

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Área de Construções Rurais e Ambiência

Modelagem computacional da distribuição de variáveis ambientais em aviário ventilado à pressão negativa

Gisele Caldas de Araújo Cunha



Campina Grande/ PB

2017

Gisele Caldas de Araújo Cunha

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE
VARIÁVEIS AMBIENTAIS EM AVIÁRIO VENTILADO À
PRESSÃO NEGATIVA**

Tese apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola,
Universidade Federal de Campina Grande/PB,
para obtenção do grau de doutora em Engenharia Agrícola
na área de Construções Rurais e Ambiente

Orientador: José Pinheiro Lopes Neto

Campina Grande/ PB
Fevereiro de 2017

Aos meus saudosos pais **Dário e Gizélia**,
ao meu amado esposo, **Ronnie**,
aos meus queridos filhos, **Rafael e Heitor**,
dedico este trabalho.

Agradecimentos

A **Deus**, pela manutenção de minha saúde mental e física nessa dura caminhada.

A meus pais, **Dário e Gizélia**, lembranças vivas em todas as minhas escolhas e atitudes.

A meu querido e dedicado esposo, **Ronnie**, pela solidariedade e apoio incondicional nesta trajetória.

A meus filhos, **Rafael e Heitor**, pela compreensão e paciência nos momentos em que, por ventura, me ausentei de suas vidas.

Ao orientador e amigo, **Pinheiro Neto**, pela confiança inabalável em meu empenho e por todas as palavras incentivadoras e tranquilizantes nas horas de dificuldade.

A meu cunhado, **Henrique Cunha**, por sua ajuda imprescindível para o desenvolvimento do sistema de coleta de dados experimentais.

A **Guaraves Alimentos** pela presteza na liberação do acesso à instalação avícola que serviu de meio experimental.

A todos os meus **familiares e amigos** que torceram pela concretização deste sonho.

A todos os **professores e funcionários da COPEAG**, pela atenção e valiosos ensinamentos.

Aos **colegas de doutorado** pelo convívio harmonioso.

Ao arquiteto e professor, **Raoni Venâncio**, por sua decisiva contribuição no processo de escolha e aprendizado do software de simulação.

Ao **IFPB** pela concessão do afastamento que possibilitou dedicação exclusiva à elaboração desta pesquisa.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
Lista de Equações	xi
Estrutura do trabalho	xii
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Panorama da avicultura no Brasil e na Paraíba	5
2.2 Ambiência nas instalações avícolas	7
2.2.1 Fisiologia da ave.....	7
2.2.1.2 Índice de temperatura, umidade e velocidade do ar (ITUV).....	10
2.2.3 Tipificação dos sistemas produtivos.....	11
2.2.3.1 Galpões climatizados em pressão negativa.....	13
2.3 Simulação computacional para análise de edifícios	14
2.3.1 Dinâmica dos fluidos computacional- CFD	15
2.3.1.1 Compressibilidade de escoamento.....	15
2.3.1.2 Tipos de escoamento.....	16
2.3.1.3 Equações governantes.....	18
2.3.1.4 Modelos de turbulência	21
2.3.1.5 Métodos de discretização para geração de malha	24
2.3.1.6 Verificação e validação de simulações CFD.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Caracterização da unidade experimental	28
3.2 Instrumentação para aquisição de dados experimentais	33
3.2.1 Sistema de monitoramento e armazenamento de dados	33
3.2.1.1 Montagem e programação do sistema de aquisição de dados.....	35
3.2.1.2 Calibração dos sensores de vento	36
3.2.2 Aquisição de dados complementares	37

3.3	Diagnóstico do galpão experimental.....	39
3.4	Validação do modelo CFD baseado no protótipo.....	40
3.5	Descrição dos tratamentos	41
3.5.1	Dimensionamento do sistema de ventilação.....	42
3.6	Modelagem e configurações para simulações CFD	43
3.6.1	Criação da geometria.....	44
3.6.2	Aplicação dos materiais.....	46
3.6.3	Definição das condições de contorno	48
3.6.4	Geração da malha.....	50
3.6.5	Configurações para cálculo da solução	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Diagnóstico da unidade experimental.....	54
4.1.1	Temperatura do ar (T_{ar})	54
4.1.2	Umidade relativa do ar (UR)	57
4.1.3	Velocidade do vento (V_v).....	59
4.1.4	Caracterização do ambiente térmico interno	61
4.2	Modelo CFD baseado no protótipo (TiFiA)	63
4.3	Verificação e validação do modelo CFD para TiFiA	67
4.4	Análise das simulações para arranjos de cobertura (TiFiA, TiFisA e TiFh)	71
4.4.1	Modelos CFD para TiFisA e TiFh	72
4.4.2	Distribuição da temperatura do ar em TiFiA, TiFisA e TiFh.....	76
4.4.3	Distribuição da umidade relativa em TiFiA, TiFisA e TiFh.....	79
4.4.4	Distribuição da velocidade do vento em TiFiA, TiFisA e TiFh.....	82
4.4.5	Ambiente térmico em TiFiA, TiFisA e TiFh, segundo ITUV	86
4.4.6	Seleção do arranjo de cobertura em função dos resultados alcançados	88
4.5	Análise das simulações para arranjos de painéis evaporativos (TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L)	88
4.5.1	Modelos CFD para TiFisA20L e TiFisA40L.....	89
4.5.2	Distribuição da temperatura do ar em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L.....	93
4.5.3	Distribuição da umidade relativa em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	97
4.5.4	Distribuição da velocidade do vento em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	100
4.5.5	Ambiente térmico em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L, segundo ITUV	104
4.5.6	Seleção do arranjo de painéis evaporativos em função dos resultados alcançados.....	106
5	CONCLUSÕES	108

6	PROPOSTAS PARA ESTUDOS COMPLEMENTARES.....	110
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

Lista de Figuras

Figura 01.	Escoamento laminar (a) e turbulento (b) no interior de dutos	17
Figura 02.	Exemplos de malha estruturada (a) e não estruturada (b)	26
Figura 03.	Representação esquemática do protótipo em planta baixa	29
Figura 04.	Representação esquemática do protótipo em cortes AA, BB e CC, respectivamente	29
Figura 05.	Detalhes da cobertura com aletas (a) e da cobertura em telha metálica com forro em placas de poliuretano (b)	30
Figura 06.	Vista exterior do painel evaporativo (a) e vista interior da circulação entre o painel e a área de alojamento das aves (b)	31
Figura 07.	Exaustores localizados no oitão Oeste (a) e na parede voltada a Sul	32
Figura 08.	Equipamentos componentes do sistema: plataforma de prototipagem (a), divisor de tensão (b), módulo de cartão (c), sensor de vento REV C (d) e sensor de temperatura e umidade DHT22/AM2302 (e)	34
Figura 09.	Esquema de comunicação entre os componentes do sistema de aquisição de dados	34
Figura 10.	Localização esquemática dos componentes do sistema de aquisição de dados	35
Figura 11.	Montagem do sistema de aquisição de dados para testes prévios	36
Figura 12.	Calibração do sensor de vento	37
Figura 13.	Pontos de medição de temperatura do ar e umidade relativa nas aberturas de captação	37
Figura 14.	Localização dos pontos de medição da velocidade de saída do vento	38
Figura 15.	Denominação para sensores de vento, de temperatura e umidade	39
Figura 16.	Marcação de pontos para extração dos dados simulados	41
Figura 17.	Composições de cobertura TiFiA, TiFisA e TiFh, respectivamente	42
Figura 18.	Elevação Leste do modelo gerado para validação	45
Figura 19.	Elevação Oeste do modelo gerado para validação	45
Figura 20.	Figura 20. Elevação Norte do modelo gerado para validação	45
Figura 21.	Elevação Sul do modelo gerado para validação	45
Figura 22.	Detalhes internos, em perspectiva, do modelo gerado para validação	46
Figura 23.	Temperaturas do ar (°C) coletadas a 0,50 m de altura relativa à	54

	cama	
Figura 24.	Curvas das temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) coletadas a 0,50 m com respectiva zona de conforto para frangos de corte adultos	55
Figura 25.	Umidades relativas do ar (%) coletadas a 0,50 m de altura relativa à cama	58
Figura 26.	Curvas das umidades relativas do ar (%) coletadas a 0,50 m com respectiva faixa recomendada para frangos de corte adultos	59
Figura 27.	Velocidades do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) coletadas a 0,50 e a 1,50 m de altura relativa à cama	60
Figura 28.	Curvas das velocidades do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) coletadas a 0,50 m (a) e a 1,50 m (b) com respectiva faixa recomendada para frangos de corte adultos	61
Figura 29.	Valores de ITUV calculados para pontos a 0,50 m de altura relativa à cama	62
Figura 30.	Curvas de ITUV por cortina, para dados coletados a 0,50 m, com faixa interpretativa	62
Figura 31.	Modelo CFD para TiFiA com condições de contorno	64
Figura 32.	Distribuição da malha final para TiFiA nas faces Leste (a) e Oeste(b)	65
Figura 33.	Detalhes da distribuição externa da malha para TiFiA nas saídas (a) e entradas de ar (b)	65
Figura 34.	Detalhes da distribuição interna da malha para TiFiA nas saídas (a) e entradas de ar (b)	65
Figura 35.	Umidade relativa do ar, coletada e simulada a 0,50 m de distância da cama	68
Figura 36.	Temperatura do ar, coletada e simulada a 0,50 m de distância da cama	69
Figura 37.	Velocidade do vento, coletada e simulada a 0,50 m de distância da cama	70
Figura 38.	Velocidade do vento, coletada e simulada a 1,50 m de distância da cama	70
Figura 39.	Modelo CFD para TiFisA com condições de contorno	72
Figura 40.	Modelo CFD para TiFh com condições de contorno	73
Figura 41.	Distribuição da malha final para TiFisA nas faces Leste (a) e Oeste(b)	73
Figura 42.	Detalhes da distribuição externa da malha para TiFisA nas saídas	74

	(a) e entradas de ar (b)	
Figura 43.	Detalhes da distribuição interna da malha para TiFisA nas saídas (a) e entradas de ar (b)	74
Figura 44.	Distribuição da malha final para TiFh nas faces Leste (a) e Oeste(b)	75
Figura 45.	Detalhes da distribuição externa da malha para TiFh nas saídas (a) e entradas de ar (b)	75
Figura 46.	Detalhes da distribuição interna da malha para TiFh nas saídas (a) e entradas de ar (b)	75
Figura 47.	Variação da temperatura do ar simulada a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	76
Figura 48.	Simulação da temperatura do ar a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	78
Figura 49.	Simulação da temperatura do ar, por cortina, para TiFiA, TiFisA e TiFh	79
Figura 50.	Variação da umidade relativa do ar simulada a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	80
Figura 51.	Simulação da umidade relativa do ar a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	81
Figura 52.	Simulação da umidade relativa do ar, por cortina, para TiFiA, TiFisA e TiFh	82
Figura 53.	Variação da velocidade do vento simulada a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	83
Figura 54.	Simulação da velocidade do vento a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	84
Figura 55.	Simulação da velocidade do vento, por cortina, para TiFiA, TiFisA e TiFh	85
Figura 56.	Variação do ITUV calculado a partir de dados simulados a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh	87
Figura 57.	Modelo CFD para TiFisA20L com condições de contorno	90
Figura 58.	Modelo CFD para TiFisA40L com condições de contorno	90
Figura 59.	Distribuição da malha final para TiFisA20L nas faces Leste (a) e Oeste(b)	91
Figura 60.	Detalhes da distribuição externa da malha para TiFisA20L nas saídas (a) e entradas de ar (b)	91
Figura 61.	Detalhes da distribuição interna da malha para TiFisA20L nas saídas (a) e entradas de ar (b)	92
Figura 62.	Distribuição da malha final para TiFisA40L nas faces Leste (a) e	92

Oeste(b)

Figura 63.	Detalhes da distribuição externa da malha para TiFisA40L nas saídas (a) e entradas de ar (b)	93
Figura 64.	Detalhes da distribuição interna da malha para TiFisA40L nas saídas (a) e entradas de ar (b)	93
Figura 65.	Variação da temperatura do ar simulada a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	94
Figura 66.	Simulação da temperatura do ar a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	96
Figura 67.	Simulação da temperatura do ar, por cortina, para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	97
Figura 68.	Variação da umidade relativa simulada a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	98
Figura 69.	Simulação da umidade relativa a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	99
Figura 70.	Simulação da umidade relativa, por cortina, para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	100
Figura 71.	Variação da velocidade do vento simulada a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFsA40L	101
Figura 72.	Simulação da velocidade do vento a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	103
Figura 73.	Simulação da velocidade do vento, por cortina, para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	104
Figura 74.	Variação do ITUV calculado a partir de dados simulados a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L	105

Lista de Tabelas

Tabela 01.	Total de frangos abatidos na Região Nordeste, por estado, no 3º trimestre de 2016	5
Tabela 02.	PIB total, ranking e variação nominal dos municípios paraibanos (2013-2014)	6
Tabela 03.	Valor adicionado pelo setor agropecuário, participação no município e no estado da Paraíba (2014)	7
Tabela 04.	Faixas interpretativas para ITUV, considerando-se frangos nas últimas semanas do ciclo produtivo (Tao & Xin, 2003)	10
Tabela 05.	Diagnóstico bioclimático do município de Guarabira para aves adultas	11
Tabela 06.	Classificação da compressibilidade dos gases em função do número de Mach	16
Tabela 07.	Classificação do regime de escoamento, segundo o número de Reynolds	18
Tabela 08.	Alguns dos modelos de turbulência disponibilizados pelo Autodesk CFD 2016	23
Tabela 09.	Dados climatológicos (1911-1990) para o Município de Guarabira/PB	28
Tabela 10.	Características construtivas do galpão experimental, localizado em Guarabira/PB	30
Tabela 11.	Dados da curva de queda de pressão (ΔP) em função da velocidade do vento (V_v)	31
Tabela 12.	Zona de conforto e faixas recomendadas de umidade relativa e velocidade do vento para frangos de corte na idade adulta	40
Tabela 13.	Tipos e propriedades dos materiais especificados e seus locais de aplicação	47
Tabela 14.	Dados, por tratamento, das condições de contorno atribuídas às partes	49
Tabela 15.	Parâmetros para refinamento automático da malha em elementos bidimensionais e seus respectivos valores	52
Tabela 16.	Parâmetros para avaliação automática de convergência e seus respectivos valores	52
Tabela 17.	Valores parcial e global da média dos quadrados dos erros normalizados (NMSE)	67
Tabela 18.	Valores máximos e mínimos de umidade relativa do ar, coletada e	68

	simulada, por cortina	
Tabela 19.	Varição das médias entre os dados coletados e os simulados em comparação com resultados obtidos em outros experimentos	71
Tabela 20.	Valores médios de temperatura do ar, por cortina e tratamento de cobertura, e amplitude da variável (ΔT_{ar}) por tratamento	77
Tabela 21.	Valores médios de umidade relativa, por cortina e tratamento de cobertura, e amplitude da variável (ΔUR) por tratamento	80
Tabela 22.	Valores médios de velocidade do vento, por cortina e tratamento de cobertura, e amplitude da variável (ΔV_v) por tratamento	83
Tabela 23.	Valores médios de ITUV por cortina em TiFiA, TiFisA e TiFh e amplitude do índice ($\Delta ITUV$) por tratamento	87
Tabela 24.	Valores médios de temperatura do ar, por cortina e tratamento de painéis evaporativos, e amplitude da variável (ΔT_{ar}) por tratamento	95
Tabela 25.	Valores médios de umidade relativa, por cortina e tratamento de painéis evaporativos, e amplitude da variável (ΔUR) por tratamento	98
Tabela 26.	Valores médios de velocidade do vento, por cortina e tratamento de painéis evaporativos, e amplitude da variável (ΔV_v) por tratamento	102
Tabela 27.	Valores médios de ITUV por cortina em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L e amplitude do índice ($\Delta ITUV$)	105

Lista de Equações

Equação 01.	Índice de temperatura, umidade e velocidade do ar	10
Equação 02.	Número de Mach	16
Equação 03.	Número de Reynolds	17
Equação 04.	Equação de continuidade	18
Equação 05.	Equação de conservação para momento no eixo x	19
Equação 06.	Equação de conservação para momento no eixo y	19
Equação 07.	Equação de conservação para momento no eixo z	19
Equação 08.	Termo para resistência distribuída-/	20
Equação 09.	Termo para escoamento rotativo	20
Equação 10.	Conservação de energia	21
Equação 11.	Viscosidade turbulenta	22
Equação 12.	Condutividade turbulenta	22
Equação 13.	Transporte de energia cinética turbulenta	23
Equação 14.	Taxa de dissipação de energia turbulenta	24
Equação 15.	Média dos quadrados dos erros normalizados	40
Equação 16.	Dimensionamento dos painéis evaporativos	42
Equação 17.	Dimensionamento da quantidade de exaustores	43
Equação 18.	Pressão atmosférica em função da altitude	46
Equação 19.	Coefficiente de perda “ <i>Through-Flow K</i> ”	48
Equação 20.	Taxa de fluxo de massa	49
Equação 21.	Taxa metabólica basal	50

Estrutura do trabalho

Esta tese é composta de sete partes: Introdução, Revisão bibliográfica, Material e métodos, Resultados e discussão, Conclusões, Propostas para estudos complementares e Referências bibliográficas.

Na primeira parte é apresentado o tema estudado, abordada sua importância e justificada sua relevância frente ao cenário regional e nacional. Os objetivos, geral e específico, se encontram aqui definidos; na segunda é feita uma revisão bibliográfica acerca de assuntos relacionados diretamente ao tema desta pesquisa, entre eles: panorama da avicultura no Brasil e na Paraíba, ambiência nas instalações avícolas e simulação computacional para análise de edifícios agrícolas.

Em Material e métodos, terceira parte, são apresentados os procedimentos para coleta de dados experimentais e a metodologia utilizada para alcançar os objetivos traçados. Nesta seção é feita a caracterização do município de Guarabira/PB e do galpão avícola, de propriedade da Empresa Guaraves Alimentos, utilizado como meio experimental.

Na quarta parte são expostos os dados obtidos a partir do monitoramento do aviário durante o período experimental; no trecho seguinte, são apresentados os resultados da validação do modelo computacional; logo depois, os resultados das simulações CFD para os tratamentos estabelecidos. Discutem-se todos os resultados, comparando-os com outros encontrados em literatura específica. Na sequência, são listadas as conclusões obtidas por meio da análise dos resultados.

Na penúltima parte são elencadas sugestões para pesquisas complementares a fim de viabilizar avanços rumo a propostas projetuais para construção de aviários melhores adequados ao conforto térmico de frangos de corte.

Por fim, são relacionadas todas as obras de literatura científica referenciadas nesta tese.

Resumo

No Brasil, o emprego de sistemas de condicionamento artificial em pressão negativa em galpões avícolas está se tornando cada vez mais comum e, na Paraíba, ainda que a passos mais lentos, vem sendo incorporado por viabilizar a correção do microclima no interior de aviários. No entanto, pesquisas desenvolvidas na área de Construções Rurais e Ambiência apontam para a necessidade de melhoria da eficiência desses sistemas vez que identificam a distribuição heterogênea do ar ao longo das instalações e a inadequação dos dados ambientais internos às faixas recomendadas para o conforto térmico de aves adultas, especialmente nos períodos mais quentes do dia. Diante do exposto, avaliou-se a eficiência de diferentes arranjos construtivos de aviários para frangos de corte, ventilados à pressão negativa, por meio da análise da distribuição da temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (V_v) e da caracterização do ambiente térmico em função do Índice de temperatura, umidade e velocidade do ar (ITUV). Para tanto, instrumentou-se um galpão para coleta de dados de campo e diagnóstico de suas instalações quanto ao conforto térmico interno; gerou-se um modelo computacional de referência baseado neste galpão, por meio do software Autodesk CFD 2016; validou-se esse modelo; testaram-se três diferentes arranjos de cobertura (TiFiA- baseado no protótipo, com forro paralelo à cobertura inclinada e aletas, TiFisA- semelhante à TiFiA, excluindo-se as aletas e TiFh- similar à TiFisA, com forro horizontal); selecionou-se aquele mais eficiente e combinou-se à dois arranjos de painéis evaporativos (TiFisA20L e TiFisA40L, com 20% e 40% da área dos painéis voltadas à Leste, respectivamente). Concluiu-se que: segundo ITUV, o galpão instrumentado, entre 12 e 14 h, não proveu conforto às aves adultas alojadas, com valores de T_{ar} , UR e V_v não pertinentes às faixas recomendadas; o modelo CFD para TiFisA foi validado com médias de T_{ar} coletadas em campo de $27,75 \pm 1,35$ °C e simuladas de $27,85 \pm 0,55$ °C, médias de UR coletadas de $83\% \pm 12\%$ e simuladas de $78\% \pm 3\%$ e médias das V_v coletadas de $2,35 \pm 1,35$ m.s⁻¹ e simuladas de $2,50 \pm 1,50$ m.s⁻¹; dentre os tratamentos de cobertura testados, TiFisA mostrou ser o mais adequado ao conforto das aves em função do padrão de distribuição da T_{ar} e da V_v ; e dentre todos os arranjos simulados, TiFisA mostrou ser o mais adequado ao conforto das aves em função do padrão de distribuição da T_{ar} .

Palavras-chave: Ambiência, arranjos construtivos, validação de modelos, simulações CFD

Abstract

In Brazil, the use of artificial conditioning systems in negative pressure in poultry houses is becoming increasingly common and in Paraíba, although at a slower pace, has been incorporated for making possible the correction of the microclimate inside aviaries. However, researches developed in the area of Rural Constructions and Ambience indicate the need to improve the efficiency of these systems instead of identifying the heterogeneous distribution of air throughout the building and the inadequacy of internal environmental data to the recommended ranges for the thermal comfort of broilers especially in the hottest times of the day. For these reasons, the efficiency of different constructive arrangements was evaluated in broilers houses, ventilated at negative pressure, by analyzing the distribution of air temperature (T_{ar}), relative humidity (UR) and wind speed (V_v) and characterization of the thermal environment using the Temperature, Humidity and Air Velocity Index (ITUV). For that, a poultry house was instrumented for field data collection and diagnosis of its internal thermal comfort facilities; a computer model of reference was generated based on this aviary, using the software Autodesk CFD 2016; this model was validated; Three different cover arrangements (TiFiA- based on the prototype, with ceiling parallel to the inclined cover and fins, TiFisA- similar to TiFiA, excluding fins and TiFh- similar to TiFisA, with horizontal ceiling) were tested; the most efficient cover arrangement was selected and combined with two evaporative panel arrangements (TiFisA20L and TiFisA40L, with 20% and 40% of the area of the panels facing the East, respectively). It was concluded that: according to ITUV, the instrumented aviary, between 12 and 14 h, did not provide comfort to the adult poultrys housed, with T_{ar} , UR and V_v values not pertinent to the recommended ranges; the CFD model for TiFisA was validated with T_{ar} averages of 27.75 ± 1.35 °C collected in the field and simulated ones were 27.85 ± 0.55 °C, UR mean values of $83\% \pm 12\%$ collected and simulated ones of $78\% \pm 3\%$ and V_v means values of 2.35 ± 1.35 m.s⁻¹ collected and simulated ones were of 2.50 ± 1.50 m.s⁻¹; among the tested cover treatments, TiFisA showed to be the most adequate to the comfort of the broilers according to the distribution pattern of T_{ar} and V_v ; and among all the simulated arrangements, TiFisA was shown to be the most suitable for the comfort of the broilers according to the T_{ar} distribution pattern.

Keywords: Ambience, constructive arrangements, model validation, CFD simulations

1 INTRODUÇÃO

A avicultura é, hoje, a cadeia produtiva do setor pecuário com maior índice de industrialização e grande responsável pela inserção do Brasil no cenário econômico mundial, como o maior exportador e o segundo maior produtor de carne de frango. Em função disto, é constantemente solicitada a investir em melhoramento do potencial genético, do aproveitamento nutricional, das técnicas de manejo e da qualidade ambiental, a fim de manter-se competitivo no mercado e adequar-se a programas internacionais de prevenção e preservação da saúde e do bem-estar de animais e trabalhadores.

Ainda que o panorama mundial e nacional apresente-se bastante favorável, a parcela de contribuição da Região Nordeste e do estado da Paraíba para tal ainda é pouco expressiva. Equacionar os fatores que levam à pequena exploração da avicultura nesta região abrange, dentre tantas outras questões, compreender as limitações impostas pelo clima, os regimes de produção adotados e como estes influenciam, direta e indiretamente, os custos de produção e a rentabilidade do negócio.

A maior parcela do estado paraibano possui clima caracterizado como tropical seco com evaporação excedente à precipitação e ocorrência de pequenos períodos de chuvas sazonais, típico da região semiárida nordestina. A adaptação às necessidades avícolas do microclima no interior de galpões de criação inclui a necessidade de correção da temperatura e umidade do ar por meio de climatização artificial.

Em busca de maior lucratividade e participação mais ativa no cenário econômico mundial e nacional, empresas do setor avícola paraibano têm modernizado suas instalações com a incorporação das tipologias construtivas dos aviários de grandes dimensões ventilados à pressão negativa e ampliado seu plantel com a criação de aves em regime de confinamento em maior densidade, o que maximiza a produção sem a necessidade da expansão do número de galpões.

Neste regime de confinamento, o controle das características térmicas e da qualidade do ar no interior das instalações torna-se imprescindível visto que, além do incremento das cargas de calor do ambiente em função do calor metabólico produzido pelos animais, há também a redução da capacidade de locomoção dos confinados com restrição da possibilidade de deslocamento para um ambiente mais

favorável dentro do galpão de alojamento, principalmente, durante as últimas semanas do ciclo produtivo das aves.

Em função dos critérios de desempenho estabelecidos para os aviários, tornou-se comum a adoção de recomendações projetuais gerais baseadas em princípios qualitativos e subjetivos (dimensões, geometria e orientação do galpão, emprego de elementos de vedação, posicionamento relativo dos vãos de ventilação, paisagismo circundante, dentre outras) e, muitas vezes, fundamentadas em soluções precedentes bem-sucedidas.

Cabe o exemplo das instalações ventiladas à pressão negativa, para as quais se presume o controle eficaz das variáveis ambientais internas por meio da captação e exaustão de ar, única e exclusivamente, por aberturas previstas e dimensionadas a fim de gerar o efeito de túnel de vento. Na adaptação às necessidades dos galpões abertos brasileiros, com fechamentos laterais e forros confeccionados em tecidos sintéticos a base de resinas termoplásticas, desconsidera-se a alta permeabilidade ao ar e as taxas de infiltração desconhecidas que podem comprometer a eficiência deste sistema de climatização.

A fim de reduzir a ocorrência de erros relacionados ao uso de analogias e desconsideração das especificidades de projeto, paulatinamente, vêm-se incorporando metodologias quantitativas de avaliação, monitoramento, modelagem e tomada de decisão sobre os sistemas de controle das condições ambientais no interior de aviários, a exemplo da geoestatística, da telemetria, da termografia e da simulação computacional (redes neurais, sistemas Fuzzy, termo-energética e de dinâmica de fluidos computacional - CFD).

A simulação computacional possibilita tanto a avaliação do desempenho termo-energético de diferentes geometrias, da eficiência do isolamento da envoltória em testes de variáveis para identificação da influência de cada elemento isoladamente (auxiliados por softwares como EnergyPlus, TRNSYS, DOE) quanto a avaliação das taxas de renovação de ar e a adequação de sistemas de climatização por meio de programas baseados em CFD (como ANSYS, PHEONICS e Autodesk CFD).

Buscando coadunar o contexto econômico favorável, a disponibilidade destes recursos computacionais e a necessidade de diagnóstico para melhoria das instalações avícolas paraibanas, utilizou-se de modelos de simulação CFD,

desenvolvidos com auxílio do software Autodesk CFD 2016, para avaliar a distribuição da temperatura e umidade relativa do ar e da velocidade do ar em galpão para criação de frangos de corte, climatizados à pressão negativa.

Tomou-se como ponto inicial da pesquisa, o diagnóstico da tipologia construtiva do aviário mais recentemente adquirido pela empresa parceira quanto à distribuição das variáveis ambientais citadas, à altura dos animais, nos períodos mais quentes, quando a eficiência do sistema de ventilação é imprescindível.

Em seguida, avaliou-se a influência de diferentes arranjos arquitetônicos de cobertura sob a qualidade térmica do ambiente interno e, por fim, combinou-se a cobertura testada mais eficiente a diferentes configurações de aberturas de captação do ar. Em todas as simulações foram considerados fechamentos laterais em cortinas flexíveis e a geração de calor pelos exaustores e metabolismo das aves.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Definir, dentre as possibilidades simuladas, o arranjo construtivo de aviário climatizado à pressão negativa mais eficiente quanto ao conforto térmico das aves e à uniformidade da distribuição interna da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, em período quente, no qual o sistema de exaustão precisa funcionar em plena capacidade.

1.1.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar a distribuição das variáveis ambientais, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, no interior de um galpão avícola ventilado à pressão negativa;
- Criar um modelo computacional do galpão avícola para simulações CFD utilizando o software Autodesk CFD 2106;
- Validar o modelo computacional quanto à distribuição da temperatura do ar, da umidade relativa e da velocidade do vento obtidas experimentalmente;

- Simular e avaliar três diferentes composições de cobertura quanto à sua influência sob a distribuição interna da temperatura do ar, da umidade relativa e da velocidade do vento, em galpões ventilados à pressão negativa;
- Testar outros arranjos construtivos gerados a partir da combinação da cobertura mais eficiente, quanto ao conforto térmico e à uniformidade da distribuição da temperatura do ar, da umidade relativa e da velocidade do vento, com diferentes localizações de painéis evaporativos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama da avicultura no Brasil e na Paraíba

No Brasil, a avicultura é uma das atividades mais avançadas tecnologicamente e tem ocupado lugar de destaque na economia mundial em função de seus altos índices produtivos, gerando riquezas para o país e contribuindo de forma significativa para o fornecimento de proteína animal de baixo custo para a população local. Atualmente, o Brasil é o principal exportador, seguido por EUA e China, e o segundo país no ranking dos maiores produtores de carne de frango, posicionando-se entre EUA e China.

Em 2015, a produção brasileira de carne de frango alcançou 13,146 milhões de toneladas, sendo 67,3% deste montante destinado ao consumo interno (consumo *per capita* de 43,25 kg.hab⁻¹) e 32,7% destinado às exportações (ABPA, 2016). Esses resultados são consequência da implantação de vários programas de qualidade, com destaque para a genética, nutrição, manejo, programas de bem-estar animal e de preservação ambiental.

No Brasil, foram abatidas 1,47 bilhão de cabeças de frangos durante o terceiro trimestre de 2016. Deste montante, a região Sul respondeu por 60,9%, a Sudeste por 19,4%, a Centro-Oeste por 14,4%, a Nordeste por 3,7% e a Norte por 1,6%. Conforme apresentado na Tabela 01, a Paraíba ocupa a quarta posição no ranking de abate entre os estados nordestinos, posicionando-se atrás da Bahia, Pernambuco e Ceará (IBGE, 2106).

Tabela 01. Total de frangos abatidos na Região Nordeste, por estado, no 3º trimestre de 2016

Frangos abatidos na região Nordeste, por estado, no 3º trimestre de 2016					
Estado	Nº de cabeças	%	Estado	Nº de cabeças	%
BA	24.364.902	44,73	AL	686.484	1,26
PE	14.787.910	27,15	MA	362.849	0,67
CE	6.405.654	11,76	SE	292.266	0,54
PB	5.482.148	10,06	RN	---	---
PI	2.089.405	3,83			

Fonte: IBGE, 2016
Adaptada pela autora

Ainda neste período, do total de 1,00 bilhão de tonelada de carne de frango exportado pelo Brasil, 2,63 milhões de toneladas do produto foram exportados por estados do Nordeste. Neste limite geográfico, a Paraíba ocupa atualmente a 4ª posição no ranking de abate, respondendo por 188,7 mil quilos de carne para exportação; no terceiro semestre de 2015 este estado não constava na lista de exportadores (IBGE, 2016).

Um dos municípios paraibanos com maior investimento na avicultura de frango de corte é a cidade de Guarabira, que contribuiu, no ano de 2014, com R\$ 788,89 milhões para o PIB total da PB; ganhando posição de destaque entre os dez maiores PIB do estado, conforme apresentado na Tabela 02. Sua taxa de crescimento anual foi superior à média estadual e a 3ª com variações mais relevantes entre 2013-2014 (IDEME, 2016).

Tabela 02. PIB total, ranking e variação nominal dos municípios paraibanos (2013-2014)

PIB total (1.000 R\$)							
Municípios	2014	Ranking	VN (%)	Municípios	2014	Ranking	VN (%)
Paraíba	52.936.483	---	14,1				
João Pessoa	17.462.539	1º	16,4	Bayeux	1.080.912	6º	15,5
Campina Grande	7.541.055	2º	14,7	Souza	926.413	7º	14,5
Cabedelo	2.294.113	3º	13,0	Cajazeiras	905.38	8º	17,5
Santa Rita	2.079.084	4º	9,1	Guarabira	788.890	9º	24,5
Patos	1.322.958	5º	14,5	Alhandra	715.033	10º	19,2

VN- Variação nominal entre os anos de 2013 e 2014

Fonte: IDEME, 2016
Adaptada pela autora

Dados complementares do valor adicionado pelo setor agropecuário, participação no município e no estado da Paraíba em 2014 são apresentados na Tabela 03; pode-se observar a pequena parcela de contribuição do município de Guarabira ao setor agropecuário do estado, quando comparada à parcela do PIB total, demonstrando que a avicultura nesta região ainda pode ser mais bem explorada.

