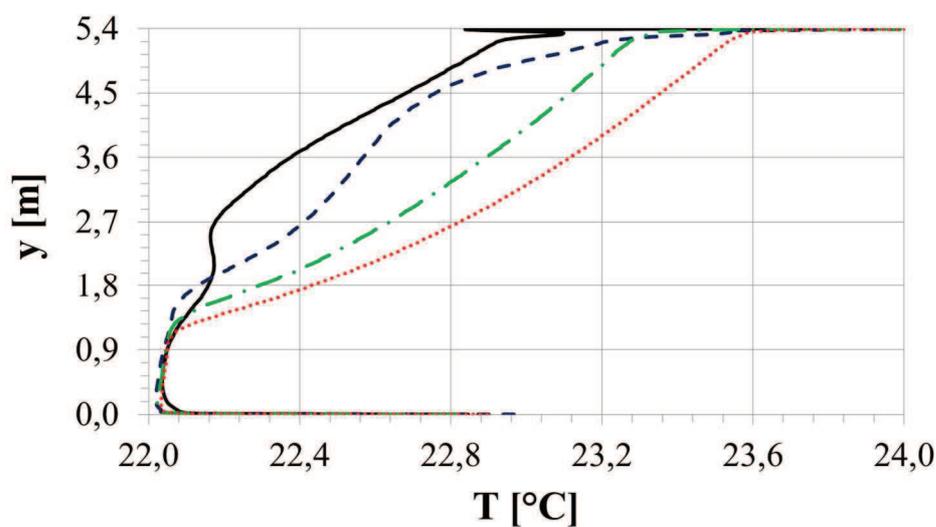
Não foi observado grande variação da temperatura do domínio, assim os perfis de temperatura (Figura 66) ficaram próximos à temperatura da entrada de ar, 22°C . No entanto,

pode-se afirmar que, por conta das maiores velocidades proporcionadas pelo uso do exaustor com maior vazão nominal (EM50), as temperaturas permaneceram menores ao longo do domínio, Figura 66a, enquanto que no caso do exaustor ED24 as temperaturas permaneceram um pouco maiores. O mesmo comportamento pode ser visto na linha vertical, Figura 66b, na qual as temperaturas do exaustor EM50 ficaram menores que os outros exaustores com menor vazão.

Figura 66 – Comparativo dos perfis de temperatura.



(a) Linha $y=0,25m$



(b) Linha $x=42m$

7.4 LINHAS DE CORRENTE E CAMPOS VETORIAIS DE VELOCIDADE

Linhas de corrente e campos vetoriais de velocidade em determinados planos, para as malhas intermediárias, são apresentados nas Figuras 67 e 68, respectivamente.

As linhas de corrente mostraram que, na medida em que se diminui a vazão dos exaustores, surgem algumas zonas com baixa recirculação de ar, Figura 67. É possível perceber que o modelo k- ϵ padrão prescreveu uma recirculação de ar próximo ao teto no plano de simetria ($z=W/2$). Essa recirculação estende-se ao longo do comprimento do aviário na medida em que se diminui a vazão do exaustor.

Os campos vetoriais de velocidade, Figura 68, sugeriram que a velocidade é praticamente uniforme, no plano da região dos frangos ($y=0,25m$), para todos os casos. Naturalmente, vetores com menor módulo encontram-se no caso do exaustor EM50. O módulo diminuiu no sentido do exaustor ED24 o qual tem a menor vazão. As direções dos vetores são muito semelhantes em todos os casos.

As velocidades médias na entrada e saída do domínio, para as três malhas, encontram-se na Tabela 15. Observando esses valores, pode-se dizer que houve pouca variação entre as malhas para os quatro casos estudados e que estas velocidades aumentam no sentido de aumentar o refinamento. Verificou-se que a velocidade média na saída no caso com o exaustor EM50 é 20% menor que a mesma velocidade no caso com o exaustor ED24. Por outro lado, a velocidade média na entrada no caso do exaustor EM50 é 70% maior que a mesma velocidade no caso com o exaustor ED24.

Tabela 15 – Velocidade média nas entradas e saídas.

Caso	Tipo de malha			
	Grosseira	Intermediária	Refinada	
EM50°	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,584	0,585	0,588
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,66	2,64	2,70
EM36	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,322	0,323	0,324
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,96	2,99	2,97
EM30	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,220	0,221	0,222
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	2,86	2,82	3,02
ED24	$V_{\text{entrada}} [\text{ms}^{-1}]$	0,170	0,171	0,171
	$V_{\text{saída}} [\text{ms}^{-1}]$	3,38	3,37	3,38

Figura 67 – Linhas de corrente para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).

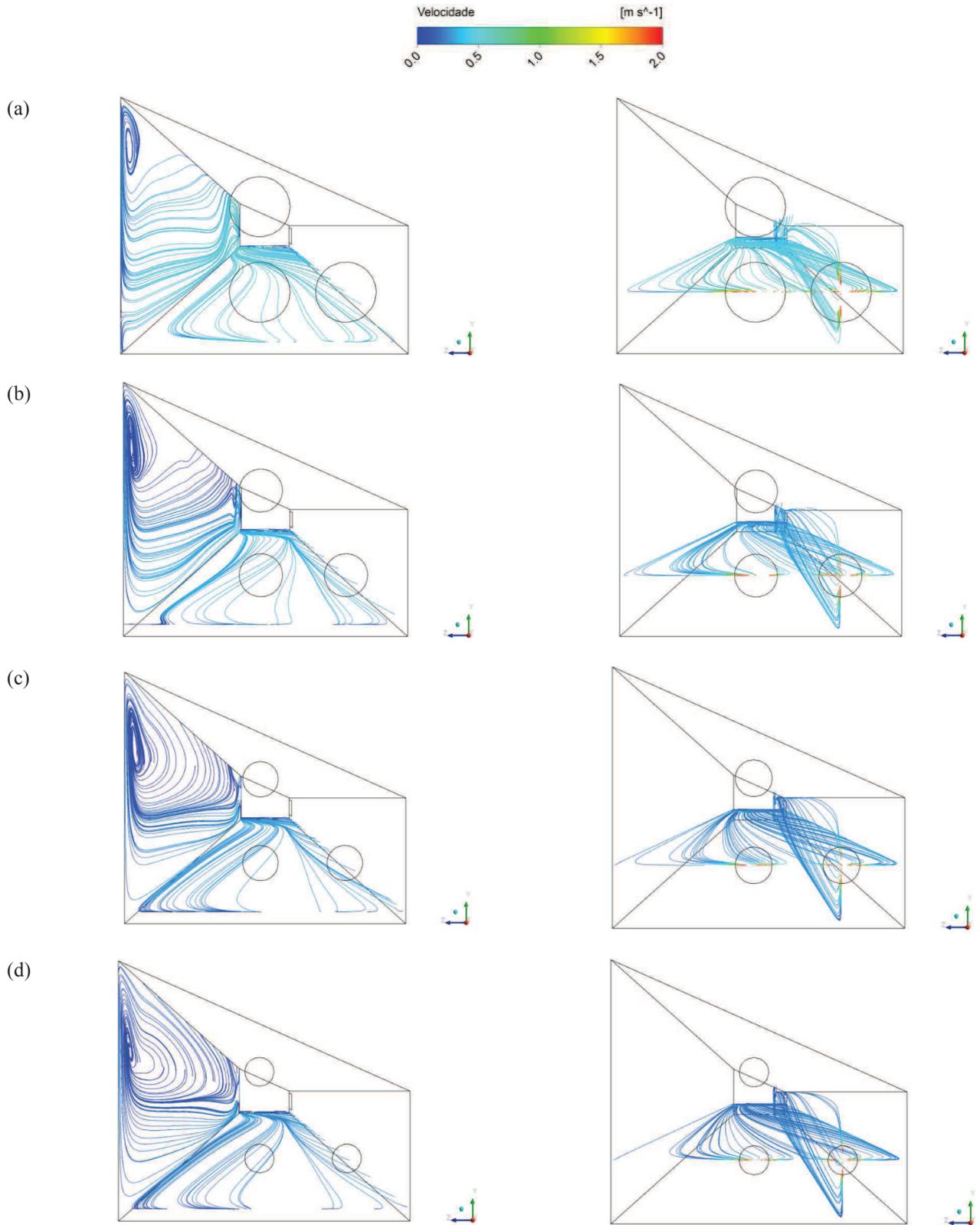
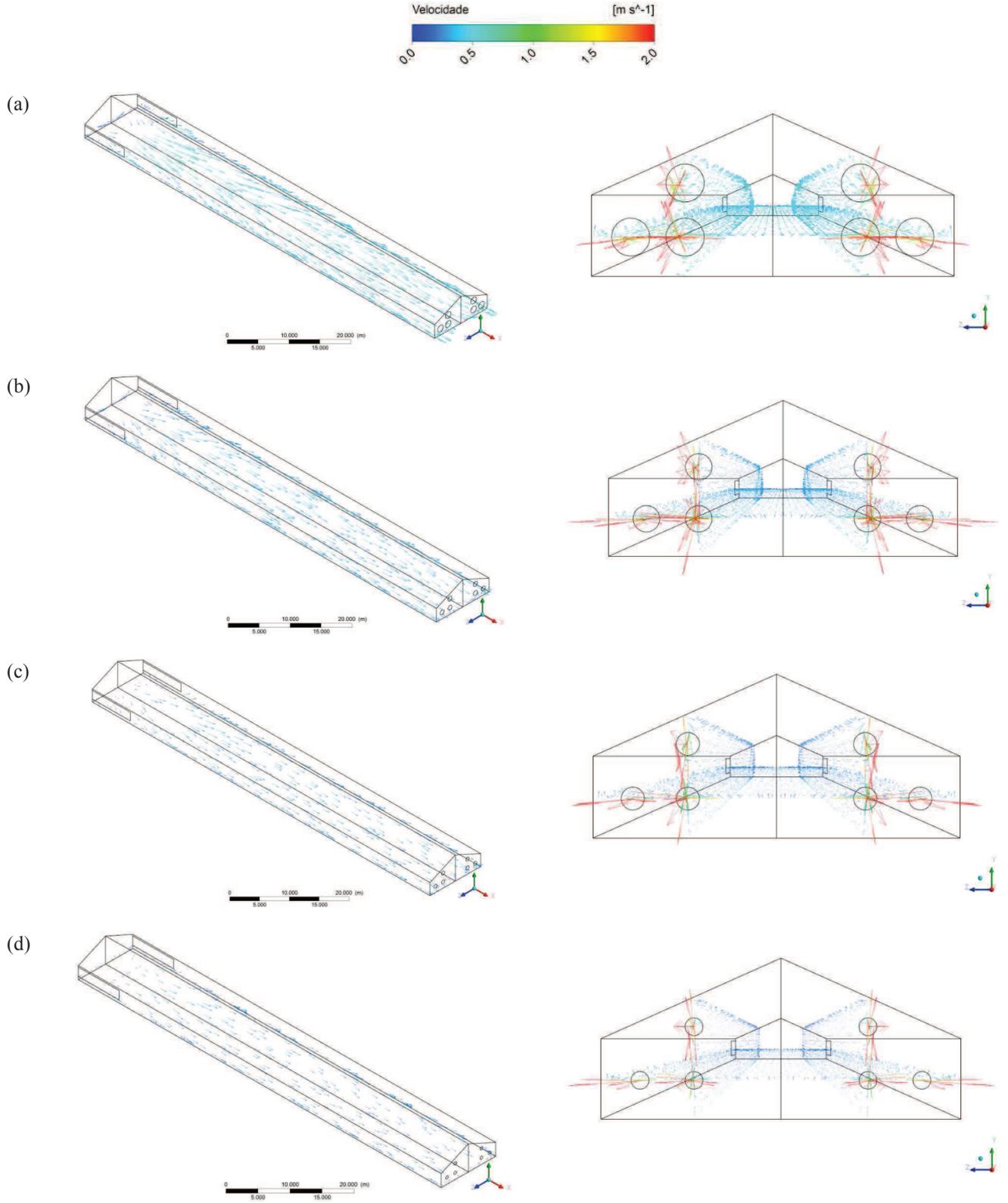


Figura 68 – Campos vetoriais de velocidade para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (d) e ED24 (d).



7.5 ISOTERMAS

A Figura 69 apresenta as isotermas, para as malhas intermediárias, dos casos estudados neste capítulo. Os planos escolhidos para análise foram um plano XZ na altura dos frangos, $y=0,25m$, e dois planos XY que cruzam os centros dos exaustores, em $z=1,3m$ e $z=3,1m$.

Observou-se que, em todos os casos, as isotermas têm temperaturas menores próximos à entrada e aumentam na medida em que se aproximam da saída de ar (Figura 69). No nível dos frangos, $y=0,25m$, o melhor caso foi o aviário com exaustor EM50 (Figura 69a) uma vez que nesta situação isotermas com temperaturas mais amenas são mantidas ao longo de todo o aviário (até aproximadamente $x=60m$) e no exaustor ED24 as temperaturas aumentam próximo na posição $x=20m$.

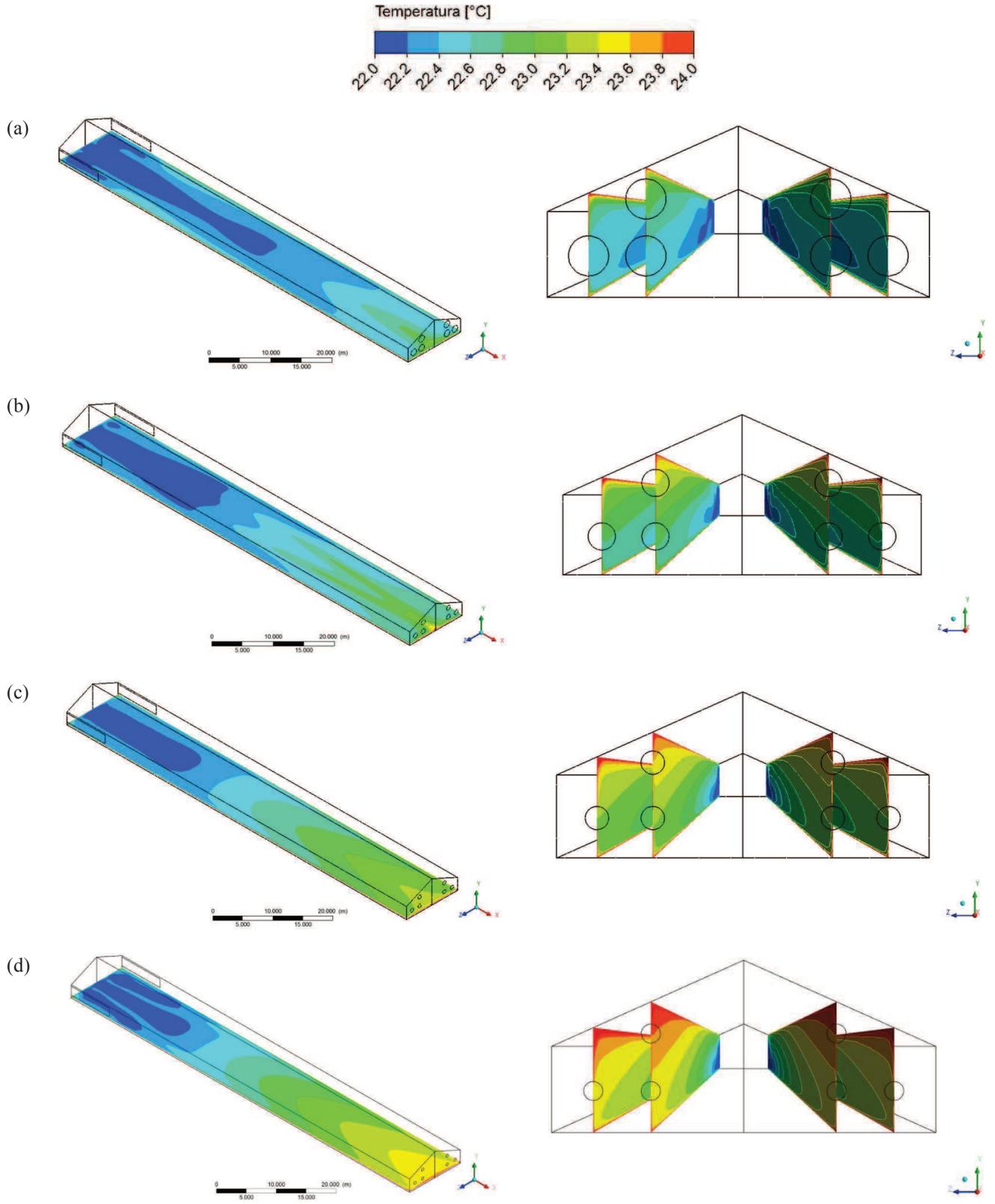
Verificou-se que isotermas com temperaturas maiores surgem próximas ao teto para os aviários com exaustor ED24 (Figura 69d) e no aviário com exaustor EM50 (Figura 69a) as isotermas próximas ao teto têm temperaturas menores.