Tabela 03. Valor adicionado pelo setor agropecuário, participação no município e no estado da Paraíba (2014)

Setor Agropecuário				
Municípios	Valor (1.000 R\$)	Participação no VN total (%)	Estado	
			Part. (%)	Ranking
Paraíba	1.817.995	4,44	---	---
Pedras de Fogo	117.592	32,57	6,47	1º
Alagoa nova	79.612	34,62	4,38	2º
Santa Rita	63.919	4,05	3,52	3º
Pocinhos	58.797	33,84	3,23	4º
Souza	28.233	4,00	1,55	5º
Guarabira	9.693	1,74	0,53	28º

VN- Variação nominal entre os anos de 2013 e 2014

Fonte: IDEME, 2016
Adaptada pela autora

2.2 Ambiência nas instalações avícolas

A introdução de novas tecnologias de criação e suas adaptações na indústria avícola brasileira tem como consequência o surgimento de diversos sistemas produtivos, cada um com suas especificidades. Dessa forma, estudar a ambiência no interior dessas instalações abrange principalmente o conhecimento da fisiologia da ave, o diagnóstico bioclimático da microrregião de produção e a tipificação dos sistemas (Abreu e Abreu, 2011).

2.2.1 Fisiologia da ave

As aves são animais homeotérmicos privados de glândulas sudoríparas e que, por não transpirem, liberam o excesso de calor por meio da respiração e pela vasodilatação das superfícies desprovidas de penas. A elevação da temperatura ambiente ocasiona gradativamente o aumento da temperatura corporal das aves; esta varia dentro de um intervalo mínimo até a temperatura do ar atingir 33 °C; o uso destes mecanismos de troca de calor, com consequente desperdício de energia metabolizável, afeta negativamente o desempenho produtivo das aves (Welker et al., 2008).

Estes animais expressam suas melhores capacidades produtivas quando expostos à combinação de variáveis ambientais de temperatura, de umidade e de

velocidade do vento dentro de uma faixa muito estreita: a zona de termoneutralidade. Dentro desse limite não há desperdício de energia pelo animal para compensação do frio nem, tampouco, para resistência ao calor ambiental (Abreu e Abreu, 2011).

Dentre todas as variáveis, a temperatura do ar é o principal fator ambiental causador de perdas. O estresse térmico nas aves pode acarretar diminuição da ingestão de alimento e das atividades físicas, além de perdas na produção (Vitorasso e Pereira, 2009).

De maneira geral, um ambiente para criação de frangos de corte na idade adulta é tido como confortável quando apresenta temperaturas de 18 a 28 °C e umidade relativa do ar de 50 a 70% (Tinôco, 2001; Baêta e Souza, 2010).

Medeiros (2001) constatou que aves com idade entre 3 e 7 semanas de vida mantidas a temperatura entre 21 e 27 °C, umidade relativa entre 50 e 70% e velocidade do ar entre 0,5 e 1,5 m.s⁻¹ apresentaram melhores resultados de desempenho quando comparadas a aves submetidas a temperaturas superiores.

Abreu e Abreu (2011) afirmam que, em virtude do aumento de peso e consequente aumento da área ocupada por ave, nas 6^a e 7^a semanas de seu ciclo produtivo, a temperatura do ar ideal é de 20 °C com umidade relativa do ar entre 60 e 70%.

Esses valores, especialmente no que tange à temperatura, dificilmente são obtidos nas condições do clima brasileiro, sobretudo no verão, sem a utilização da climatização artificial (Tinôco, 2001).

Nos sistemas dotados de condicionamento artificial, quando as temperaturas estão acima da zona de termoneutralidade, o aumento da velocidade do ar é o meio mais eficaz para melhorar o desempenho e bem-estar de frangos de corte, vez que há aumento das perdas convectivas de calor e diminuição da respiração ofegante. Se as perdas de calor por convecção estão relacionadas com a área superficial a ser resfriada, pode-se afirmar que a velocidade do ar torna-se mais benéfica quanto maior for o tamanho corporal das aves, ou seja, quanto mais avançada for sua idade (Simmons et al., 1997).

Há quase meio século, em uma das primeiras pesquisas com uso de ventilação em túnel, Drury (1966) já observava aumento de ganho de peso corporal (BWG) relacionado com incremento nas taxas de ventilação para aves de 07

semanas de idade; quando testou uma velocidade do ar superior ($v_{ar} = 2,75 \text{ m.s}^{-1}$) àquela comumente utilizada nas operações de aviários ventilados em pressão negativa ($v_{ar} = 2 \text{ m.s}^{-1}$), registrou melhoria de BWG sem mudanças na taxa de conversão alimentar.

Posteriormente, May et al. (2000) testaram, em câmaras climáticas, os efeitos de dois valores de velocidade do ar ($v_{ar} < 0,25 \text{ m.s}^{-1}$ e $v_{ar} = 2 \text{ m.s}^{-1}$) sobre frangos de corte entre a 3^a e 7^a semana de vida e encontraram que estes, quando expostos à velocidade do ar mais elevada, consumiram menos água e mais ração, ganharam mais peso e tiveram uma maior taxa de conversão alimentar.

Simmons et al. (2003) estudaram, em túneis de vento, o efeito da velocidade do ar de 2,0 e 3,0 m.s^{-1} contra calmaria ($v_{ar} < 0,25 \text{ m.s}^{-1}$) em frangos de corte e verificaram que aves na 3^a/ 4^a semana de idade não sentiram efeitos sobre o ganho de peso corporal (BWG) e conversão alimentar; aves na 4^a/ 5^a e 5^a/ 6^a semana de vida apresentaram melhorias significativas em BWG e conversão alimentar para as duas velocidades do ar, enquanto na 6^a/ 7^a semana, uma velocidade do ar de 3 m.s^{-1} melhorou significativamente os dois índices produtivos avaliados quando comparados com $v_{ar} = 2 \text{ m.s}^{-1}$ e $v_{ar} < 0,25 \text{ m.s}^{-1}$.

A Cobb (2012) endossa as conclusões dos autores acima por afirmar que a velocidade do vento ao nível das aves deve variar entre 1,75 a 3,0 m.s^{-1} para animais com mais de 28 dias de idade.

Como a sensação térmica é resultante da interação de diversas variáveis, entre elas temperatura, umidade e velocidade do ar, Barnwell e Rossi (2003) afirmaram que uma temperatura ambiente de 21,1 °C, associada à umidade relativa de 50%, velocidade do ar entre 2,29 e 2,41 m.s^{-1} e taxa de renovação de ar em menos de 1,3 m.s^{-1} é uma combinação capaz de oferecer conforto térmico a frangos de corte em idade adulta.

Para avaliar os efeitos das condições térmicas sobre os animais, têm-se adotado vários índices ambientais baseados em estado fisiológico e/ou desempenho produtivo, entre eles o Índice de temperatura e umidade (ITU), o Índice de temperatura do globo negro e umidade (ITGU) e a Carga térmica de radiação (CTR) (Furtado et al., 2003; Tao e Xin, 2003; Carvalho-Curi, 2014).

2.2.1.2 Índice de temperatura, umidade e velocidade do ar (ITUV)

Embora índices como ITU, ITGU e CTR revelem a importância relativa da temperatura, da umidade e da radiação sobre a sensação térmica de animais, não conseguem integrar diretamente o efeito importante da velocidade do vento. Para suprir essa lacuna, Tao e Xin (2003) propuseram o Índice de temperatura, umidade e velocidade do ar (ITUV), calculado aplicando-se a Equação 01.

$$ITUV = [(0,85 * T_{bs}) + (0,15 * T_{bu})] * V_v^{-0,058} \quad \text{Eq. 01}$$

Na qual:

ITUV - Índice de Temperatura, Umidade e Velocidade do ar;

T_{bs} - Temperatura de bulbo seco, em °C;

T_{bu} - Temperatura de bulbo úmido, em °C;

V_v - Velocidade do vento, em m.s⁻¹.

As faixas interpretativas empregadas para ITUV estão apresentadas na Tabela 04.

Tabela 04. Faixas interpretativas para ITUV, considerando-se frangos nas últimas semanas do ciclo produtivo (Tao & Xin, 2003)

ITUV	Sensação térmica
ITUV ≤ 24	Conforto
24 < ITUV ≤ 34	Alerta
34 < ITUV ≤ 39	Perigo
ITUV > 39	Emergência

2.2.2 Diagnóstico bioclimático da microrregião de produção

O Estado da Paraíba possui clima de semiárido em 76,2% de sua área geográfica englobando 170 dos seus 223 municípios e 57,1% de sua população (BRASIL, 2005).

O semiárido paraibano é subdividido em 04 mesorregiões: Agreste, Curimataú, Cariri e Sertão; sendo o Agreste, na qual se encontra o município de Guarabira, o limite oeste da Mata Atlântica, com trechos quase tão úmidos como no

litoral e outros tão secos como no Sertão, com período mais chuvoso entre os meses de abril a julho (Silva et al., 2008).

No município de Guarabira, as médias das temperaturas do ar máximas chegam a 32,1 °C e as mínimas a 19,5 °C, enquanto as médias da umidade relativa do ar variam entre 71,5 e 84,7% (DCA, 2015).

Na Tabela 05 pode-se encontrar o diagnóstico bioclimático do município de Guarabira elaborado a partir de dados disponibilizados pelo Departamento de Ciências Atmosféricas, referentes ao período de 1911-1990.

Tabela 05. Diagnóstico bioclimático do município de Guarabira para aves adultas

Diagnóstico bioclimático do município de Guarabira												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp. máxima média (°C)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Temp. mínima média (°C)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
UR 12 h (%)	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>
UR 18 h (%)	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>	<u>C</u>
UR 24 h (%)	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>	<u>S</u>

LEGENDA:

S – temperatura do ar acima do limite da zona de conforto para aves adultas

C – temperatura do ar dentro da zona de conforto para aves adultas

S – umidade relativa do ar acima do limite da zona de conforto para aves adultas

C – umidade relativa do ar dentro da zona de conforto para aves adultas

- Necessário corrigir a temperatura do ar - Necessário corrigir a umidade relativa do ar

Fonte: Baseada em dados do DCA- Departamento de Ciências Atmosféricas
Adaptada pela autora

Conclui-se que, em galpões para criação de aves adultas (6ª e 7ª semanas), é imperativo recorrer tanto aos sistemas de resfriamento ao longo de todo o ano no período mais quente do dia; quanto aos sistemas de desumidificação ao longo da madrugada de janeiro a dezembro, nas horas mais quentes do dia entre janeiro e setembro e ao final da tarde dos meses de maio a agosto.

2.2.3 Tipificação dos sistemas produtivos

Tendo em vista a necessidade de montagem de custos de produção da avicultura para os estados brasileiros, a Embrapa Suínos e Aves definiu a tipificação

dos sistemas produtivos em: convencional, semiclimatizado, climatizado, *dark house*, *brown house*, *blue* e *green house* e aviário gigante (Abreu, 2010).

Suas principais características no tocante ao condicionamento térmico, segundo o autor acima, são:

- Convencional: não possui controle artificial de temperatura; não utiliza forro para diminuir o ganho de calor por radiação pela cobertura; seu fechamento lateral é feito com uso de cortinas;
- Semiclimatizado: utiliza ventiladores em pressão positiva; pode ou não utilizar-se de forro; seu fechamento lateral também é feito por cortinas;
- Climatizado: possui ventiladores em pressão positiva ou exaustores em pressão negativa ou ainda sistema de resfriamento por nebulização ou por placas evaporativas; pode ou não ter forro; seu fechamento lateral é feito por cortinas;
- *Dark house*: é o sistema com maior controle das condições térmicas ambientais e da iluminação; possui exaustores em pressão negativa ou resfriamento por nebulização ou por placas evaporativas; possui forro de cobertura; suas laterais são vedadas em alvenaria para possibilitar total controle da luz natural que adentra a instalação por meio de armadilhas de luz do tipo *light trap* na entrada e saída do ar;
- *Brown house*: é semelhante ao *dark house*, porém com controle de iluminação menos eficiente que este, é feito por meio de armadilhas de luz confeccionadas com tijolos, telhas e madeiras; possui forro; nele utiliza-se de cortinas para a vedação das laterais;
- *Blue* e *green house*: se diferenciam dos demais pela aplicação da teoria de que a cor influencia a produtividade dos animais confinados; possuem exaustores em pressão negativa; forro de cobertura e cortinas laterais na cor azul ou verde, respectivamente; e
- Aviário gigante: possui maiores dimensões, que podem chegar a 32 m de largura por 150 m de comprimento; o sistema de climatização mais comum é a ventilação em pressão negativa.

Furtado et al. (2005) observaram que os aviários da mesorregião do Agreste paraibano caracterizavam-se por serem abertos com fechamentos em cortinas,

predominantemente, de pequenas dimensões, com cobertas sem lanternim e forro. Aproximadamente, 50% destes aviários eram dotados de sistemas de climatização por ventiladores em pressão positiva sendo apenas uma pequena porcentagem associados à nebulizadores.

Segundo Nääs (2007), de maneira geral, a grande maioria dos galpões abertos nos quais são utilizados sistemas de ventilação e nebulização, permitem melhores condições de alojamento para aves do que aqueles totalmente fechados, comuns em locais de clima temperado, onde são detectados altos teores de concentração de gases e poeiras.

2.2.3.1 Galpões climatizados em pressão negativa

Em galpões climatizados por pressão negativa, se perfeitamente isolados e vedados, o ar adentra a instalação exclusivamente pelos painéis evaporativos e percorre todo o seu comprimento a uma velocidade fixa até sair, pelo lado oposto à entrada, sugado por exaustores. Se houver infiltração de ar, sua velocidade depois da seção dos evaporadores será menor que a velocidade de projeto, acarretando tanto perdas na produtividade, uma vez que a maior parte do calor dissipado pelos frangos ocorre por convecção, quanto de eficiência energética (Bianchi, 2014).

A função da ventilação de pressão negativa do tipo exaustão é a renovação do ar do ambiente interno utilizando o sistema túnel. Toda vez que a ventilação natural não for suficiente para a manutenção das condições ambientais ideais de temperatura e umidade no interior dos galpões deve-se utilizar a ventilação artificial que é produzida por equipamentos de exaustão. A taxa de ventilação pode ser controlada através do dimensionamento das entradas de ar e dos exaustores; atenção especial deve ser dada à pressão, relacionada diretamente com a vazão do ar, e à quantidade de ar a ser renovado por unidade de tempo. Um dos fatores que mais acarretam a formação de zonas de pressão com baixa movimentação de ar é o mau dimensionamento e posicionamento dos equipamentos de ventilação (Carvalho-Curi, 2014).

Diferenças entre regiões de altas e baixas velocidades do ar e o comportamento turbulento do ar podem levar a não uniformidade do lote, visto que impacta no desempenho, na conversão alimentar e no consumo de água das aves (May et al., 2000).

2.3 Simulação computacional para análise de edifícios

A simulação computacional pressupõe a reprodução virtual de diferentes características de um edifício com o propósito de predição, utilizando-se de cálculos complexos, do desempenho da edificação sobre uma determinada abordagem (Lima, 2012).

Segundo o Building Energy Tools Directory, site mantido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, atualmente, encontram-se disponíveis no mercado mais de 400 ferramentas de simulação para avaliar a eficiência energética, renovável e sustentabilidade em edifícios; a escolha do programa a ser utilizado deve estar relacionada à amplitude do escopo de análise e à precisão e eficiência de seus resultados (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2015).

Lima (2012) agrupou as ferramentas de suporte às decisões projetuais com abordagens focadas no desempenho térmico da edificação em quatro categorias: de análise climática, de análise solar, de simulação termoenergética e de CFD. A primeira proporciona informações sobre o clima de locais específicos a partir de um arquivo climático; a segunda possibilita analisar o sombreamento a partir da modelagem virtual do edifício e seu entorno; a terceira reproduz as trocas térmicas de um modelo e seu impacto sobre o consumo energético e, por fim, a de CFD fornece dados sobre o escoamento ao redor e no interior da edificação.

Testes físicos em instalações avícolas, caracterizadas por suas grandes dimensões e relação entre comprimento e altura, com o intuito de avaliar o posicionamento das aberturas de ventilação podem ser inviabilizados pelo grande tempo despendido, pelo alto custo financeiro das adaptações e, também, pela dificuldade de instrumentação em busca de resultados confiáveis.

Em função disto, alguns pesquisadores, dentre eles Simmons et al. (2003), Blanes-Vidal et al. (2008), Lee et al. (2009), Norton et al. (2010), Hernández et al. (2013), Bustamante et al. (2013) e Carvalho-Curi (2014), recorreram aos modelos computacionais, a exemplo de simulações termoenergéticas e de CFD, muito promissores por oferecerem possibilidades de manipulação das características do sítio, da geometria, das propriedades dos materiais, das rotinas de ocupação e dos equipamentos de climatização com, relativamente, baixo custo e curto período de tempo.

2.3.1 Dinâmica dos fluidos computacional- CFD

Dinâmica dos fluidos computacional- CFD é o termo utilizado para descrever uma família de métodos numéricos utilizados na previsão do escoamento de líquidos e gases e da transferência de calor ao redor e no interior de objetos sólidos. CFD é uma ferramenta importante do processo de projeto e beneficia áreas como eficiência energética, redução de riscos e inovação (AUTODESK CFD 2016, 2016).

Os algoritmos do CFD baseiam-se na resolução de um conjunto de equações, que descrevem a conservação de energia, massa e quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo, conhecido como equações de Navier-Stokes (Norton et al., 2009).

A precisão e a qualidade dos resultados estão associadas com as grandezas físicas atribuídas às condições limites do fluxo, bem como os métodos estão relacionados com as condições limites para o escoamento do ar nas entradas e saídas; a quantidade de elementos e o refinamento adequado da malha são critérios importantes para a resolução dos gradientes locais (Carvalho-Curi, 2014).

Outros métodos de simulação, a exemplo do Fuzzy e Geoestatística, apesar de serem precisos, necessitam de ambas as informações quantitativas e qualitativas obtidas a partir de medições experimentais *in loco* do fluxo interno, a fim de determinar a modelagem e os parâmetros do modelo (Norton et al., 2010).

Recentemente, têm-se utilizado o CFD em pesquisas para fornecimento de descrição detalhada dos campos de fluxo no interior de edifícios agropecuários, a partir do qual o nível de mistura e a qualidade do ar no espaço ocupado podem ser determinados (Blanes-vidal et al., 2008; Bustamante et al., 2013; Hernández et al., 2013; Tinôco et al., 2010; Lee et al., 2009; Norton et al., 2010).

2.3.1.1 Compressibilidade de escoamento

A compressibilidade de escoamento refere-se à relação entre densidade e pressão; um fluxo é dito compressível quando a massa específica tem variação desprezível devido às pequenas variações na pressão atmosférica (Young e Freedman, 2008).

Para fluxos incompressíveis, os efeitos a jusante são sentidos imediatamente e a equação de pressão é matematicamente elíptica, exigindo condições de limite à jusante (AUTODESK CFD 2016, 2016).

Uma medida de compressibilidade é o número de Mach, definido conforme a Equação 02; fluxos com número de Mach menores que 0,3 podem ser considerados incompressíveis, segundo a Tabela 06 (AUTODESK CFD 2016 e NASA, 2016).

$$NM = \frac{v_f}{v_{sf}} \quad \text{Eq. 02}$$

Na qual:

NM - Número de Mach, adimensional;

v_f - Velocidade média do escoamento no meio fluido, em $m.s^{-1}$; e

v_{sf} - Velocidade do som no meio fluido, em $m.s^{-1}$.

Tabela 06. Classificação da compressibilidade dos gases em função do número de Mach

Gases			
Estudos em geral		Estudos em aerodinâmica	
$NM < 0,3$	incompressível	subsônico	
$0,3 < NM < 1$	compressível		
$NM = 1,0$	crítico	transônico	
$NM > 1,0$	compressível	$1 < NM < 5$	supersônico
		$NM > 5$	hipersônico

Obs.: Em líquidos, o escoamento é considerado incompressível.

Fonte: AUTODESK CFD 2106, 2016 e NASA, 2016
Adaptada pela autora

2.3.1.2 Tipos de escoamento

O escoamento pode ser considerado laminar, quando as linhas são definidas e estacionárias ao longo do campo, ou turbulento, quando as linhas de corrente não são estacionárias (AUTODESK CFD 2016, 2016). A Figura 01a e 01b exemplifica, respectivamente, o escoamento laminar e turbulento no interior de um tubo.

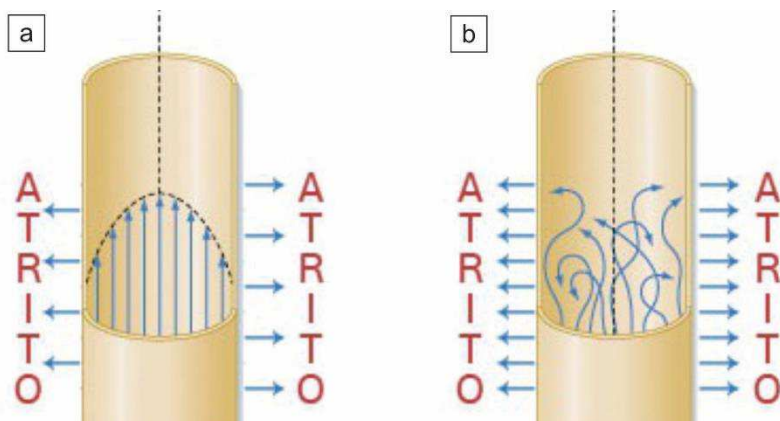


Figura 01. Escoamento laminar (a) e turbulento (b) no interior de dutos
 Fonte: lucasnicolau.com/?v=publicacoes&id=2

No regime laminar, o fluido se move em lâminas, uma escorregando sobre a adjacente, havendo somente troca de quantidade de movimento molecular; as partes mais centrais do fluxo apresentam maior velocidade de deslocamento, enquanto as partes mais próximas às paredes do tubo deslocam-se mais lentamente devido as forças de atrito. Qualquer tendência à instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do fluido (Young e Freedman, 2008).

O escoamento turbulento é aleatório e apresenta flutuação da pressão, da temperatura e da velocidade nas três direções; neste regime, a existência de vórtices e redemoinhos torna o fluxo imprevisível (Young e Freedman, 2008).

Para determinar se o escoamento deve ser tratado como laminar ou turbulento, utiliza-se o número de Reynolds, calculado conforme a Equação 03; os critérios de classificação são apresentados na Tabela 07 (AUTODESK CFD 2016, 2016).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{Eq. 03}$$

Na qual:

- Re - Número de Reynolds, adimensional;
- ρ - Massa específica do fluido, em $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$;
- V - Velocidade média do escoamento, em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- D - Diâmetro do tubo, em m; e

μ - Viscosidade dinâmica do fluido, em N.s.m⁻²

Tabela 07. Classificação do regime de escoamento, segundo o número de Reynolds

Número de Reynolds	
Re < 2500	Laminar
2500 < Re < 4000	Transiente
Re > 4000	Turbulento

Fonte: AUTODESK CFD 2016, 2016
Adaptada pela autora

Na faixa intermediária, com número de Reynolds entre 2500 e 4000, tem-se o regime de fluxo de transição ou transiente, no qual o escoamento apresenta vários estágios de comportamento não linear antes de se tornar totalmente turbulento. Estes estágios são altamente instáveis, visto que o fluxo pode apresentar mudanças abruptas em suas características (ex.: de pontos turbulentos para desagregação de vórtices e, novamente, turbulência); devido a essa instabilidade, é muito difícil prevê-lo numericamente (AUTODESK CFD 2016, 2016).

2.3.1.3 Equações governantes

As equações governantes de escoamento de fluidos (laminar e turbulento), transferência de calor e fenômenos associados podem ser consideradas como formulações matemáticas das leis de conservação que descrevem a taxa de mudança de uma propriedade de fluido desejada como uma função de forças externas (Norton et al., 2007).

O Autodesk CFD resolve as equações governantes, em tempo médio, em conformidade com as Equações de 04 a 10 (AUTODESK CFD 2016, 2016).

- 1) Equação de continuidade: os fluxos de massa que entram em um elemento fluido devem equilibrar-se exatamente com aqueles que saem.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 04}$$

Na qual:

ρ - Densidade do fluido, em kg.m⁻³;

- t - Tempo, em s;
 x, y, z - Coordenadas cartesianas; e
 U, V, W - Velocidade média nas direções x, y e z , respectivamente, em $m.s^{-1}$.

2) Equações de conservação de momento (Segunda Lei de Newton): a soma das forças externas que atuam sobre a partícula de fluido é igual à sua taxa de variação de momento linear.

- Para momento no eixo x Eq. 05

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \rho W \frac{\partial U}{\partial z} = \\ \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + S_{DR} + S_\omega + \frac{\partial}{\partial x} \left[2(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] \end{aligned}$$

- Para momento no eixo y Eq. 06

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \rho W \frac{\partial V}{\partial z} = \\ \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + S_{DR} + S_\omega + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2(\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] \end{aligned}$$

- Para momento no eixo z Eq. 07

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho U \frac{\partial W}{\partial x} + \rho V \frac{\partial W}{\partial y} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z} = \\ \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + S_{DR} + S_\omega + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2(\mu + \mu_t) \frac{\partial W}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

Nas quais:

ρ -	Densidade do fluido, em kg.m^{-3} ;
U, V, W -	Velocidade média nas direções x, y e z, em m.s^{-1} ;
t -	Tempo, em s;
x, y, z -	Coordenadas cartesianas;
g_x, g_y, g_z -	Aceleração gravitacional nas direções x, y e z, em m.s^{-2} ;
P -	Pressão, em Pa;
S_{DR} -	Termo para resistência distribuída;
S_{ω} -	Termo para escoamento rotativo;
μ -	Viscosidade dinâmica do fluido, em Pa.s; e
μ_t -	Viscosidade turbulenta do escoamento, em Pa.s;

Os termos para resistência distribuída e escoamento rotativo são descritos nas Equações 08 e 09, respectivamente.

$$S_{DR} = - \left(K_i + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - C \mu V_i \quad \text{Eq. 08}$$

Na qual:

S_{DR} -	Termo para resistência distribuída;
K -	Coeficiente de perda constante
i -	Direção das coordenadas globais (u, v, w);
f -	Fator de atrito; adimensional
D_H -	Diâmetro hidráulico, em m;
ρ -	Densidade do fluido, em kg.m^{-3} ;
V -	Velocidade média, em m.s^{-1} ;
C -	Coeficiente de viscosidade;
μ -	Viscosidade dinâmica do fluido, em Pa.s.

$$S_{\omega} = -2\rho\omega_i * V_i - \rho\omega_i * \omega_i * r_i \quad \text{Eq. 09}$$

Na qual:

S_{ω} -	Termo para escoamento rotativo;
ρ -	Densidade do fluido, em kg.m^{-3} ;
ω -	Velocidade de rotação, em m.s^{-1} ; e

- i - Direção das coordenadas globais (u, v, w);
- V - Velocidade média, em $m.s^{-1}$;
- r - Distância para o eixo de rotação, em m.

- 3) Conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica): a variação da energia interna de um sistema é expressa por meio da diferença entre a quantidade de calor trocada com o meio ambiente e o trabalho realizado durante a transformação.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v \quad \text{Eq. 10}$$

Na qual:

- ρ - Densidade do fluido, em $kg.m^{-3}$;
- C_p - Calor específico à pressão constante, em $J.kg^{-1}.K^{-1}$;
- T - Temperatura, em K;
- t - Tempo, em s;
- U, V, W - Velocidade média nas direções x, y e z, em $m.s^{-1}$;
- x, y, z - Coordenadas cartesianas;
- k - Condutividade térmica, em $W.m^{-1}.K^{-1}$;
- k_t - Condutividade turbulenta, em $W.m^{-1}.K^{-1}$; e
- q_v - Fonte de calor volumétrica, em $m^3.s^{-1}$.

Para complementar as equações acima, faz-se necessária determinar a viscosidade turbulenta (μ_t) e a condutividade turbulenta (k_t) por meio dos modelos de turbulência (AUTODESK CFD 2016, 2016).

2.3.1.4 Modelos de turbulência

A viscosidade turbulenta (μ_t) e a condutividade turbulenta (k_t) são calculadas utilizando as Equações 11 e 12:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 11}$$

Na qual:

- μ_t - Viscosidade turbulenta, em Pa.s
- C_μ - Constante empírica, adimensional;¹
- ρ - Densidade do fluido, em kg.m⁻³;
- K - Transporte de energia cinética turbulenta
- ε - Taxa de dissipação de energia turbulenta

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad \text{Eq. 12}$$

Na qual:

- k_t - Condutividade turbulenta, em W.m⁻¹.K⁻¹
- μ_t - Viscosidade turbulenta, em Pa.s
- C_p - Calor específico à pressão constante, em J.kg⁻¹.K⁻¹;
- σ_t - Número de Prandtl, adimensional.

Para determinar as variáveis de viscosidade turbulenta e de condutividade turbulenta, vários modelos de turbulência utilizam um modelo de duas equações, TKE e TDE (AUTODESK CFD 2016, 2016).

Dos modelos disponíveis no Autodesk CFD 2016, o Standard k- ε , o SST k- ω e o RNG k- ε , são os mais utilizados em pesquisas agropecuárias (Carvalho-Curi, 2014). Seus usos sugeridos e algumas informações adicionais estão listados na Tabela 08.

¹ O valor padrão para a constante C_μ é 0,09; valores maiores resultam em mais mistura, mais cisalhamento e maior mudança na pressão.

Tabela 08. Alguns dos modelos de turbulência disponibilizados pelo Autodesk CFD 2016

Modelos	Usos recomendados	Notas adicionais
Standard k-ε	Funciona bem para a maioria das aplicações	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência de uso geral • Modelo padrão
SST k-ω	Escoamento externo e fluxos com gradientes de pressão adversos	<ul style="list-style-type: none"> • SST simula turbulência ao longo de todo o caminho para a parede. • A malha precisa ser muito fina na região da camada limite. • É possível adicionar até 10 camadas próximas às paredes.
RNG k-ε (Renormalization-group k-ε)	Ponto de religação para fluxos separados, particularmente para aqueles com uma etapa em sentido contrário.	<ul style="list-style-type: none"> • Requer cálculos mais intensivos, mas às vezes, é um pouco mais preciso do que o modelo Standard k-ε. • Muitas vezes recomenda-se começar com o modelo Standard k-ε e mudar para RNG K-ε depois que o fluxo é maioritariamente convergente.

Fonte: AUTODESK CFD 2016, 2016
Adaptada pela autora

As equações TKE e TED descrevem o transporte da energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação de energia turbulenta (ϵ), respectivamente; para o modelo de turbulência Standard k-ε, com altos números de Reynolds, são calculadas por meio das Equações 13 e 14, respectivamente (AUTODESK CFD 2016, 2016).

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho U \frac{\partial K}{\partial x} + \rho V \frac{\partial K}{\partial y} + \rho W \frac{\partial K}{\partial z} = \text{Eq. 13}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \epsilon$$

$$+ \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Na qual:

- ρ - Densidade do fluido, em kg.m^{-3} ;
- K - Transporte de energia cinética turbulenta
- t - Tempo, em s;
- U, V, W - Velocidade média nas direções x, y e z, em m.s^{-1} ;
- x, y, z - Coordenadas cartesianas;

- μ_t - Viscosidade turbulenta, em Pa.s
 σ_k - Número de Schmidt, adimensional;²
 ε - Taxa de dissipação de energia turbulenta

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \quad \text{Eq. 14}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$$

$$+ C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{K} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Na qual:

- ρ - Densidade do fluido, em kg.m⁻³;
 ε - Taxa de dissipação de energia turbulenta
 t - Tempo, em s;
 U, V, W - Velocidade média nas direções x, y e z, em m.s⁻¹;
 x, y, z - Coordenadas cartesianas;
 K - Transporte de energia cinética turbulenta
 μ_t - Viscosidade turbulenta, em Pa.s
 σ_ε - Número de Schmidt, adimensional;³ e
 C_1 - Constantes empíricas.⁴
 C_2 - Constantes empíricas.⁵

2.3.1.5 Métodos de discretização para geração de malha

Antes de executar uma análise CFD, as partes componentes do modelo geométrico, inclusive o volume de ar, são divididas em pequenos pedaços. Ao processo de partição dá-se o nome de discretização do domínio, enquanto ao

² O valor para o número de Schmidt σ_K é 1,0.

³ O valor padrão para o número de Schmidt σ_ε é 1,3.

⁴ O valor padrão para a constante empírica C_1 é 1,44. Valores maiores resultam em menos mistura, menor cisalhamento e menor alteração na pressão.

⁵ O valor padrão para a constante empírica C_2 é 1,92. Valores maiores resultam em mais mistura, mais cisalhamento e maior mudança na pressão.

conjunto de elementos discretos dá-se o nome de malha. Cada elemento é composto por faces e nós. São nesses nós que as equações diferenciais parciais governantes são resolvidas numericamente a fim de produzir uma solução para todo o domínio (NTL, 2017).

Segundo o Autodesk CFD (2016), o método de discretização pode ser das diferenças finitas, dos elementos finitos ou dos volumes finitos, como descritos abaixo.

- Diferenças finitas- é o método mais antigo (data do século 18) e mais fácil de ser utilizado, entretanto, sua viabilidade está limitada a geometrias simples com fronteiras imersas. Em geometrias complexas, é comum apresentar problemas de cruzamento de equações, de geração de malha e dificuldade de convergência.
- Volumes finitos- neste método, as equações governantes são integradas em um volume ou elemento assumindo uma variação linear por parte das variáveis dependentes. Usando essas integrações, o fluxo, que é calculado no ponto médio entre os nós discretos no domínio, é equilibrado além dos limites dos volumes individuais. Permite acomodar qualquer tipo de malha, no entanto, nas malhas regulares o cálculo de fluxo é bastante direto, mas nas irregulares necessita de grande esforço de contabilidade para garantir resultados precisos.
- Elementos finitos- é muito parecido com o anterior, contudo as equações diferenciais parciais governantes somente são integradas sobre um elemento ou volume depois de terem sido multiplicadas por uma função de peso. Sua principal vantagem é o fácil refinamento da malha em geometrias complexas.

Existem basicamente dois tipos de malha: as estruturadas e não estruturadas, como exemplificado na Figura 02.

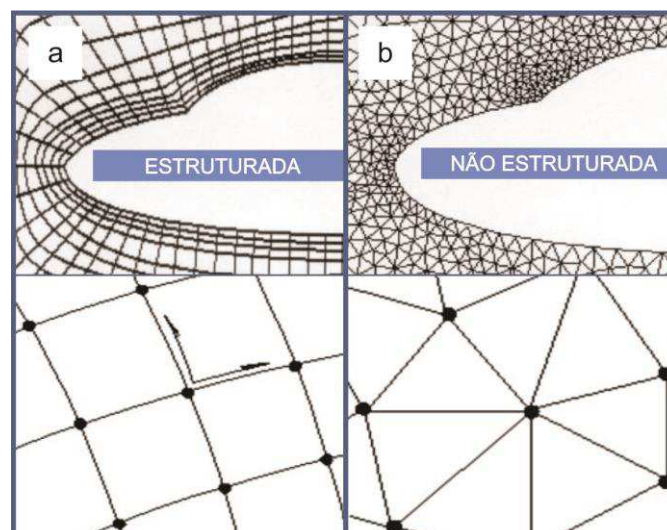


Figura 02. Exemplos de malha estruturada (a) e não estruturada (b)

Fonte: NTL, 2017
Adaptada pela autora

Na malha estruturada, cada ponto nodal interior é rodeado por igual número de elementos adjacentes; elementos quadrilaterais e hexaédricos são comuns neste tipo de malha. Na malha não estruturada, o número de células em torno de um nó interior típico da malha não é necessariamente constante; elementos triangulares e tetraédricos são mais comuns, embora malhas quadrilaterais e hexaédricas também possam ser desestruturadas (NTL, 2017).

A abordagem não estruturada é uma ferramenta poderosa para a discretização de domínios de forma complexa, mas sua principal desvantagem é a maior demanda por memória computacional (AUTODESK CFD 2016, 2016); apesar disto, têm sido bastante utilizada em pesquisas agropecuárias (Blannes-Vidal et al., 2008; Valera et al., 2011; Bustamante et al., 2013; Guerra-Galdo et al., 2015).

2.3.1.6 Verificação e validação de simulações CFD

Uma grande vantagem dos modelos baseados em CFD é possibilitar a redução de repetições dos experimentos e aperfeiçoar as instalações a partir da validação dos dados experimentais; sua importância vem crescendo juntamente com a solução de problemas, como a pouca precisão dos resultados das simulações e a falta de equipamentos computacionais adequados (Carvalho Curi e Moura, 2014).

Blanes-vidal et al. (2008), Bustamante et al. (2013), Hernández et al. (2013) e Carvalho-Curi (2014) desenvolveram pesquisas do tipo V&V- verificação e validação,

nas quais os resultados das simulações são comparados às medições *in loco*. Concluíram que o modelo computacional utilizando dinâmica dos fluidos é uma ferramenta eficiente tanto para avaliação quantitativa quanto para tomada de decisões em projetos bioclimáticos de galpões avícolas, visto que não encontraram diferenças significativas entre os dados experimentais e do modelo em CFD.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da unidade experimental

A coleta de dados em campo foi realizada em granja para criação de frangos de corte com área de 2.250,00 m², ventilação em túnel por pressão negativa, localizada na Fazenda Sapucaia, Guarabira/PB, com coordenadas geográficas 06°51'58" S, 35°27'58" O e 89,00 m de altitude. O galpão referido é propriedade da Empresa Guaraves Alimentos. O município de Guarabira está localizado na Mesorregião do Agreste Paraibano e, segundo Köeppen, possui clima do tipo Aw', caracterizado como tropical subúmido.

Em Guarabira, conforme apresentado na Tabela 09, a temperatura máxima média chega a 32 °C, nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro; a mínima média chega até 19,5 °C (no mês de agosto); a umidade relativa média varia de 71,5% a 84,7%, nos meses de novembro e junho, respectivamente; o período chuvoso ocorre entre março e julho com precipitação média de 160 mm, enquanto o período seco, entre outubro e dezembro, com precipitação média de aproximadamente 24 mm; os ventos predominantes possuem direção Sudeste com velocidade média de 12 m.s⁻¹, medida à altura de 10 m em relação ao nível do solo (DCA, 2015).

Tabela 09. Dados climatológicos (1911-1990) para o Município de Guarabira/PB

Dados climatológicos para Guarabira/PB													
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temp. máxima média (°C)	32	31,9	31,4	30,9	30,3	29,4	29	29,6	30,6	31,5	32,1	32,1	30,9
Temp. mínima média (°C)	22	22	22,1	21,8	21,3	20,5	19,9	19,5	20,2	20,8	21,1	21,6	21,1
Pluviosid. (mm)	65,1	78,2	155,5	175,7	166,2	173,5	137,5	80,9	50,1	15,6	20,4	37,5	1.183,9
UR (%)	73,4	75,6	78	79,8	83,1	84,7	84	80,9	78,1	72,5	71,5	72	77,8

LEGENDA:

	- Temperatura média máxima mais alta		- Temperatura média mínima mais baixa
	- Pluviosidade média máxima		- Pluviosidade média mínima

Fonte: DCA - Departamento de Ciências Atmosféricas
Adaptada pela autora

O galpão experimental, deste ponto em diante, por vezes referenciado como protótipo, está implantado no sentido Leste-Oeste. As Figuras 03 e 04 são as ilustrações esquemáticas de sua planta baixa e cortes (transversais, AA e BB; longitudinal, CC), respectivamente.

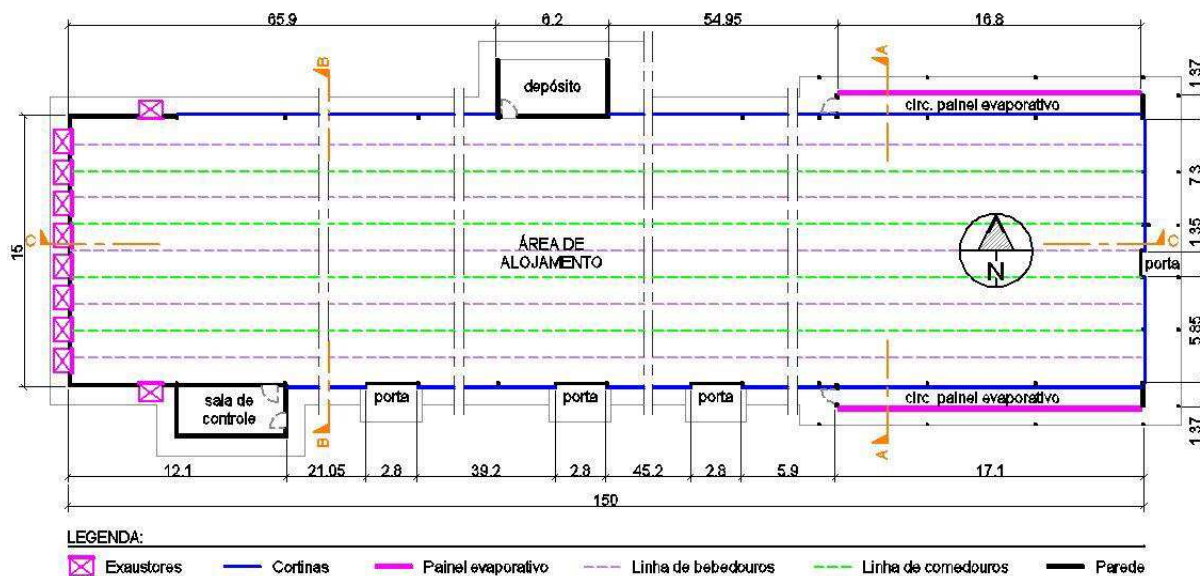


Figura 03. Representação esquemática do protótipo em planta baixa
Fonte: Acervo da autora

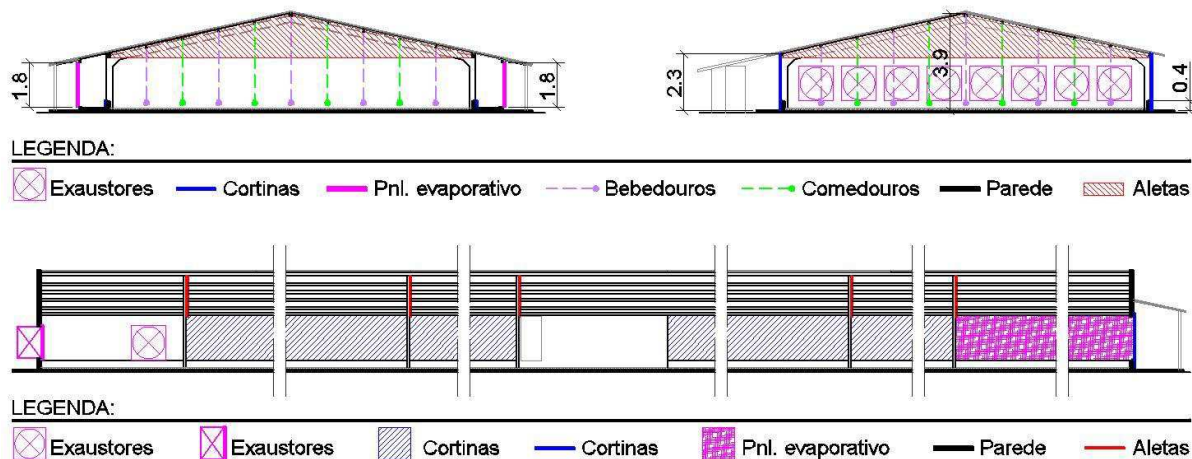


Figura 04. Representação esquemática do protótipo em cortes AA, BB e CC, respectivamente
Fonte: Acervo da autora

As características construtivas do protótipo encontram-se listadas na Tabela 10.

Tabela 10. Características construtivas do galpão experimental, localizado em Guarabira/PB

Características construtivas do galpão experimental (protótipo)		
Dimensões Gerais	15,00 x 150,00 m (largura x comprimento)	
	3,90 m (pé-direito máximo do piso cimentado até o forro)	
	2,30 m (pé-direito mínimo do piso cimentado até o forro)	
	Circulação lateral, ao longo dos painéis evaporativos, com 0,95 m de largura	
	Muretas com 0,40 m de altura	
	Beirais laterais com 0,60 m de largura, sendo 0,90 m de largura ao longo dos painéis evaporativos	
	Beiral com 2,15 m de largura no oitão Leste	
	Sem beiral no oitão Oeste	
	Cama de frango com 0,10 m de espessura	
Estrutura	Em pórticos metálicos com seção de 0,25 x 0,10 m, com 6,00 m e 14,75 m de distância entre eixos, ao longo do comprimento e da largura, respectivamente	
Tipologia construtiva	Fechamento vertical	Em tijolos cerâmicos rebocados e pintados na cor amarela Em cortinas de polipropileno, na cor amarela, que permitem manipulação de cima para baixo
	Fechamento horizontal	Estrutura em terças metálicas com seção de 0,05 x 0,10 m (largura x altura)
		Cobertura em telhas trapezoidais de aço galvanizado
		Forro, paralelo à cobertura, em placas de poliuretano com espessura de 0,02 m e superfícies na cor rosa
Acessos externos	Aletas, em polipropileno na cor amarela, fixadas nos pórticos estruturais	
	03 portas metálicas de correr com 2,80 x 1,80 m (largura e altura), na lateral Sul	
	01 porta metálica de correr com 1,35 x 1,80 m (largura e altura), no oitão Leste	
	04 portas de giro, em madeira, que dão acesso à sala de controle, à área de armazenamento de lenha e às circulações dos painéis evaporativos	

Detalhes dos elementos de cobertura (telhas, forro e aletas) são ilustrados na Figura 05.

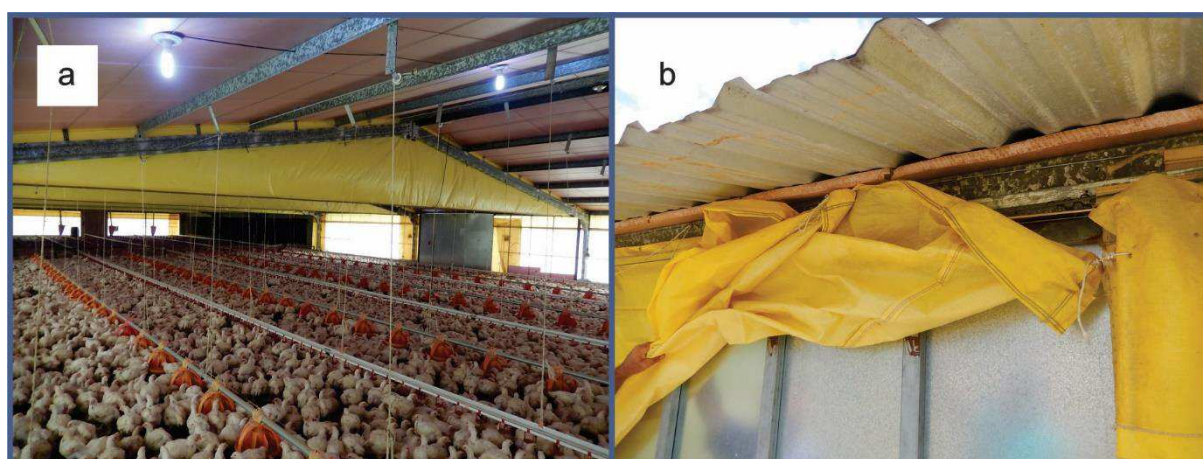


Figura 05. Detalhes da cobertura com aletas (a) e da cobertura em telha metálica com forro em placas de poliuretano (b)

Fonte: Acervo da autora

O aviário está equipado com sistema de climatização em pressão negativa composto por painéis evaporativos, nebulizadores internos e exaustores. O sistema de ventilação foi dimensionado para atingir velocidades do vento de até $3,5 \text{ m.s}^{-1}$.

A captação de ar se dá por dois painéis evaporativos construídos em placas de celulose de $1,80 \times 0,60 \times 0,10 \text{ m}$ (altura x comprimento x espessura), com caneluras de 60° e 30° , dotados de sistema de recirculação de água, do tipo CELdek 7090-15-1800-600-100 com MI-T-Edge, Munters, com comprimento total de $16,80 \text{ m}$ e altura de $1,80 \text{ m}$ cada um, localizados nas faces laterais (orientações Norte e Sul) próximos ao oitão frontal, à Leste. Uma vista exterior e uma do interior da circulação do painel evaporativo são ilustradas na Figura 06.

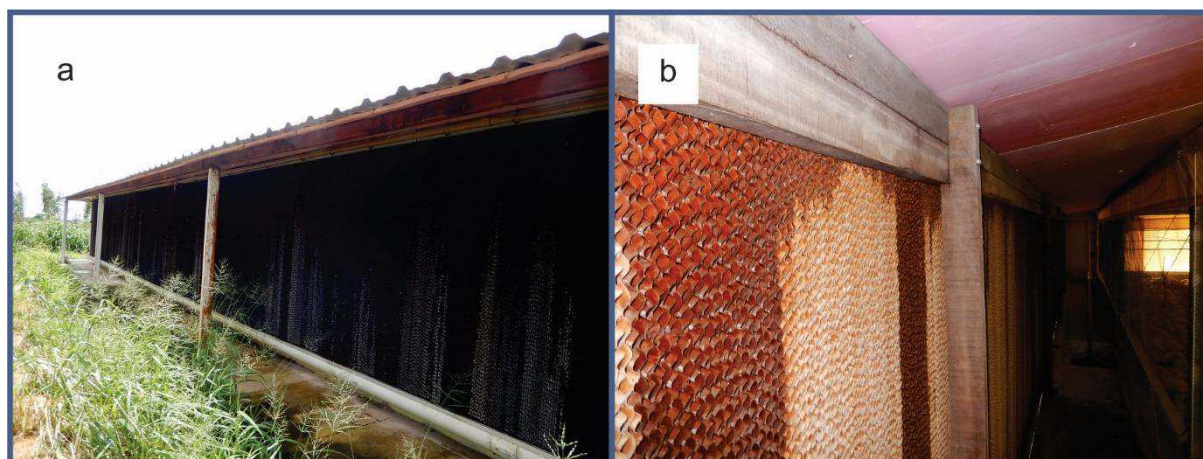


Figura 06. Vista exterior do painel evaporativo (a) e vista interior da circulação entre o painel e a área de alojamento das aves (b)
Fonte: Acervo da autora

A curva de queda de pressão (ΔP) em função da velocidade do vento (V_v), característica do painel evaporativo CELdek 7090-15 com $0,10 \text{ m}$ de espessura, na condição úmida, é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11. Dados da curva de queda de pressão (ΔP) em função da velocidade do vento (V_v)

Queda de pressão x Velocidade do vento			
$V_v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$\Delta P \text{ (Pa)}$	$V_v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$\Delta P \text{ (Pa)}$
1,00	9	3,00	80
1,50	20	3,50	110
2,00	35	4,00	140
2,50	55		

Fonte: MUNTERS, 2016
Adaptada pela autora

A exaustão do ar é proporcionada por meio de dez exaustores confeccionados em aço galvanizado, do tipo Multifan 130 com cone e três pás, Multifan, que medem 1,382 x 1,382 m (altura x largura), possuem potência de 1,5 HP (~1120 W) e capacidade de vazão de 47.470 m³.h⁻¹ a 0 Pa. Oito deles estão localizados na parede a Oeste (Figura 07a), um na Norte e outro na Sul (Figura 07b); estes dois próximos ao oitão posterior. No programa de acionamento, o primeiro exaustor entra em funcionamento sempre que a temperatura do ar no interior do galpão ultrapassa a temperatura máxima ideal para a fase produtiva; em seguida, um exaustor a mais é acionado sempre que ocorre um incremento de 0,5 °C na temperatura interna (Ex.: Para alojamento entre a 6^a e 7^a semana, o primeiro exaustor é ligado aos 22,5 °C de temperatura do ar e, ao atingir 27 °C, todos os dez exaustores estarão acionados).

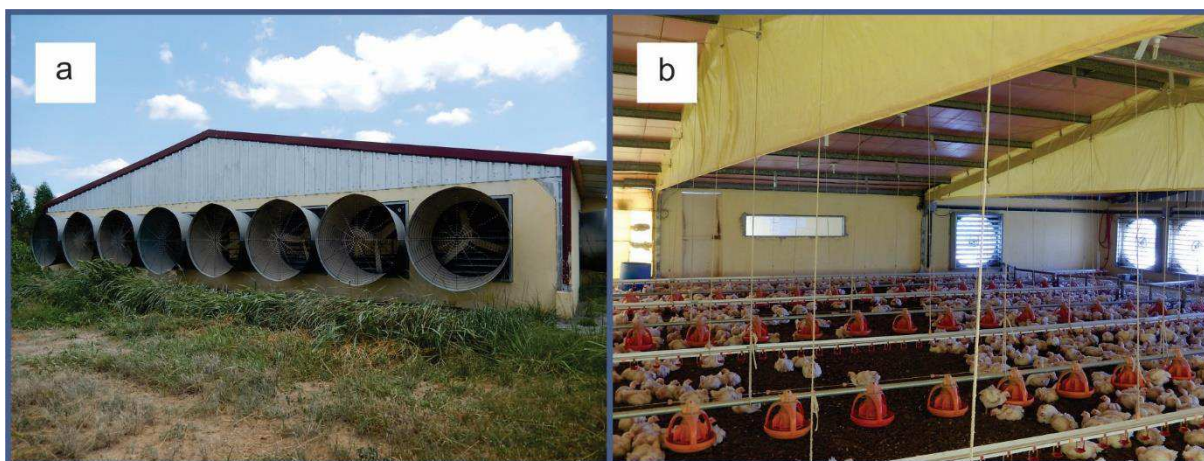


Figura 07. Exaustores localizados no oitão Oeste (a) e na parede voltada a Sul
Fonte: Acervo da autora

Dados do controle de lote efetuados pelo criador indicam alojamento de 30.000 frangos (densidade de 13,33 aves.m⁻²), separados em três grupos: 10.000 fêmeas, 10.000 misto e 10.000 machos. Aos 32 dias de alojamento, procedeu-se a apanha para retirada das 10.000 fêmeas e aos 42 dias finalizou-se o lote, momento em que foi registrado peso médio de 2,60 kg por animal (~ 23,0 kg.m⁻²) e taxa de mortalidade final de 0,02% (613 unidades).

3.2 Instrumentação para aquisição de dados experimentais

3.2.1 Sistema de monitoramento e armazenamento de dados

Os dados coletados em campo, com auxílio do sistema descrito a seguir, serviram não somente para diagnóstico da unidade experimental, mas também para validação do modelo de simulação CFD gerado a partir da semelhança geométrica com o galpão instrumentado.

O sistema foi desenvolvido para possibilitar a coleta e armazenamento dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento no interior do aviário, sendo composto por:

- 04 plataformas de prototipagem eletrônica, do tipo Mega 2560;
- 04 placas divisoras de tensão (confeccionadas pela autora), para possibilitar o armazenamento dos dados coletados nos cartões de memória;
- 04 módulos cartão, do tipo SD Card, dotados de 04 cartões de memória com capacidade de armazenamento de 8 MB;
- 24 sensores de vento baseados em fio-quente, modelo Wind Sensor Rev C, Modern Device, capaz de capturar velocidades a partir de 0 m.s^{-1} com uma resolução de $0,01 \text{ m.s}^{-1}$; e
- 16 sensores de umidade e temperatura, modelo DHT22/AM2302, capaz de medir umidade relativa do ar entre 0 e 100% e temperaturas do ar entre -40 e $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os equipamentos componentes do sistema e o esquema de comunicação entre eles são apresentados nas Figuras 08 e 09.

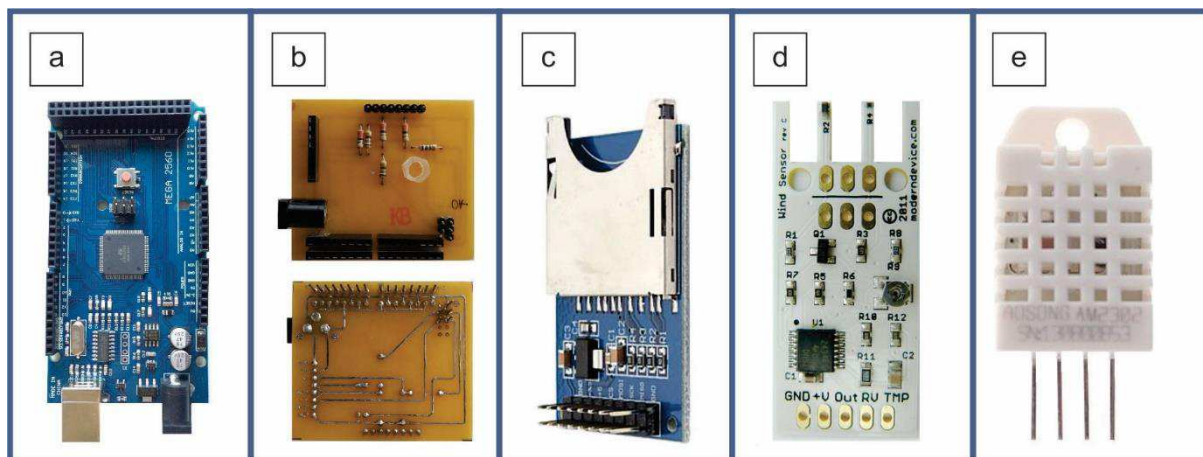


Figura 08. Equipamentos componentes do sistema: plataforma de prototipagem (a), divisor de tensão (b), módulo de cartão (c), sensor de vento REV C (d) e sensor de temperatura e umidade DHT22/AM2302 (e)
Fonte: Acervo da autora

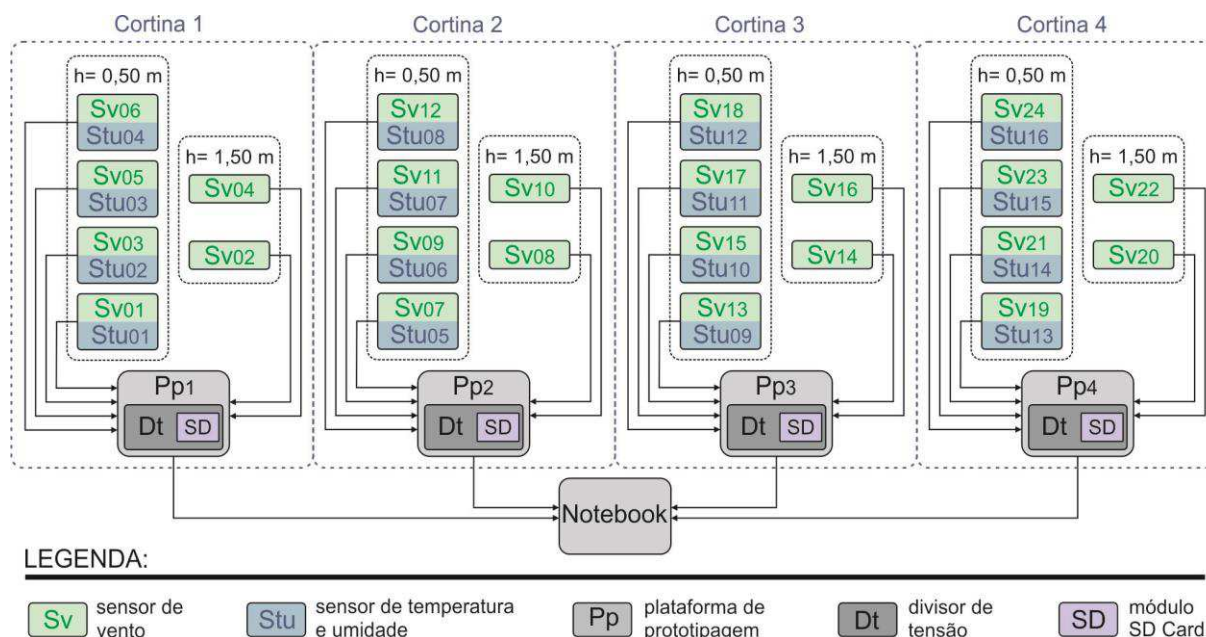
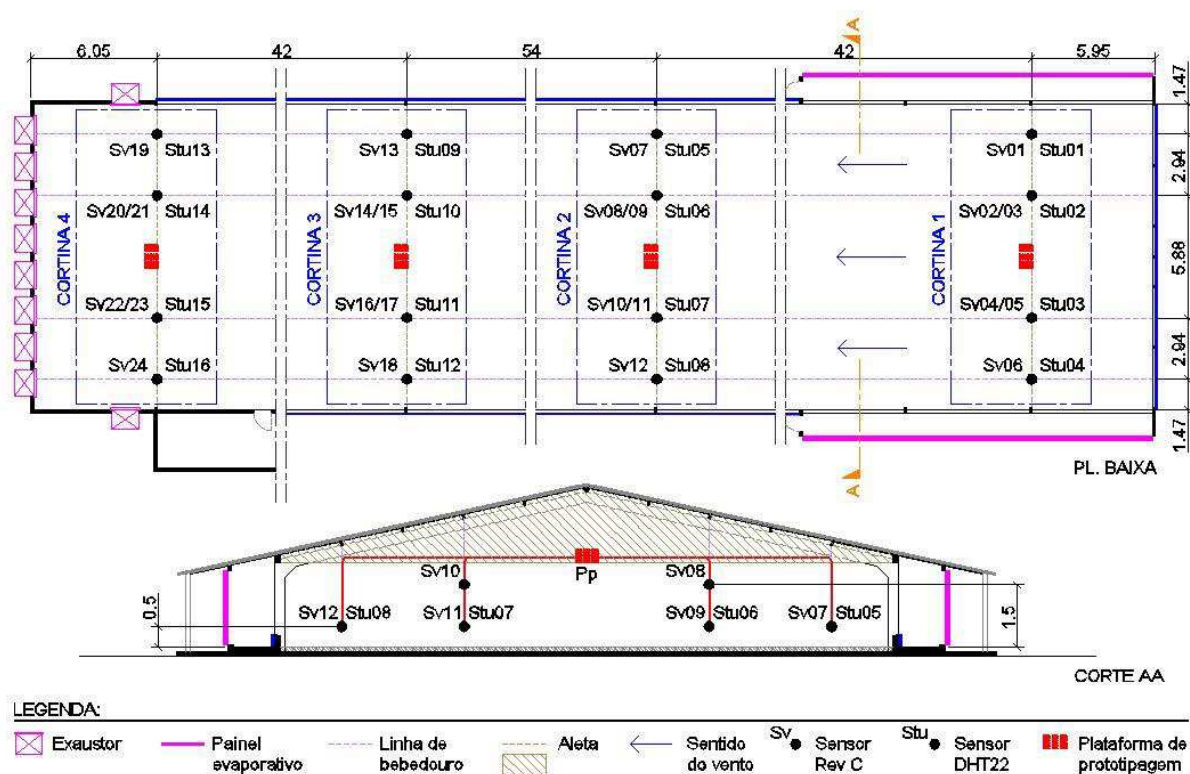


Figura 09. Esquema de comunicação entre os componentes do sistema de aquisição de dados
Fonte: Acervo da autora

Os quatro conjuntos formados pelas plataformas de desenvolvimento, placas divisoras de tensão e módulo de cartão (Pp + Dt + SD) foram acomodados individualmente em caixas, confeccionadas sob medida, em espuma sintética laminada, para proteção dos equipamentos eletrônicos contra umidade e poeira tão comuns em aviários. Fixou-se estas caixas na parte central inferior das aletas da cobertura, à altura de 2,00 m, de modo a facilitar o acesso ao cartão de memória e, assim, permitir a coleta, em dias alternados, dos dados armazenados.

Utilizou-se de cabos CCI de 06 pares para interligação entre sensores e plataformas de prototipagem. Os cabos foram presos na borda inferior das aletas e nos cordões de sustentação de bebedouros, o que possibilitou posicionar os sensores em duas secções paralelas ao piso, à altura de 0,50 m e 1,50 m relativa à cama; os sensores de vento tiveram suas placas de circuito devidamente protegidas por fita isolante, ficando aparentes apenas os termistores.

A localização esquemática do instrumental para medição das variáveis ambientais encontra-se definida na Figura 10.



3.2.1.1 Montagem e programação do sistema de aquisição de dados

Antes da instalação definitiva no aviário, procedeu-se à montagem, programação do sistema e calibração dos sensores de vento em bancada de trabalho, como se observa na Figura 11, o que permitiu a realização de testes preliminares a fim de implementar melhorias e presumir problemas na definição e adequação do algoritmo.

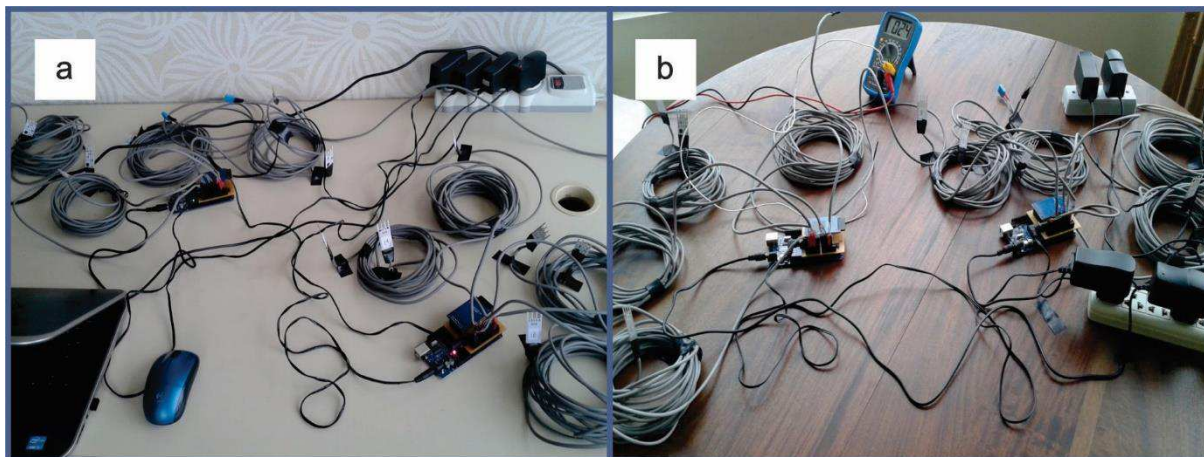


Figura 11. Montagem do sistema de aquisição de dados para testes prévios
Fonte: Acervo da autora

A montagem do sistema na unidade experimental aconteceu no 33º dia do ciclo produtivo das aves (um dia após a retirada das fêmeas), quando foram realizados novos testes de verificação de funcionamento e ajustes do sistema. Realizou-se seu desmonte no 41º dia, um dia antes da finalização do lote. Dos dados válidos, selecionaram-se aqueles referentes ao intervalo entre 12 e 14 h (considerado o período mais quente do dia no qual todos os exaustores permaneceram acionados) dos 34º, 36º e 38º dias de alojamento.

As plataformas de desenvolvimento foram programadas para registrar e armazenar, simultaneamente, leituras instantâneas efetuadas a cada 5 minutos pelos 40 sensores, durante os oito dias de medição. Trataram-se estes registros, com auxílio do software Microsoft Excel 2016, de maneira que os dados representativos do intervalo analisado foram gerados a partir da média das 24 leituras, para cada variável, registradas neste período.

3.2.1.2 Calibração dos sensores de vento

Todos os sensores de vento foram calibrados individualmente durante a testagem do sistema. Para tanto, utilizou-se de uma redoma para isolar cada sensor das correntes de ar; em seguida, realizaram-se ajustes na programação da plataforma de desenvolvimento para registro de velocidade próxima a zero, como ilustra a Figura 12.

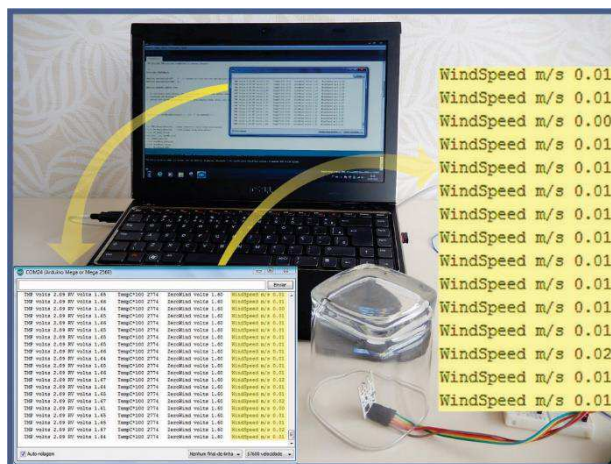


Figura 12. Calibração do sensor de vento
Fonte: Acervo da autora

3.2.2 Aquisição de dados complementares

Tendo em vista que os aviários ventilados à pressão negativa são projetados para manter as condições ambientais internas dentro da faixa de conforto térmico dos frangos, independente das variações externas, não houve monitoramento das condições meteorológicas no exterior do galpão.