A Tabela 16 apresenta os valores da temperatura média na saída e a variação da temperatura no domínio ($\Delta T_0 = T_{saída} - T_{entrada}$). Pode-se observar que há pouca diferença destes valores conforme se refina a malha. Observou-se uma maior variação de temperatura para o caso com exaustor ED24 ($\Delta T_0 = 1,8^\circ C$) e menor para o exaustor EM50 ($\Delta T_0 = 0,9^\circ C$), ou seja, um exaustor com o triplo da vazão e dobro do tamanho proporciona a metade da diferença das temperaturas de entrada e saída do domínio.

Tabela 16 – Temperatura média na saída e variação da temperatura no domínio.

Caso	Tipo de malha			
	Grosseira	Intermediária	Refinada	
EM50	$T_{saída}$ [$^\circ C$]	23,0	22,8	22,9
	ΔT_0 [$^\circ C$]	1,0	0,8	0,9
EM36	$T_{saída}$ [$^\circ C$]	23,3	23,2	23,2
	ΔT_0 [$^\circ C$]	1,3	1,2	1,2
EM30	$T_{saída}$ [$^\circ C$]	23,6	23,6	23,5
	ΔT_0 [$^\circ C$]	1,6	1,6	1,5
ED24	$T_{saída}$ [$^\circ C$]	23,8	23,8	23,8
	ΔT_0 [$^\circ C$]	1,8	1,8	1,8

Figura 69 – Isotermas para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (c) e ED24 (d).

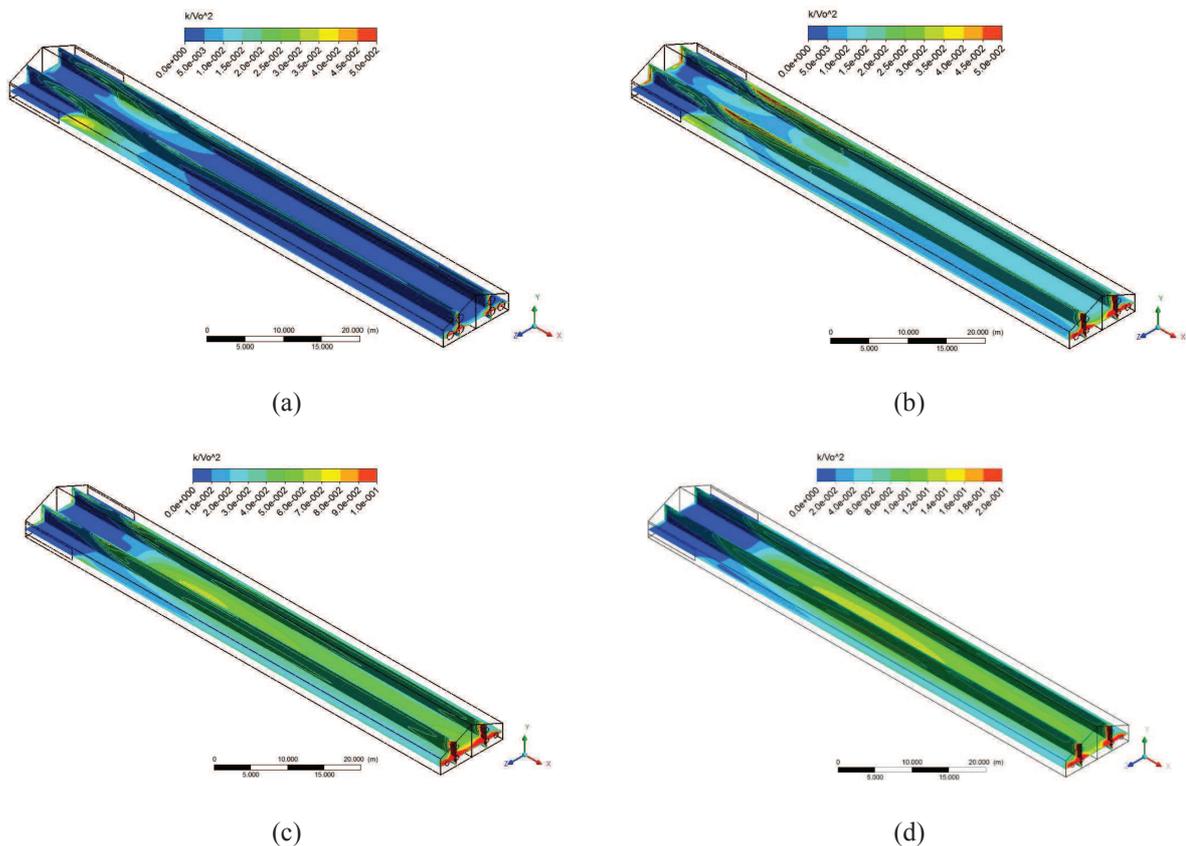


7.6 CAMPOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência foi analisada por meio do parâmetro adimensional k/V_0^2 , onde k é a energia cinética turbulenta (Equação (37)) e V_0 é a velocidade média na entrada de ar. Foram selecionados dois planos que cruzam os centros dos exaustores, um plano XZ ($y=1,3m$) e um plano XY ($z=3,1m$), conforme pode ser visto na Figura 70 (resultados para as malhas intermediárias). Estes resultados mostraram que a maior intensidade da turbulência encontra-se próximo aos exaustores. Calculando-se os valores máximos chega-se a energia cinética turbulenta de $0,13m^2s^{-2}$, $0,43m^2s^{-2}$, $0,46m^2s^{-2}$ e $0,66m^2s^{-2}$ para os casos com exaustor EM50, EM36, EM30 e ED24, respectivamente, indicando que a exaustores com menor vazão apresentam maiores valores de intensidade turbulenta.

Os exaustores ED24 e EM30 apresentam uma região que se estende logo após a entrada até próximo às saídas, ou seja, praticamente todo o domínio apresentam regiões turbulentas, conforme pode ser visto nas Figuras 70d e 70c, respectivamente. A intensidade da turbulência diminui no exaustor EM36 (Figura 70b) e tem uma porção praticamente nula, próximo do regime laminar, no exaustor EM50 (Figura 70a).

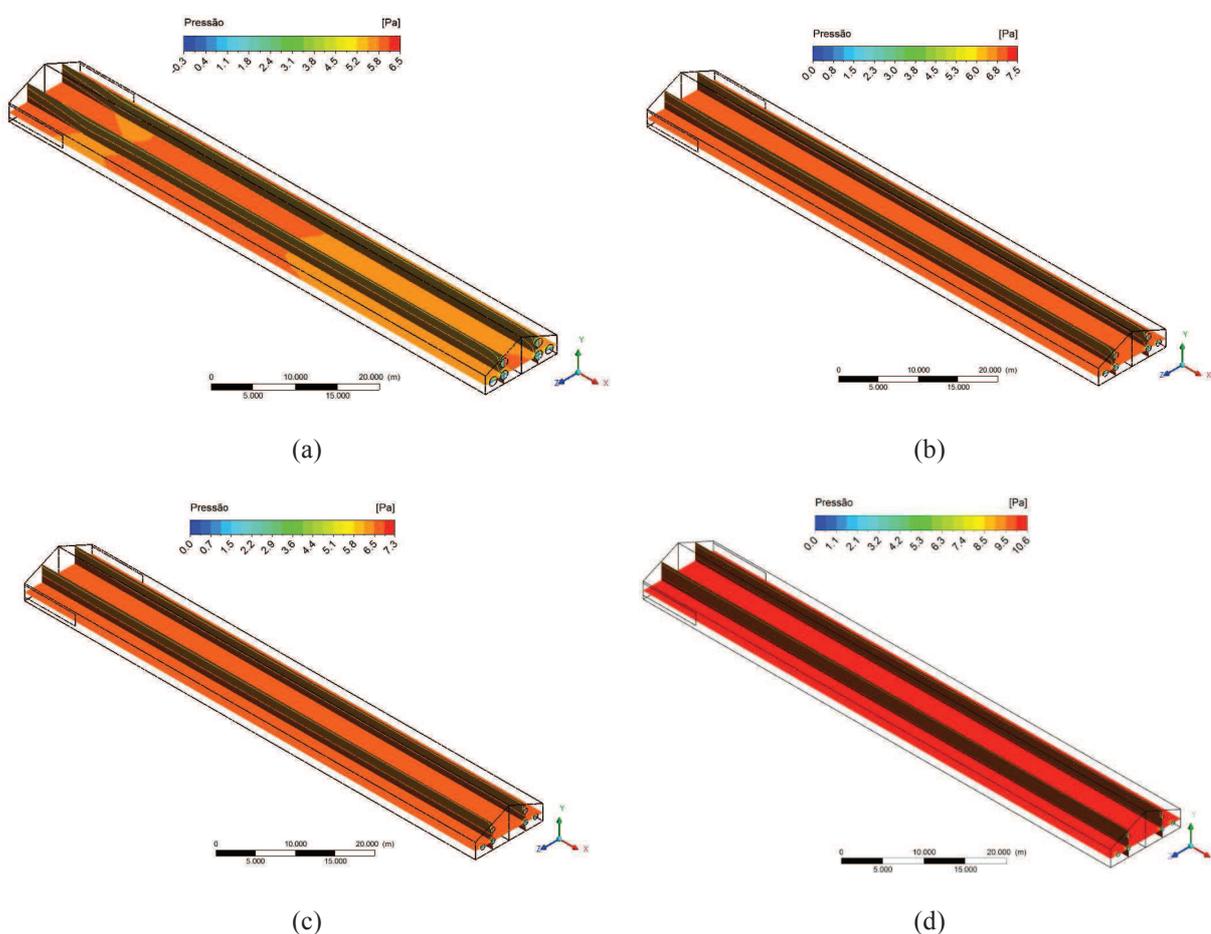
Figura 70 – Campos de turbulência para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (c) e ED24 (d).



7.7 ISOBÁRICAS E PERDA DE CARGA

Finalmente, campos com pressão relativa nos planos XZ ($y=1,3m$) e XZ ($z=3,1m$) são apresentados na Figura 71 (resultado para as malhas intermediárias). Verificou-se que não há grande variação da pressão no domínio e as isobáricas mostram que somente próximo aos exaustores a pressão diminui, uma vez que nesta região foi imposto pressão relativa nula. Observou-se que as maiores pressões encontram-se no exaustor com menor vazão, ED24 (Figura 71d).

Figura 71 – Isobáricas para os casos do aviário de Montenegro com exaustores: EM50 (a), EM36 (b), EM30 (c) e ED24 (d).



A perda de carga e sua respectiva vazão encontram-se na Tabela 17. Observou-se que a maior perda de carga aconteceu no caso do exaustor com menor vazão, ED24 ($\Delta P=7,62Pa$). A vazão nominal do exaustor Munters® ED24 é $2,998\text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ou seja, a maior perda de carga observada forneceu um valor aproximadamente 6% menor. Os exaustores EM50, EM36 e EM30 forneceram valores de aproximadamente 1,9%, 2,1% e 2,8% menores em relação as

vazão nominal, respectivamente. Isto ocorre porque, fixando o volume de ar a ser renovado, é esperado que um exaustor com uma menor vazão precise de mais energia para manter o escoamento e, conseqüentemente, a perda de carga será maior.

Tabela 17 – Perda de carga e vazão.

Caso	Tipo de malha			
	Grosseira	Intermediária	Refinada	
EM50	ΔP [Pa]	4,81	4,79	4,98
	Q [m ³ s ⁻¹]	9,748	9,749	9,741
EM36	ΔP [Pa]	5,52	5,76	5,82
	Q [m ³ s ⁻¹]	5,389	5,384	5,383
EM30	ΔP [Pa]	6,14	6,18	6,13
	Q [m ³ s ⁻¹]	3,666	3,665	3,666
ED24	ΔP [Pa]	7,86	7,63	7,62
	Q [m ³ s ⁻¹]	2,820	2,824	2,824

CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados quatro estudos numéricos em aviários industriais. O primeiro (i) analisou três modelos turbulentos para o aviário da pesquisa de BLANES-VIDAL *et al.* (2008). Selecionou-se o modelo k- ϵ padrão e, para o mesmo domínio, foi decidido estudar mais duas configurações (ii) com variação na inclinação do telhado. Os outros dois estudos basearam-se no aviário localizado em Montenegro (RS), avaliando (iii) o uso ou não de defletores, uma inclinação menor e aplicação de forro e (iv) o uso de quatro tipos de ventiladores considerando a perda de carga do escoamento. Para todos os casos foram apresentados campos de variação de y^+ e histogramas com a qualidade dos elementos, avaliando os seguintes resultados da simulação: perfis de velocidade e temperatura, campos de velocidade e temperatura, energia cinética turbulenta e campos de pressão.

Por mais informações que autores possam dispor em seus artigos, sempre há incerteza que interferem na solução. No caso de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), as distâncias entre as janelas de ventilação têm interferência significativa no resultado. Além disso, a medição da velocidade média dos exaustores tem uma elevada incerteza de medição, logo foi difícil encontrar o valor correto para a velocidade na entrada.

A análise ideal para os valores de y^+ seria garantir que todos os valores das paredes do domínio fiquem entre um mínimo e máximo aceitável. Quando isso não é possível (caso de edificações cujas malhas devem ser grandes) deve-se fazer uma análise qualitativa associada a histogramas de um critério de qualidade de malha mais crítico para definir a possibilidade ou não da simulação com a malha gerada.

A DFC aplicada a edificações é uma solução útil e relativamente barata para fazer modificações em uma estrutura real e tomar decisões para tornar a instalação mais eficiente. Validações na literatura ratificam que simulações em DFC apresentam boa aproximação do escoamento real, e, portanto, se usada corretamente, as soluções atingidas são confiáveis.

Atualmente, o obstáculo principal das simulações continua sendo os computadores (*hardware*), uma vez que uma boa capacidade computacional permite, na teoria, gerar malhas tão finas que se aproximam da ordem de escala próximas da região em que hipótese do contínuo não é válida.

Para aumentar a velocidade do escoamento, fixando o uso de um tipo de exaustor, pode-se reduzir a inclinação do aviário, considerar o uso de forro ou empregar defletores no teto transversais ao sentido do escoamento. No entanto, o projetista precisa ficar atento para que a velocidade máxima não ultrapasse um limite aceitável que possa causar desconforto que

estressa os frangos, reduzindo o peso corporal e podendo acarretar perdas na produção devido a doenças pulmonares nas aves.

Para um mesmo número e posição dos exaustores, é claro que aqueles com maior vazão proporcionam maiores valores de velocidade ao longo do aviário. Para analisar a melhor opção é preciso fazer uma relação custo/benefício considerando o uso ou não de defletores e a perda de carga do escoamento.

Devido a alguns dos gases produzidos durante o ciclo de vida dos frangos serem tóxicos, como a amônia e o dióxido de carbono, e ao atingir determinados níveis de concentração que podem causar perdas da produção, é mais recomendado um sistema que use pressão negativa que retira o ar contaminado do ambiente a cada período de tempo.

Para trabalhos futuros, seguem algumas sugestões:

- I. Criar uma malha estruturada para os modelos deste trabalho;
- II. Inserir uma variação diária da temperatura nas paredes e considerar que ventiladores e aquecedores ligam/desligam de acordo com a operação;
- III. Fazer a modelagem de efeitos convectivos nas paredes;
- IV. Introduzir o efeito da umidade no ambiente e avaliar parâmetros de conforto térmico da literatura;
- V. Adicionar o efeito causado pelas presenças dos frangos no galpão, principalmente em relação à geração total de calor e produção de gases nocivos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, P.G. de, ABREU, V.M.N., Ventilação na avicultura de corte, **Embrapa**, Brasil, Concórdia, SC, 43 p. 2000.
- BECK, J.V, ARNOLD, K.J., **Parameter Estimation in Engineering and Science**, 1st ed., John Wiley & Sons Inc, 522p., 1977.
- BAÊTA, F.C., SOUZA, C.F., **Ambiência em edificações rurais – conforto térmico animal**, Viçosa: UFV, 246p., 1997.
- BARTH, T.J., JESPERSON, D.C., The design and application of upwind schemes on unstructured meshes, **AIAA**, pp. 89-0366, 1989.
- BIANCHI, M.V.A., Frangos de Corte sob um telhado quente, **Revista Avicultura Industrial**, 2013, Disponível em: < <http://www.aviculturaindustrial.com.br> >. Acesso em 30 abr. 2014.
- BJERG, B., SVIDT, K., ZHANG, G., MORSING, S., The effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room, **Journal of Agricultural Engineering Research** **77 (3)**, pp. 317-326, 2000.
- BLANES-VIDAL, V., FITAS, V., TORRES, A., Differential pressure as a control parameter for ventilation in poultry houses: effect on air velocity in the zone occupied by animals, **Spanish Journal of Agricultural Research** **5 (1)**, pp. 31-37, 2007.
- BLANES-VIDAL, V., GUIJARRO, E., BALASCH, S., TORRES, A.G., Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building, **Biosystems Engineering** **100**, pp. 105 -116, 2008.
- BORTOLI, A.L., **Introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional**, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 134 p., 2000.
- BURDEN, RICHARD L., FAIRES, J. DOUGLAS. **Numerical Analysis**, 9th ed. USA, Boston: Books/Cole, 872 p., 2010.
- BUSTAMANTE, E., GARCÍA-DIEGO, F.J., CALVET, S., ESTELLÉS, F., BELTRÁN, P., HOPITALER, A., TORRES, A.G., Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: the validation of computational fluid dynamics (CFD) in cross-mechanically ventilated broiler farm, **Energies** **6**, pp. 2605-2623, 2013.
- CAMPOS, E.J., **Avicultura: razões, fatos e divergências**, Belo Horizonte: FEP-MVZ Editora, 311p., 2000.
- CARVALHO-CURI, T.M.R. de, MOURA, D.N., VERCELLINO, R.A., Ventilação de precisão, **Revista Produção Animal – Avicultura**, ed. 81, abr. 2014.
- COBB. **Manual de Manejo de Frangos de Corte**. Disponível em: < www.cobb-vantress.com >. Acesso em: 16 mar. 2014.
- CURTIS, S.E., **Environmental management in animal agriculture**, Iowa State University Press, 409p., 1983.