Entretanto, para alimentação do modelo de simulação CFD, fez-se necessária a aquisição dos dados complementares listados abaixo:

- Temperatura do ar no exterior do galpão, em 01 ponto afastado 5,00 m da parede Leste;
- Temperatura e umidade relativa do ar nas circulações dos painéis evaporativos, em 10 pontos distantes 0,10 m das placas, aproximadamente, como ilustrado na Figura 13; e

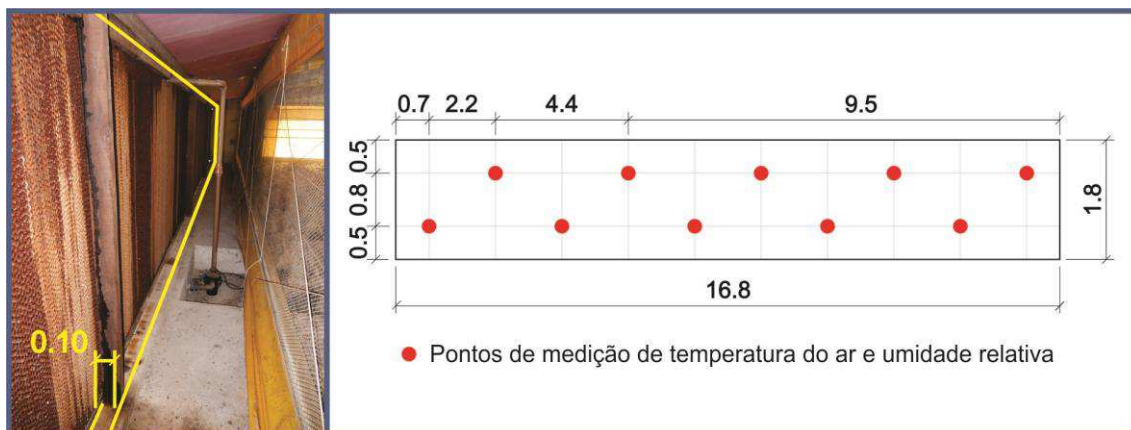


Figura 13. Pontos de medição de temperatura do ar e umidade relativa nas aberturas de captação
Fonte: Acervo da autora

- Velocidade do vento no exterior, em 04 pontos recuados cerca de 0,10 m do cone de cada exaustor, conforme mostrado na Figura 14.

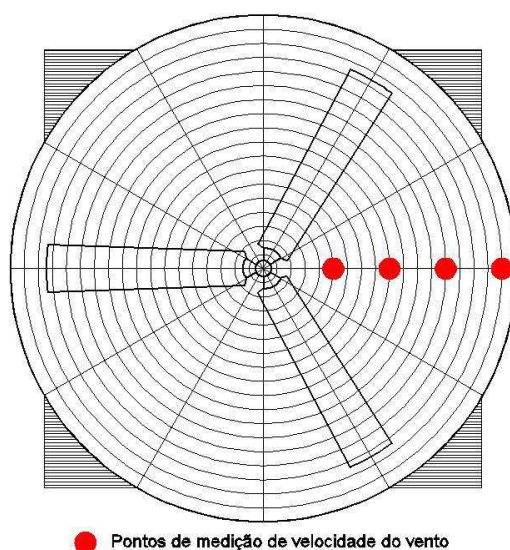


Figura 14. Localização dos pontos de medição da velocidade de saída do vento
Fonte: Acervo da autora

Para tal, utilizou-se do termo-higro-anemômetro, modelo THAL 300, Instruterm, capaz de medir temperatura do ar entre 0 e 50 °C (resolução de 0,1 °C, precisão de 1,2 °C), umidade relativa do ar de 10% a 95% (resolução de 0,1%, precisão de 4%) e velocidade do vento entre 0,4 a 30,0 m.s⁻¹ (resolução de 0,1 m.s⁻¹, precisão de 3% da escala completa).

Os dados complementares foram obtidos por meio de uma única coleta diária, iniciada às 13h, dos 34º, 36º e 38º dias de alojamento das aves; consideraram-se os registros feitos após a estabilização do valor (tempo médio de 10 segundos) de cada variável disponibilizado no display do equipamento. Na sequência diária de aquisição dos dados, registraram-se, por último, aqueles referentes às aberturas de captação de ar, a fim de obter uma melhor representatividade da condição de saturação dos painéis evaporativos. A coleta dos dados da velocidade do ar na face externa dos exaustores aconteceu apenas uma vez para cada exaustor, perfazendo o total de dez exaustores nos três dias de medição.

Desta forma, considerou-se a temperatura do ar externa, a temperatura e umidade relativa do ar que adentra o galpão e a velocidade do vento que sai do aviário como a média de três, 24 e 40 dados registrados, respectivamente.

3.3 Diagnóstico do galpão experimental

Com o intuito de facilitar a compreensão dos resultados apresentados nas subseções 4.1 e 4.2, deste ponto em diante, os sensores de vento e de temperatura e umidade, foram referenciados conforme disposto na Figura 15.

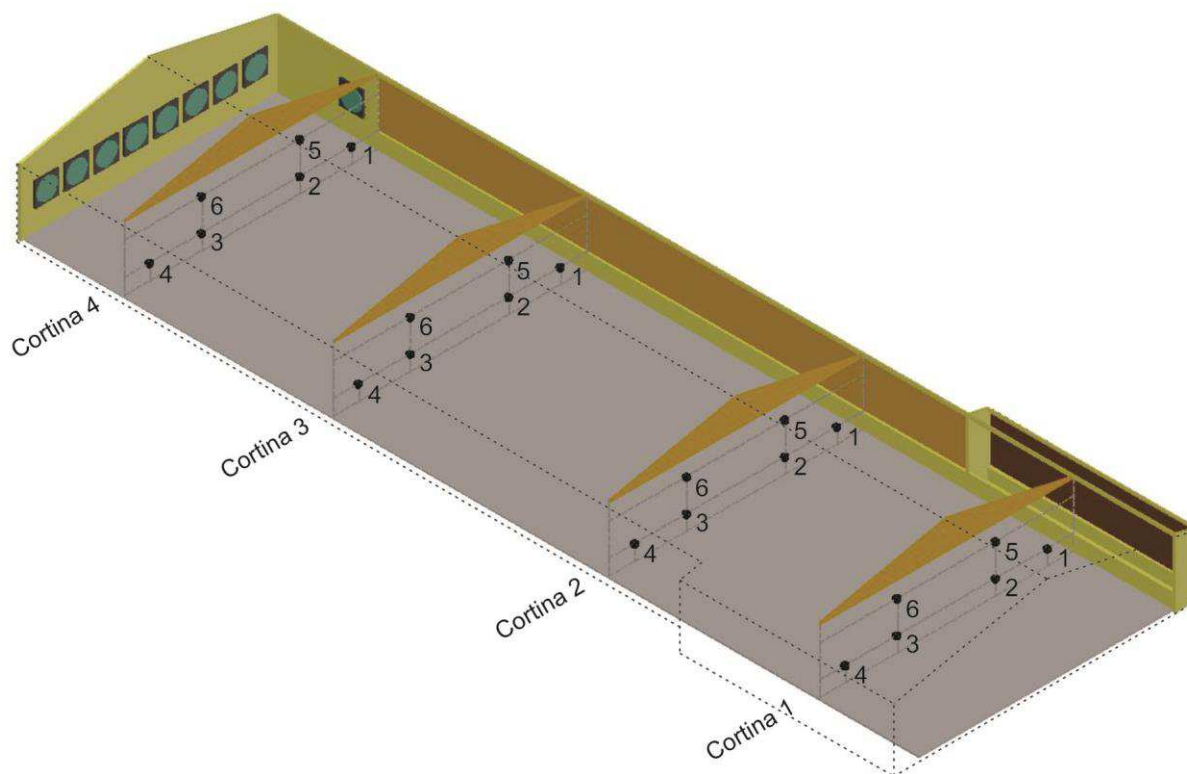


Figura 15. Denominação para sensores de vento, de temperatura e umidade
Fonte: Acervo da autora

O diagnóstico do galpão instrumentado foi realizado em duas etapas. Em um primeiro momento, os dados medidos de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento foram analisados isoladamente, segundo os limites recomendados para conforto térmico; em seguida, utilizados para cálculo do ITUV (Eq. 01).

Consideraram-se a zona de conforto para frangos de corte na idade adulta e as faixas recomendadas para umidade relativa e velocidade do vento conforme descritas na Tabela 12.

Tabela 12. Zona de conforto e faixas recomendadas de umidade relativa e velocidade do vento para frangos de corte na idade adulta

Variável	Zona de conforto
Temperatura do ar	18 a 28 °C (Tinôco, 2001; Baêta e Souza, 2010)
	Faixa recomendada
Umidade relativa	50 a 70% (Tinôco, 2001; Baêta e Souza, 2010)
Velocidade do vento	1,75 a 3,00 m.s ⁻¹ (Cobb, 2012)

As temperaturas de bulbo úmido foram estimadas com auxílio da calculadora para conversão de misturas, *The Weather Calculators*, a partir dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica (NATIONAL WEATHER SERVICE, 2016).

3.4 Validação do modelo CFD baseado no protótipo

Validou-se o modelo CFD gerado por similitude com o galpão experimental, por vezes chamado de modelo referência, tanto para a variável temperatura do ar quanto para a umidade relativa e a velocidade do vento.

Para validação, buscou-se a aproximação entre os dados coletados em campo e aqueles oriundos da simulação CFD realizada para o modelo referência.

Como método de validação, adotou-se o procedimento proposto por Anderson et al. (1992), adotado por Carvalho-Curi (2014) e Xue et al. (2016), em que a média dos quadrados dos erros normalizados (NMSE) é calculada, conforme Equação 15.

$$NMSE = \frac{\left(\frac{\sum_i (VAR_{pi} - VAR_{mi})^2}{n} \right)}{(VAR_{pi} \times VAR_{mi})} \quad \text{Eq. 15}$$

Na qual:

- VAR_{pi} É o valor da variável ambiental predita, m.s⁻¹
- VAR_{mi} É o valor da variável ambiental medida, m.s⁻¹
- $\overline{VAR_{pi}}$ É a média dos valores da variável ambiental predita, m.s⁻¹
- $\overline{VAR_{mi}}$ É a média dos valores da variável ambiental medida, m.s⁻¹
- n É o número de medidas, adimensional

Anderson (1992) afirma que valores de NMSE inferiores a 0,25 são considerados aceitáveis para validação de um modelo computacional de simulação.

Uma vez validado o modelo referência, adotaram-se todos os procedimentos e configurações atribuídos a ele para as demais simulações em CFD.

3.5 Descrição dos tratamentos

A fase de utilização da CFD como ferramenta de apoio às decisões projetuais foi dividida em duas etapas. Na primeira, foram comparados os resultados simulados de três diferentes composições de coberta a fim de identificar aquela mais eficiente quanto ao conforto térmico das aves alojadas. Na segunda, combinou-se a tipologia de coberta mais eficiente com duas diferentes composições de painéis evaporativos.

Em ambas as etapas, analisaram-se a distribuição interna da temperatura do ar, da umidade relativa e da velocidade do vento e caracterizou-se cada ambiente térmico segundo o ITUV (calculado conforme descrito na subseção 3.3), a partir de dados simulados extraídos de cada modelo CFD em 25 pontos, localizados a 0,30 m de altura relativa à cama de frango, de acordo com a Figura 16.

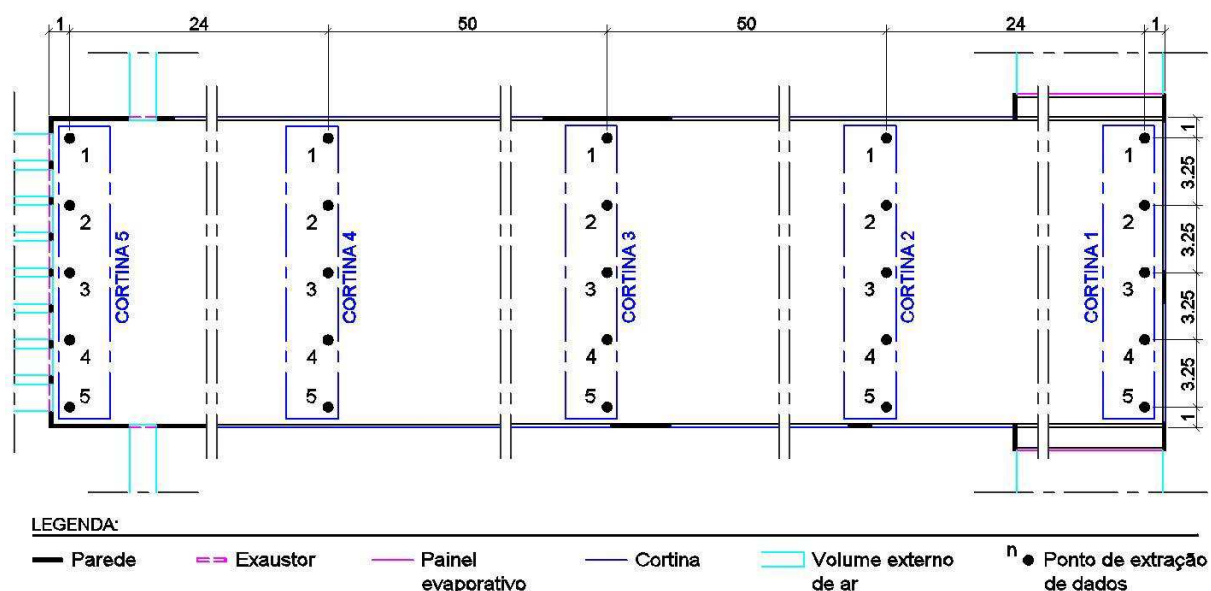


Figura 16. Marcação de pontos para extração dos dados simulados
Fonte: Acervo da autora

Foram testadas as seguintes tipologias de coberta: 1) modelo referência, equivalente ao protótipo, com cobertura em telhas metálicas dotadas de forro em

poliuretano, paralelo e adjacente às mesmas, e aletas em polipropileno – TiFiA; 2) semelhante à TiFiA, mas com a supressão das aletas - TiFisA; e 3) similar à TiFisA, mas com forro paralelo ao piso - TiFh.

Na Figura 17 estão representadas esquematicamente as três diferentes tipologias de cobertura. É importante frisar que, no modelo geométrico gerado para o tratamento TiFh, desprezou-se o volume de ar no ático. Tal procedimento foi fundamentado no adotado por Carvalho-Curi (2014) e, também, no fato do forro em questão ser confeccionado em material isolante, o que diminui substancialmente a influência da temperatura do ar no ático sobre a temperatura do ar no setor de alojamento das aves.



Figura 17. Composições de cobertura TiFiA, TiFisA e TiFh, respectivamente
Fonte: Acervo da autora

Convém ressaltar que, em TiFh, procedeu-se ao ajuste no dimensionamento de exaustores e painéis evaporativos em função da diminuição do volume de ar a ser climatizado quando comparado às propostas TiFiA e TiFisA; o método de cálculo adotado está descrito no subitem 3.4.1.

Os demais arranjos testados foram definidos a partir dos resultados das simulações de cobertura, levando-se em conta o julgamento de qual parte do sistema de ventilação (painéis ou exaustores) foi mais influente sobre o padrão de distribuição das variáveis ambientais no interior dos modelos testados. As composições foram: 1) 20% da área total das placas evaporativas localizadas à Leste, 40% à Norte e 40% à Sul - ***20L; e 2) 40% da área total das placas localizadas à Leste, 30% à Norte e 30% à Sul - ***40L; em que *** se refere à nomenclatura adotada para o tratamento de cobertura mais eficiente.

3.5.1 Dimensionamento do sistema de ventilação

Para a modelagem geométrica referente ao tratamento TiFh, fez-se necessário o dimensionamento de exaustores e painéis evaporativos; para tanto, considerou-se o método proposto por Tinôco (2009), no qual a área de abertura a

ser coberta pelas placas evaporativas e a quantidade adequada de exaustores são calculadas segundo as Equações 16 e 17, respectivamente.

$$A_{PE} = L * H_{med} \quad \text{Eq. 16}$$

Na qual:

A_{PE} - Área do painel evaporativo, em m^2 ;

L - Largura do galpão, em m; e

H_{med} - Altura média útil do galpão, em m.

$$N_{ex} = \frac{L * H_{med} * V_v}{C_{ex}} \quad \text{Eq. 17}$$

Na qual:

N_{ex} - Quantidade de exaustores, adimensional;

L - Largura do galpão, em m;

H_{med} - Altura média útil do galpão, em m;

V_v - Velocidade do vento desejada, em $m.s^{-1}$; e

C_{ex} - Capacidade de vazão do exaustor, em $m^3.s^{-1}$.

Consideraram-se a velocidade do ar desejada máxima igual a $3,5 m.s^{-1}$, a capacidade de vazão dos exaustores igual a $47.470 m^3.s^{-1}$ e a renovação completa do volume de ar em menos de 1 minuto (dados similares aos especificados no protótipo).

3.6 Modelagem e configurações para simulações CFD

As simulações CFD geradas com o software Autodesk CFD 2016 (versão 16.2, com licença estudantil) foram utilizadas, em um primeiro momento, para validação de um modelo computacional de referência; em seguida, empregadas como mecanismo de apoio à decisão projetual na testagem de diferentes arranjos construtivos.

O modelo referência foi criado e ajustado como discriminado adiante. Após sua validação, adotaram-se os mesmos procedimentos e configurações para os demais modelos gerados para análise em dinâmica dos fluidos computacional.

Seguiu-se o fluxo de trabalho descrito abaixo, conforme sugerido pelo fabricante do software; esta sequência contemplou todas as etapas inerentes à metodologia CFD.

- Pré-processamento- definição do problema (ver seção 1), criação da geometria, aplicação de materiais, definição das condições de contorno, geração da malha;
- Processamento (solver)- configurações para cálculo da solução; e
- Pós-processamento- análise e comparação dos resultados.

3.6.1 Criação da geometria

As geometrias de todos os arranjos simulados em CFD foram geradas na escala 1:1 utilizando-se do software Autodesk AutoCAD 2014 (versão I.18.0.0 licenciada para estudantes) e exportadas como arquivo ACIS (*.sat).

Uma vez que a simplificação da geometria é requisito básico para simulações CFD, excetuaram-se de todos os modelos as regiões fluidas não envolvidas diretamente no domínio do problema e, também, os elementos estruturais (pilares e vigas metálicas) que, segundo Saraz (2010), não interferem nos resultados das simulações.

Os painéis evaporativos, as cortinas de fechamento lateral e as aletas da cobertura foram modelados como regiões bidimensionais, com desprezo da espessura, reconhecidas pelo programa CFD como “*surface parts*”. Este artifício possibilitou menor refinamento da malha ocasionando redução da quantidade de nós e elementos totais e, por conseguinte, diminuição de tempo e recursos computacionais exigidos.

Para representar o ar que adentra a edificação, gerou-se uma volumetria na face externa de cada abertura de captação com largura e altura correspondentes às respectivas dimensões do painel evaporativo e comprimento igual a cinco vezes seu raio hidráulico, conforme recomendação da Autodesk (AUTODESK CFD 2016, 2016).

De maneira similar, os exaustores foram compostos de duas partes: a primeira, representativa do receptáculo que abriga as pás e responde pela troca de calor com o meio e a segunda, que reproduz o ar que é levado para fora do ambiente. Dessa forma, o volume de ar que sai foi modelado com diâmetro igual ao especificado pelo fabricante do equipamento e comprimento de cinco vezes seu raio hidráulico.

As vistas das fachadas Leste, Oeste, Norte e Sul do modelo referência TiFiA, além dos detalhes de sua modelagem interna, estão ilustradas, nas Figuras de 18 a 22, respectivamente.

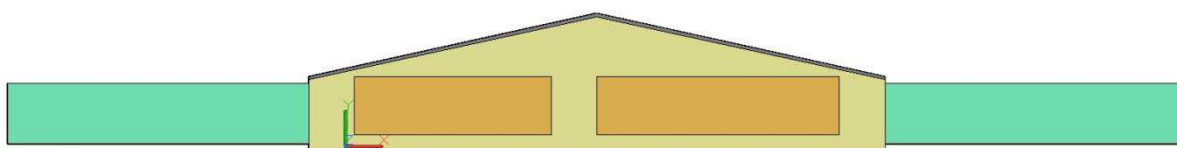


Figura 18. Elevação Leste do modelo gerado para validação
Fonte: Elaborada com o Autodesk AutoCAD 2014

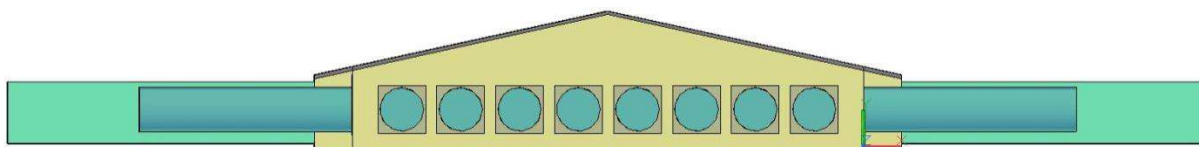


Figura 19. Elevação Oeste do modelo gerado para validação
Fonte: Elaborada com o Autodesk AutoCAD 2014

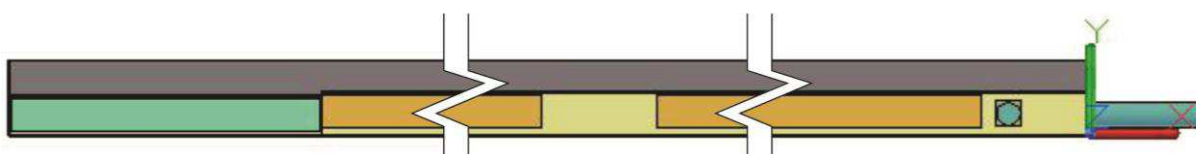


Figura 20. Elevação Norte do modelo gerado para validação
Fonte: Elaborada com o Autodesk AutoCAD 2014

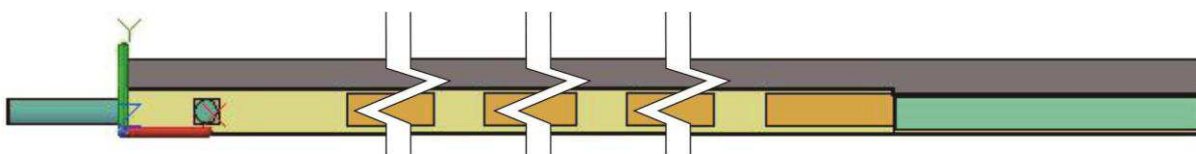


Figura 21. Elevação Sul do modelo gerado para validação
Fonte: Elaborada com o Autodesk AutoCAD 2014

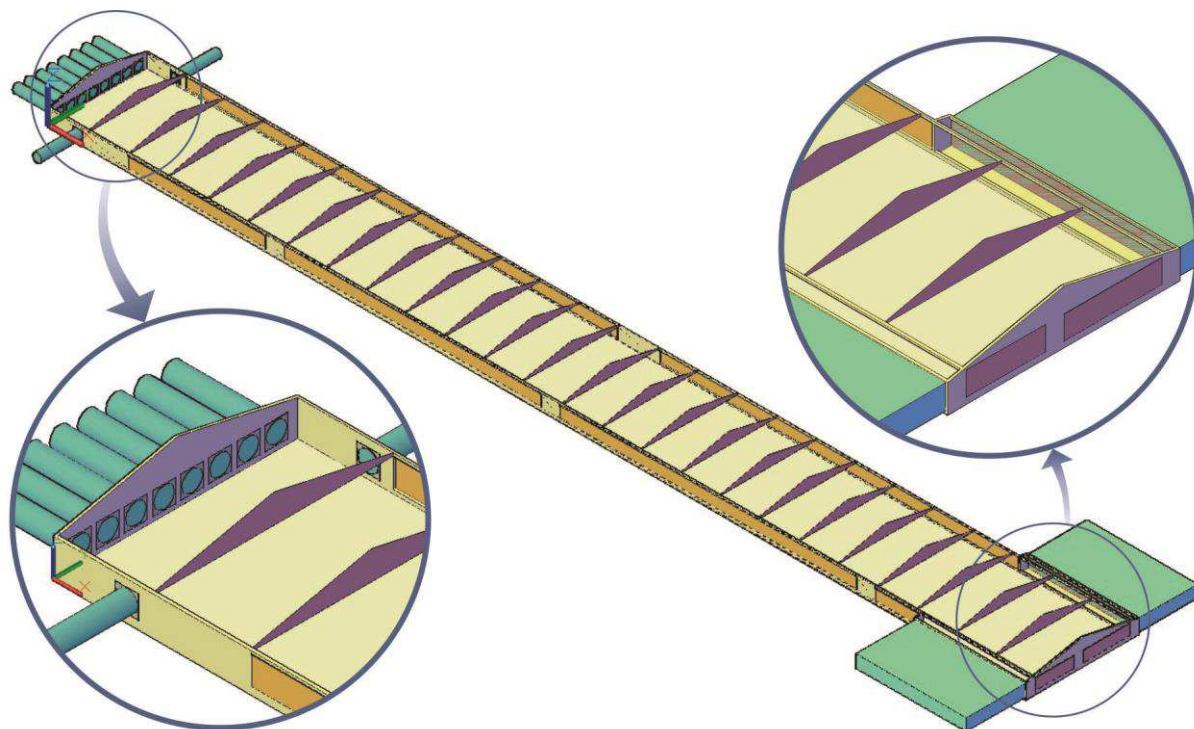


Figura 22. Detalhes internos, em perspectiva, do modelo gerado para validação
 Fonte: Elaborada com o Autodesk AutoCAD 2014

3.6.2 Aplicação dos materiais

Inicialmente, a pressão atmosférica do local de estudo, estimada em função de sua altitude, conforme a Equação 18 proposta por Jensen et al. (1990) e a temperatura média do ar externo durante o experimento, coletada conforme descrito no item 3.2.2, foram atribuídas ao ambiente dos cenários.

$$P_{atm} = 101,3 * \left(\frac{288 - 0,0065 * H}{288} \right)^{5,257} \quad \text{Eq. 18}$$

Na qual:

P_{atm} - Pressão atmosférica no local de estudo, em kPa

H - Altitude do local de estudo, em m

Em seguida, todos os materiais foram definidos com base em suas propriedades (físicas, térmicas ou coeficientes de perda, conforme solicitado pelo software) e aplicados à parte da geometria correspondente. Na Tabela 13 são

elencados todos os tipos e materiais empregados, a parte da geometria a qual foi atribuída e suas características específicas.

Tabela 13. Tipos e propriedades dos materiais especificados e seus locais de aplicação

Tipo	Material	Parte	Propriedades	
Fluido	Ar úmido	Volumes de ar	Densidade	<i>Moist Gas</i> ⁶
			Viscosidade	1,817 e ⁻⁰⁵ Pa.s
			Condutividade	0,02563 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
			Calor específico	1004 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
			Compressibilidade	1,40
			Emissividade	1,00
Sólido	Telha galvanizada com forro em poliuretano	Cobertura	Condutividade	0,0186 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
			Densidade	40 kg.m ⁻³
			Calor específico	460 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
			Emissividade	0,25
	Alvenaria de tijolos furados, rebocada e pintada na cor amarela	Paredes	Condutividade	0,90 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
			Densidade	1750 kg.m ⁻³
			Calor específico	920 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
			Emissividade	0,30
	Tecido sintético em polipropileno na cor amarela	Cortinas e aletas	Condutividade	0,22 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
			Densidade	1000 kg.m ⁻³
			Calor específico	2000 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
			Emissividade	0,30
Cobertura de frangos	Piso	Condutividade	0,50 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	
		Densidade	1070 kg.m ⁻³	
		Calor específico	3014,50 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	
		Emissividade	0,95	
Resistência	Painel evaporativo em celulose com e= 0,10 m e caneluras em 60° e 30°	Painéis evaporativos	Coefficiente de perda na direção do fluxo (<i>Through-Flow K</i>) ⁷	Curva de queda de pressão em função da velocidade (ver Tabela 10)
			Coefficiente de perda nas direções normais ao fluxo (<i>Normal Direction 1K e 2K</i>)	75,105
			Condutividade	0,1 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
			Coefficiente de perda na direção do fluxo (<i>Through-Flow K</i>)	Curva de queda de pressão em função da velocidade (ver Tabela 10)

Obs.: Considerou-se rugosidade igual à zero para todos os materiais do tipo sólido

⁶ As propriedades do fluido úmido são calculadas assumindo uma mistura homogênea. Com a opção *Moist Gas*, o software determina a densidade de umidade a partir de tabelas termodinâmicas utilizando a entalpia calculada (AUTODESK CFD 2016, 2016).

⁷ Considera-se que a perda nas direções normais ao escoamento é significativamente maior do que na direção de passagem do fluido, de maneira que os valores atribuídos a *Normal Direction K* devem ser cinco ordens de grandeza superiores ao valor de *Through-Flow K* (AUTODESK CFD 2016, 2016).

O coeficiente de perda “*Through-Flow K*” para meios porosos foi calculado com base na Equação 19, que descreve as perdas em termos de queda de pressão, conforme recomendação da Autodesk (AUTODESK CFD 2016, 2016).

$$\Delta p = \zeta_i \rho \frac{V_i^2}{2} \quad \text{Eq. 19}$$

Na qual:

- Δp - Valores conhecidos de pressão, em Pa;
- ζ_i - Coeficiente de perda na direção global i, adimensional;
- ρ - Densidade do fluido, em kg.m⁻³;
- V_i - Velocidade do fluido na direção global i, em m.s⁻¹.

Segundo Norton et al. (2007), em edifícios pecuários, o pressuposto de meios porosos tem sido usado para modelar o efeito de arrasto produzido pela velocidade do ar superficial através de divisórias internas, pisos ripados, tetos porosos e outros, com parâmetros do tipo coeficientes de permeabilidade e resistência que provocam uma queda de pressão.

3.6.3 Definição das condições de contorno

O uso adequado da técnica de CFD envolve a definição de condições de contorno capazes de reproduzir no modelo de simulação, os fenômenos envolvidos no problema e presentes no modelo físico (Norton et al., 2007; Saraz et al., 2012; Carvalho-Curi, 2014).

As condições de contorno atribuídas aos modelos encontram-se discriminadas na Tabela 14.

Tabela 14. Dados, por tratamento, das condições de contorno atribuídas às partes

Partes	Condições de contorno	Dados por tratamento		
		TiFiA	TFisA	TiFh
Entradas	Pressão estática	0 Pa	0 Pa	0 Pa
	Temperatura do ar	27,2 °C	27,2 °C	27,2 °C
	Umidade relativa do ar	0,81	0,81	0,81
Saídas	Taxa de fluxo de massa	11,33 kg.s ⁻¹	11,33 kg.s ⁻¹	11,33 kg.s ⁻¹
Envoltória	Coefficiente de filme	20 W.m ⁻² .K ⁻¹	20 W.m ⁻² .K ⁻¹	20 W.m ⁻² .K ⁻¹
	Temperatura de referência	34,5 °C	34,5 °C	34,5 °C
Exaustores	Geração de calor total	11200 W	11200 W	8960 W
Frangos	Fluxo de calor total	137000 W	137000 W	137000 W

Segundo o Autodesk CFD 2016 (2016), a condição de limite de pressão, com uma pressão estática de calibração de valor igual à zero, é a condição de saída recomendada e mais conveniente.

No problema em questão, uma vez que o sistema de ventilação funcionava em pressão negativa, o software identificou entradas (*inlets*) como saídas (*outlets*) e vice-versa; por isso, utilizou-se pressão estática igual a zero como condição de entrada.

Os valores atribuídos à temperatura e umidade relativa do ar nas entradas foram resultantes dos dados coletados nas circulações dos painéis evaporativos, como descrito no subitem 3.2.2.

A taxa de fluxo de massa foi calculada por meio da Equação 20, tomando-se por base o valor médio resultante das velocidades do vento coletadas no exterior do galpão, na face externa dos cones dos exaustores.

$$\dot{m} = \rho * V * A_{st} \tag{Eq. 20}$$

Na qual:

- \dot{m} - Taxa de fluxo de massa, em kg.s⁻¹;
- ρ - Densidade do fluido, em kg.m⁻³;
- V - Velocidade do vento na saída do exaustor, m.s⁻¹; e
- A_{st} - Área da seção transversal do tubo, em m².

Condições de contorno do tipo coeficiente de filme se prestam a simular a transferência de calor para o ambiente por meio de sua envoltória, sem que seja necessário modelar o ambiente circundante (AUTODESK CFD 2016, 2016).

Seguindo instruções do software, utilizou-se o valor de $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ para simular o ar externo em movimento e o valor da temperatura do ar coletada no exterior do galpão, conforme descrito no subitem 3.2.2, como temperatura de referência.

A geração de calor total (baseada em volume) e o fluxo de calor total (baseado em superfície) foram empregados para simular o calor dissipado pelos exaustores e pelo metabolismo dos frangos alojados, respectivamente. O calor total produzido pelos exaustores foi calculado multiplicando-se a quantidade de equipamentos por sua potência em watts (especificada no subitem 3.1), enquanto o calor metabólico total produzido pelas aves foi estimado multiplicando-se o número final de aves vivas (mencionado no subitem 3.1) pela taxa metabólica basal por animal.

A taxa metabólica basal foi obtida empregando-se a Equação 21, conforme preconizado por Curtis (1983).

$$Q = a * W^b \quad \text{Eq. 21}$$

Na qual:

- Q - Taxa metabólica basal, em kcal.h^{-1} ;
- a - Constante igual a 2,9 (para Q em kcal.h^{-1});
- W - Peso do animal, em kg; e
- b - Constante igual a 0,75 (para Q em kcal.h^{-1}).

3.6.4 Geração da malha

De maneira geral, quanto mais refinada a malha, mais precisos poderão ser os resultados; entretanto, maior será a quantidade de nós e, conseqüentemente, maior tempo e recurso computacional serão demandados para que a simulação atinja a convergência.

A fim de definir uma malha adequada que atendesse igualmente aos requisitos de precisão e redução no tempo de simulação, alguns ajustes de

configurações foram implementados antes de sua geração automática. As etapas percorridas e valores atribuídos estão listados abaixo; com eles foram cumpridos as duas exigências estabelecidas pelo software, relação de aspecto nodal menor que 100 ($NAR < 100$) e valores para Y^+ entre 35 e 350 ($35 \leq Y^+ \leq 350$) para modelos de turbulência *Standard k- ϵ* :

- 1) Diagnóstico de arestas e superfícies com dimensões muito pequenas em relação a seus pares no restante do modelo, utilizando-se a função “*Edge Mode Diagnostics*” e “*Surface Mode Diagnostics*”, respectivamente;
- 2) Definição do tamanho limite da aresta que influenciará as características da malha em sua vizinhança com o comando “*Minimum Refinement Length*”, cujo valor, correspondente à espessura do conjunto telha/forro, foi fixado em 0,10 m. Segundo Autodesk CFD 2016 (2016) esta é uma das ferramentas mais eficazes para melhoramento da malha e enquadramento da razão de aspecto dentro da faixa recomendada;
- 3) Fixação do número de camadas de elementos ao longo das interfaces fluido-parede e fluido-sólido, da sua taxa de crescimento e suavização da transição entre estas camadas e a malha adjacente. Para tal, foram habilitadas as opções “*Mesh enhancement*” e “*Enhancement blending*” e estabelecido o número de oito camadas com taxa de crescimento de 1,50. A Autodesk (AUTODESK CFD 2016, 2016) afirma que este controle é útil para enquadramento nos critérios para Y^+ , incremento na precisão do fluxo de calor nas paredes e, também, do fluxo turbulento em alguns modelos de fechamento; e
- 4) Estabelecimento dos parâmetros para refinamento automático do tamanho da malha nos elementos bidimensionais “*Surface parts*”, nos quais a espessura foi suprimida; os valores postos estão elencados na Tabela 15. De acordo com Autodesk CFD 2016 (2016), a geração automática da malha, geralmente, cria uma malha grosseira em elementos sem espessura, caso o refinamento automático não seja acionado.

Tabela 15. Parâmetros para refinamento automático da malha em elementos bidimensionais e seus respectivos valores

Parâmetro	Valor
Fator de resolução- " <i>Resolution factor</i> "	1,00
Taxa de crescimento na borda- " <i>Edge growth rate</i> "	1,10
Número mínimo de pontos na borda- " <i>Minimum points on edge</i> "	2
Número mínimo de pontos nas bordas mais longas- " <i>Points on longest edge</i> "	10
Limite da razão de aspecto na superfície- " <i>Surface limiting aspect ratio</i> "	10
Taxa de crescimento superficial- " <i>Surface growth rate</i> "	1,20
Taxa de crescimento das camadas próximas às superfícies- " <i>Enhancement growth rate</i> "	1,10

Somente depois de cumprida cada etapa listada acima, prosseguiu-se com a geração automática da malha utilizando-se do comando "*Mesh sizing automatic*".

3.6.5 Configurações para cálculo da solução

De início, o mecanismo de cálculo da solução, chamado "*Solver*", foi configurado para simulação em estado estacionário- "*Steady state*" e previsão de no máximo 1500 iterações até a convergência.

Na sequência, habilitaram-se as opções de controle inteligente de solução- "*Intelligent solution control*" e avaliação automática de convergência- "*Automatic convergence assessment*".

Com estas opções selecionadas, o software para automaticamente os cálculos, assim que os critérios de convergência estabelecidos⁸, listados na Tabela 16, estejam atendidos.

Tabela 16. Parâmetros para avaliação automática de convergência e seus respectivos valores

Parâmetro	Valor
Inclinação da curva de convergência instantânea- " <i>Instantaneous convergence curve slope</i> "	10^{-4}
Tempo médio da inclinação da curva de convergência- " <i>Time-Average convergence curve slope</i> "	10^{-2}
Tempo médio da concavidade da curva de convergência- " <i>Time-Average convergence curve concavity</i> "	10^{-2}
Flutuação de campo- " <i>Field fluctuation</i> "	10^{-5}

Utilizou-se o esquema de advecção⁹ padrão- ADV 01 vez que a Autodesk (AUTODESK CFD 2016, 2016) recomenda sua seleção sempre que houver

⁸ Os critérios de convergência aqui estabelecidos são considerados os mais rigorosos na escala pré-definida no Autodesk CFD 2016 (2016).

geometrias com numerosas obstruções internas e/ou resistências distribuídas atribuídas a “*Surface parts*”; nesta pesquisa, estes elementos estão identificados nas aletas da cobertura e nos painéis evaporativos, respectivamente.

Uma vez determinado o escoamento como incompressível ($NM < 10^{-2}$, conforme a Equação 01) e turbulento ($Re > 1,5 \times 10^6$, conforme a Equação 02), escolheu-se o modelo de turbulência “*Standard k-ε*”.

Blannes-Vidal et al. (2008) afirmam que, em sistemas com ventilação natural e/ou mecânica, é recomendado o uso do modelo “*Standard k-ε*” para descrição da parte turbulenta do fluido devido à facilidade de convergência e boa precisão.

Saraz et al. (2012) fizeram uma revisão acerca do uso do CFD para estudos em instalações avícolas e concluíram que os modelos de turbulência *Standard k-ε* e *RNG k-ε* são os mais utilizados.

Por fim, para viabilizar o cálculo da temperatura e da umidade relativa, se fez necessário habilitar os modelos de radiação e umidade.

O Autodesk CFD 2016 (2016) declara que o modelo de radiação é capaz de calcular o balanço de energia com precisão, pois impõe a reciprocidade entre cada parte de uma volumetria, ainda que estas apresentem grandes diferenças de tamanho; quanto ao modelo de umidade, ressalta que o software pode simular a condensação do líquido de um gás úmido, mas não suporta a evaporação.

⁹ Define qual o mecanismo numérico será utilizado para transportar uma determinada quantidade (neste caso, velocidade, temperatura e umidade) através do domínio da solução.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagnóstico da unidade experimental

O diagnóstico do galpão instrumentado foi cumprido em quatro etapas. Nas três primeiras, foram analisados os dados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, correlacionando-os com suas respectivas zona de conforto e faixas recomendadas para frangos adultos; na última, caracterizou-se o ambiente térmico interno em função do ITUV.

4.1.1 Temperatura do ar (T_{ar})

Os dados médios das temperaturas do ar coletadas a 0,50 m de altura relativa à cama de frango estão discriminados na Figura 23. É possível observar que as menores temperaturas aconteceram no alinhamento da Cortina 1 com o registro da média mínima de 26,4 °C, enquanto a média máxima, no valor de 29,1 °C, foi registrada na Cortina 4; a média global da temperatura do ar foi de 28,2 °C.

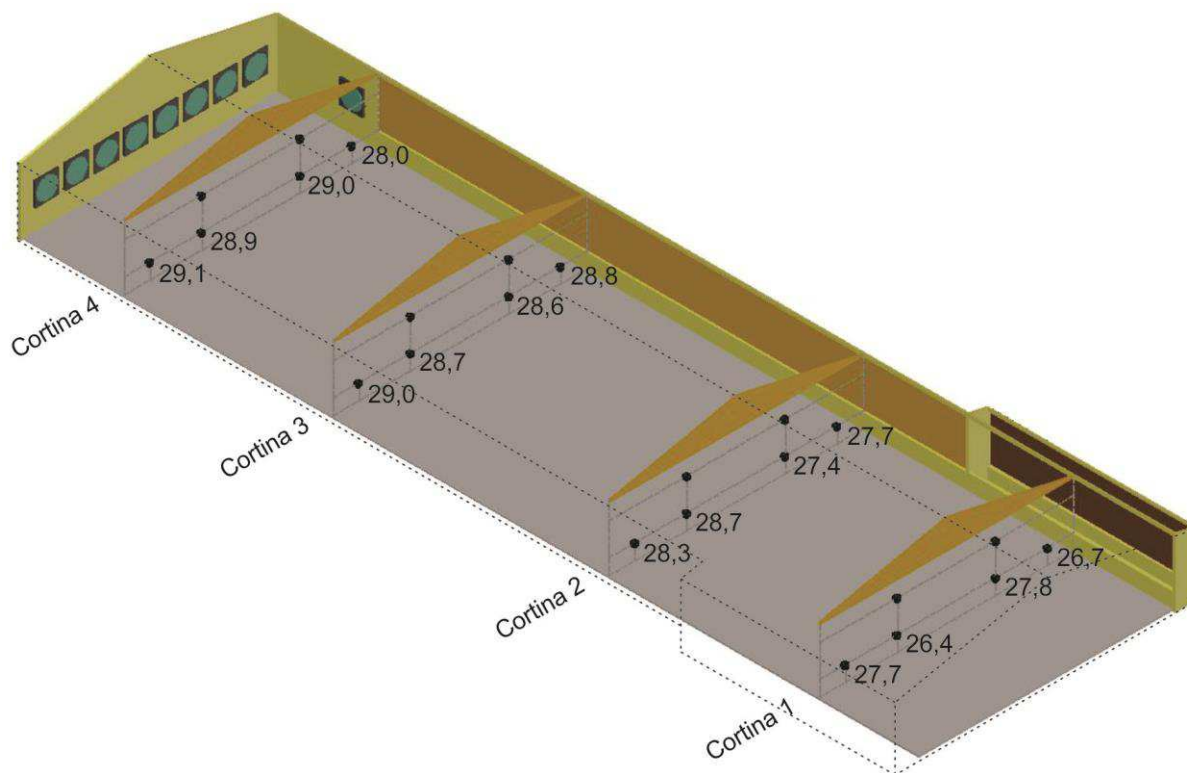


Figura 23. Temperaturas do ar (°C) coletadas a 0,50 m de altura relativa à cama
Fonte: Acervo da autora

Esses achados corroboram os registros feitos por Furtado et al. (2003); as temperaturas do ar, em sua pesquisa acerca do conforto térmico em galpões avícolas paraibanos com diferentes sistemas de condicionamento, variaram entre 28,7 e 30,9 °C, no período entre 12 e 14 h.

Também estão em acordo com os dados declarados por Santos (2012), que ao investigar dois galpões em pressão negativa, localizados no município de Guarabira/PB, encontrou, para o período seco, valores máximos de T_{ar} interno de até 35,5 °C e valores médios para a variável de 28,3 °C, durante as últimas semanas do ciclo produtivo das aves.

Da observação da Figura 24, na qual constam as curvas para temperatura do ar por cortina, conclui-se que esta variável, apenas no trecho próximo ao painel evaporativo, apresentou valores dentro dos limites preconizados como confortáveis que, segundo Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), está definido entre 18 a 28 °C para frangos adultos. Isso está em consonância com Furtado et al. (2002), categóricos ao afirmar que nas diversas mesorregiões do Estado da Paraíba, aves adultas se encontraram em situação de desconforto térmico ao longo do período diurno, devido às elevadas temperaturas do ar no interior das instalações.

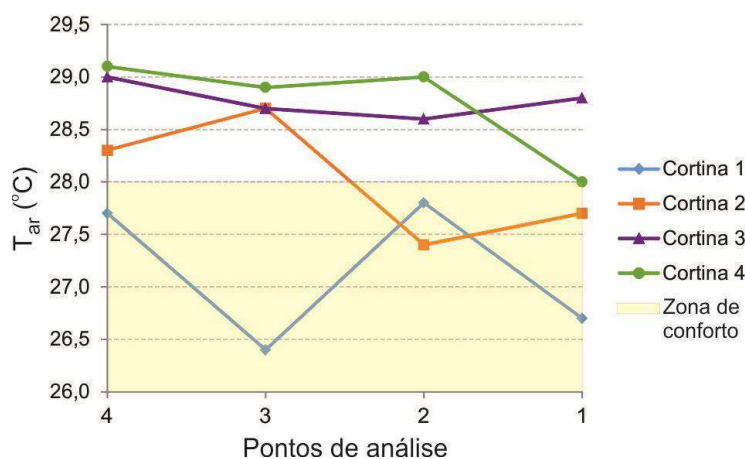


Figura 24. Curvas das temperaturas do ar (°C) coletadas a 0,50 m com respectiva zona de conforto para frangos de corte adultos
Fonte: Acervo da autora

Da análise dos valores médios da temperatura do ar por cortina visualizou-se o aumento da magnitude dessa variável na medida em que se distanciou dos painéis e se aproximou dos exaustores.

É fácil compreender este padrão de distribuição da temperatura interna; isso aconteceu, pois, como explicado em Franco et al. (2011), a temperatura do ar externo mais aquecido sofre efetivo resfriamento ao passar pelas placas porosas e saturadas com água e, então, resfria o ar interno logo que se mistura a ele.

Neste ponto, vale ressaltar que a T_{ar} no exterior do galpão, registrada durante o período do experimento, atingiu o valor médio de 34,5 °C, ao passo que aquela coletada na circulação interna das placas evaporativas desceu ao patamar de 27,2 °C; isto representou um resfriamento direto de 7,3 °C.

Franco et al. (2011) investigaram o uso de painéis evaporativos para o arrefecimento do ar no interior de casas de vegetação, em Almeria/ Espanha, e relacionaram a utilização das placas em celulose com espessura de 0,10 m, sujeitas à velocidade do vento de 1,27 m.s⁻¹, à redução média de até 8 °C em comparação com a temperatura externa. De acordo com Tinôco et al. (2004) e Carvalho et al. (2009), dependendo das condições climáticas da região onde o sistema de *pad coolings* é utilizado, a T_{ar} pode ser reduzida em até 11 °C, sendo no Brasil a redução média de 6 °C. A Cobb (2012) vai além e admite que a minoração possa alcançar 15 °C, em combinações de alta temperatura do ar e baixa umidade relativa (Ex.: T_{ar} = 40 °C e UR = 29%).

No entanto, ao longo do percurso até chegar às saídas, o ar resfriado que adentrou o galpão volta a aquecer; este aquecimento é cumulativo e acontece em função de diversos fatores: a) transferência do calor corporal das aves resultante de suas atividades metabólicas; b) calor radiativo proveniente da envoltória, em especial, pelos fechamentos laterais em cortinas amarelas; e c) ganho de calor advindo dos exaustores elétricos.

É importante considerar que a contribuição para a elevação da temperatura do ar pelo calor metabólico das aves é tão maior quanto mais próximo de seus peitorais forem os pontos de observação.

Considerando a temperatura corporal de frangos confinados entre 41 e 42 °C (Nazareno et al., 2009), a superficial da pele de 33 °C (Santos, 2012) e a temperatura média do ar, no experimento ora discutido, de 28,2 °C, pode-se afirmar que houve ganho de calor pelo ambiente em função de trocas evaporativas e condutivas com as aves. A produção total de calor metabólico de 137.000 W foi

estimada em função do número de aves vivas e do peso médio do animal quando da finalização do lote.

A importância do emprego de *pad coolings* e a relevância da escolha dos fechamentos verticais, em virtude de suas propriedades térmicas, a fim de minorar os efeitos das altas temperaturas externas ficam evidentes no trabalho realizado por Carvalho-Curi (2014).

Ao investigar a T_{ar} no exterior e interior de quatro diferentes tipologias de aviários ventilados por pressão negativa, com iguais arranjos de cobertura, a referida autora encontrou que, em todas elas, as condições externas de temperatura afetaram o ambiente térmico interno. Registrou, entretanto, que o *Blue House* esteve mais sujeito à dita influência, visto vez que o resfriamento do ar nas entradas era feito apenas por nebulização; dos demais, dotados de placas evaporativas, o aviário *Dark House* apresentou melhor desempenho, frente ao *Double Wide House* e *Solid Wall*.

Outra questão é o incremento das cargas de calor, nas regiões próximas ao oitão Oeste, oriundo dos exaustores elétricos. Bueno e Rossi (2006) afirmam que nos sistemas em pressão negativa, os equipamentos que mais consomem energia e mais produzem calor, em razão da sua maior potência instalada, são os exaustores. Neste experimento, estes foram responsáveis pelo fluxo total de calor estimado em 11.200 W.

4.1.2 Umidade relativa do ar (UR)

Os dados médios de umidade relativa por ponto de coleta estão mapeados na Figura 25. Nas cortinas de 1 a 4, foram registrados valores médios de 84,25%, 89%, 93% e 72,5%, respectivamente; já o valor médio global foi de 84,69%.

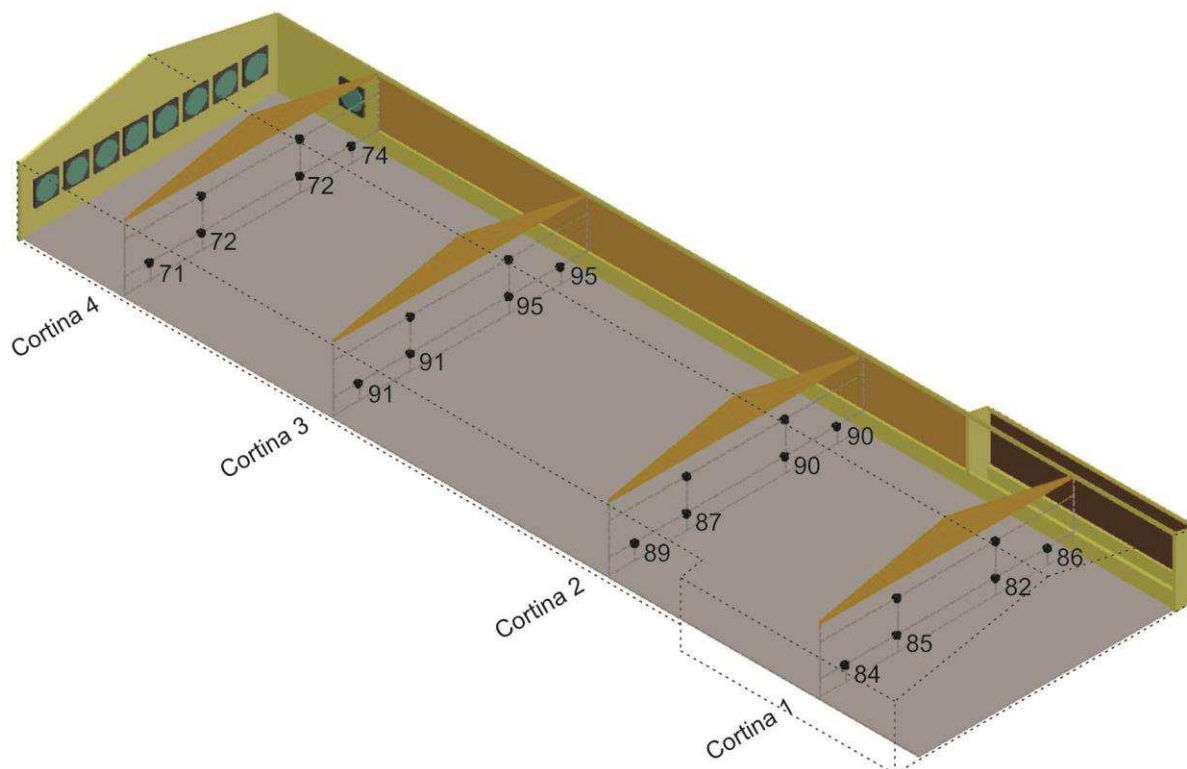


Figura 25. Umidades relativas do ar (%) coletadas a 0,50 m de altura relativa à cama
Fonte: Acervo da autora

Nas imediações da Cortina 3, a UR atinge seu valor médio máximo de 95%, enquanto na Cortina 4, logo na sequência, registra-se o valor médio mínimo de 71%.

Elevada umidade relativa no interior de aviário ventilado à pressão negativa e situado em Guarabira/PB, durante o período quente, foi constatada por Santos (2012), a qual anotou valores internos máximo de 91,20% e médio de 76,23%.

Carvalho-Curi (2014) também encontrou valores acima da faixa recomendada para conforto de frangos quando investigou aviários climatizados em túnel, dotados de painéis evaporativos e exaustores, instalados no município de Amparo/SP, nos quais a UR máxima foi de 89,90% e a média de 81,59%.

Percebe-se o aumento da umidade nos trechos médios do galpão, referentes às Cortinas 2 e 3, devido ao sistema interno complementar de nebulização. Este permaneceu desligado no trecho correspondente aos painéis evaporativos e naquele próximo aos exaustores; neste último, por medida protetiva para os equipamentos elétricos.

No alinhamento da Cortina 1, a umidade é proveniente unicamente dos *pad coolings*, enquanto na Cortina 4 é apenas fruto do carreamento pelo vento

decrecida da parcela perdida em função da temperatura mais elevada no fundo do galpão. Nesta conjectura para a Cortina 4, considerou-se irrelevante o acréscimo de umidade promovido pela evaporação do líquido produzido no trato respiratório do animal alojado, visto que o ar, nos trechos imediatamente anteriores, encontrava-se quase saturado.

As curvas da umidade relativa do ar coletada a 0,50 m, por cortina, com respectiva faixa recomendada para frangos de corte adultos podem ser contempladas na Figura 26.

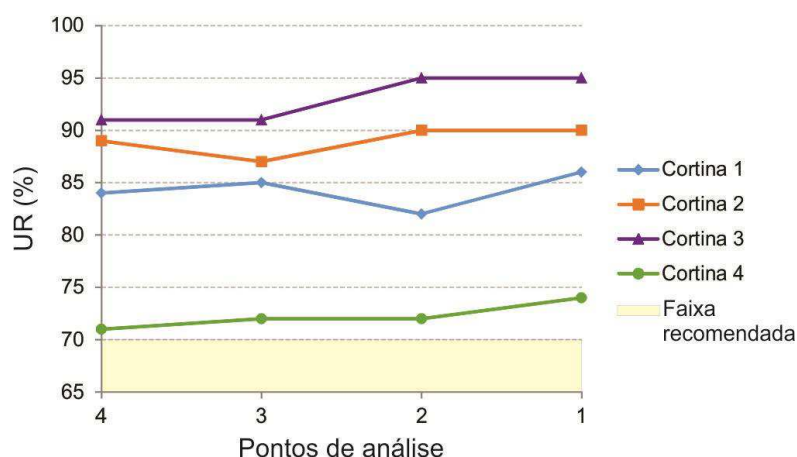


Figura 26. Curvas das umidades relativas do ar (%) coletadas a 0,50 m com respectiva faixa recomendada para frangos de corte adultos
Fonte: Acervo da autora

Nas horas mais quentes do dia, a UR esteve mais próxima da faixa recomendada para conforto de frangos adultos apenas na Cortina 4; ainda assim, em todas as cortinas os valores para esta variável extrapolaram os limites entre 50% e 70% preconizados por Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010).

4.1.3 Velocidade do vento (V_v)

Os dados médios para velocidade do vento a 0,50 e a 1,50 m, adquiridos a partir do sistema de aquisição, estão apresentados na Figura 23.

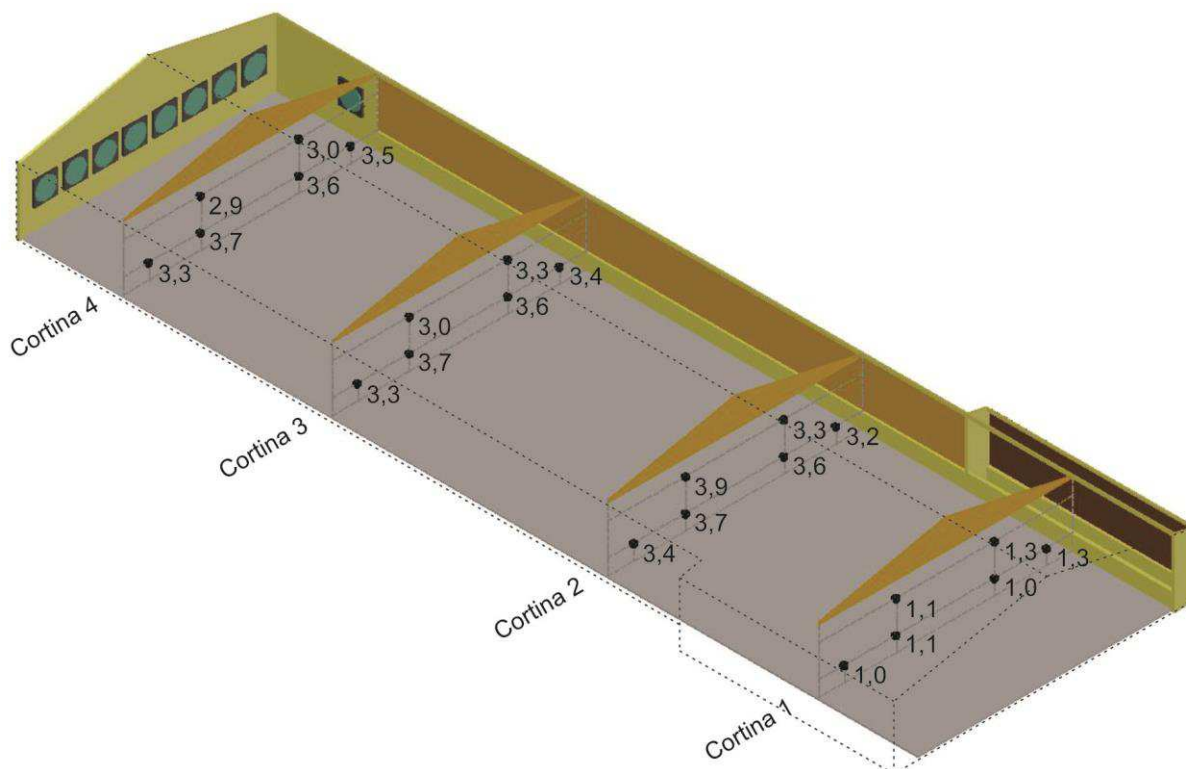


Figura 27. Velocidades do vento (m.s^{-1}) coletadas a 0,50 e a 1,50 m de altura relativa à cama
Fonte: Acervo da autora

Velocidades de vento mais baixas, com valor médio de $1,13 \text{ m.s}^{-1}$, ocorreram no alinhamento referente à Cortina 1; para as cortinas seguintes, os valores médios da variável em questão foram de $3,52$, $3,40$ e $3,33 \text{ m.s}^{-1}$, na sequência. Valores mínimo de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, máximo de $3,9 \text{ m.s}^{-1}$ e médio global de $2,85 \text{ m.s}^{-1}$, foram encontrados.

Pode-se observar que a velocidade do vento esteve distribuída mais uniformemente no trecho posterior ao alinhamento dos painéis evaporativos, com diferença média entre os dados da Cortina 1 e das subsequentes de aproximadamente 33%.

Santos (2012) declarou achados de velocidade do vento mínimas de até $0,00 \text{ m.s}^{-1}$ e máximas de até $2,90 \text{ m.s}^{-1}$, na 6ª semana de vida das aves, durante o período quente, em galpões situados em Guarabira/PB e ventilados à pressão negativa.

Carvalho-Curi (2014) relatou V_v máxima de $2,32 \text{ m.s}^{-1}$ e mínima de $0,34 \text{ m.s}^{-1}$ encontradas em galpões de Amparo/SP ao 42 dias de vida das aves, no período do verão às 14h.

Embora a velocidade do vento média máxima, registrada no experimento ora discutido, tenha extrapolado os valores achados pelas duas autoras supracitadas, atende parcialmente ao requisito pré-estabelecido pelo criador, cuja V_v desejada é de até $3,50 \text{ m.s}^{-1}$.

Da observação da Figura 28, nas quais são apresentadas as curvas de velocidade do vento geradas a partir dos dados coletados a 0,50 e 1,50 m, pode-se notar a inadequação dos dados de V_v encontrados em todos os trechos, ao longo de todo o volume de ar do galpão. Tal inadequação é indicada pela impertinência dos valores à faixa recomendada por Cobb (2012) para o conforto térmico de aves adultas.

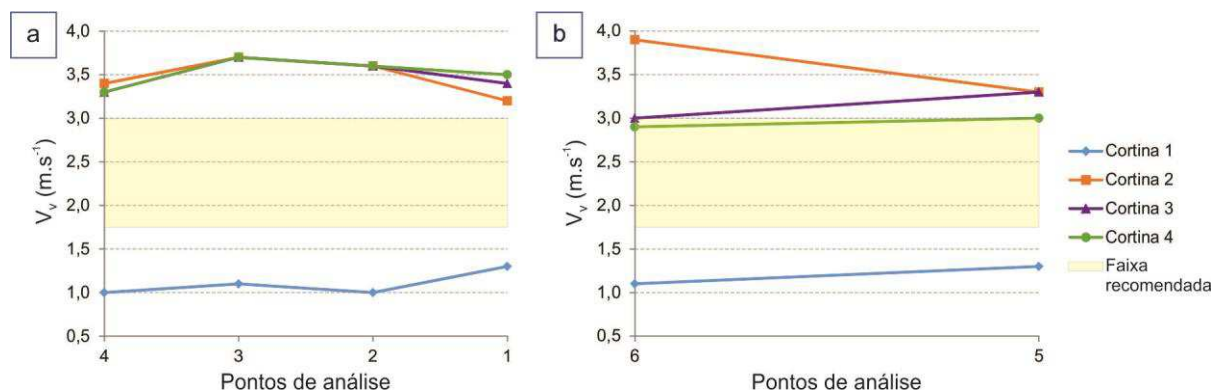


Figura 28. Curvas das velocidades do vento (m.s^{-1}) coletadas a 0,50 m (a) e a 1,50 m (b) com respectiva faixa recomendada para frangos de corte adultos
Fonte: Acervo da autora

Embora Santos (2012) e Carvalho-Curi (2014) refiram-se aos dados médios de velocidade do vento como apropriados ao conforto de frangos adultos, tem-se que atentar para a grande amplitude entre máximas e mínimas; estas últimas, muito aquém dos limites mínimos recomendados.

4.1.4 Caracterização do ambiente térmico interno

A caracterização do ambiente térmico interno do galpão experimental foi feito em função do Índice de temperatura, umidade e velocidade do ar (ITUV), proposto por Tao e Xin (2003) e calculado conforme descrito na Equação 01. Ambientes com $ITUV \leq 24$ foram qualificados em estado de conforto, ao passo que ambientes com $24 < ITUV \leq 34$ como em condições de alerta.

Os valores de ITUV calculados para pontos a 0,50 m de altura relativa à cama de frango estão apresentados na Figura 29. O ITUV mínimo encontrado foi de 25,3 na Cortina 2 e ITUV máximo de 27,4 na Cortina 1; o ITUV médio foi de 26,3.

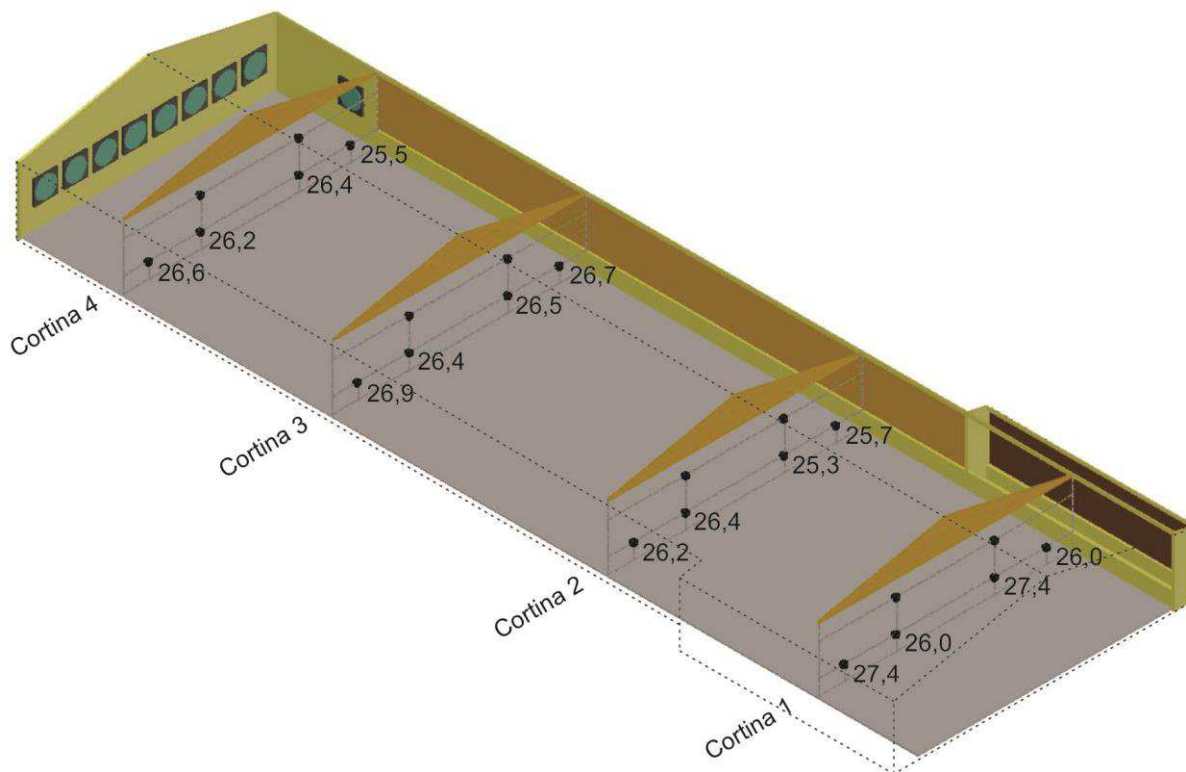


Figura 29. Valores de ITUV calculados para pontos a 0,50 m de altura relativa à cama
Fonte: Acervo da autora

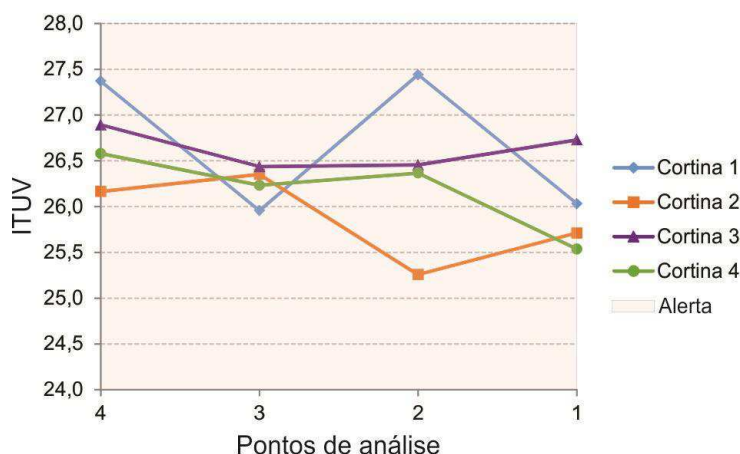


Figura 30. Curvas de ITUV por cortina, para dados coletados a 0,50 m, com faixa interpretativa
Fonte: Acervo da autora

Como se pode visualizar na Figura 30, o ambiente interno mostrou-se inadequado, segundo ITUV, para assegurar conforto térmico às aves alojadas no

período mais quente do dia, quando o sistema de climatização foi solicitado em sua potência máxima.