CHEN, Q., Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations, **Numerical Heat Transfer**, Part B, Vol 28, pp.353-369, 1995.

FAWAZ, H., ABIAD, M.G., CHADDAR, N., GHALI, K., Solar-assisted localized ventilation system for poultry brooding, **Energy and Buildings** 71, pp. 142-154, 2014.

FOX, Robert W., MCDONALD, Alan T.,; PRITCHARD, Philip J., **Introdução à mecânica dos fluidos**, Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 8ª ed., 871 p., 2014.

GERBENS-LEENES, P.W., MEKONNEN, M.M., HOEKSTRA, A.Y, The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems, **Water Resources and Industry** 1-2, pp. 25 – 36, 2013.

GSi®, Boletim de informações técnicas: ventilação mínima, número 14.00/018, Jan. 2012.

GUIMARÃES, R.M., **Influência da razão de aspecto na convecção mista turbulenta em cavidade retangular**, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 105 p., 2012.

GRANGER, R.A., **Fluid mechanics**, New York: Dover Publications, 896 p., 1995.

HARRAL, B.B., BOON, C.R., Comparison of predicted and measured air flow Patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals, **Journal of Agricultural Engineering Research** 66, pp. 221-228, 1997.

HAMERSCHLAG, K., **Meat eater's guide**, Environmental Working Group. (EWG), 2011.

HOOFF, T.V., BLOCKEN, B., HEIJST, G.J.F., On the suitability of steady RANS CFD for forced mixing ventilation at transitional slot Reynolds numbers, **Indoor Air** 23, pp. 236-249, 2012.

LAUNDER, B.E., SPALDING, D.B., The numerical computation of turbulent flows, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 3, pp. 269-289, 1974.

MACARI, M., MENDES, A.A., **Manejo de matrizes de corte**. Campinas: FACTA, 421 p., 2005.

MALISKA, Clovis R., **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Fundamentos e Coordenadas Generalizadas, Florianópolis, Brasil. LTC, 424p., 1995.

MENTER, F.R., Improved two-equation k- ω turbulence model for aerodynamics flows, **NASA TM-103975**, pp. 1-18, 1992.

MISTRITIS, A., de JONG, T., WAGEMANS, M.J.M., BOT, G.P.A., Computational fluid dynamics as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings, **Netherlands Journal of Agricultural Science** 45, pp. 81-96, 1997.

MORAN, Michael J., SHAPIRO, Howard N., **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, Rio de Janeiro: LTC: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 7ª ed., 2013.

MOSTAFA, E., LEE, I.B., SONG, S.H., KNOWN, K.S., SEO, I.H., HONG, S.W., HWANG, H.S., BIOTG, J.P., HAN, H.T., Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system, **Biosystem Engineering** 112, pp. 293-303, 2012.

- NÃÃS, I.A., **Princípios do conforto térmico na produção animal**, São Paulo: Ícone, 1989.
- NIELSEN P.V. StrØmningsforhold i luftkondionerede lokaler. PhD thesis, Technical University of Denmark, 1974 (in Danish; English translation: **Flow in Air Conditioned Rooms**, 1976).
- NIELSEN P.V. Specification of a two-dimensional test case. Technical report, International Energy Agency. **Annex 20: Air Flow Pattern within Buildings**, 1990.
- NORTON, T., SUN, Da-Wen, GRANT, J., FALLON, R., DODD, V., Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review, **Bioresource Technology** **98**, pp. 2386-2414, 2007.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), **Agricultural Outlook 2014-2023**, OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.
- OUWERKERK, E.N.J. van, VOSKAMP, J.P., ALISKAN, Y., Climate simulation and validation for an aviary systems for laying hens, **Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Report N 94-C-063, AgENG**, 1994.
- PATANKAR, S.V., **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, Minnesota, USA. McGRAW-HILL Book Company, 205p , 1980.
- POPE, S.B., **Turbulent Flows**, UK, Cambridge University Press, 771p., 2000.
- RHIE, C.M., CHOW, W.L., A numerical study of turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation, **AIAA**, pp. 89-0998, 1982.
- ROBINSON, T.P., WINT, G.R.W., CONCHEDDA, G., BOECKEL, T.P.V., ERCOLI, V., PALAMARA, E., CINARDI, G., D'AIETTI, L., HAY, S.I., GILBERT, M., Mapping the global distribution of livestock, **Plos ONE**, DOI: 10.1371, 2014.
- ROCHA, K.S.O., TINÔNOCO, I.F.F., MARTINS, J.H., SARAZ, J.O., MARTINS, M.A., Modeling and simulation of internal environment conditions in high –density poultry houses with ventilation using computational fluid dynamics, **Proceedings International Conference of Agricultural Engineering**, Zurich, 06th to 10th July 2014.
- ROSA, P.M., **Estudo do escoamento turbulento em dutos corrugados com cavidade helicoidal**, Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 128p., 2014.
- SARAZ, J.A.O, **Measurement and CFD Modelling of Ammonia Concentration Flux and Thermal Environment Variables in Open Inside Broiler Housing**. PhD. thesis, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brazil, 132 p., 2010.
- SARAZ, J.A.O., MARTINS, M.A., MARÍN, O.L.Z., DAMASCENO, F.A., VELASQUEZ, H.J.C., Una revisión acerca de la dinamica de fluidos computacionales (CFD) em instalaciones avícolas, **Dyna año 79**, pp. 142-149, 2012.
- SARAZ, J.A.O., MARTINS, M.A., ROCHA, K.S.O., MACHADO, N.S., VELASQUES, H.J.C., Use of computational fluid dynamics to simulate temperature distribution in broiler houses with negative and positive tunnel type ventilation systems, **Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica** **16**, pp. 159-166, 2013.

SCHILICHTING, H. **Boundary-layer Theory**. New York, USA. McGRAW-HILL Book Company, 1979.

SEO, I.H., LEE, I.B., MOON, O.K., KIM, H.T., HWANG, H.S., HONG, S.W., BITOG, J.P., YOO, J.I., KWON, K.S., KIM, Y.H., HAN, J.W., Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations, **Biosystems Engineering** **104**, pp. 106-117, 2009.

SUSIN, R.M.S., **Análise numérica do escoamento em uma sala retangular ventilada por um jato horizontal de parede**, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 136 p., 2007.

TENNEKES, Henk; LUMLEY, John L, **A First Course in Turbulence**, Massachusetts: MIT Press Design Department, 1972.

TINÔCO, Ilda Fátima Ferreira. Avicultura industrial: Novos conceitos de materiais, concepções, técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. **Revista brasileira de ciência avícola**, vol. 3, n1, 2001.

UBABEF. **Relatório Anual 2014**. Disponível em: < www.ubabef.com.br >. Acesso em: 02 fev. 2015.

User's Manual Version 14.5, 2012. Copyright 1996-2012 ANSYS® Europe Ltd.

VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W. **An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. England. Pearson Education Limited, 403 p., 2007.

VIGODERIS, R.B., **Sistemas de Aquecimento de Aviários e seus Efeitos no Conforto Térmico Ambiental, Qualidade do ar e Performance Animal, em Condições de Inverno, na Região Sul do Brasil**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 104 p., 2006.

VIGODERIS, R.B., **Ambiência e bem-estar animal em instalações zootécnicas – aplicações práticas**, **I Jornada Universitária da Unidade Acadêmica de Garanhuns**, Garanhuns, Pernambuco, Brasil, out. 2007.

WILCOX, D.C., **Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models**, **AIAA**, vol. 26, pp. 1299-1310, 1988.

WORLEY, M.S., MANBECK, H.B., **Modelling particle transport and air flow in ceiling inlet ventilation systems**, **Transactions of the ASAE** **38 (1)**, 231-239, 1995.

YAKHOT, V., ORSZAG, S.A., THANGAM, S., GATSKI, T.B., SPEZIALE, C.G., **Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique**, **Phys. Fluids A**, vol. 4, pp 1510-1520, 1992.

XIN, H., BERRY, I.L., TABLER, G.T., COSTELLO, T.A., **Heat and moisture production of poultry and their housing systems: broilers**, **Transactions of ASAE**, 44(6), pp 1851-1857, 2001.

GLOSSÁRIO

Cama – Material no piso do aviário que é usado para absorver os excrementos das aves.

Conversão alimentar – Razão entre a quantidade (unidade de massa) de ração consumida pelo frango de corte e sua massa no abate.

Cortinas defletoras – Lonas fabricadas usualmente com polímero e usadas para reduzir a área de seção transversal na direção do escoamento, aumentando a velocidade do fluido.

Hipertermia – A temperatura corporal do organismo sobe acima do normal, prejudicando seu metabolismo.

Hipotermia – A temperatura corporal do organismo cai abaixo do normal, prejudicando seu metabolismo.

Pressão negativa – Exaustores retiram ar do interior do galpão.

Pressão positiva – Ventiladores insuflam ar para o interior do galpão.

Ventilação tipo túnel – Galpão de frango de corte cujas entradas principais localizam-se numa extremidade da instalação e as saídas principais na outra.

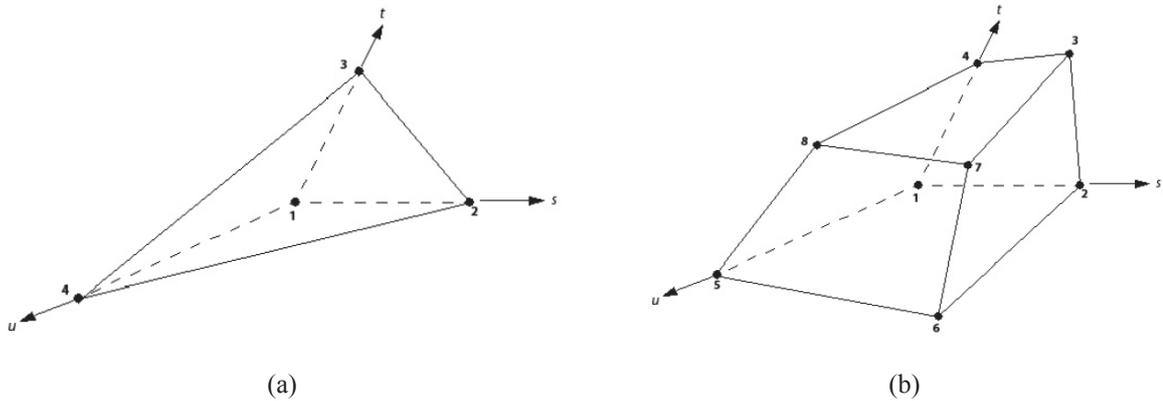
APÊNDICE A – MALHAS

FUNÇÕES DE FORMA

Conforme visto na seção 3.5 deste trabalho o MVFbEF implementado no Ansys® CFX v14.5 usa funções de forma para aproximação das propriedades nos pontos de integração da malha e cada tipo de elemento tem funções próprias.

Para um elemento tetraédrico (Figura 72a) as funções de forma encontram-se na Equação A.1 e para um elemento hexaédrico (Figura 72b) vale a Equação A.2.

Figura 72 – Elemento tetraédrico (a) e hexaédrico (b). Fonte: Ansys® CFX, 2012.



$$\begin{aligned}
 N_1(s, t, u) &= 1 - s - t - u, \\
 N_2(s, t, u) &= s, \\
 N_3(s, t, u) &= t, \\
 N_4(s, t, u) &= u.
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

$$\begin{aligned}
 N_1(s, t, u) &= (1 - s)(1 - t)(1 - u), \\
 N_2(s, t, u) &= s(1 - t)(1 - u), \\
 N_3(s, t, u) &= st(1 - u), \\
 N_4(s, t, u) &= (1 - s)t(1 - u), \\
 N_5(s, t, u) &= (1 - s)(1 - t)u, \\
 N_6(s, t, u) &= s(1 - t)u, \\
 N_7(s, t, u) &= stu, \\
 N_8(s, t, u) &= (1 - s)tu.
 \end{aligned}
 \tag{A.2}$$

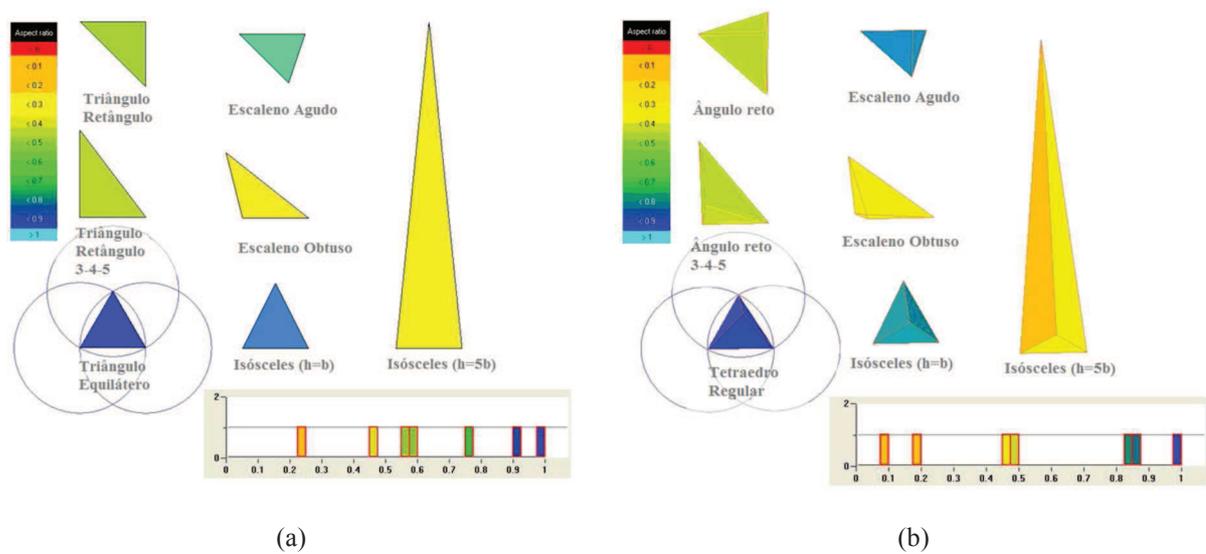
CRITÉRIO *QUALITY*

O critério *Quality* é o critério de qualidade de malha padrão no ICEM CFD do Ansys® CFX v14.5. Trata-se um modo de avaliar e melhorar a malha gerada. Este critério varia de 0 a 1, onde 1 seria um elemento com qualidade ótima e 0 com qualidade ruim. O critério *Quality* é calculado de acordo com o tipo de elemento (Ansys® CFX, 2012), conforme será mostrado a seguir.

Elementos Tri e Tetra

A qualidade é calculada como a razão de aspecto dos elementos. Para elementos Tri a razão de aspecto é definida como a razão entre a área do triângulo dividido pelo comprimento de sua maior aresta e o mesmo valor para um triângulo equilátero (Equação A.3), conforme pode ser visto na Figura 73a. A definição para elementos Tetra é semelhante (Equação A.4) porém envolve a razão entre o volume do tetraedro dividido pelo raio da esfera circunscrita ao cubo e o mesmo valor para um tetraedro equilátero, conforme pode ser visto na Figura 73b. Em ambos os casos, os valores da razão de aspecto variam de 0 a 1, onde 0 indica que o elemento não tem área ou volume e 1 corresponde a um elemento perfeitamente regular.