Este entendimento é corroborado por Santos (2012) que empregou o ITGU-Índice de temperatura do globo negro e umidade, para caracterizar o ambiente térmico dos galpões paraibanos por ela instrumentados e encontrou ITGU máximo de 80, valor acima do faixa interpretativa para conforto térmico ($69 < ITGU < 77$), indicando situação de estresse para as aves em fase de terminação.

Anteriormente, Furtado et al. (2003) encontraram ITGU máximo de 80,4, no horário entre 12 e 14 h, demonstrando que no período mais quente do dia, os sistemas de acondicionamento térmico testados foram insuficientes para produzir um ambiente confortável no interior do aviário.

Chama atenção a semelhança entre as curvas de ITUV e as curvas de temperatura do ar apresentadas por cortina, o que demonstra a maior importância relativa da temperatura sobre a umidade relativa e velocidade do vento.

De posse do diagnóstico para o galpão instrumentado, considerando-se as faixas interpretativas para ITUV como parâmetros e as condições médias por cortina encontradas para T_{ar} e V_v , infere-se que baixar os níveis de UR para 50% ou menos, seria a medida mais fácil de ser implementada para melhorar a sensação térmica dos frangos, durante as horas mais quentes do dia. Portanto, manter desligado o sistema de nebulização interno pareceu ser uma boa alternativa.

4.2 Modelo CFD baseado no protótipo (TiFiA)

Após o diagnóstico da unidade experimental procedeu-se à criação de um modelo CFD com características similares à unidade experimental. O procedimento utilizado está pormenorizado no subitem 3.6.

Imagem global e detalhes do modelo gerado no software de simulação, com indicativo das condições de contorno, estão apresentados na Figura 31.

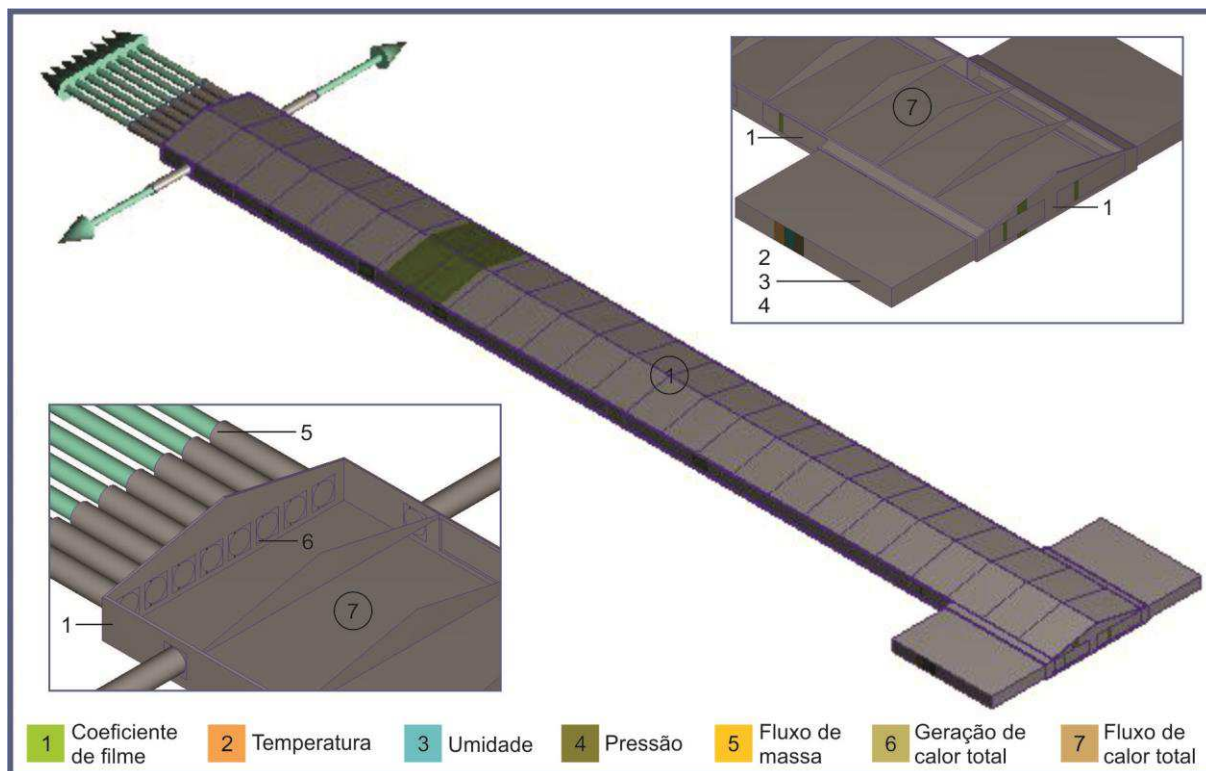


Figura 31. Modelo CFD para TiFiA com condições de contorno
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

As condições limites responsáveis pela simulação do escoamento foram:

- Fluxo de massa - utilizada nos volumes de ar de saída, em suas faces externas e paralelas aos exaustores; e
- Pressão - aplicada às superfícies dos volumes de ar de entrada, juntamente com a temperatura e a umidade.

As condições de contorno responsáveis por viabilizar as trocas de calor foram:

- Coeficiente de filme - aplicado a todas as superfícies externas da envoltória, inclusive nas faces de fora das caixarias metálicas dos exaustores;
- Temperatura e umidade - atribuídas ao volume de ar de entrada, nas faces externas e paralelas às superfícies do meio poroso;
- Geração de calor total (baseada em volume) - justapostas aos receptáculos dos exaustores; e
- Fluxo de calor total (baseada em superfície) - empregadas na face superior do volume interno correspondente aos frangos.

A malha gerada, a partir do método de discretização dos elementos finitos, foi do tipo não-estruturada, predominantemente tetraédrica; sua distribuição, em vistas e em detalhes externos e internos das saídas e entradas de ar, pode ser examinada nas Figuras 32, 33 e 34.

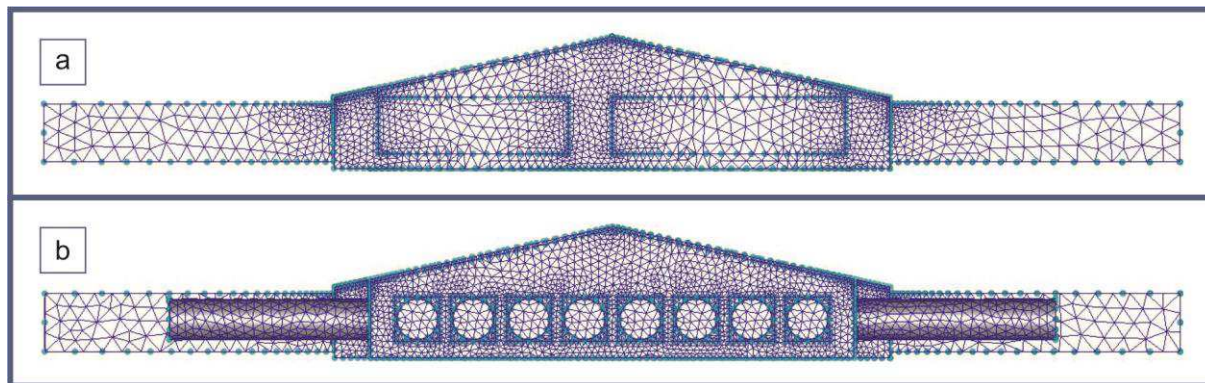


Figura 32. Distribuição da malha final para TiFiA nas faces Leste (a) e Oeste (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

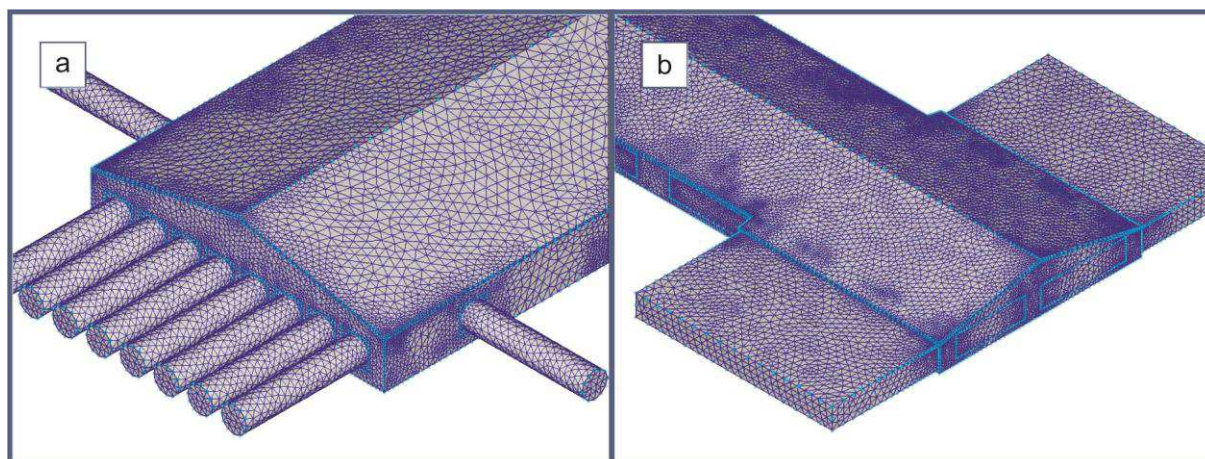


Figura 33. Detalhes da distribuição externa da malha para TiFiA nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

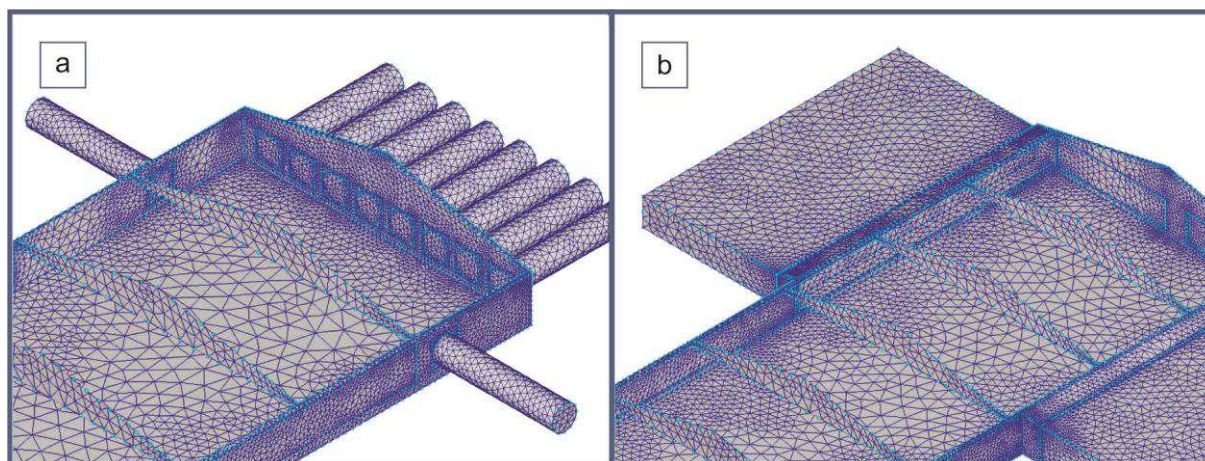


Figura 34. Detalhes da distribuição interna da malha para TiFiA nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

Para o dimensionamento automático da malha estabeleceu-se o valor mínimo de 0,10 m, definido em função da espessura do conjunto telha/forro; em seguida, recorreu-se ao refinamento automático para os elementos de superfície (aletas, cortinas e painéis evaporativos), cujos parâmetros estão descritos no subitem 3.6.4.

A malha final foi composta de 973.495 nós (858.683 em fluidos e 114.812 em sólidos), 3.524.459 elementos (2.977.164 em fluidos e 547.295 em sólidos) distribuídas no modelo com volume total de 8.056,6 m³; a relação de aspecto nodal máxima foi de 11,52. No modelo CFD para TiFiA, foram necessárias 1060 iterações para atingir a convergência.

Relação de aspecto nodal menor que 100 (NAR<100) é um bom indicativo de adequação da malha (AUTODESK CFD 2016, 2016).

Xue et al. (2016) adotaram malha tetraédrica com 3.380.000 de elementos para galpão com dimensões de 12,00 x 90,00 x 3,60 m. Carvalho-Curi (2014) gerou uma malha hexaédrica com 729.949 nós para um aviário com 20,00 x 120,00 x 3,00 m de dimensões.

Os cálculos da solução foram realizados para regime estacionário, escoamento incompressível e turbulento utilizando o modelo *Standard k-ε*; um dos critérios definidos para detecção automática de convergência foi o valor residual (RMS)¹⁰ inferior a 10⁻⁵.

Blannes-Vidal (2008), Bustamante et al. (2013), Guerra-Galdo et al. (2015) e Xue et al. (2016) adotaram parâmetros idênticos em seus experimentos utilizando-se de modelo CFD para avaliação de galpões avícolas ventilados à pressão negativa.

Malha hexaédrica do tipo estruturada, modelo de fechamento *Standard k-ε* e critério de convergência do tipo residual (RMS) com valor inferior a 10⁻⁴ foram adotados por Carvalho-Curi (2014).

¹⁰ O Autodesk CFD 2016 não fornece o RMS diretamente, mas ele pode ser monitorado através dos valores residuais de saída (Resid Out) e de entrada (Resid In). O valor de RMS é dado pela divisão de Resid Out por Resid In.

4.3 Verificação e validação do modelo CFD para TiFiA

A validação do modelo CFD para TiFiA deu-se por comparação entre os valores medidos no galpão experimental e aqueles resultantes da simulação deste tratamento; para tanto, calculou-se a média dos quadrados dos erros normalizados (NMSE) para cada cortina (1, 2, 3 e 4) separadamente e para o modelo em sua totalidade. Os valores de NMSE encontrados estão discriminados na Tabela 17.

Tabela 17. Valores parcial e global da média dos quadrados dos erros normalizados (NMSE)

NMSE			
Cortina	Variável Ambiental		
	Velocidade do vento	Temperatura do ar	Umidade relativa
1	0,00	0,00	0,01
2	0,00	0,00	0,06
3	0,01	0,00	0,19
4	0,02	0,00	0,01
Global	0,02	0,00	0,13

Visto que Anderson et al. (1992) afirmaram que valores de NMSE menores ou iguais a 0,25 são bons indicativos de validação, Carvalho-Curi (2014), empregando metodologia similar, considerou validado um modelo CFD de galpão ventilado em pressão negativa gerado no software Ansys CFX 14.0, com o qual encontrou valor de NMSE igual a 0,1936; Xue et al. (2016) calcularam NMSE médio de 0,15 e validaram seu modelo CFD para análise dos efeitos da instalação de *pad cooling* sobre a distribuição do fluxo do ar em galpões para poedeiras, ventilados em túnel.

Sendo assim, o modelo de simulação TiFiA também foi considerado validado, vez que apresentou NMSE máximo de 0,19; por isso, os procedimentos e configurações de sua modelagem CFD foram declarados adequados à aplicação nas demais simulações referentes aos tratamentos pré-estabelecidos.

Entretanto, chamam atenção os valores global e parcial das Cortinas 2 e 3 de NMSE referente à umidade relativa, respectivamente, 0,13, 0,06 e 0,19. Estes são compreensíveis pela combinação de vários fatores: a) a nebulização interna foi desconsiderada na modelagem; b) a umidade foi inicializada no modelo apenas como condição de entrada pelos painéis evaporativos, por isso o valor mais baixo de NMSE para a Cortina 1; c) no galpão o sistema de nebulização estava desligado no trecho imediatamente anterior às Cortinas 1 e 4; e d) os sensores da Cortina 3 foram

os mais expostos às condições críticas de umidade, por estarem localizados no último trecho do galpão sujeito à nebulização.

Na Figura 35 estão dispostas as variações entre os dados coletados e os simulados para a umidade relativa do ar a 0,50 m de altura relativa à cama. Quando comparados os valores máximo ($UR_{máx}$) e mínimo ($UR_{mín}$), de ambos e aos pares, é possível observar o quão menos uniformidade é a distribuição desta variável para os dados coletados; enquanto o resumo quantitativo dos dados oriundos das medições no local apontam para valores de $83\% \pm 12\%$, os oriundos da simulação indicam variação da ordem de $78\% \pm 3\%$. Como sugerido pelo NMSE parcial calculado, esta distorção entre resultados coletados e simulados fica ainda mais evidente nas Cortinas 2 e 3, nas quais a diferença percentual entre máximas foi de 12,2 e 21% e entre mínimas de 9,2 e 17,6%, respectivamente, como consta na Tabela 18.

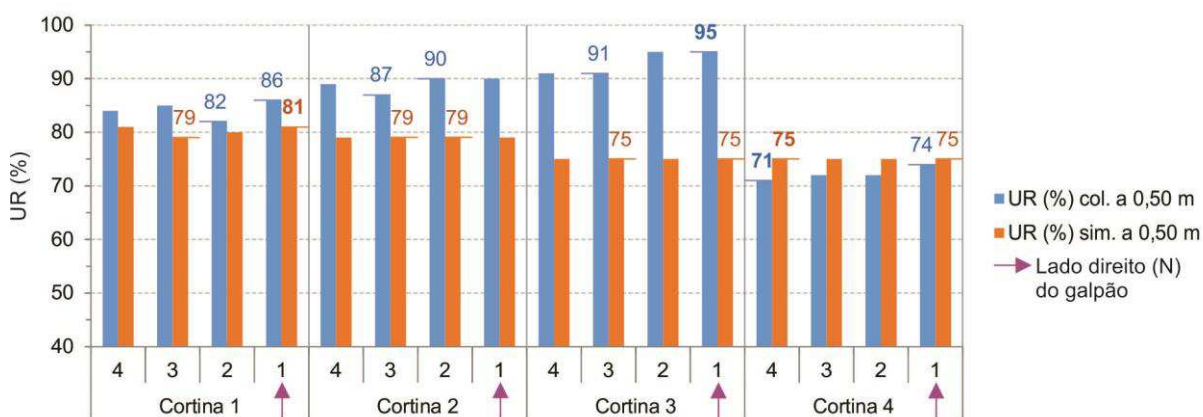


Figura 35. Umidade relativa do ar, coletada e simulada a 0,50 m de distância da cama
Fonte: Acervo da autora

Tabela 18. Valores máximos e mínimos de umidade relativa do ar, coletada e simulada, por cortina

Cortina	Coletada		Simulada		Diferença %	
	$UR_{máx}$	$UR_{mín}$	$UR_{máx}$	$UR_{mín}$	Entre máximas	Entre mínimas
1	86	82	81	79	5,8	3,7
2	90	87	79	79	12,2	9,2
3	95	91	75	75	21,0	17,6
4	74	71	75	75	1,3	5,3

De posse dos dados de temperatura do ar, coletados e simulados, a 0,50 m apresentados na Figura 36, infere-se que a temperatura do ar na Cortina 1 não sofreu influência da umidade gerada pela nebulização interna e manteve-se mais baixa, tanto nas medições como na simulação, em função do resfriamento

adiabático proporcionado pelos painéis. É importante ressaltar que a temperatura e a umidade relativa do ar na face interna das placas evaporativas foram as únicas condições de contorno de fluxo de calor atribuídas às entradas do modelo de simulação.

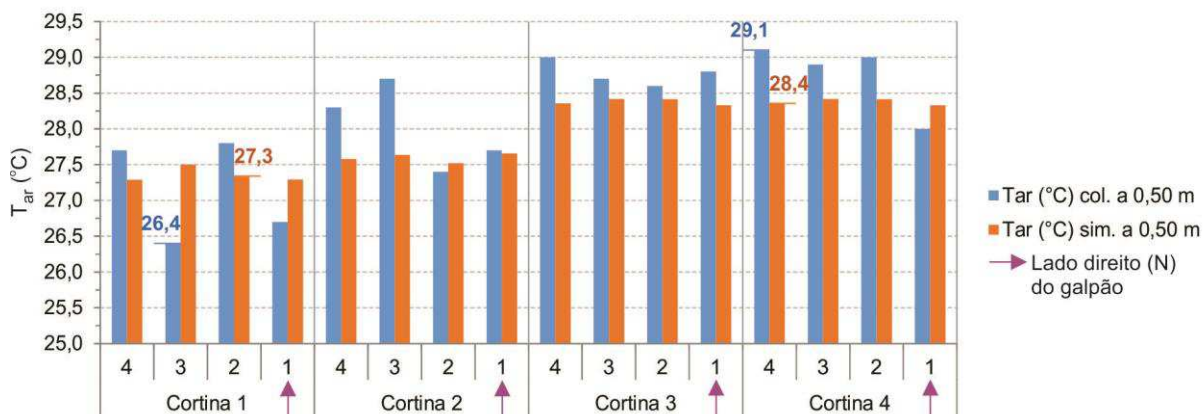


Figura 36. Temperatura do ar, coletada e simulada a 0,50 m de distância da cama
Fonte: Acervo da autora

Como a relação entre temperatura e umidade relativa do ar é inversamente proporcional, para os dados simulados nas Cortinas 3 e 4, a temperatura subiu devido à distância das placas evaporativas e a não simulação da nebulização interna. Os valores de temperatura do ar, coletados e simulados, nesta cortina só se aproximaram porque, no galpão real, a nebulização interna neste trecho permaneceu desligada durante todo o experimento. Para dados de temperatura do ar, encontrou-se valores de $27,75 \pm 1,35 \text{ }^\circ\text{C}$ nos dados de campo e $27,85 \pm 0,55 \text{ }^\circ\text{C}$ na simulação.

As variações da velocidade do vento, coletadas e simuladas, a 0,50 m e a 1,50 m são apresentadas nas Figuras 37 e 38. É possível identificar que as velocidades simuladas a 0,50 m foram sempre superiores às coletadas, exceto a medida relativa ao ponto 1 da Cortina 1; o mesmo padrão não pôde ser identificado à altura de 1,50 m. Uma hipótese é que, no alinhamento logo abaixo das aletas de cobertura, existe uma zona de turbulência; neste caso, a utilização de sensores de vento do tipo REV C, eficientes para medições em ventos unidirecionais, não é tão adequada.

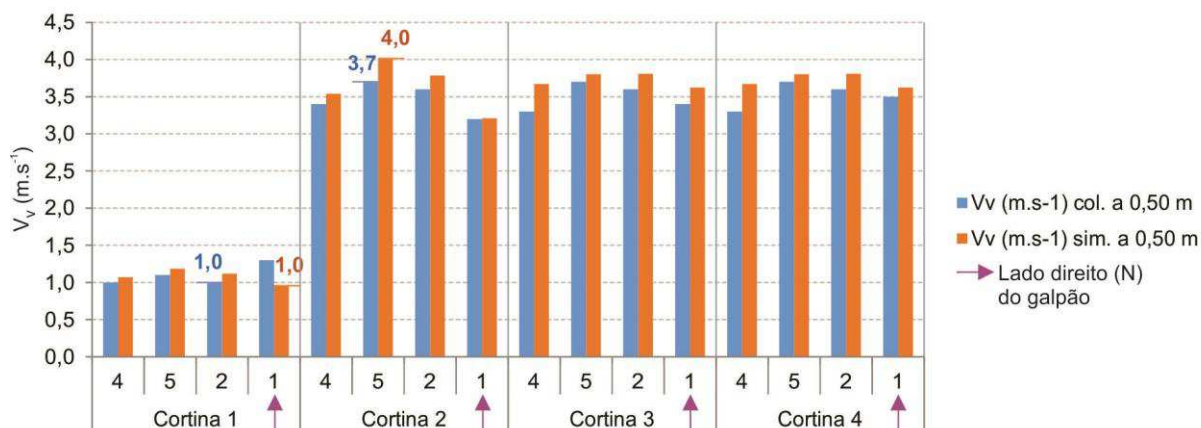


Figura 37. Velocidade do vento, coletada e simulada a 0,50 m de distância da cama
Fonte: Acervo da autora

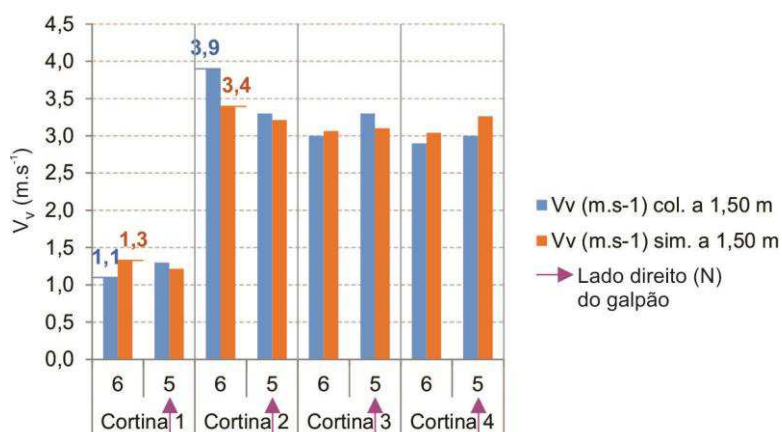


Figura 38. Velocidade do vento, coletada e simulada a 1,50 m de distância da cama
Fonte: Acervo da autora

As velocidades de vento, mínima e máxima, coletadas a 0,50 m foram de 1,0 e 3,7 m.s⁻¹, enquanto as simuladas de 1,0 e 4,0 m.s⁻¹, nesta ordem. À altura de 1,50 m, esses dados foram de 1,1 e 3,9 m.s⁻¹ e 1,2 e 3,4 m.s⁻¹. Os resultados finais indicaram variações da velocidade do vento medidas no galpão de 2,35 ± 1,35 m.s⁻¹ e simuladas de 2,50 ± 1,50 m.s⁻¹.

A variação entre as médias dos dados coletados e dos simulados, no experimento ora discutido, se assemelha aos resultados encontrados por Blanes-Vidal et al. (2008), Bustamante et al. (2013) e Bustamante et al. (2015) conforme consta na Tabela 19, desde que sejam observadas as singularidades de cada pesquisa.

Tabela 19. Variação das médias entre os dados coletados e os simulados em comparação com resultados obtidos em outros experimentos

Experimento	Coletada (m.s ⁻¹)		Simulada (m.s ⁻¹)		Diferença %	
	Vv _{máx}	Vv _{mín}	Vv _{máx}	Vv _{mín}	Entre máximas	Entre mínimas
Blanes-Vidal et al. (2008)	0,51	0,23	0,47	0,21	7,8	9,1
Bustamante et al. (2013)	1,18	0,10	1,16	0,04	1,7	60,0
Bustamante et al. (2015)	2,27	0,87	2,35	0,89	3,4	2,2
Ora discutido	3,70	1,00	4,00	1,00	7,5	0,0

Blanes-Vidal et al. (2008) instrumentaram um galpão avícola na cidade de Valência/ Espanha, a fim de efetuar medições *in loco* das velocidades do ar para compará-las com resultados de simulações; utilizaram-se de diferentes condições de contorno para um único cenário experimental composto do terço médio de um galpão dotado de *inlets* e exaustores, posicionados em faces opostas no sentido transversal. Os resultados quantitativos indicaram velocidade do vento na altura das aves de $0,37 \pm 0,14$ m.s⁻¹ para dados obtidos de medições e $0,34 \pm 0,13$ m.s⁻¹ a partir do ajuste das simulações CFD.

Bustamante et al. (2013), empregando as metodologias de medições diretas e simulações CFD, exploraram o ambiente interno de um edifício para frango de corte, localizado em Vila-real/ Espanha, dotado de ventilação mecânica cruzada por *inlets* e exaustores. Deram por válidas as simulações CFD em função da semelhança entre os resultados obtidos: as médias dos valores de velocidade do ar foram de $0,64 \pm 0,54$ m.s⁻¹ para medições diretas e $0,60 \pm 0,56$ m.s⁻¹ para CFD.

Bustamante et al. (2015), ao pesquisar a importância dos padrões de operação dos exaustores sobre a distribuição da velocidade do vento em um aviário, localizado em Alcalá de Xivert/ Espanha, com tipologia alternativa de ventilação em túnel, encontraram velocidade média de $1,57 \pm 0,70$ para dados coletados “*in loco*” e $1,62 \pm 0,73$ m.s⁻¹ para dados simulados.

4.4 Análise das simulações para arranjos de cobertura (TiFiA, TiFisA e TiFh)

4.4.1 Modelos CFD para TiFisA e TiFh

Uma vez validado o modelo CFD para TiFiA, utilizaram-se dos mesmos parâmetros para construção das geometrias, atribuição das condições de contorno, geração da malha de elementos finitos e, por fim, para configuração do mecanismo de cálculo das soluções dos modelos para TiFisA e TiFh.

Os modelos CFD para TiFisA e TiFh, com as condições de contorno que lhes foram atribuídas, encontram-se ilustrados nas Figuras 39 e 40, respectivamente.

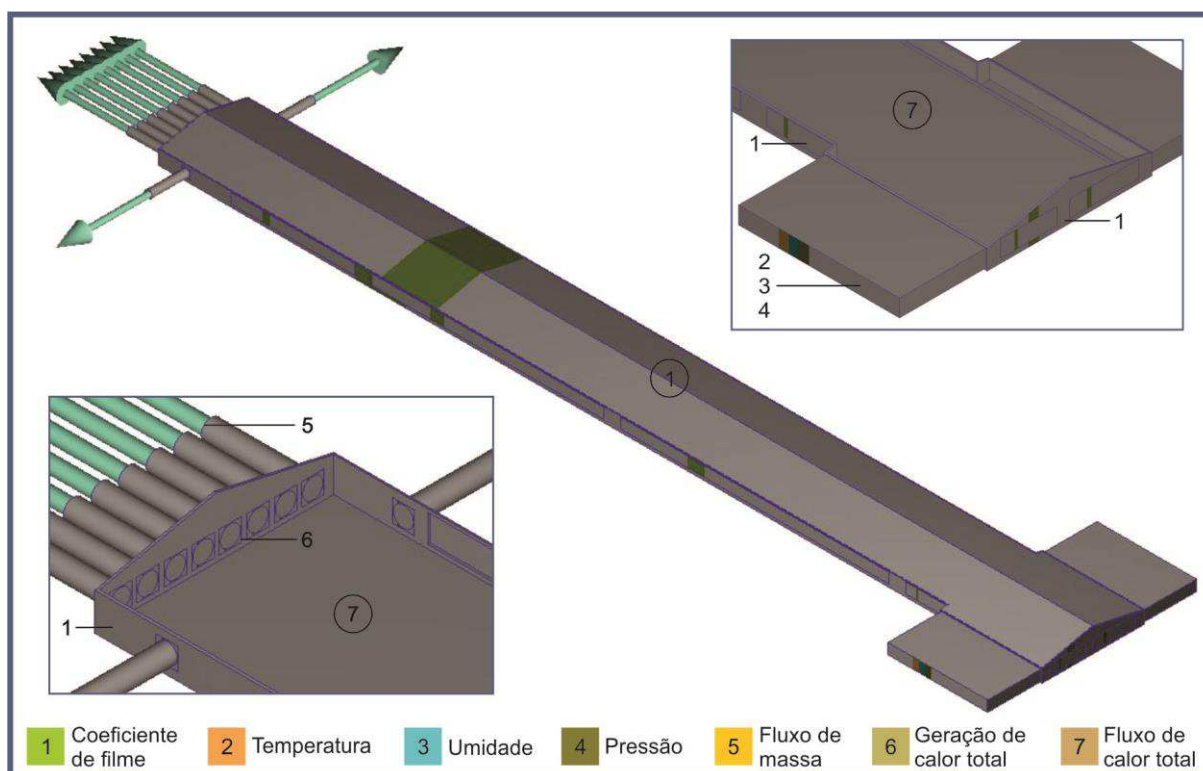


Figura 39. Modelo CFD para TiFisA com condições de contorno
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

Em TiFh, desconsiderou-se o volume do ático e houve redimensionamento do sistema de ventilação em função do menor volume de ar interno a ser climatizado, quando comparado com TiFiA e TiFisA; para tanto utilizou-se do procedimento descrito no subitem 3.5.1. Dessa forma, para o modelo de TiFh, o número de exaustores foi igual a oito e a área total dos painéis evaporativos igual a 36,72 m². O volume total final do modelo TiFisA foi de 8.056,60 m³, igual ao de TiFiA, enquanto o de TiFh foi de 6.076,70 m³.

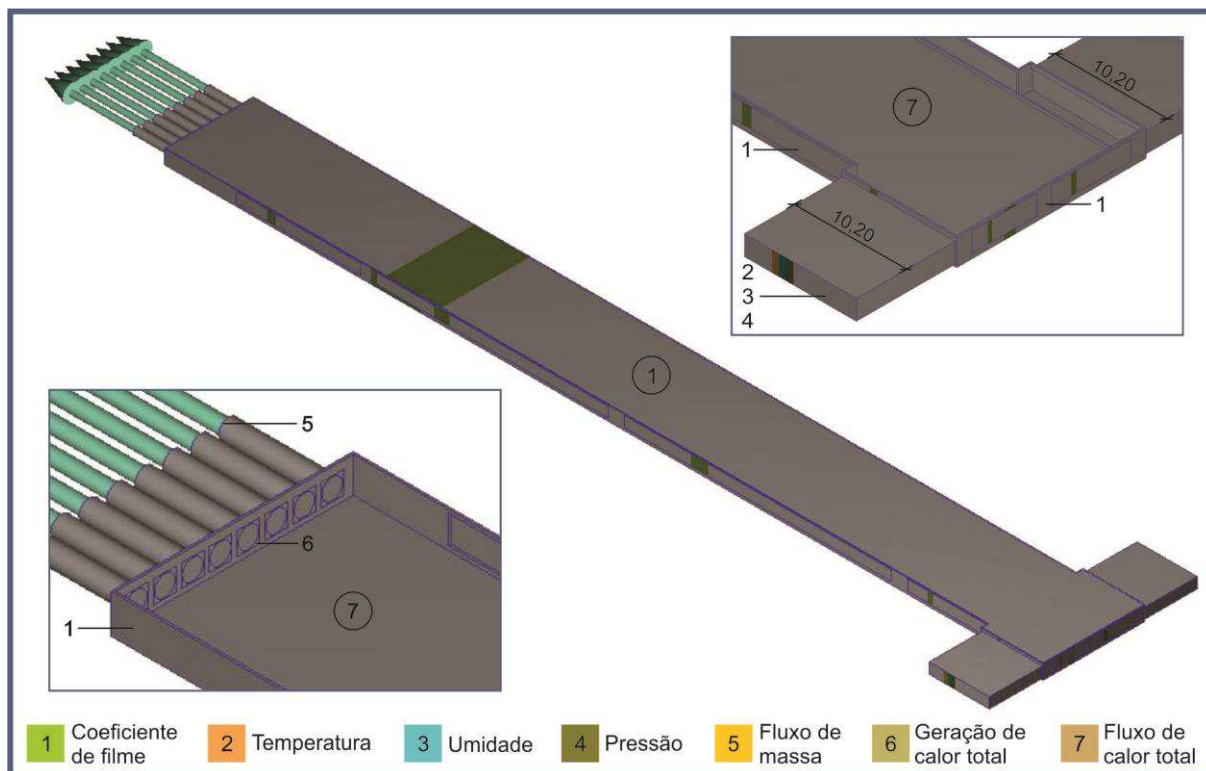


Figura 40. Modelo CFD para TiFh com condições de contorno
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

A malha gerada para TiFisA, apresentada nas Figuras 41 a 43, foi composta de 662.525 nós (579.077 em fluidos e 83.449 em sólidos), 2.435.818 elementos (2.050.305 em fluidos e 385.513 em sólidos) com relação de aspecto nodal máxima de 19,84. O cálculo da solução necessitou de 909 iterações para atingir a convergência.

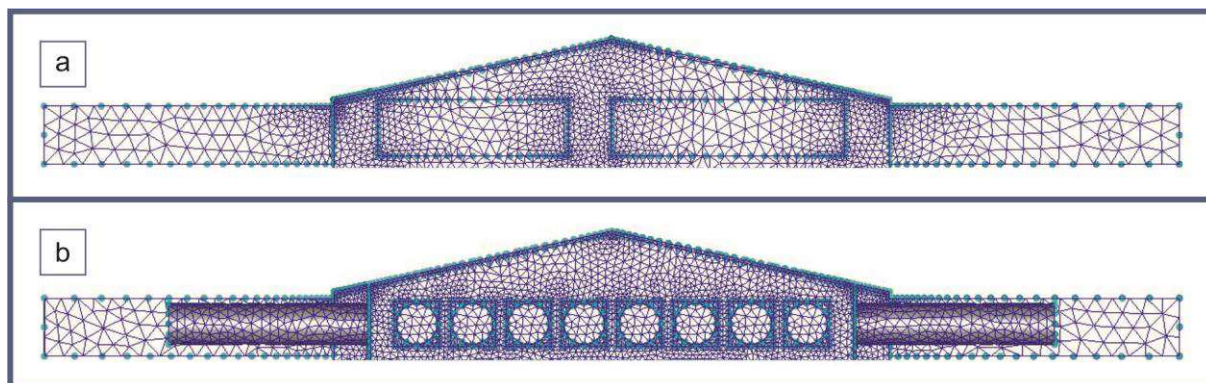


Figura 41. Distribuição da malha final para TiFisA nas faces Leste (a) e Oeste(b)
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

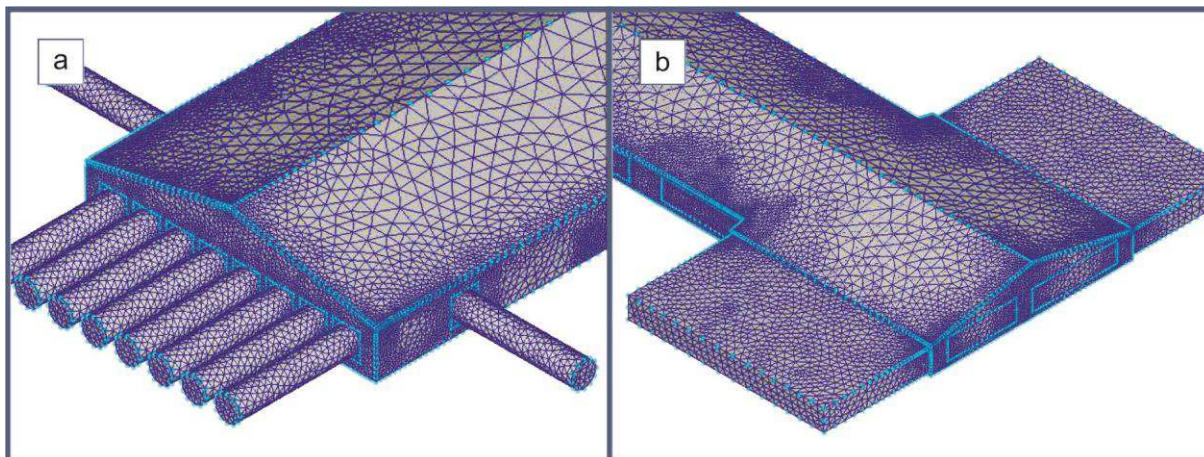


Figura 42. Detalhes da distribuição externa da malha para TiFisA nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

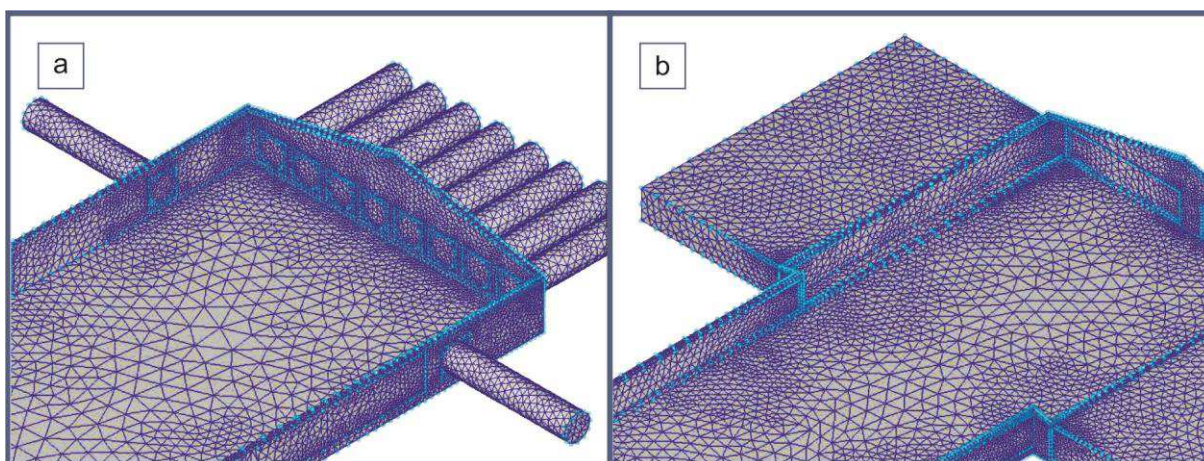


Figura 43. Detalhes da distribuição interna da malha para TiFisA nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

A malha de elementos finitos para TiFh, ilustrada pelas Figuras 44 a 46, foi composta de 677.283 nós (595.415 em fluidos e 81.868 em sólidos), 2.439.327 elementos (2.050.678 em fluidos e 388.649 em sólidos) com relação de aspecto nodal máxima de 10,65. No modelo CFD para TiFh, foram necessárias 1.469 iterações para atingir a convergência.

Relação de aspecto nodal menor que 100 ($NAR < 100$) é um bom indicativo de adequação da malha (AUTODESK CFD 2016, 2016).

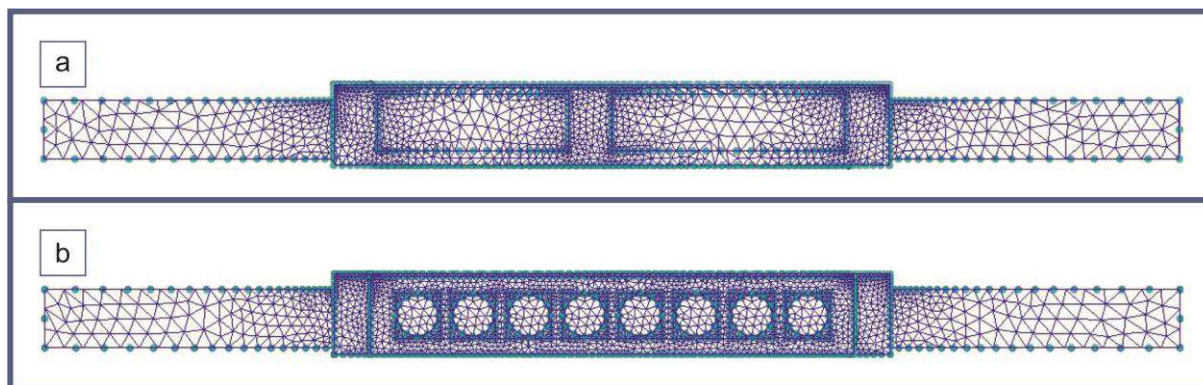


Figura 44. Distribuição da malha final para TiFh nas faces Leste (a) e Oeste(b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

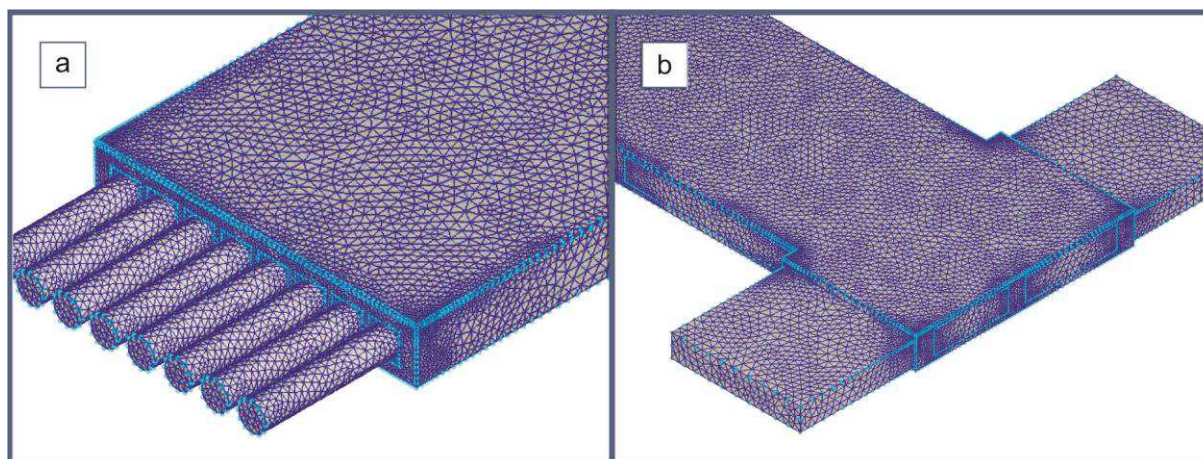


Figura 45. Detalhes da distribuição externa da malha para TiFh nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

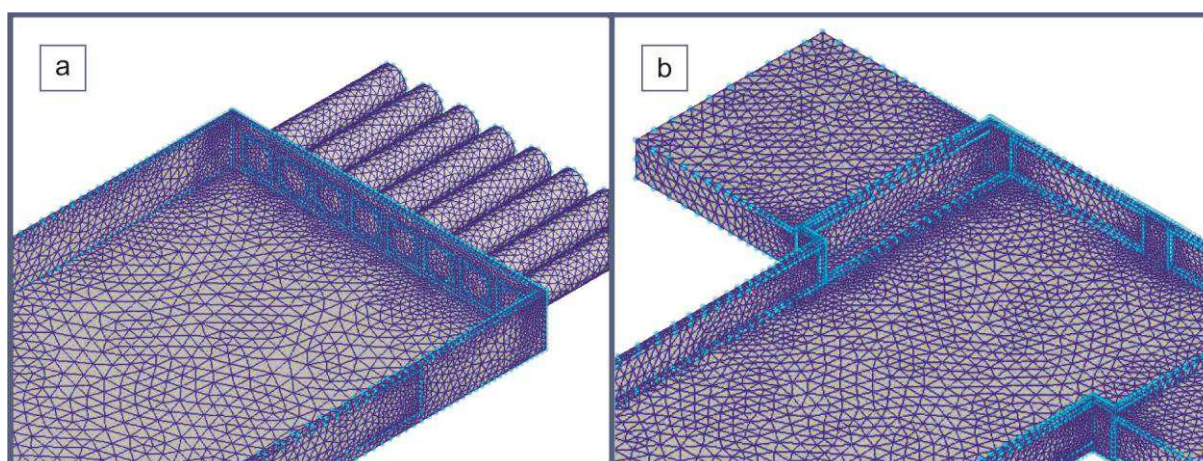


Figura 46. Detalhes da distribuição interna da malha para TiFh nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

É possível notar que quanto maior o volume e complexidade do modelo, maior o número de nós e de elementos; a mesma relação inexistente quando se compara a quantidade de iterações necessária para a convergência da simulação.

Segundo o Autodesk CFD 2016 (2016), uma vez que as malhas possuam configurações semelhantes, as aberturas de entrada ou saída sejam construídas com comprimento igual a cinco vezes seu raio hidráulico e os parâmetros estabelecidos para convergência sejam iguais, pode-se deduzir que um maior número de iterações está relacionado à dificuldade de alcance do balanço preconizado pelas equações de continuidade e de conservação de momento e energia.

De posse dos resultados das simulações, apresentados logo a seguir, procedeu-se à comparação, entre o desempenho térmico das diferentes cobertas por meio da análise da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e ITUV no interior dos ambientes simulados.

4.4.2 Distribuição da temperatura do ar em TiFiA, TiFisA e TiFh

As variações da temperatura do ar (T_{ar}) a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFiA, TiFisA e TiFh estão representadas na Figura 47, juntamente com a zona de conforto, localizada entre 18 e 28 °C, para frangos em terminação, como preconizam Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010).

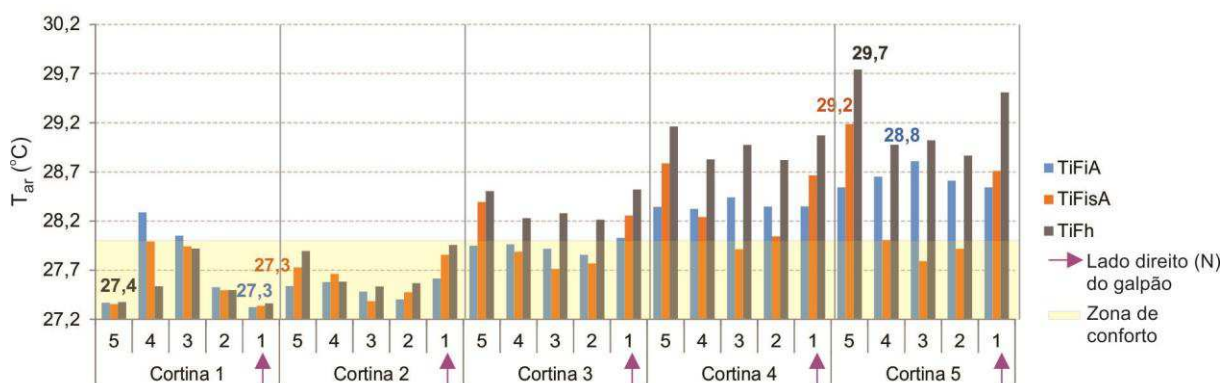


Figura 47. Variação da temperatura do ar simulada a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh
Fonte: Acervo da autora

Os valores máximos simulados, em ordem decrescente e por tratamento foram de 29,7 °C em TiFh, 29,2 °C em TiFisA e 28,8 °C em TiFiA; os valores

mínimos foram de 27,4 °C em TiFh e 27,3 °C em TiFiA e TiFisA. As temperaturas médias foram de 28,0 °C para TiFiA e TiFisA e 28,4 °C para TiFh.

Temperaturas do ar pontuais mais elevadas foram obtidas para TiFh em todas as cortinas, com exceção da Cortina 1, o que se refletiu nas médias calculadas por cortina, como apresentadas na Tabela 20. O menor aquecimento na Cortina 1 em TiFh é compreensível, visto que as condições do ar nas entradas são iguais em todos os tratamentos, mas, em TiFh, o volume de ar interno e a área de exposição às trocas por radiação são menores.

Em TiFh, o superaquecimento nos trechos subsequentes à Cortina 1 acontece de forma gradativa, até atingir o ápice na Cortina 5, por motivos similares: nos trechos intermediários, devido à exposição do menor volume de ar à mesma quantidade de calor provenientes dos fechamentos verticais e do metabolismo das aves e, no último trecho, em função da sujeição à mesma carga de calor produzida pelos equipamentos elétricos dispostos à Oeste.

Tabela 20. Valores médios de temperatura do ar, por cortina e tratamento de cobertura, e amplitude da variável (ΔT_{ar}) por tratamento

Tratamento	Valores médios de T_{ar} (°C)					Por tratamento	ΔT_{ar}
	Por cortina						
	1	2	3	4	5		
TiFiA	27,3	27,5	27,9	28,4	28,6	28,0	1,3
TiFisA	27,6	27,6	28,0	28,3	28,3	28,0	0,7
TiFh	27,5	27,7	28,3	29,0	29,2	28,4	1,7

LEGENDA:

- T_{ar} média máxima por cortina

- T_{ar} média mínima por cortina

Em todos os tratamentos, nos trechos correspondentes às Cortinas 1 e 2, T_{ar} média esteve na zona recomendada por Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), enquanto nas Cortinas 4 e 5 excedeu o limite máximo estabelecido para o conforto térmico de frangos adultos. Considerando-se a média e amplitude de T_{ar} para o galpão em sua totalidade, pode-se afirmar que o tratamento TiFh foi o menos apropriado ao conforto das aves.

Segundo Cobb (2012), frente a valores elevados de temperatura do ar, a medida corretiva mais eficiente é a redução da umidade relativa a níveis inferiores a 70% e, nos casos em que isso é impossível, a manutenção de velocidades do vento mais próximas de 3,00 m.s⁻¹.

A distribuição da temperatura do ar em TiFiA, TiFisA e TiFh, simuladas à 0,30 m de distância da cama e nos cortes transversais gerados no alinhamento das cortinas de 1 a 5, está representada por cores nas Figuras 48 e 49.

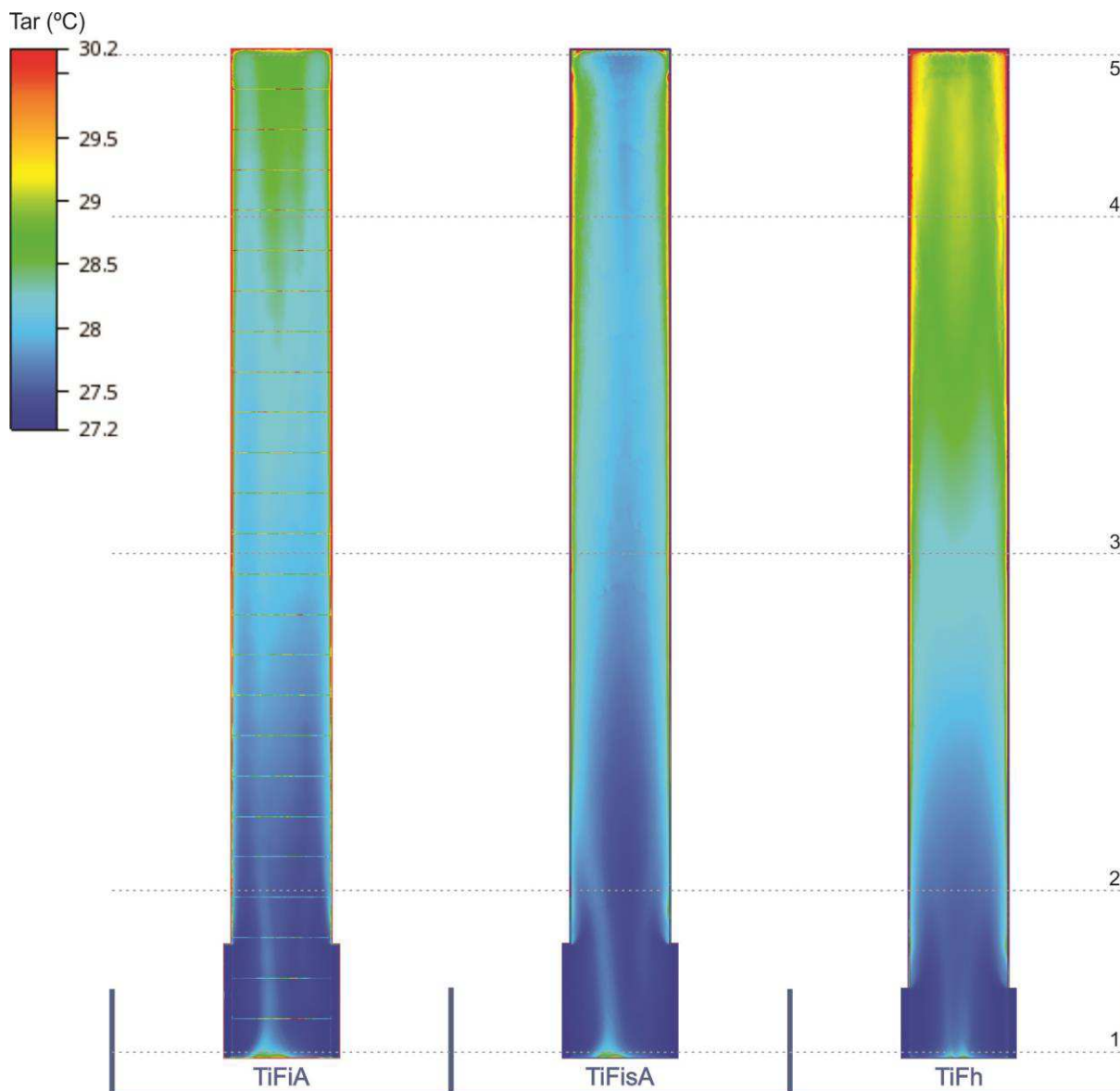


Figura 48. Simulação da temperatura do ar a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
Adaptada pela autora

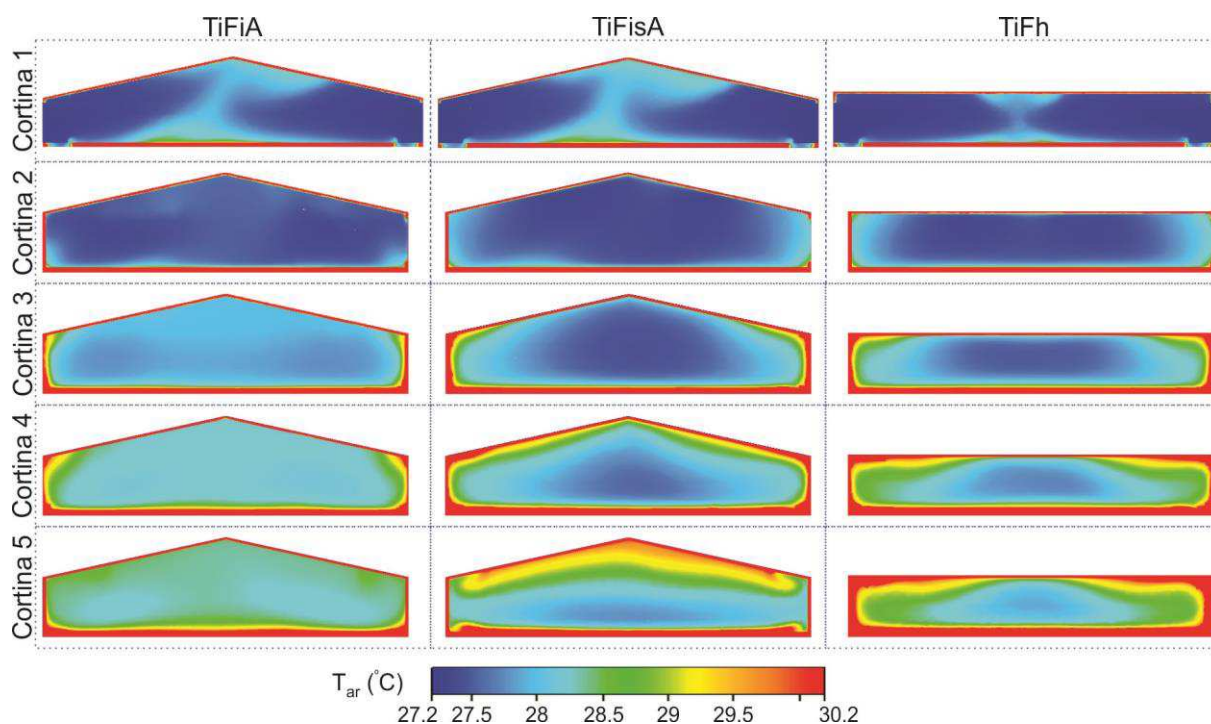


Figura 49. Simulação da temperatura do ar, por cortina, para TiFiA, TiFisA e TiFh
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
 Adaptada pela autora

A análise concomitante das seções horizontais e transversais, extraídas das simulações CFD, é de grande valia, pois evidencia a influência nociva das aletas e do forro horizontal sobre o padrão da temperatura do ar no interior das tipologias testadas. Enquanto em TiFisA ocorre a separação entre o ar quente e frio, em TiFiA o ar parece completamente misturado, isto concorreu para a majoração da temperatura do ar, nas camadas mais baixas, ao longo das Cortinas 4 e 5. Quanto ao forro inclinado, pode-se afirmar que seu uso favoreceu o acúmulo setorizado do ar quente próximo à cumeeira, promovendo a redução da T_{ar} ao nível das aves.

Em virtude dos motivos expostos acima, considerou-se o tratamento TiFisA como o mais eficiente sob a ótica da distribuição da temperatura interna do ar.

4.4.3 Distribuição da umidade relativa em TiFiA, TiFisA e TiFh

As variações da umidade relativa do ar (UR) a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFiA, TiFisA e TiFh estão representadas na Figura 50. Considerou-se o intervalo entre 50 e 70%, em conformidade com Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), como a faixa recomendada para alcance do conforto de frangos adultos.

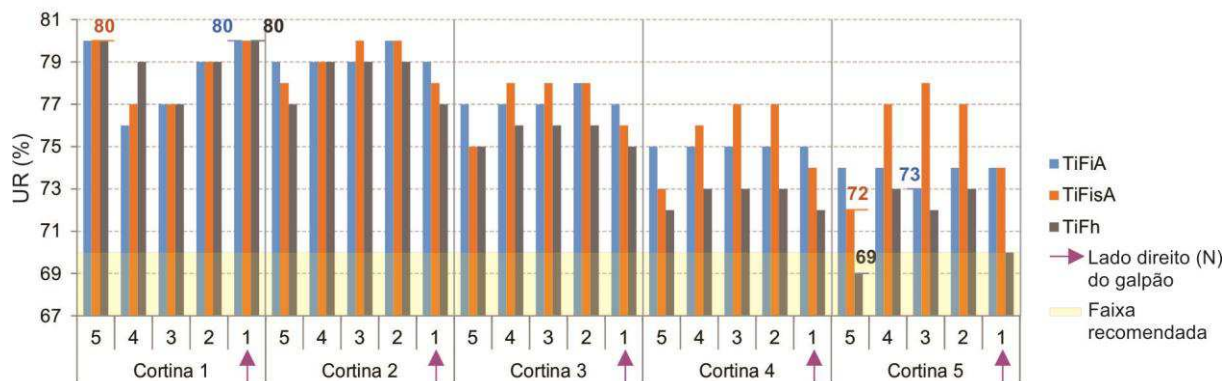


Figura 50. Variação da umidade relativa do ar simulada a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh
Fonte: Acervo da autora

Os valores pontuais máximos simulados para UR, em todos os tratamentos foram de 80%, enquanto os valores mínimos foram, em ordem crescente, de 69% em TiFh, 72% em TiFisA e 73% em TiFiA. As umidades relativas médias foram de 75,4% em TiFh, 76,7% em TiFiA e 77,1% em TiFisA.

O valor máximo de UR, recorrente em todos os tratamentos, foi registrado na Cortina 1. Justifica-se tal ocorrência, não somente pela desconsideração da nebulização interna em todas as simulações CFD, mas também porque a umidade foi inicializada com valor igual, para todos os modelos, pelas entradas de ar. Este correspondeu à média dos dados coletados na circulação dos painéis evaporativos, como descrito no subitem 3.2.2.

Os menores valores de umidade relativa nos pontos foram obtidos em TiFh, nas cortinas de 2 a 5, o que refletiu nas UR médias apresentadas na Tabela 21. Neste tratamento, também, ocorreu a maior variação entre UR máxima e mínima, denotando padrão menos uniforme de distribuição no comprimento do galpão.

Tabela 21. Valores médios de umidade relativa, por cortina e tratamento de cobertura, e amplitude da variável (ΔUR) por tratamento

Tratamento	Valores médios de UR (%)						Por tratamento	ΔUR
	Por cortina							
	1	2	3	4	5			
TiFiA	78,4	79,2	77,2	75,0	73,8	76,7	5,4	
TiFisA	78,6	79,0	77,0	75,4	75,6	77,1	3,6	
TiFh	79,0	78,2	75,6	72,6	71,4	75,4	7,6	

LEGENDA:

- UR média máxima por cortina

- UR média mínima por cortina

Em todos os arranjos de cobertura simulados, os valores dessa variável extrapolaram o limite máximo de 70% preconizado por Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010).

A distribuição da umidade relativa do ar em TiFiA, TiFisA e TiFh, simuladas à 0,30 m de distância da cama e nos cortes transversais gerados no alinhamento das cortinas de 1 a 5, está representada por cores nas Figuras 51 e 52.