Figura 73 – Razão de aspecto para elementos do tipo Tri (a) e Tetra (b). Fonte: adaptado de Ansys® CFX, 2012.



$$RA_{Tri} = \frac{(A/l_{max})_i}{(A/l_{max})_{equilátero}}, \quad (A.3)$$

$$RA_{Tetra} = \frac{(\Psi/r_c^3)_i}{(\Psi/r_c^3)_{equilátero}}, \quad (A.4)$$

onde, RA é a razão de aspecto do elemento, l_{max} o comprimento da maior aresta e r_c o raio da esfera circunscrita.

Elementos Quad

O cálculo é baseado no *Determinant* que é a razão do menor determinante da matriz Jacobiana dividido pelo seu maior determinante. Nesta opção, o determinante de cada nó do hexaedro é encontrado. A faixa de valores é de 0 a 1, onde 1 significa elemento perfeitamente regular e 0 indica elemento degenerado em uma ou mais arestas. Valores negativos indicam elementos invertidos.

Elementos Hexa

A qualidade é um diagnóstico ponderado entre o *Determinant* (entre -1 e 1), *Max Orthogls* (calcula a máxima diferença entre os ângulos internos para cada elemento) e *Max Warppls* (máxima deformação angular). O menor valor entre os três diagnósticos normalizados é usado.

Elementos Pyramid

A qualidade é calculada como o *Determinant*.

Elementos Prism

A qualidade é calculada entre o mínimo entre o *Determinant* e *Warpage* (distorção de um plano, onde 0 é plano e 90 degenerado). *Warpage* é normalizado entre um fator de 0 a 1, onde 90 graus é 0 e 0 graus é 1.

MALHAS APLICADAS

Todas as malhas deste trabalho foram geradas utilizando o ICEM CFD. São malhas não estruturadas com elementos prismáticos próximo às paredes e tetraedros no interior do domínio. Os parâmetros utilizados para construí-las foram o tamanho máximo de elemento, fator de escala, altura do primeiro nó a parede, taxa de expansão e número de camadas.

As malhas utilizadas nos resultados do **Capítulo 4** encontram-se nas Figuras 74 a 76.

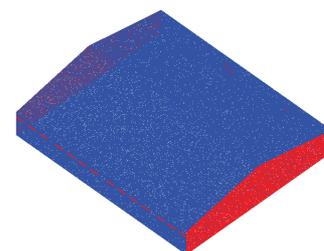
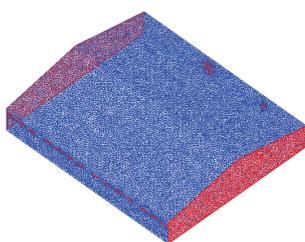
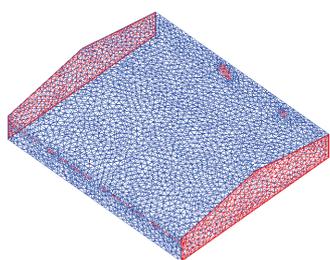
Figura 74 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), modelo k- ϵ padrão.

Malha Grosseira

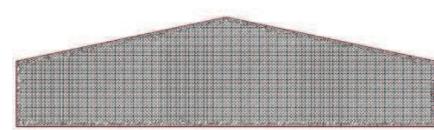
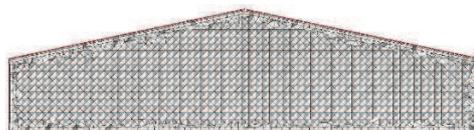
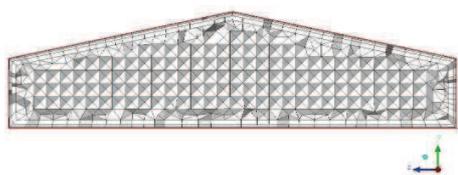
Malha Intermediária

Malha Refinada

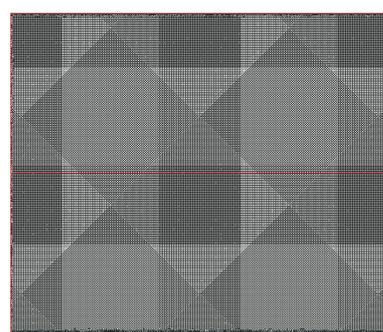
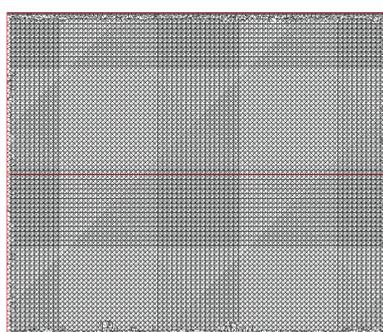
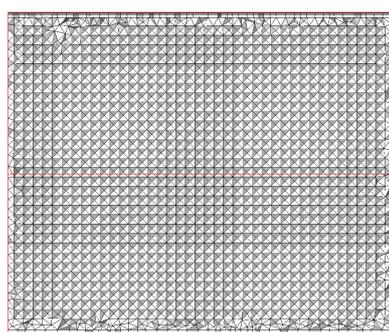
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=7\text{m}$ (posição do centro do maior exaustor)



Vista interna da malha no plano $y=1,18\text{m}$ (posição dos centros dos exaustores)



Vista interna da malha no plano $z=7,5\text{m}$ (metade da largura do aviário)

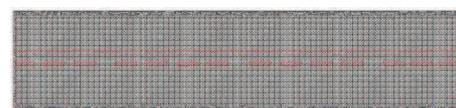
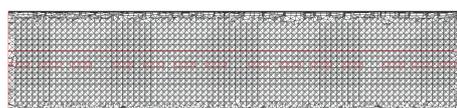
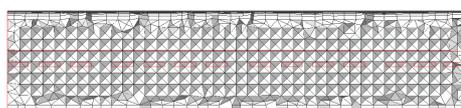


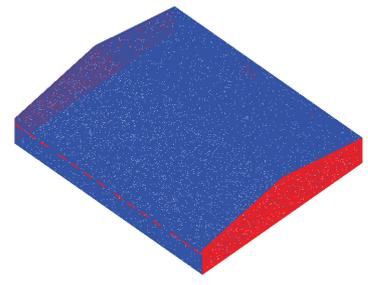
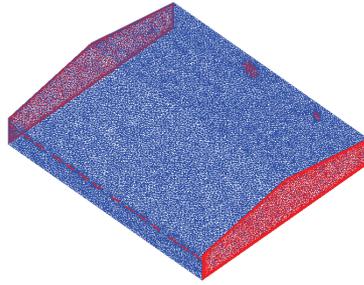
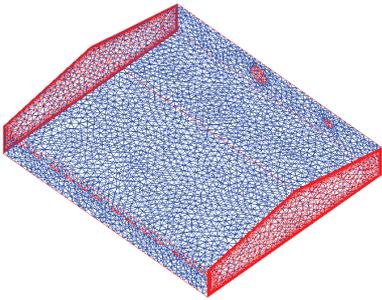
Figura 75 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), modelo RNG k- ϵ .

Malha Grosseira

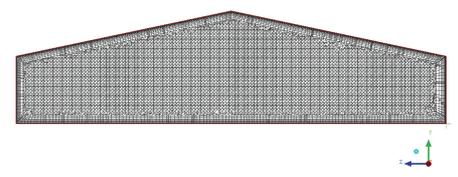
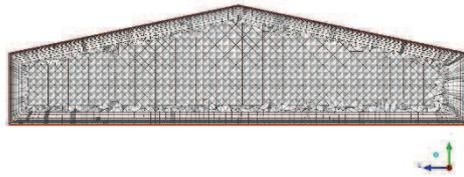
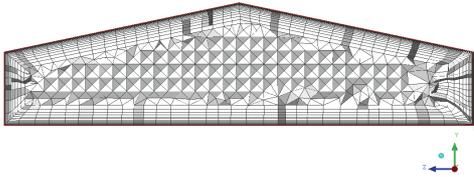
Malha Intermediária

Malha Refinada

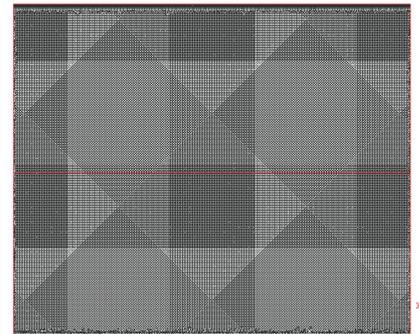
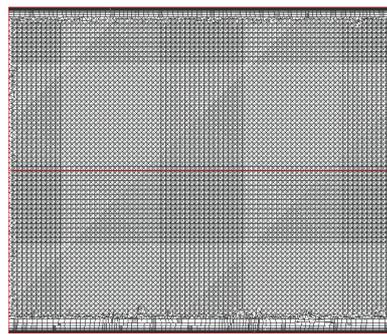
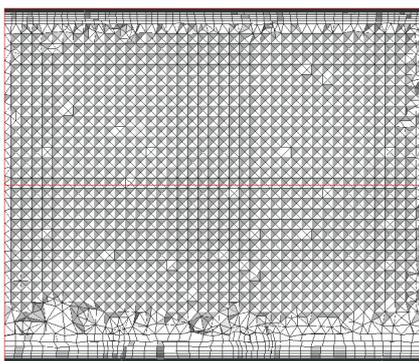
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=7\text{m}$ (posição do centro do maior exaustor)



Vista interna da malha no plano $y=1,18\text{m}$ (posição dos centros dos exaustores)



Vista interna da malha no plano $z=7,5\text{m}$ (metade da largura do aviário)

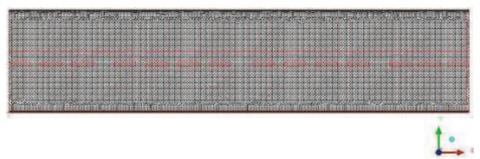
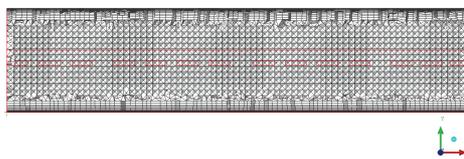
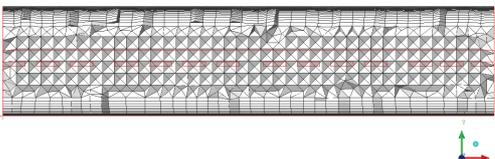


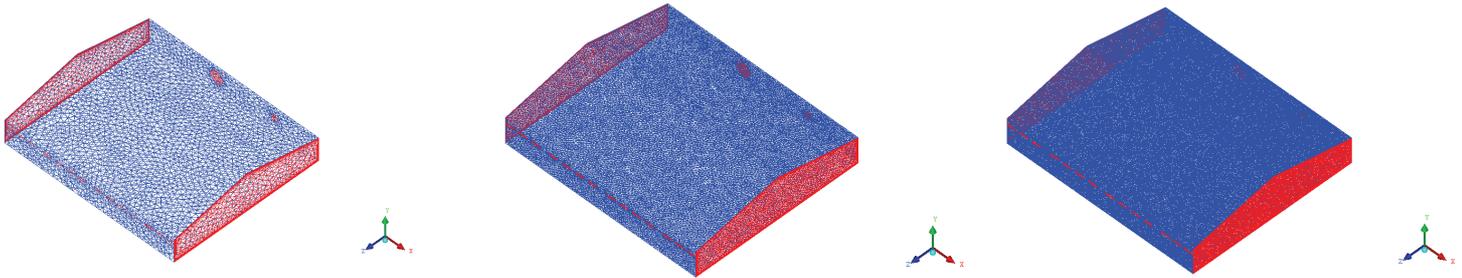
Figura 76 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), modelo $k-\omega$.

Malha Grosseira

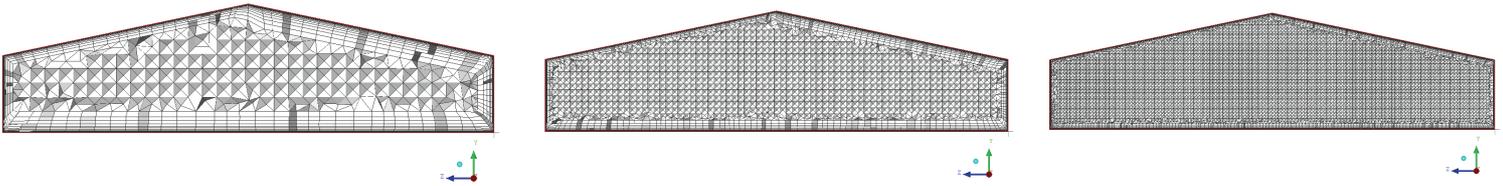
Malha Intermediária

Malha Refinada

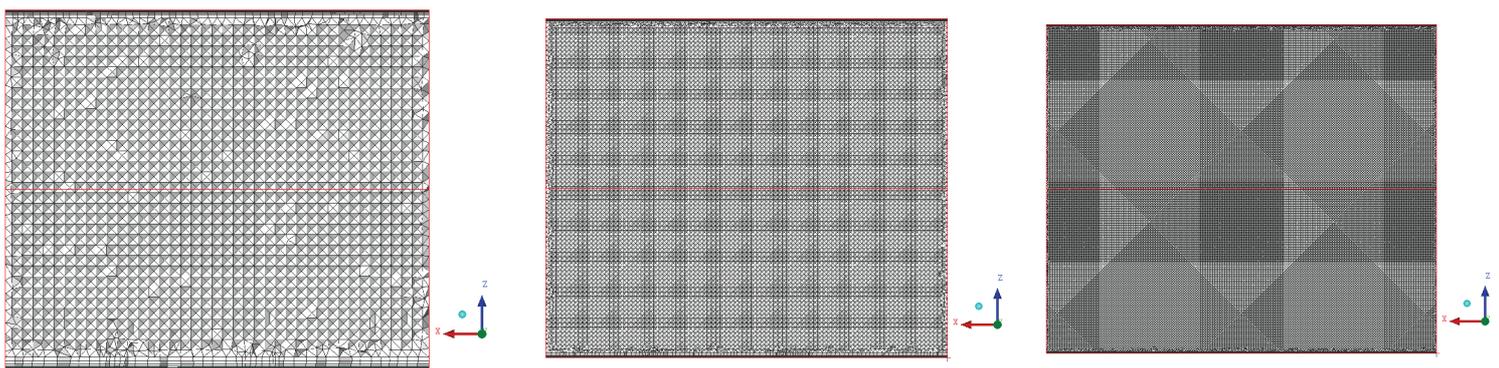
Vista isométrica



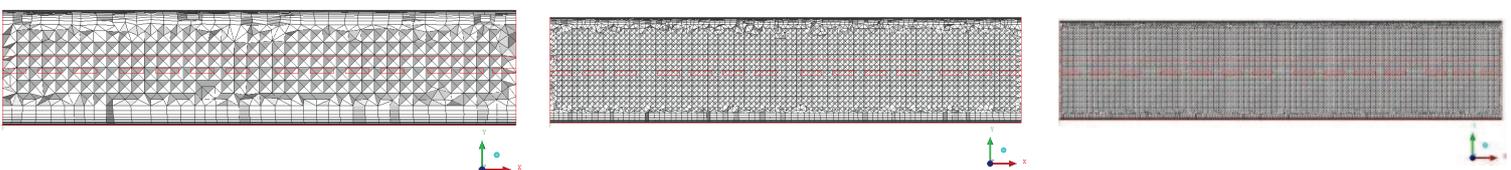
Vista interna da malha no plano $x=7\text{m}$ (posição do centro do maior exaustor)



Vista interna da malha no plano $y=1,18\text{m}$ (posição dos centros dos exaustores)



Vista interna da malha no plano $z=7,5\text{m}$ (metade da largura do aviário)



As malhas utilizadas nos resultados do **Capítulo 5** encontram-se nas Figuras 74, 77 e 78.

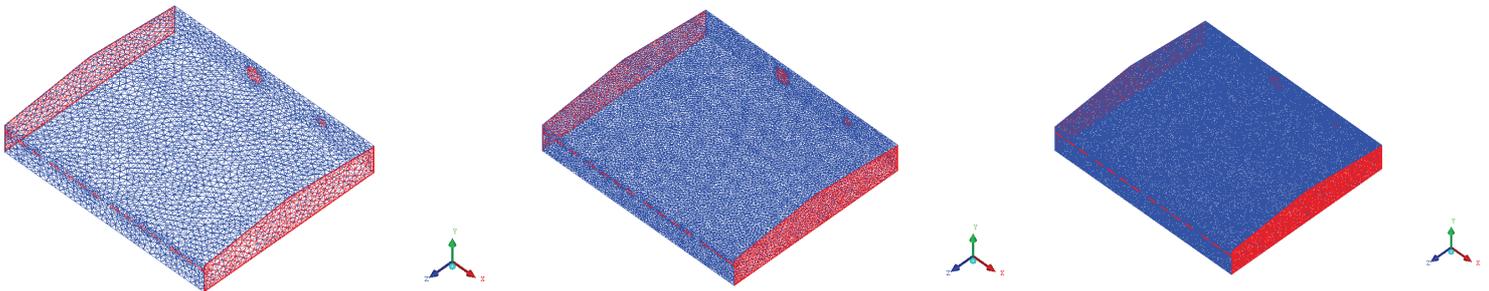
Figura 77 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), inclinação de 6°.

Malha Grosseira

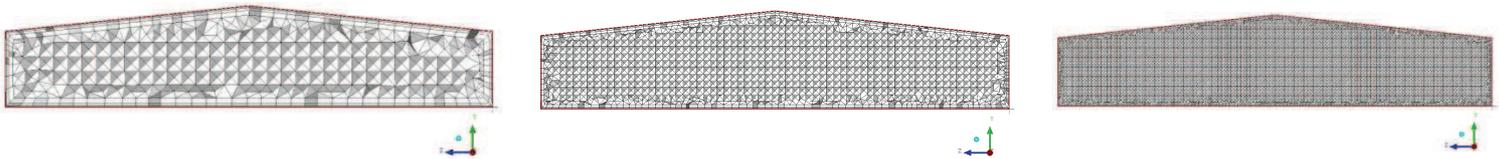
Malha Intermediária

Malha Refinada

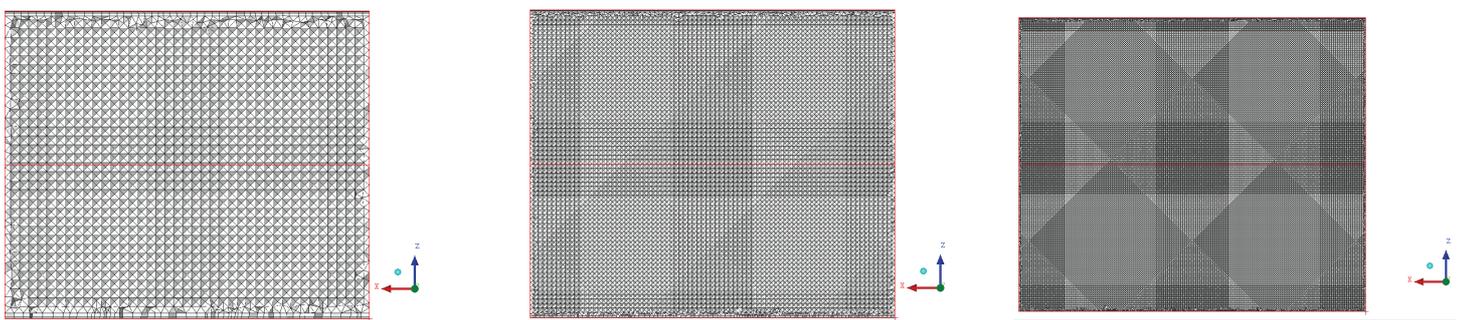
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=7\text{m}$ (posição do centro do maior exaustor)



Vista interna da malha no plano $y=1,18\text{m}$ (posição dos centros dos exaustores)



Vista interna da malha no plano $z=7,5\text{m}$ (metade da largura do aviário)

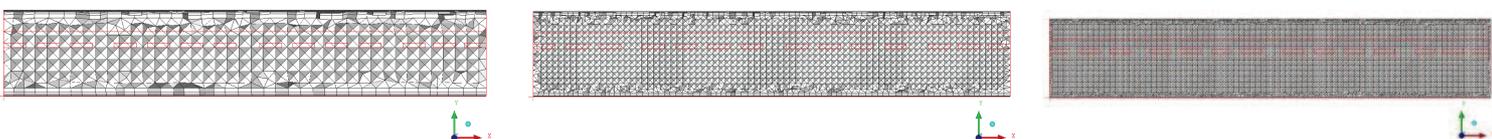


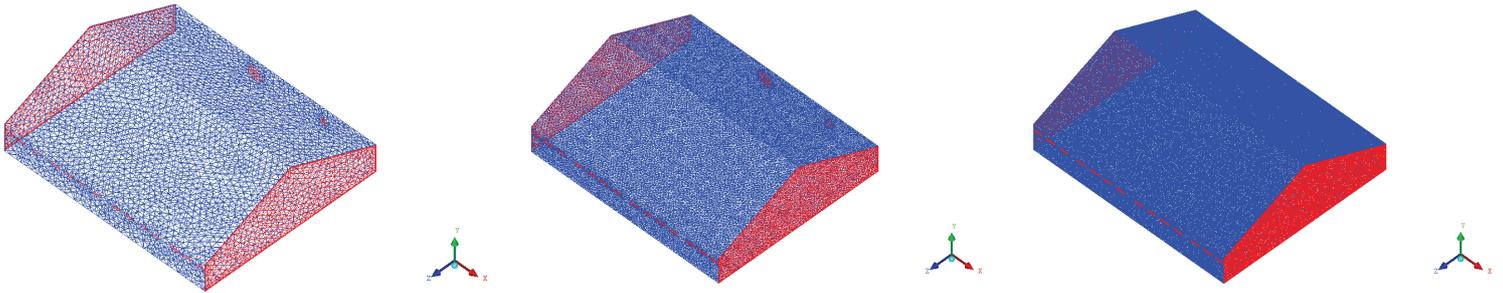
Figura 78 – Malhas híbridas para o aviário de BLANES-VIDAL *et al.* (2008), inclinação de 24°.

Malha Grosseira

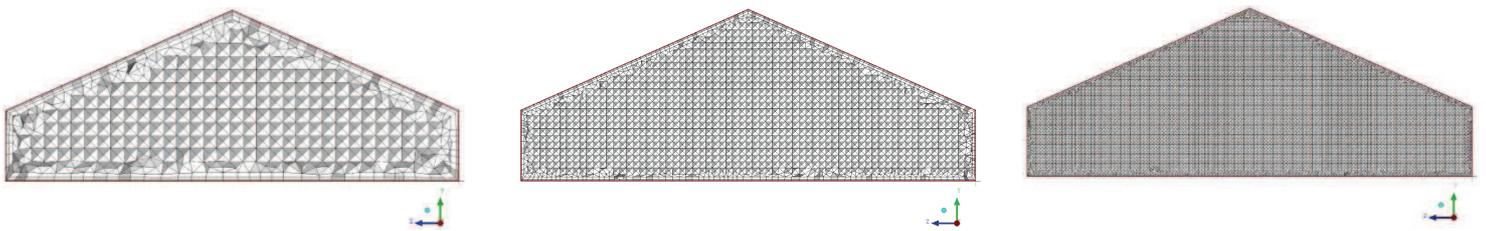
Malha Intermediária

Malha Refinada

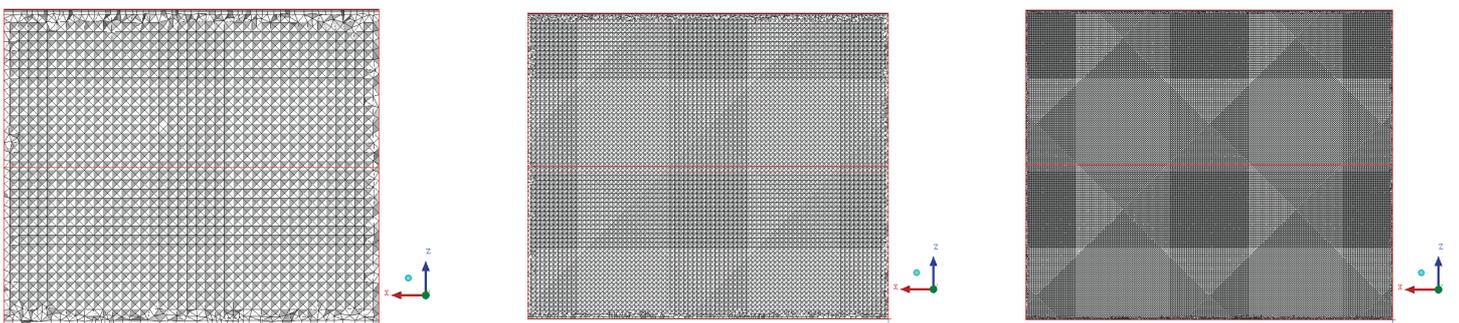
Vista isométrica



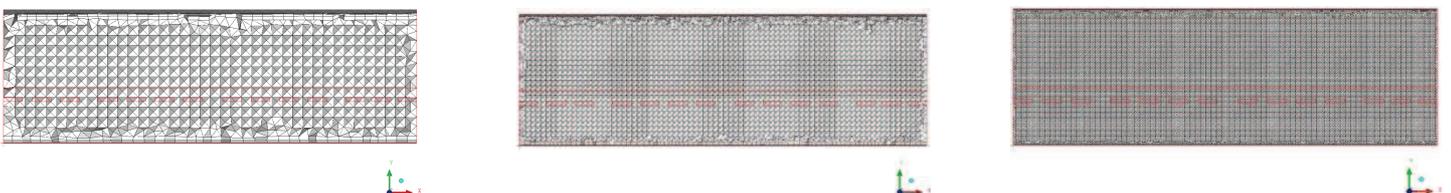
Vista interna da malha no plano $x=7\text{m}$ (posição do centro maior exaustor)



Vista interna da malha no plano $y=1,18\text{m}$ (posição dos centros exaustores)



Vista interna da malha no plano $z=7,5\text{m}$ (metade da largura do aviário)



As malhas utilizadas nos resultados do **Capítulo 6** encontram-se nas Figuras 79 a 82.

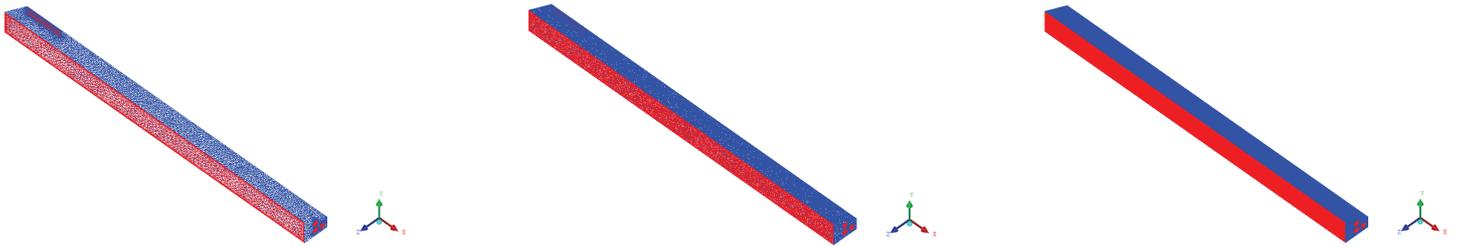
Figura 79 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, inclinação de 24° .

Malha Grosseira

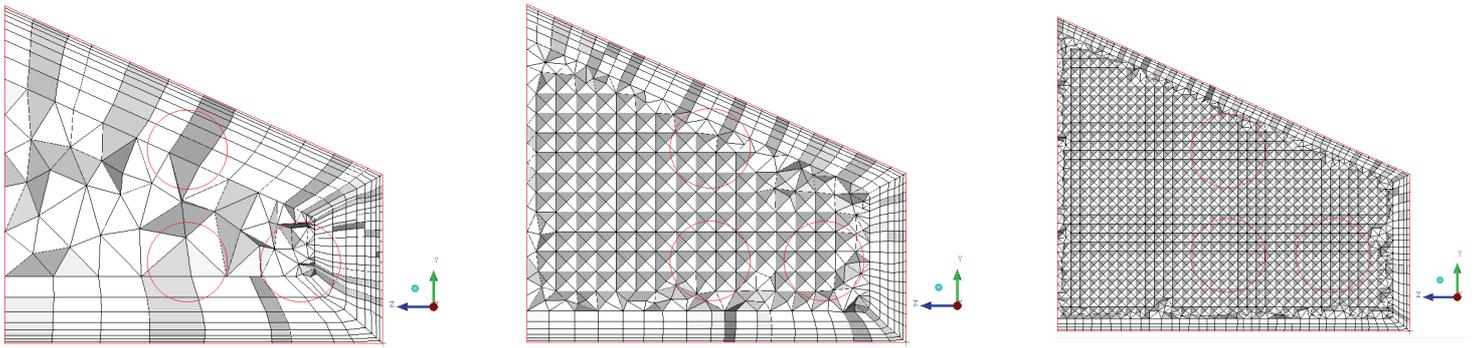
Malha Intermediária

Malha Refinada

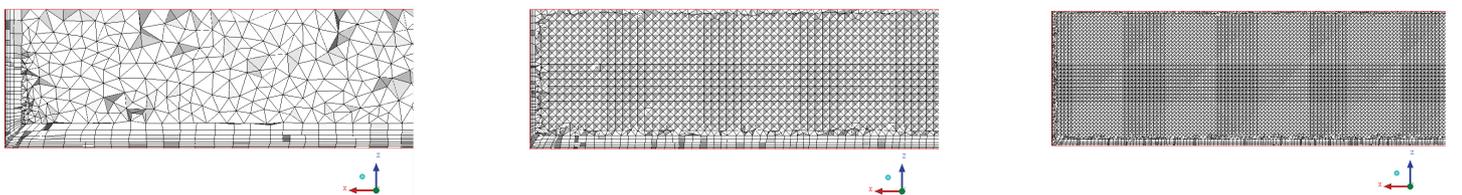
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=4,5\text{m}$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na horizontal)



Vista interna da malha no plano $z=3,1\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)

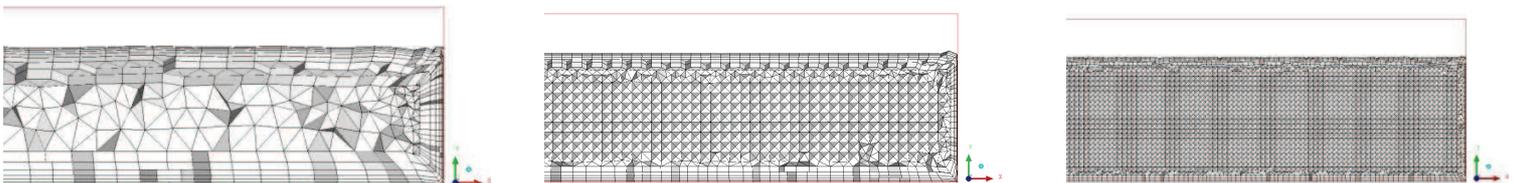


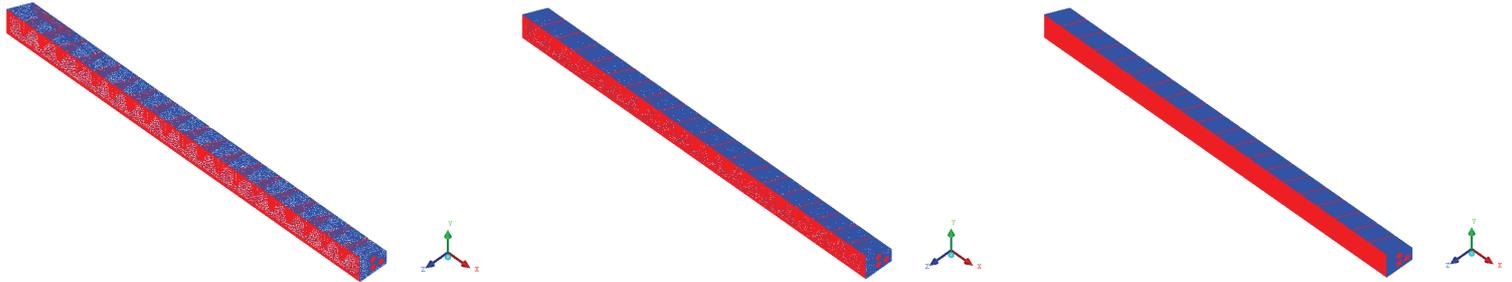
Figura 80 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, defletores.

Malha Grosseira

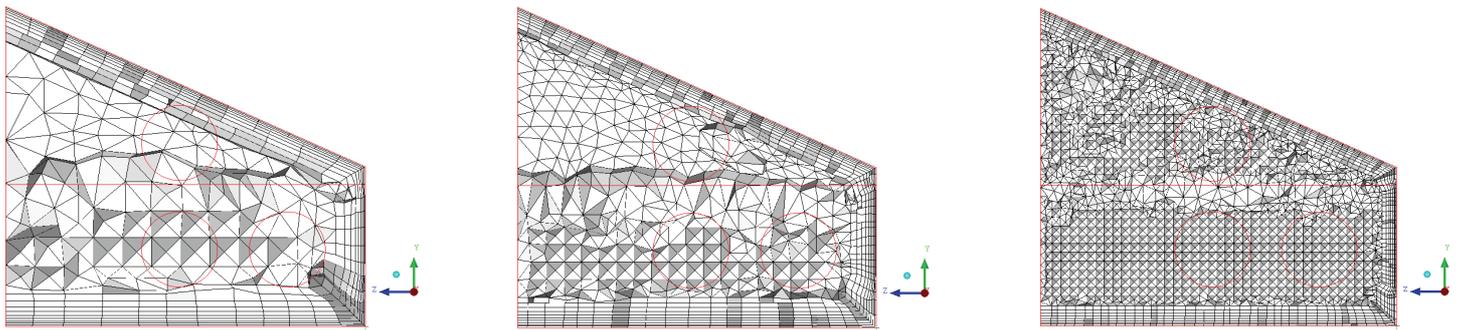
Malha Intermediária

Malha Refinada

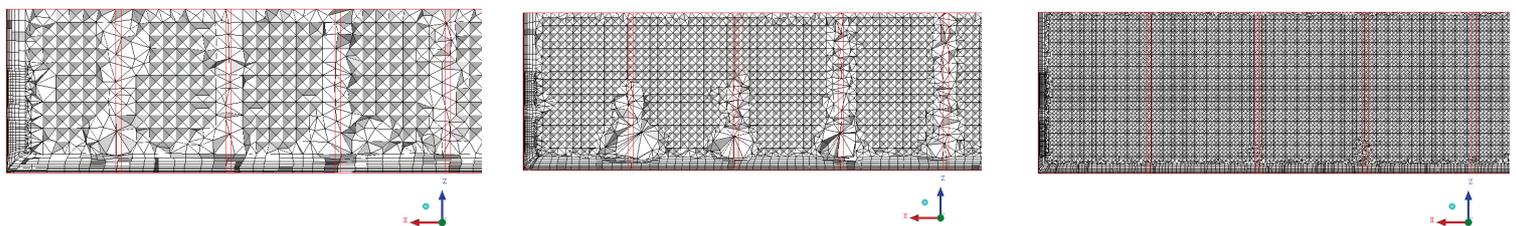
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=4,5\text{m}$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na horizontal)



Vista interna da malha no plano $z=3,1\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)

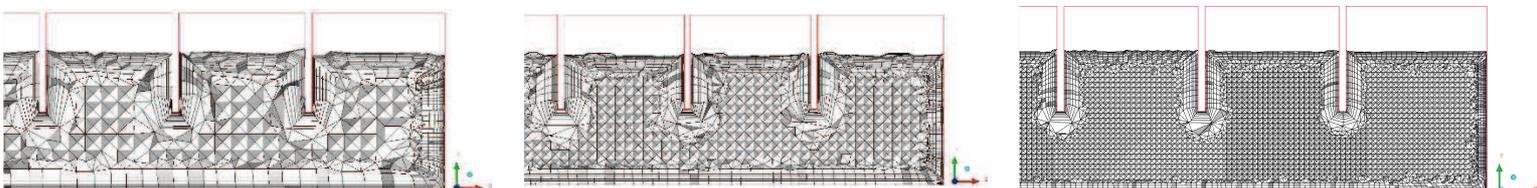


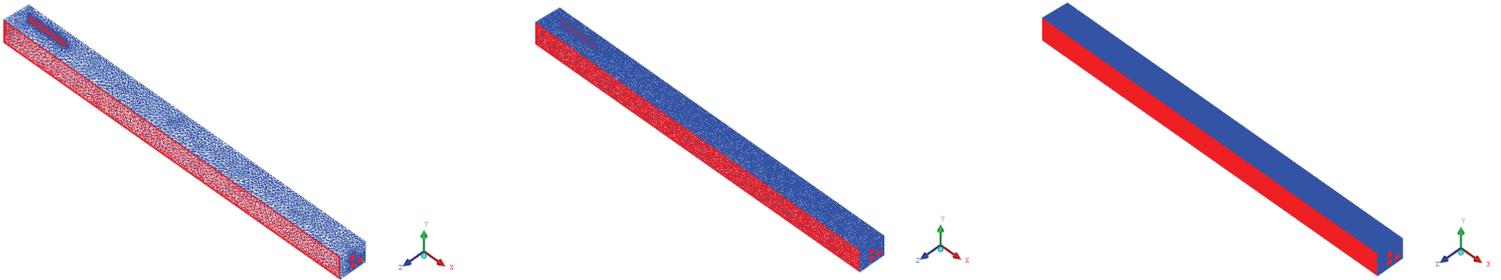
Figura 81 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, inclinação de 6°.

Malha Grosseira

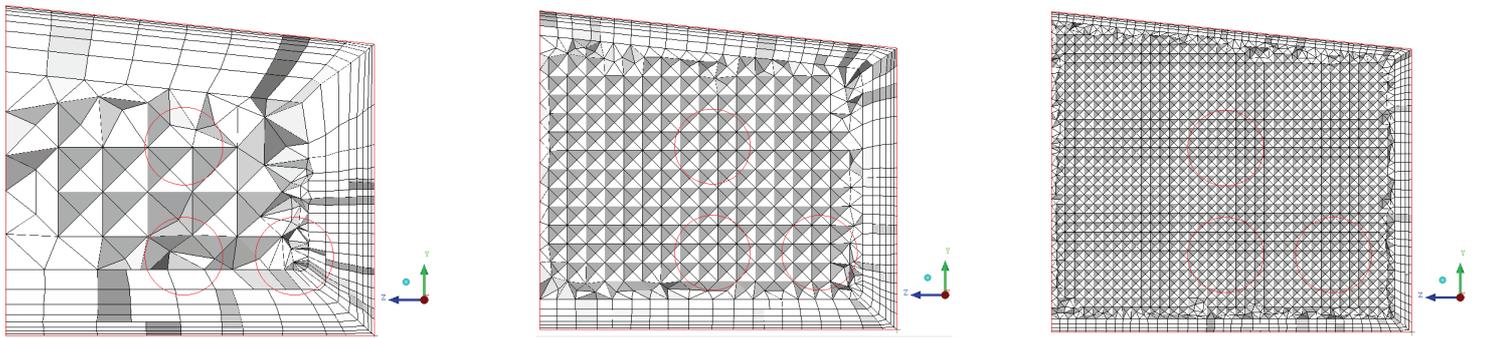
Malha Intermediária

Malha Refinada

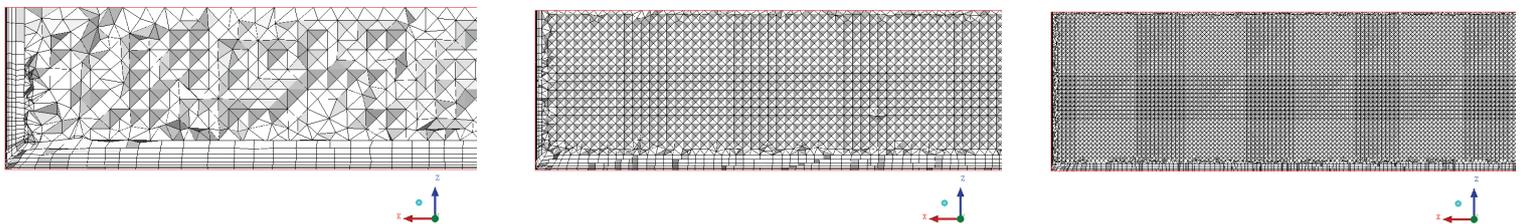
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=4,5\text{m}$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na horizontal)



Vista interna da malha no plano $z=3,1\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)

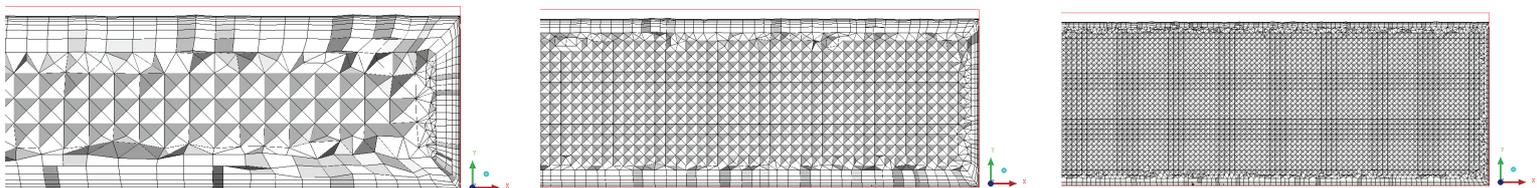


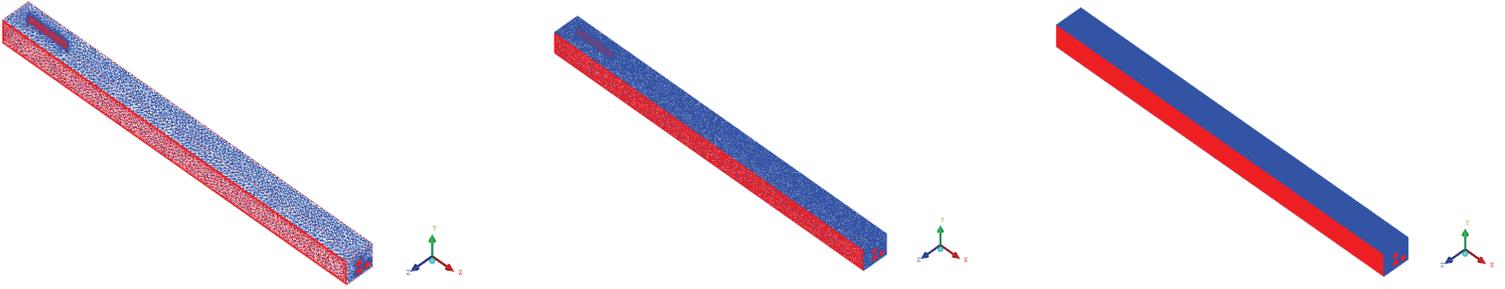
Figura 82 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, forro.

Malha Grosseira

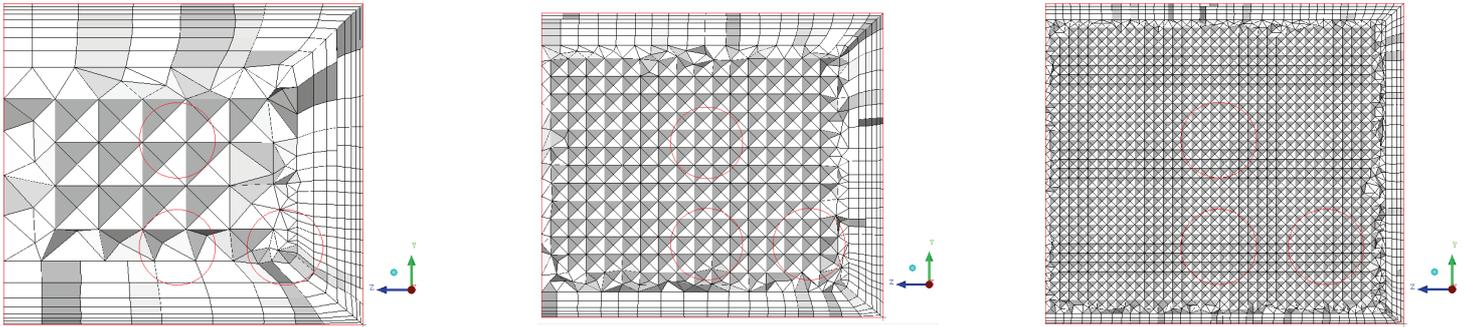
Malha Intermediária

Malha Refinada

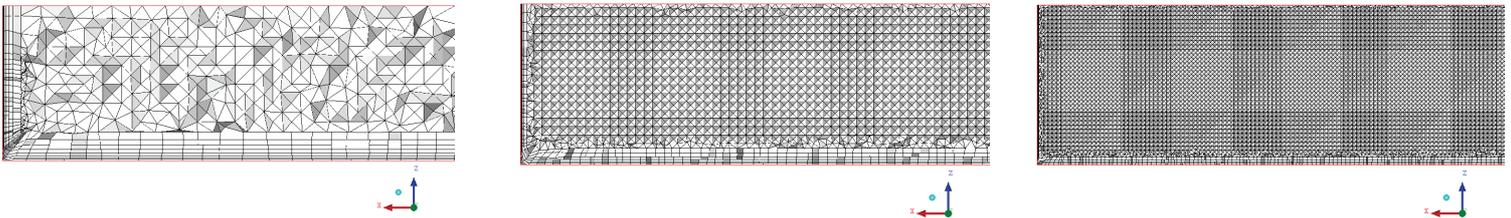
Vista isométrica



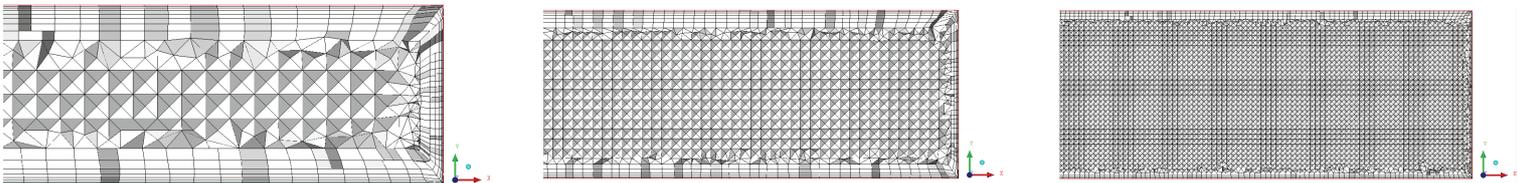
Vista interna da malha no plano $x=4,5m$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3m$ (posição dos dois exaustores alinhados na horizontal)



Vista interna da malha no plano $z=3,1m$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)



As malhas utilizadas nos resultados do **Capítulo 7** encontram-se nas Figuras 79 e 83 a 85.

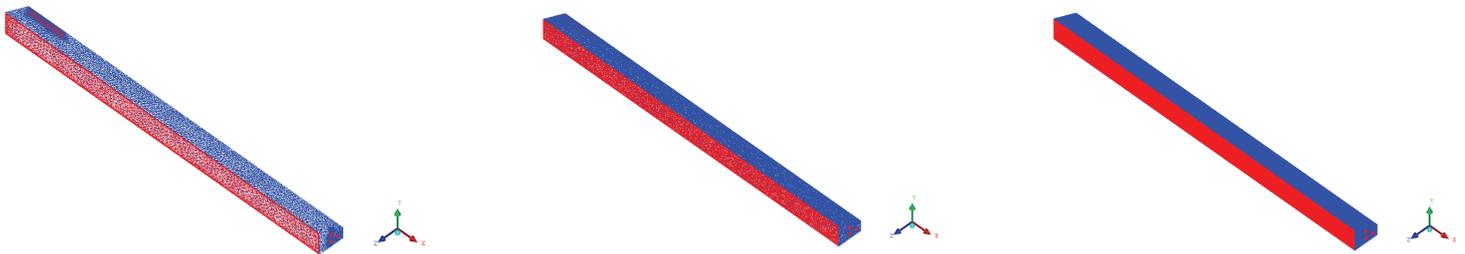
Figura 83 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, exaustor EM36.

Malha Grosseira

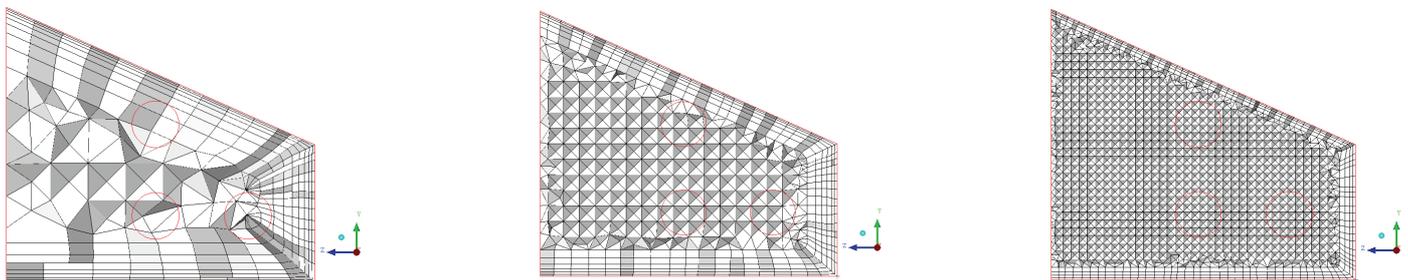
Malha Intermediária

Malha Refinada

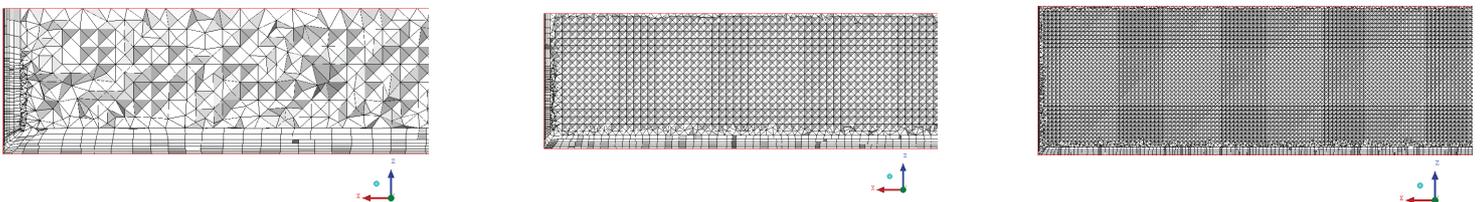
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=4,5\text{m}$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na horizontal)



Vista interna da malha no plano $z=3,1\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)

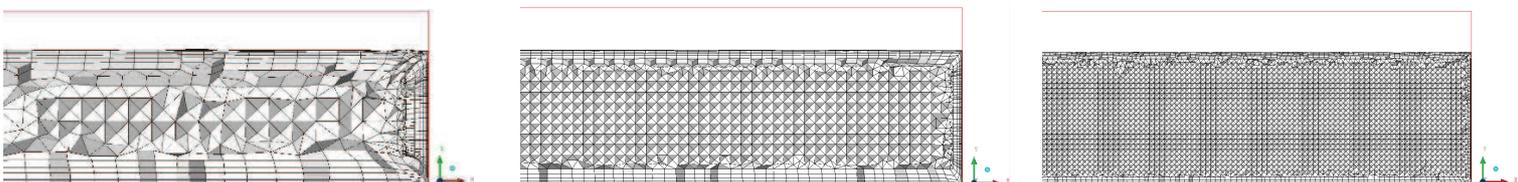


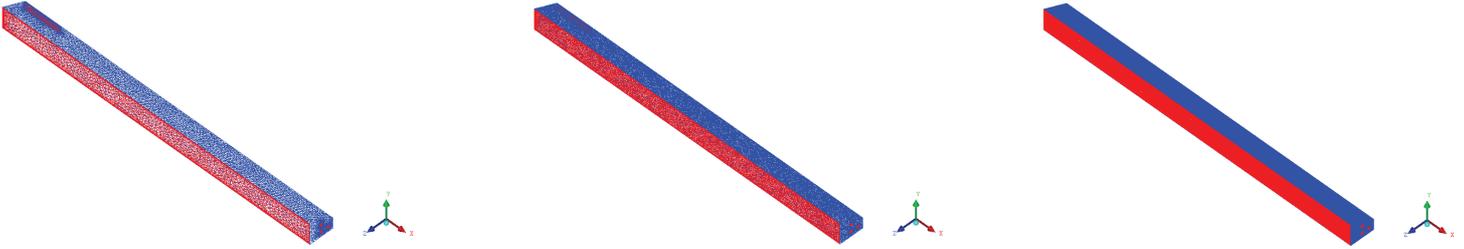
Figura 84 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, exaustor EM30.

Malha Grosseira

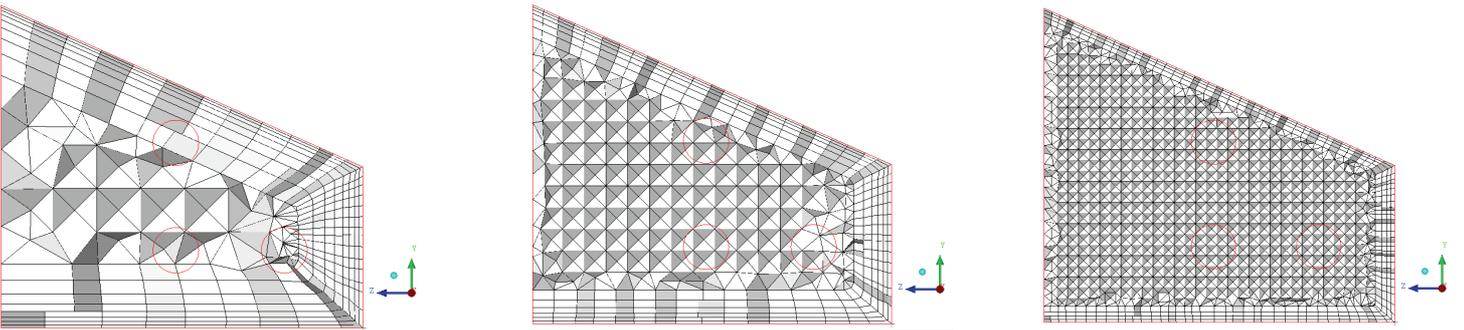
Malha Intermediária

Malha Refinada

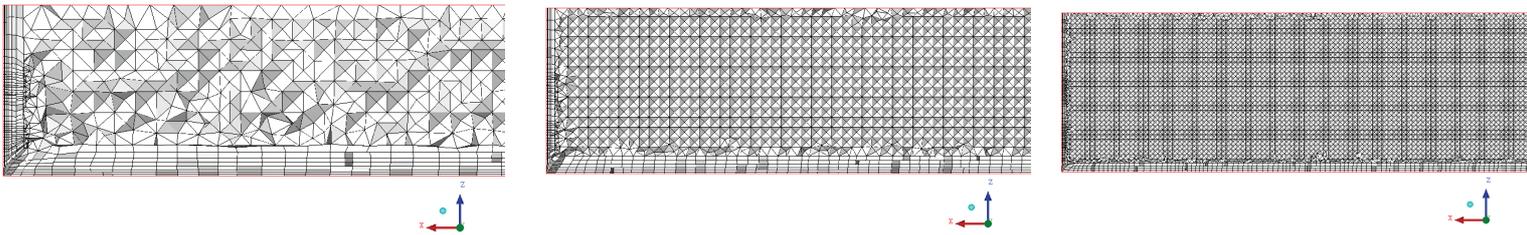
Vista isométrica



Vista interna da malha no plano $x=4,5m$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3m$ (posição dos dois exaustores alinhados na horizontal)



Vista interna da malha no plano $z=3,1m$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)

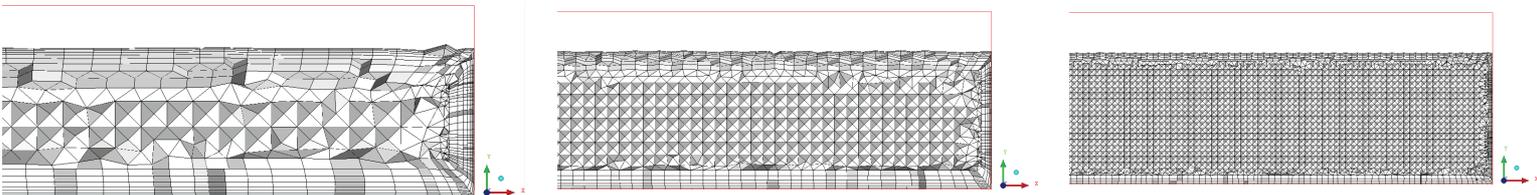


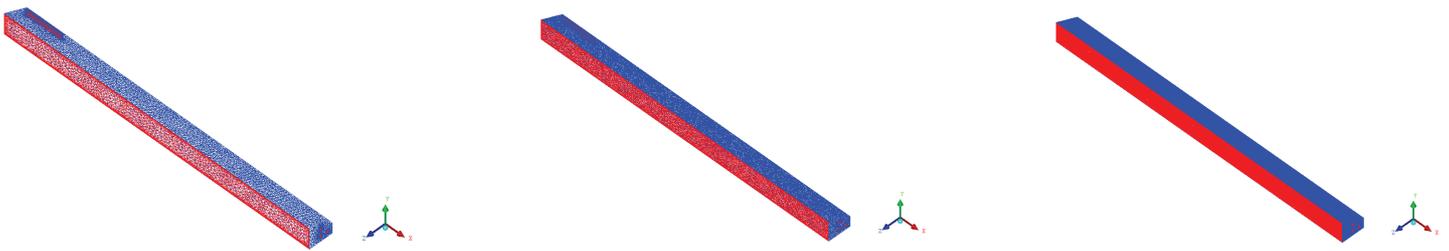
Figura 85 – Malhas híbridas para o aviário da cidade de Montenegro, forro exaustor ED24.

Malha Grosseira

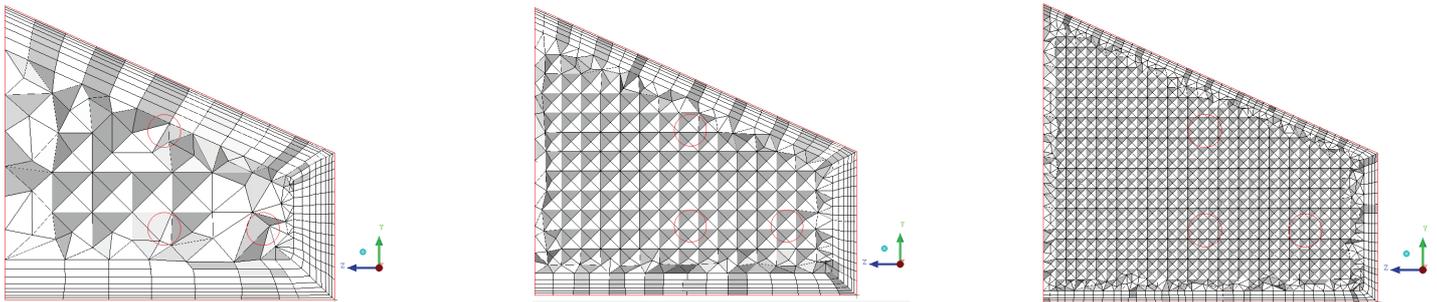
Malha Intermediária

Malha Refinada

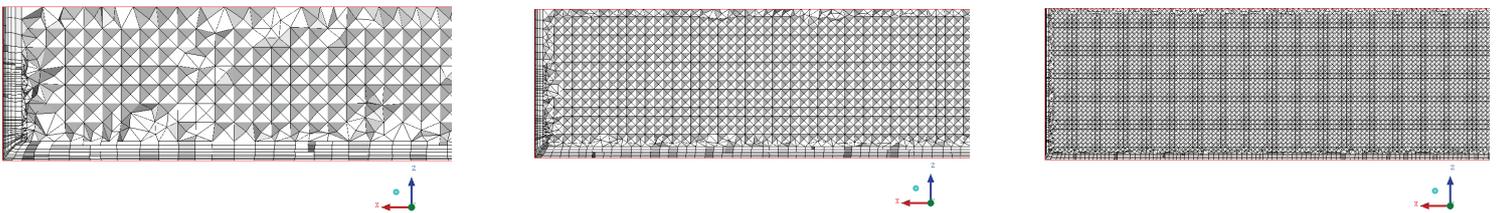
Vista isométrica



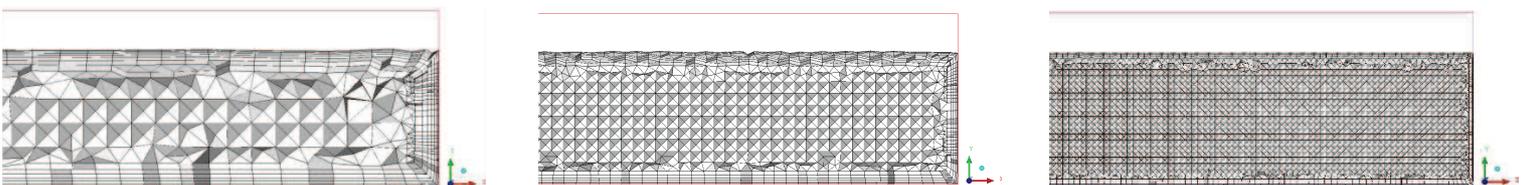
Vista interna da malha no plano $x=4,5\text{m}$ (posição da metade da largura da entrada)



Vista interna da malha no plano $y=1,3\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)



Vista interna da malha no plano $z=3,1\text{m}$ (posição dos dois exaustores alinhados na vertical)



APÊNDICE B – ANÁLISE NUMÉRICA

MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Para a interpolação dos termos advectivos do conjunto de equações diferenciais parciais governantes (Equações (1) a (3)), há três tipos disponíveis no pacote Ansys CFX versão 14.5: *Upwind*, *Blend Factor* e *High Resolution*. A interpolação dos termos advectivos no Ansys CFX segue a Equação (B.1) (Ansys® CFX, 2012).

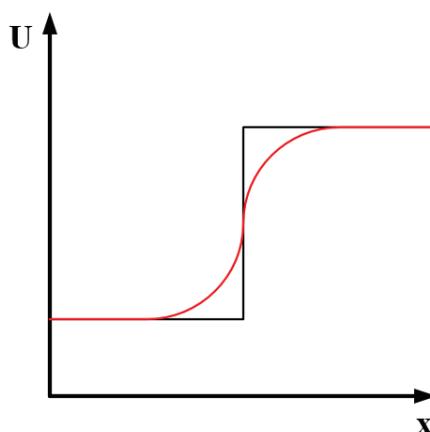
$$\varphi_{ip} = \varphi_{up} + \beta \nabla \varphi \cdot \Delta \vec{r}, \quad (\text{B.1})$$

onde, φ_{ip} é o valor da função no volume, φ_{up} é o valor da função do volume a montante e \vec{r} é o vetor do volume a montante em direção ao volume. Será a escolha dos parâmetros β e $\nabla \varphi$ que resultará em diferentes interpolações, como será explicado a seguir. O grupo de valores $\beta \nabla \varphi \cdot \Delta \vec{r}$ é conhecido como *Numerical Advection Correction*.

Upwind

Trata-se de uma interpolação de primeira ordem onde $\beta = 0$. O UDS (*Upwind Difference Scheme*) é uma interpolação que introduz erros de discretização difusivos que tendem a suavizar o passo no espaço, conforme pode ser visto na Figura 86.

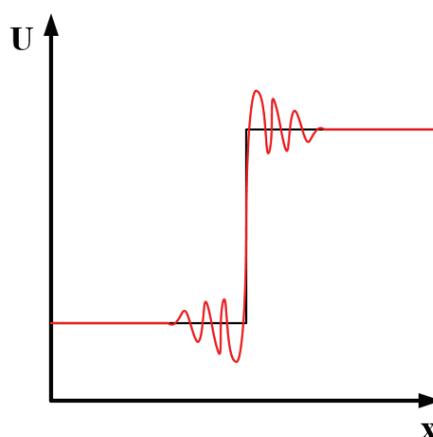
Figura 86 – Método de interpolação Upwind. Fonte: adaptado de Versteeg e Malalasekera, 2007.



Blend Factor

Permite escolher valores de β na faixa $0 \leq \beta \leq 1$, e o parâmetro $\nabla\varphi$ é igual a média dos gradientes nodais adjacentes. Assim os erros de discretização do UDS são reduzidos. Escolher $\beta = 1$ implica numa precisão de segunda ordem no espaço. No entanto, podem ocorrer erros de discretização dispersivos que causam oscilações nas regiões de altos gradientes, conforme mostra a Figura 87.

Figura 87 – Método de interpolação Blend Factor. Fonte: adaptado de Versteeg e Malalasekera, 2007.



High Resolution

Usa uma fórmula especial não linear para valores de β a cada nó. O fluxo advectivo usa valores de β e $\nabla\varphi$ do nó a montante. A fórmula de β é baseada no “princípio das fronteiras” (*boundedness principles*) usado por BARTH e JESPERSON (1989). Primeiro são calculados φ_{min} e φ_{max} de cada nó, depois para cada ponto de integração na vizinhança do nó a Equação (34) é resolvida para β de modo que os valores φ_{min} e φ_{max} não sejam ultrapassados. O valor de β deve ser o mínimo valor de todos os pontos de integração na vizinhança do nó e não pode exceder $\beta = 1$.

CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

Sempre que se utiliza algum método numérico para resolver algum problema é necessário ficar atento ao critério de convergência e ao erro numérico associado.

Basicamente, o critério de convergência pode ser o número de iterações, erro (absoluto ou relativo) ou uma combinação deles (BURDEN e FAIRES, 2010).

No Ansys CFX é possível definir um valor para o número de iterações e/ou o máximo resíduo ou o RMS (*Root Mean Square*) definido pela Equação B.2.

$$RMS = \frac{\sqrt{\sum(\phi_i - \phi_{i-1})^2}}{\sqrt{\sum(\phi_i)^2}}. \quad (B.2)$$

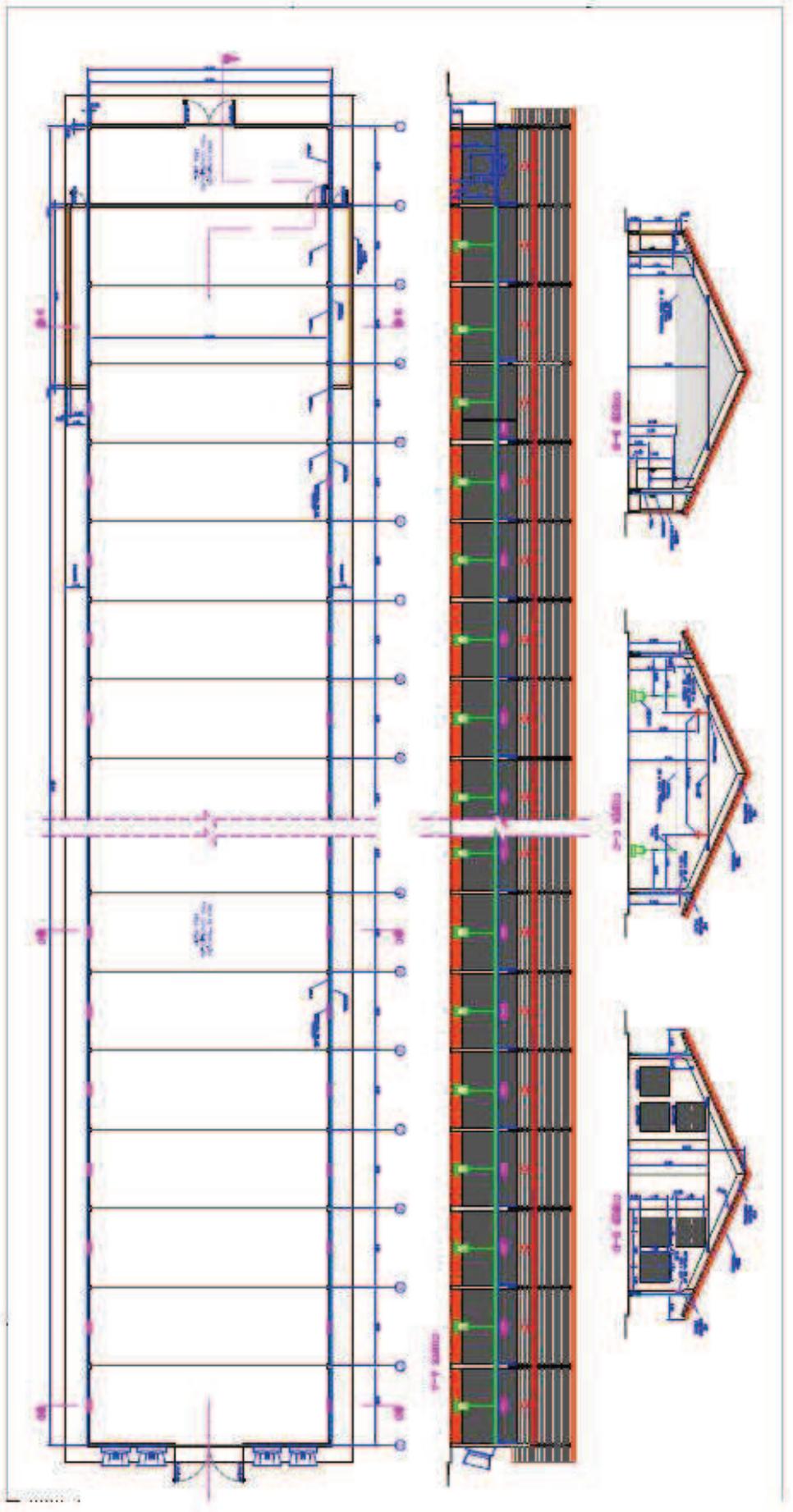
Uma convergência razoável da solução exige um nível de máximo resíduo inferior a 5×10^{-4} e o RMS terá uma ordem de magnitude inferior a essa (Ansys® CFX, 2012). Assim, foi decidido usar neste trabalho convergência na ordem de $RMS \leq 10^{-6}$, exceto para a equação da energia na qual é admitido um $RMS \leq 10^{-5}$.

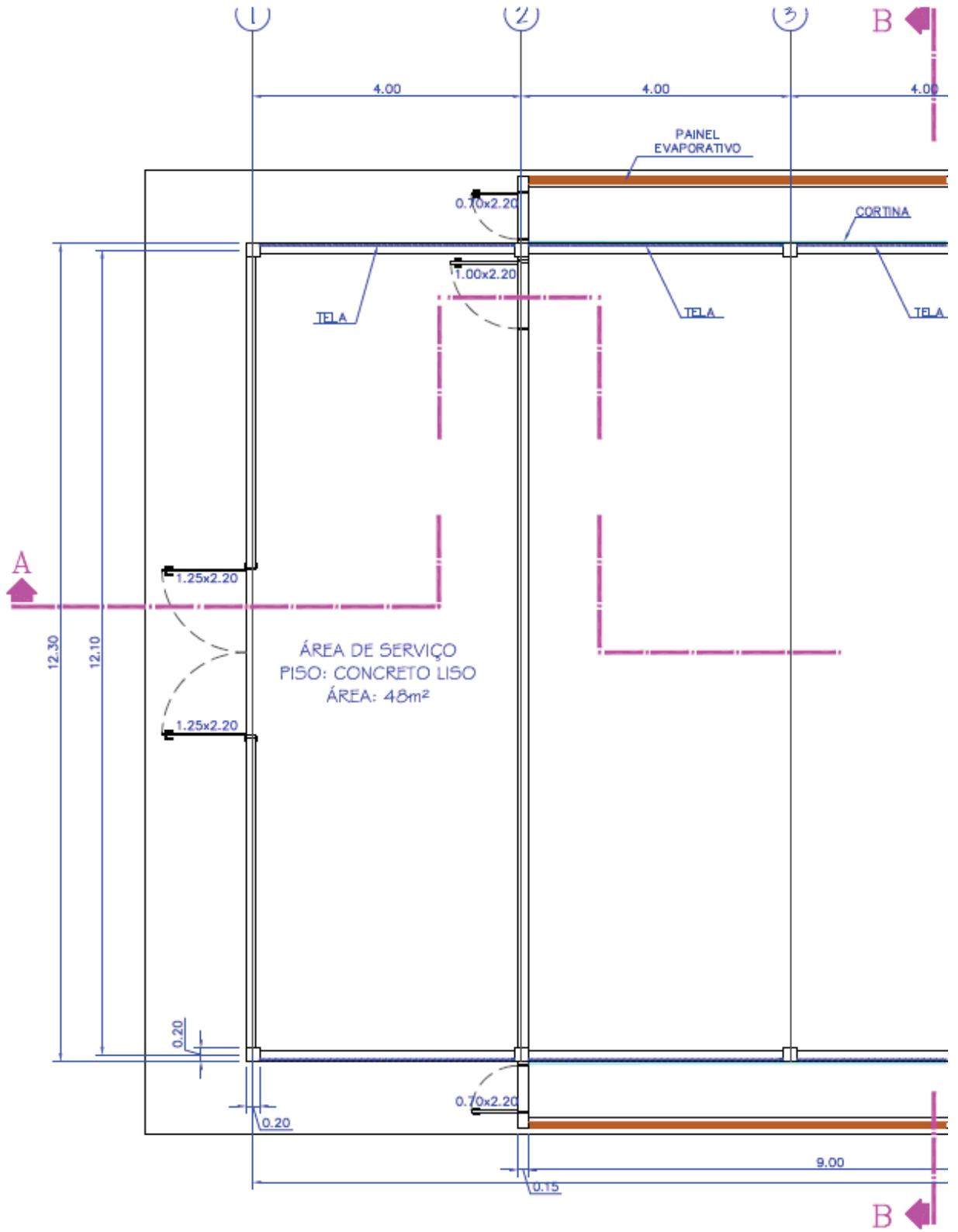
Além das iterações e do erro numérico, é importante acompanhar durante a solução do problema a variação de propriedades em pontos do domínio e/ou nas fronteiras e o *Imbalance*. O *Imbalance* é calculado através da seguinte equação (Ansys® CFX, 2012):

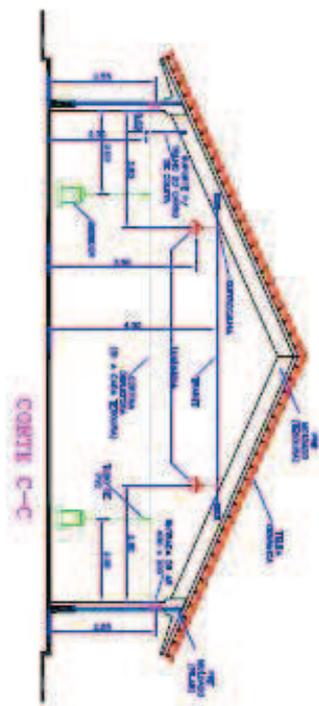
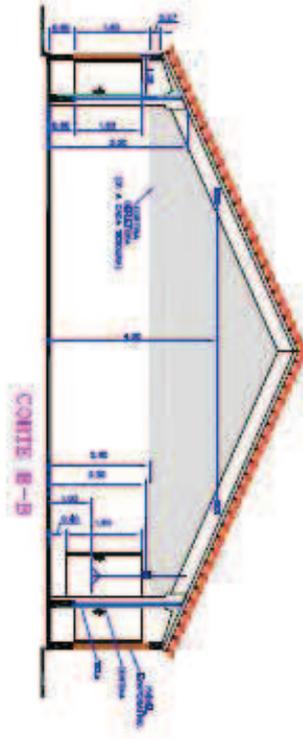
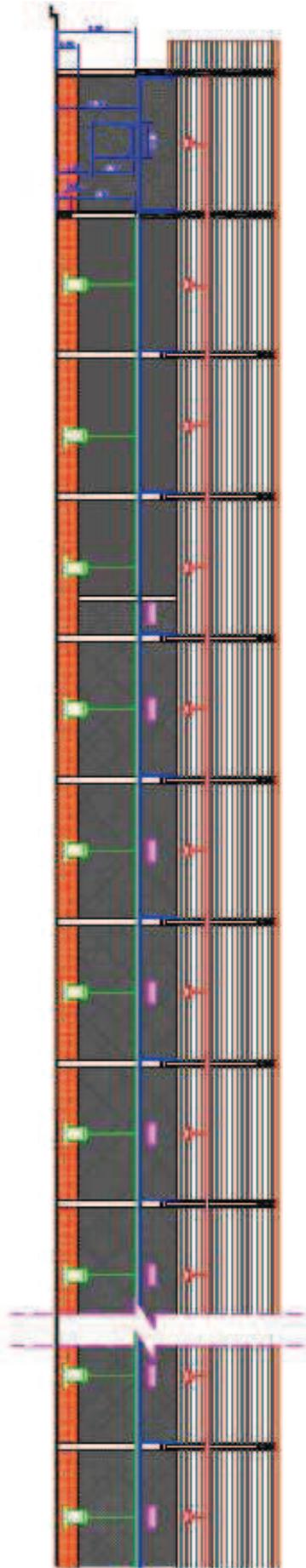
$$\%imbalance = \frac{Domain\ Imbalance}{Maximum\ Over\ All\ Domains}. \quad (B.3)$$

Neste trabalho foi aceito que a Equação (B.3) poderia variar entre -1% a 1%. Foi visto que na equação da energia, nos problemas deste trabalho, são necessárias 500 ou mais iterações para que o *Imbalance* fique nessa região.

ANEXO A – AVIÁRIO DE MONTENEGRO (RS)

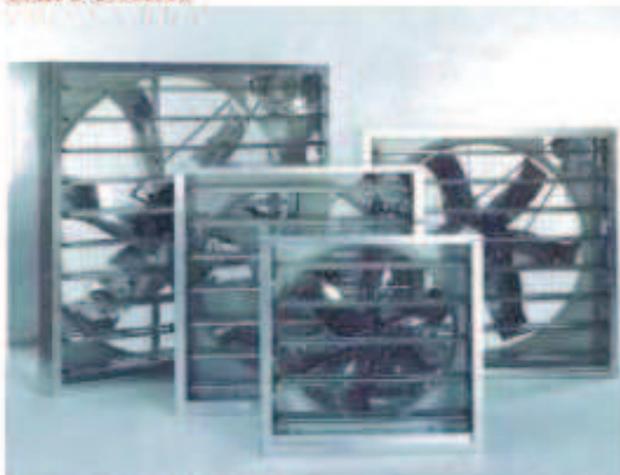






ANEXO B – VENTILADORES/EXAUSTORES MUNTERS®

Ventiladores/Exaustores Munters Euroemme



Descrição do Produto

Ventilador / Exaustor - Os ventiladores/exaustores Munters - Euroemme são a solução ideal quando grandes vazões de ar são necessárias. O desenho único da hélice é auto-limpante e permite alcançar a mais alta eficiência.

O compartimento quadrado do ventilador e o venturi são feitos de chapa de aço galvanizado e reforçado. A hélice de seis pás é balanceada estática e dinamicamente para um menor nível de ruído e uma menor vibração.

Hélice e Veneziãna - A hélice é acionada através de um sistema de correia e polias apoiada em um sistema de rolamento de esferas protegido contra água.

A transmissão através de correia assegura uma baixa rotação da hélice, aumenta a eficiência, baixa o consumo de energia bem como diminui o nível de ruído. A veneziana é feita de aço galvanizado, que é mais resistente que o alumínio e o plástico.

A veneziana é firmemente fechada quando o ventilador não está trabalhando, prevenindo qualquer vazamento de ar.

O sistema centrífugo utilizado atua diretamente sobre a abertura e fechamento da veneziana mantendo a eficiência do ventilador durante toda a operação, devido a veneziana permanecer totalmente aberta.

Não é necessário uma limpeza regular da veneziana porque a poeira e os detritos que eventualmente possam se alojar nela não influem no seu funcionamento.

Todas as partes plásticas são feitas com proteção UV.

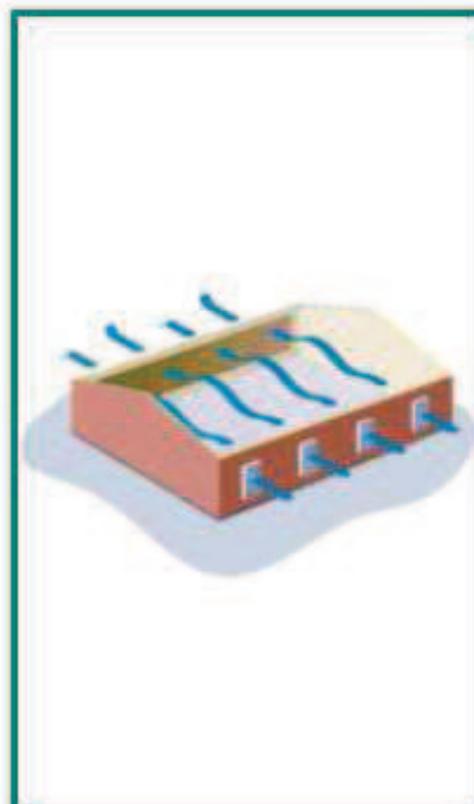
CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO:

Ventiladores / Exaustores

Aplicações

Os exaustores Munters/Euroemme com sua exclusiva abertura de venezianas por um mecanismo centrífugo, são ideais para:

- Granjas;
- Aviários;
- Estufas agrícolas;
- Indústrias.



- Compartimento do ventilador e venturi feitos de chapa de aço galvanizado;
- Venezianas feitas de aço galvanizado prensado de modo a garantir mais resistência;
- Cubo central e polias feitas em alumínio fundido;
- Hélice balanceada estática e dinamicamente;
- Rolamentos de acionamento da veneziana de lubrificação permanente;
- Sistema centrífugo parentado permite uma abertura total e firme da veneziana;
- A veneziana não é afetada pela quantidade de poeira em suas pás;
- Um resistente par de molas mantém a veneziana firmemente fechada quando o ventilador não está operando;
- Cada ventilador tem sua qualidade individualmente testada.

Dimensões (mm)	ED 24	EM 30	EM 36	EM 50
A	745	950	1000	1380
B	745	950	1090	1380
C	510	450	450	450
D	590	530	530	530
E	475	M8	M8	M8
F	M8	240	245	270
G	135	295	305	308
H	300	475	600	830

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ED 24	EM 30	EM 36	EM 50
Peso Total do Ventilador	44 Kg	55 Kg	65 Kg	84 Kg
Velocidade Nominal da Hélice	900 rpm	590 rpm	510 rpm	365 rpm
Vazão de Ar (P.E. = 0 Pa)	10600m ³ /h	13500m ³ /h	19880m ³ /h	35300m ³ /h
Vazão de Ar (P.E. = 20 Pa)	9780m ³ /h	11950m ³ /h	17930m ³ /h	31500m ³ /h
Diâmetro da Hélice	600 mm	760 mm	915 mm	1270 mm
Número de Pás	6	6	6	6
Número de Pás da Veneziana	5	7	8	10
Temperatura Máxima de Operação	50°C	50°C	50°C	50°C
Classe de Proteção do Motor Elétrico	IP-55	IP-55	IP-55	IP-55
Potência do Motor	0,5 HP	0,5 HP	0,75 HP	1 HP