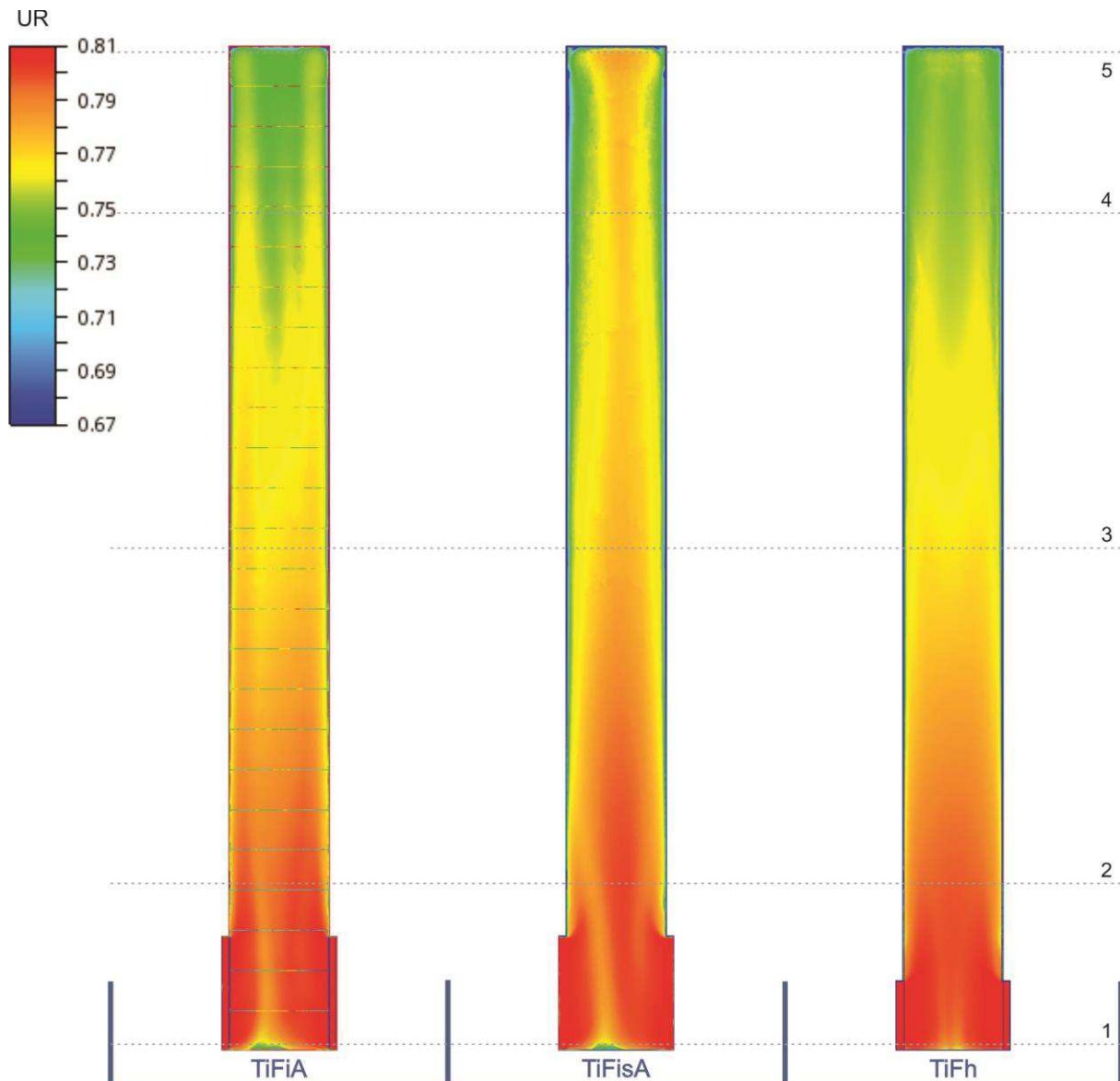


Figura 51. Simulação da umidade relativa do ar a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
Adaptada pela autora

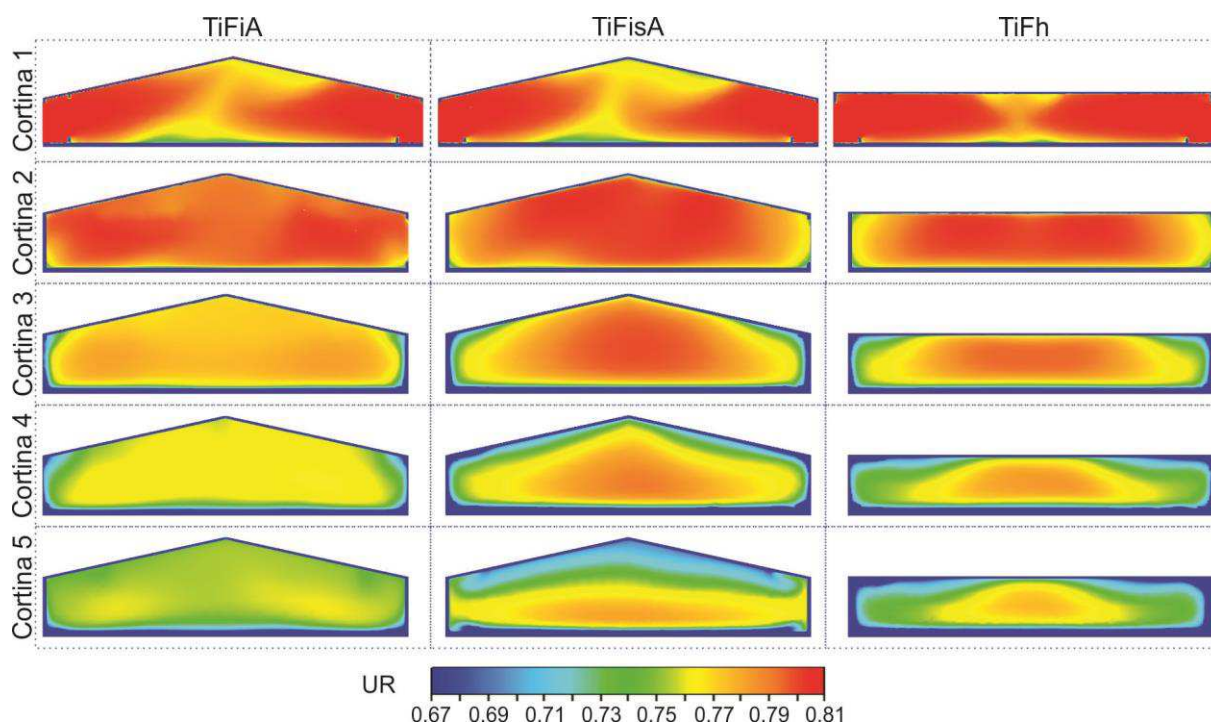


Figura 52. Simulação da umidade relativa do ar, por cortina, para TiFiA, TiFisA e TiFh
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
 Adaptada pela autora

Da análise concomitante das seções horizontais e transversais geradas no software CFD e das tabelas das médias para T_{ar} e UR, é fácil relacionar a menor umidade relativa em TiFh às suas mais elevadas temperaturas do ar. Como padrão, percebe-se a minoração gradativa da saturação do ar à medida que há afastamento dos painéis evaporativos e aproximação dos exaustores, comportamento contrário ao exibido pela temperatura do ar no mesmo tratamento. De maneira semelhante, ocorre a diminuição dos valores de UR na zona de convergência do fluxo de ar, como pode ser visto nos cortes referentes à Cortina 1, e nas proximidades dos fechamentos verticais (cortinas e paredes) e horizontais (frangos e telhado), evidenciada nos cortes para as Cortinas de 3 a 5; nestes trechos, a temperatura do ar apresentou seus valores mais elevados.

4.4.4 Distribuição da velocidade do vento em TiFiA, TiFisA e TiFh

As variações da velocidade do vento (V_v) a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFiA, TiFisA e TiFh estão representadas na Figura 53, juntamente com a faixa recomendada por Cobb (2012) para incremento no conforto de frangos

adultos. Os valores máximos de V_v foram, em ordem decrescente, de $4,3 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFiA, $3,5$ em TiFh e $3,2 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA, e os mínimos de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFh, $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA e $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFiA. De maneira geral, os valores mais elevados de velocidade do ar foram observados no tratamento TiFiA, seguido de TiFh. Apenas nas cortinas 3, 4 e 5, para os tratamentos TiFisA e TiFh, os dados de V_v simulados ficaram completamente dentro da faixa recomendada por Cobb (2012).

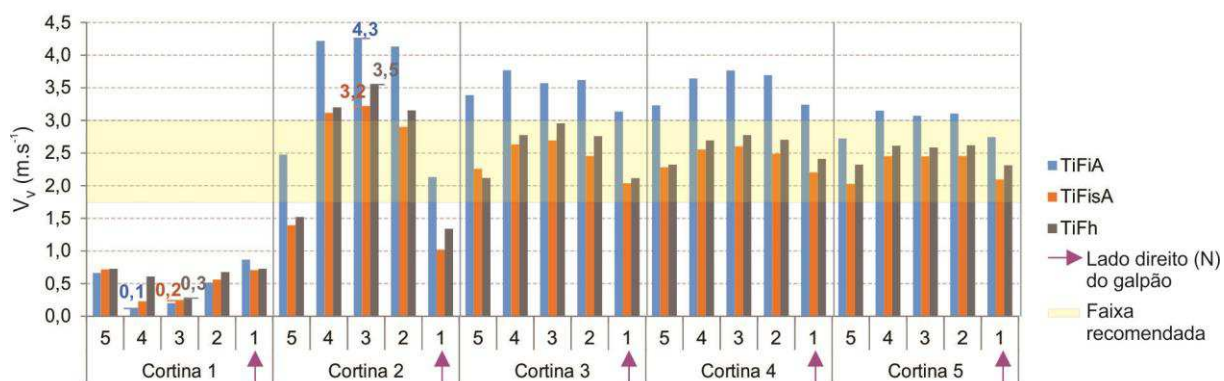


Figura 53. Variação da velocidade do vento simulada a $0,30 \text{ m}$ para TiFiA, TiFisA e TiFh
Fonte: Acervo da autora

As velocidades do vento médias por cortina e tratamento, juntamente com a amplitude de V_v por tratamento, estão registradas na Tabela 22. Valores médios mínimos por cortina ocorreram, ao longo de todo galpão, em TiFisA, enquanto os máximos, predominantemente, em TiFiA; de modo que os valores médios por tratamento foram de $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFiA, $2,2 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFh e $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA.

A menor amplitude da velocidade do vento foi encontrada para TiFisA, o que sugere maior uniformidade na distribuição dessa variável ao longo do galpão.

Tabela 22. Valores médios de velocidade do vento, por cortina e tratamento de coberta, e amplitude da variável (ΔV_v) por tratamento

Tratamento	Valores médios de V_v (m.s^{-1})					Por tratamento	ΔV_v
	Por cortina						
	1	2	3	4	5		
TiFiA	0,5	3,4	3,5	3,5	3,0	2,8	3,0
TiFisA	0,5	2,3	2,4	2,4	2,3	2,0	1,9
TiFh	0,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,2	2,0

LEGENDA:

- V_v média máxima por cortina

- V_v média mínima por cortina

O padrão do escoamento quanto ao vento, para os diferentes cenários, está representado graficamente por meio de cores e vetores nas Figuras 54 e 55. Na

primeira, constam os resultados simulados a partir de uma seção horizontal gerada a 0,30 m da cama de frango; na segunda, aqueles resultantes em cinco seções transversais alinhadas às cortinas.

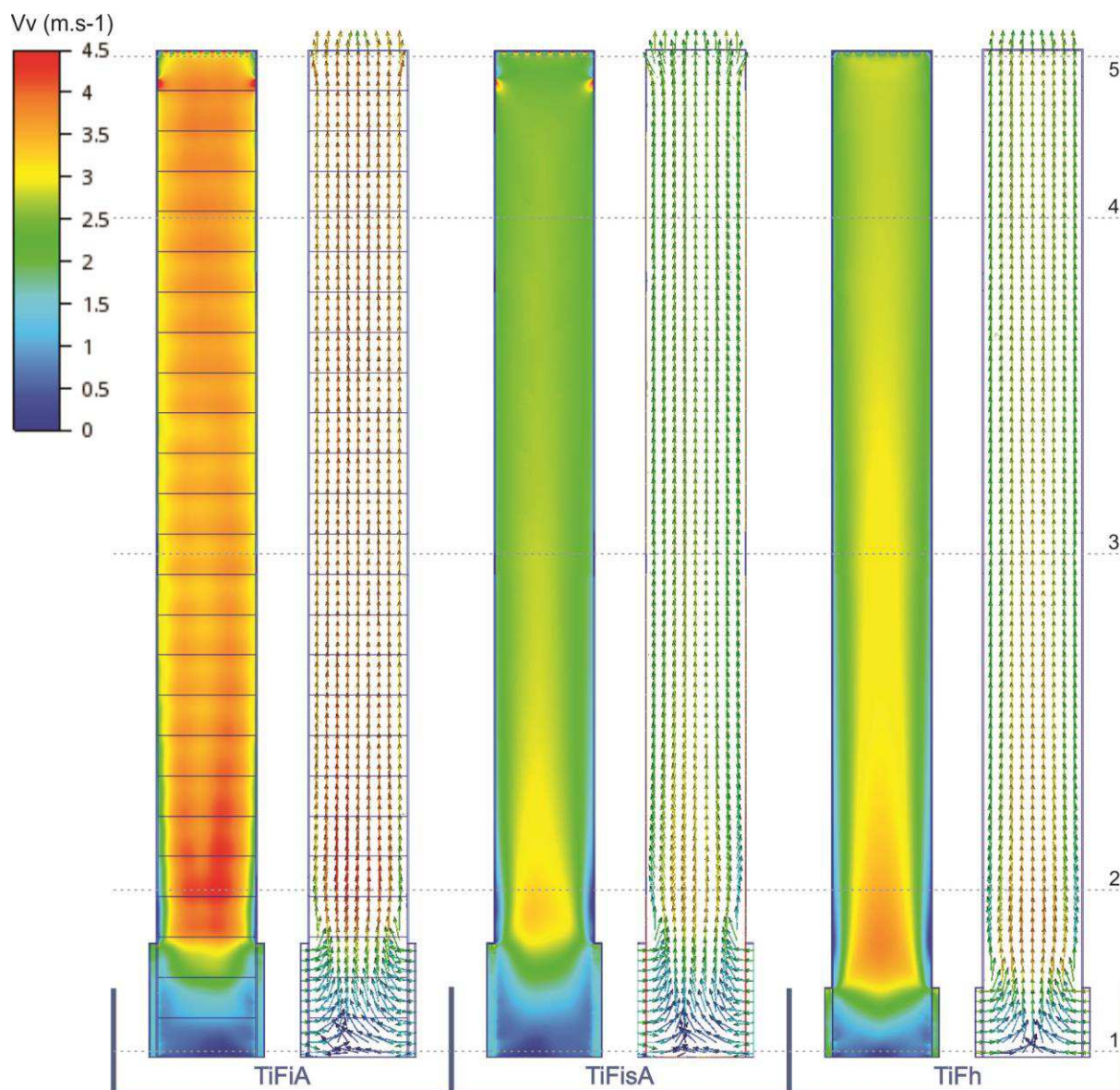


Figura 54. Simulação da velocidade do vento a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
Adaptada pela autora

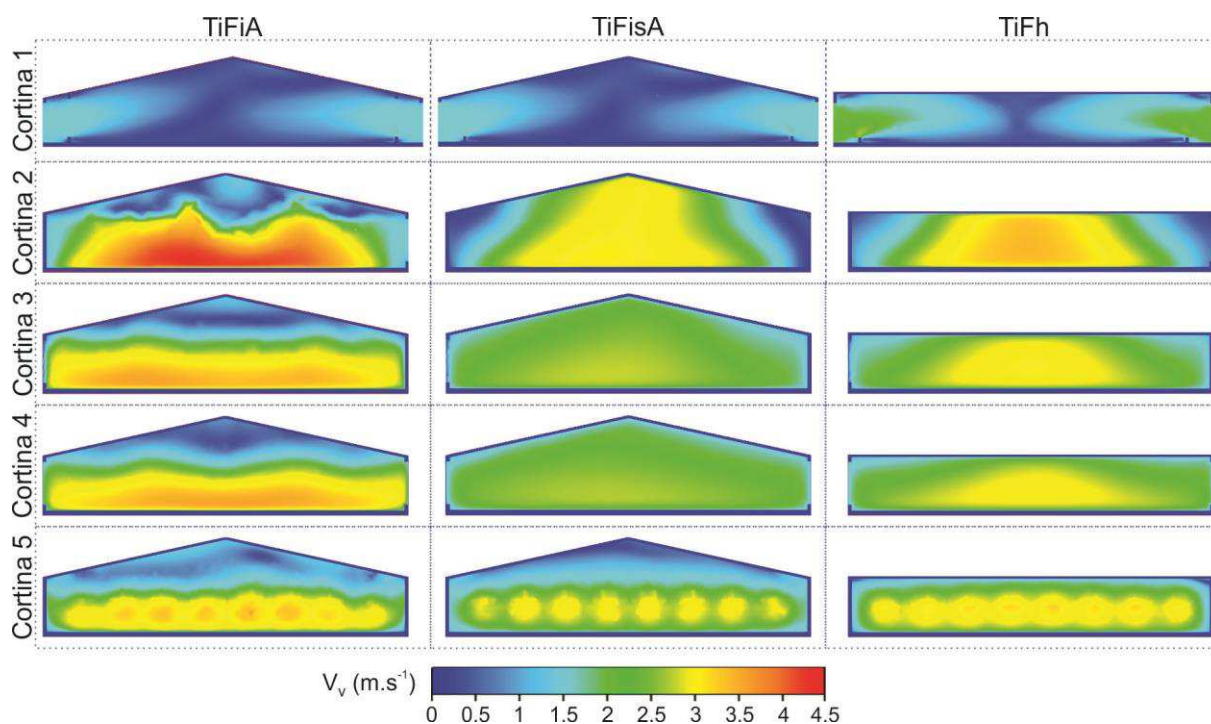


Figura 55. Simulação da velocidade do vento, por cortina, para TiFiA, TiFisA e TiFh

Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil

Adaptada pela autora

Pode-se identificar em todos os tratamentos, a partir da observação da Figura 54, que zonas com baixa troca de ar, nas quais a velocidade do vento se aproximou de $0,0 m \cdot s^{-1}$, foram registradas no trecho correspondente à Cortina 1 e nas laterais do galpão, nas proximidades da porta de acesso à circulação dos painéis evaporativos. Entretanto, em TiFiA, é possível notar a ocorrência de “zonas mortas” próximas à cumeeira em todo o galpão; em TiFisA isto também acontece, mas apenas no trecho final do galpão, bem próximo à parede Oeste.

Os valores máximos de V_v , nos três tratamentos, ocorreram na zona de convergência do fluxo de ar, próximo à Cortina 2, extrapolando o limite superior da faixa recomendada para conforto de aves em fase de terminação.

Estes resultados estão em acordo com Carvalho-Curi (2014) e Bustamante et al. (2015). Carvalho-Curi, utilizando-se de CFD, encontrou velocidades do vento mais elevadas, fora da faixa recomendada pela literatura, no trecho em que o escoamento era turbulento e velocidades quase nulas nas extremidades próximas à entrada do fluxo de ar. Bustamante et al. (2015) dividiram virtualmente um galpão avícola em cinco seções e encontraram na primeira seção, próxima às entradas de ar, mudanças bruscas na magnitude e trajetória do vento, com zonas mortas

adjacentes a zonas turbulentas onde os valores de velocidade de vento foram muito elevados; na segunda parcela, distribuição homogênea, fluxo laminar com vetores perpendiculares às saídas de ar e elevados valores de velocidade do vento quando vários exaustores estavam acionados.

A apreciação conjunta das Figuras 48 e 49, permitiu identificar um padrão de aumento da velocidade em TiFiA, assim como, relacioná-lo ao posicionamento e cadência das aletas; as seções transversais geradas para as cortinas 2, 3 e 4, neste tratamento, indicaram a contribuição destes elementos para geração de zonas de turbulência nos espaços entre elas, bem como, ao longo de seus alinhamentos inferiores. De fato, as aletas propiciaram uma partição virtual entre os volumes de ar próximos ao forro e aquele próximo à cama, criando zonas de baixa e alta pressão. Infere-se que a parcela do vento em movimento descendente, devido ao choque com as aletas, promoveu certa perturbação no escoamento laminar imediatamente abaixo, levando à elevação da velocidade do vento e da temperatura do ar na região.

Outra questão importante reporta-se à velocidade do vento na seção transversal referente à Cortina 5; notou-se que, independente do fluxo ser laminar, V_v tendeu a se elevar na medida em que se aproximou das aberturas de saída, mesmo em TiFisA, tratamento que obteve melhor uniformidade na distribuição do vento nas Cortinas 3 e 4. Este achado está em acordo com Carvalho-Curi (2014) e Bustamante et al. (2015) que encontraram trajetórias unidirecionais e maiores valores de velocidade do ar próximos aos exaustores.

Nas proximidades dos dois exaustores laterais, tanto em TiFiA quanto em TiFisA, foram registrados valores de V_v superiores à $4,5 \text{ m.s}^{-1}$; apesar disto, a partir da análise das demais seções transversais, é possível inferir que o uso concomitante dos dois não produziu efeitos na distribuição da ventilação ao longo do aviário.

4.4.5 Ambiente térmico em TiFiA, TiFisA e TiFh, segundo ITUV

As variações encontradas para ITUV a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFiA, TiFisA e TiFh estão representadas na Figura 56, juntamente com as faixas interpretativas prescritas por Tao e Xing (2003), segundo os quais

ambientes com $ITUV \leq 24$ são ditos confortáveis, enquanto com $24 < ITUV \leq 34$ sugerem certo desconforto das aves adultas alojadas.

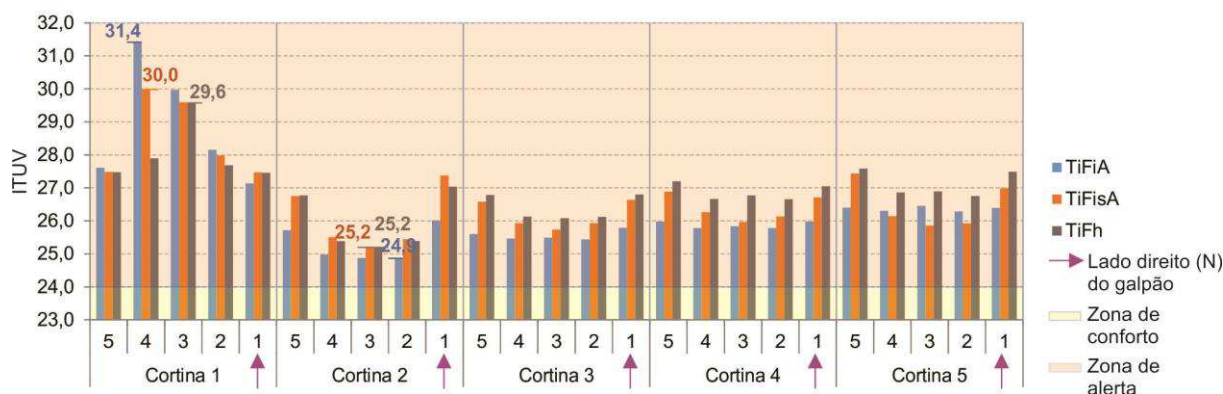


Figura 56. Variação do ITUV calculado a partir de dados simulados a 0,30 m para TiFiA, TiFisA e TiFh. Fonte: Acervo da autora

Os valores máximos calculados para ITUV foram de 31,4 em TiFiA, 30,0 em TiFisA e 29,6 em TiFh; os mínimos foram de 24,9 em TiFiA e 25,2 em TiFisA e TiFh. Segundo o ITUV, nenhum dos tratamentos testados foi capaz de promover ambiente térmico confortável para aves em terminação uma vez que todos os valores foram superiores a 24.

As médias de ITUV, por tratamento e por cortina, calculadas a partir dos dados simulados a 0,30 m de distância da cama, estão listadas na Tabela 23. De sua análise, deduz-se que, dentre os arranjos de cobertura experimentados, TiFh foi o menos apropriado, por apresentar ITUV médios mais elevados nas Cortinas 3, 4 e 5; TiFiA foi o mais adequado por apresentar, nas Cortinas 2, 3, 4 e 5, ITUV médios mais próximos de 24, valor máximo admissível para conforto de aves adultas.

Tabela 23. Valores médios de ITUV por cortina em TiFiA, TiFisA e TiFh e amplitude do índice ($\Delta ITUV$) por tratamento

Tratamento	Valores médios de ITUV					Por tratamento	$\Delta ITUV$
	Por cortina						
	1	2	3	4	5		
TiFiA	28,9	25,3	25,6	25,9	26,4	26,4	3,6
TiFisA	28,5	26,1	26,2	26,4	26,5	26,7	2,4
TiFh	28,0	26,0	26,4	26,9	27,1	26,9	2,0

LEGENDA:

- ITUV médio máximo por cortina

- ITUV médio mínimo por cortina

No entanto, vale pontuar que ITUV é um índice que, apesar de estabelecer a importância relativa entre as magnitudes da temperatura do ar, umidade relativa e

velocidade do vento sobre a sensação térmica de aves, não é capaz de prever o padrão de distribuição de cada variável no interior das instalações.

Os índices térmicos, de maneira geral, são ótimas ferramentas para inferência do quão confortável é uma instalação, porém uma caracterização mais detalhada do ambiente pode ser concebida a partir da análise simultânea, dos resultados fornecidos por índices e simulações CFD, capaz de prover dados sobre o volume da edificação em sua totalidade.

Bustamante et al. (2015) afirmam que o CFD pode ser um instrumento mais poderoso do que aqueles cujas metodologias são baseadas em medições diretas realizadas pontualmente.

Contudo, o incremento de rotinas de comando ("*Flags*"), para mapeamento de índices térmicos em função das variáveis simuladas, é uma possibilidade prevista por Autodesk CFD 2016, mas não explorada nesta pesquisa.

4.4.6 Seleção do arranjo de cobertura em função dos resultados alcançados

Em resumo, os tratamentos considerados mais eficientes tomando-se como parâmetros isolados os padrões de distribuições das variáveis e o índice térmico foram: TiFisA para T_{ar} e V_v ; TiFh para UR; e TiFiA para ITUV.

Em regiões de clima predominantemente quente, a temperatura do ar no interior dos galpões tende a extrapolar os limites de conforto e, nesses casos, a medida corretiva mais recomendada para se alcançar níveis de ITUV compatíveis com o bem-estar de frangos adultos é a manipulação dos valores de umidade relativa. Dessa forma, selecionou-se o tratamento TiFisA como o mais eficiente dentre os arranjos de cobertura testados, visto seu melhor desempenho quanto à distribuição da temperatura do ar.

4.5 Análise das simulações para arranjos de painéis evaporativos (TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L)

A escolha pela testagem de outros arranjos definidos a partir de diferentes posicionamentos de painéis evaporativos, conforme estabelecido na subseção 3.5, se deu pelos seguintes motivos:

- 1) O maior desconforto, predito por ITUV, ocorreu no trecho correspondente à Cortina 1- estima-se que em decorrência da proximidade dos painéis e da combinação entre alta umidade relativa e baixa velocidade do vento;
- 2) O trecho referente à Cortina 2 foi classificado, de acordo com ITUV, com menor grau de desconforto- entende-se, contudo, que as altas velocidades do vento e a turbulência do escoamento ocorreram em função da proximidade das entradas de ar e são ocorrências inapropriadas ao bem-estar das aves alojadas; e
- 3) Os trechos intermediários (referentes às Cortinas 3 e 4) e final (referente à Cortina 5) de todos os modelos simulados foram aqueles em que o nível de desconforto manteve-se mais uniforme e não tão superior à Cortina 2- deduz-se que o posicionamento relativo dos exaustores, ao menos quando todos estavam acionados, produziu poucos efeitos sobre o padrão da velocidade do vento ao longo de todo o volume de ar do galpão.

Em função disto, foram definidos os seguintes arranjos de painéis evaporativos combinados ao tratamento TiFisA: 1) 20% da área total das placas evaporativas localizadas à Leste, 40% à Norte e 40% à Sul - TiFisA20L e 2) 40% da área total das placas localizadas à Leste, 30% à Norte e 30% à Sul - TiFisA40L.

4.5.1 Modelos CFD para TiFisA20L e TiFisA40L

Para construção das geometrias, atribuição das condições de contorno, geração da malha de elementos finitos e configuração do mecanismo de cálculo das soluções para TiFisA20L e TiFisA40L, foram utilizados os mesmos parâmetros adotados nas simulações anteriores. Entretanto, respeitando a premissa projetual da necessidade de afastamento entre painéis evaporativos e área de alojamento das aves, em TiFisA20L e TiFisA40L, foi acrescida uma terceira circulação interligada às outras duas existentes no modelo original TiFisA. Dessa forma, o volume total final do modelo TiFisA20L foi de 8.092,73 m³, enquanto o de TiFisA40L foi de 8.077,11 m³.

Os modelos CFD finais para TiFisA20L e TiFisA40L, com as condições de contorno que lhes foram atribuídas, encontram-se ilustrados nas Figuras 57 e 58, respectivamente.

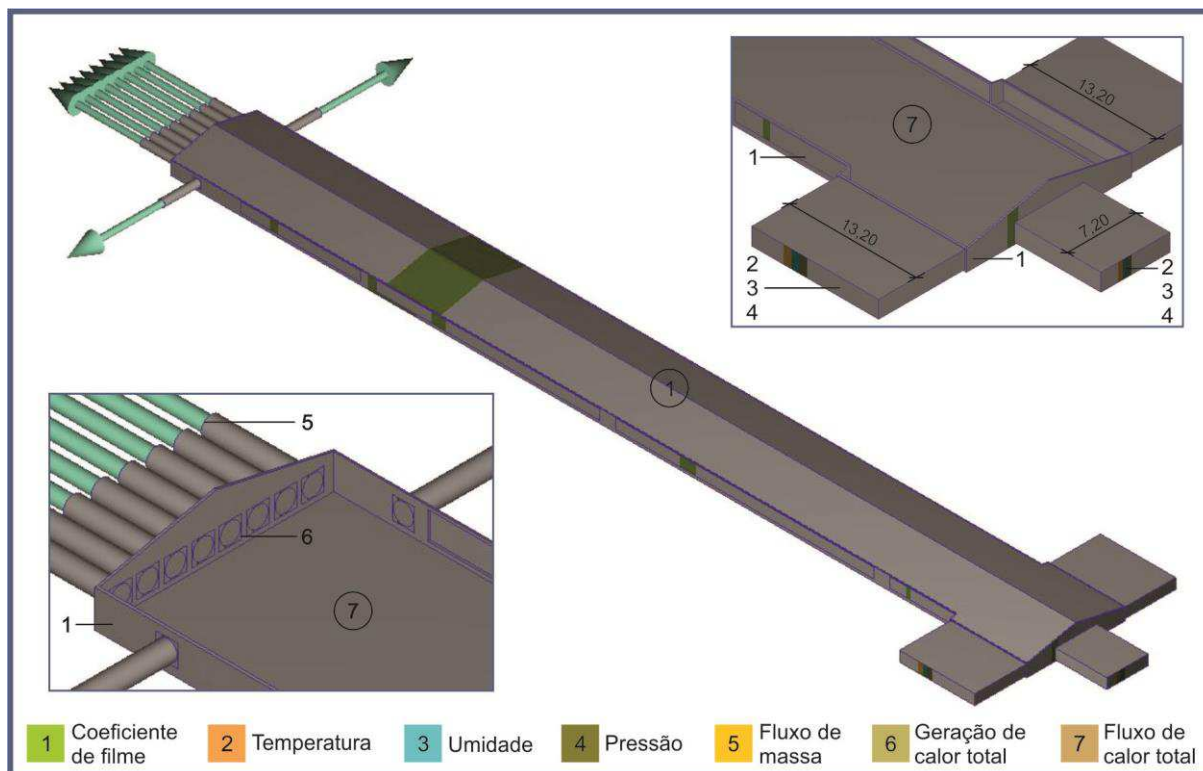


Figura 57. Modelo CFD para TiFisA20L com condições de contorno
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

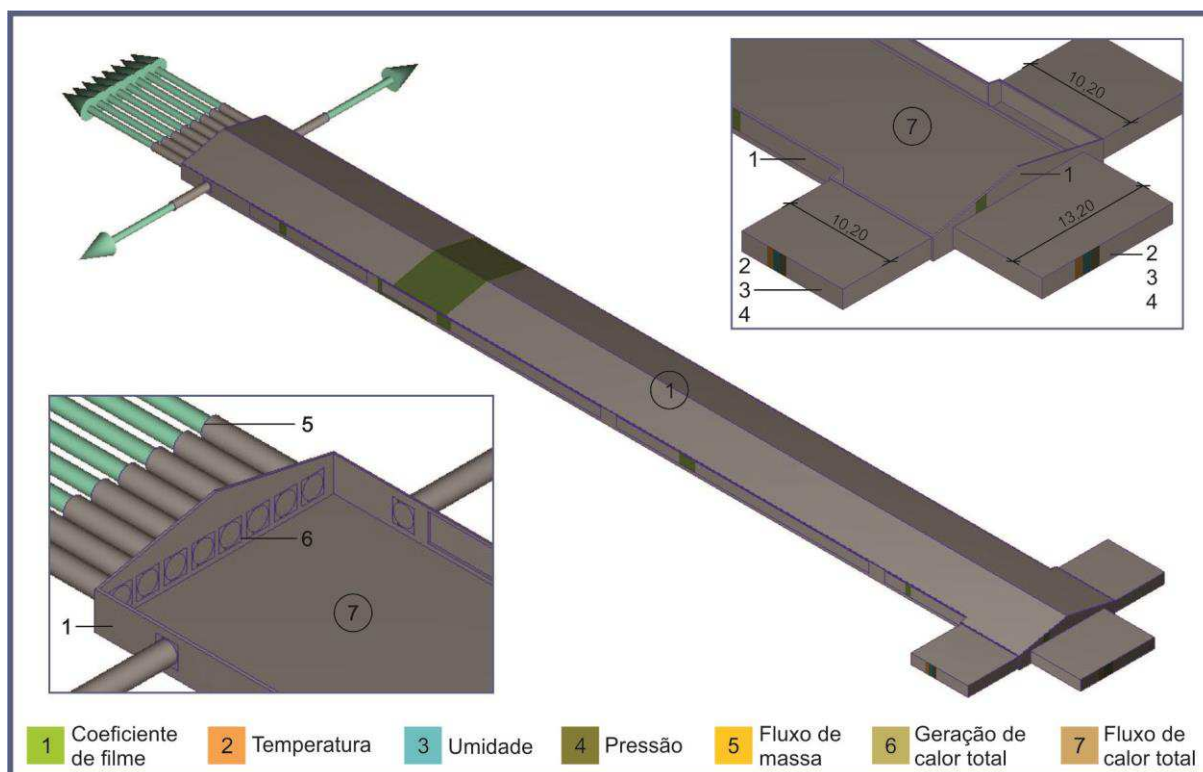


Figura 58. Modelo CFD para TiFisA40L com condições de contorno
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

A malha gerada para TiFisA20L, apresentada nas Figuras 59 a 61, foi composta de 804.546 nós (705.106 em fluidos e 99.440 em sólidos), 2.937.244 elementos (2.462.491 em fluidos e 474.753 em sólidos) com relação de aspecto nodal máxima de 11,27. O cálculo da solução necessitou de 734 iterações para atingir a convergência.

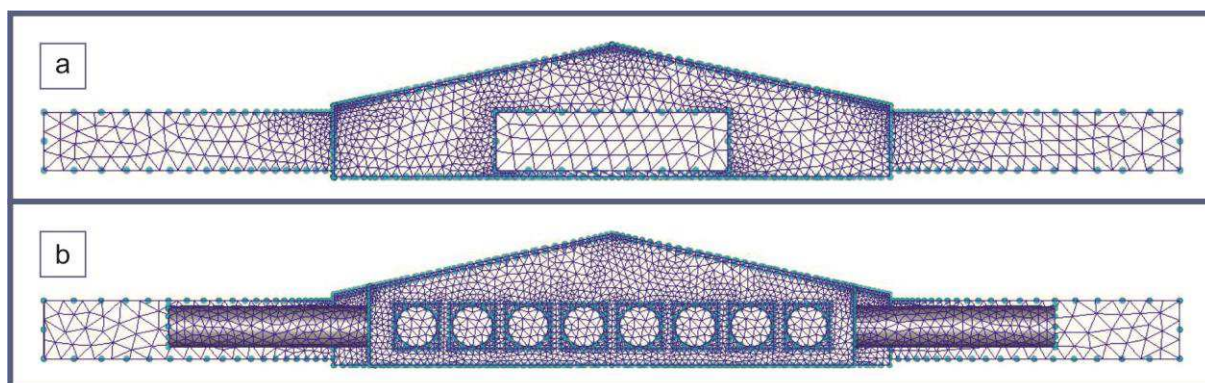


Figura 59. Distribuição da malha final para TiFisA20L nas faces Leste (a) e Oeste(b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

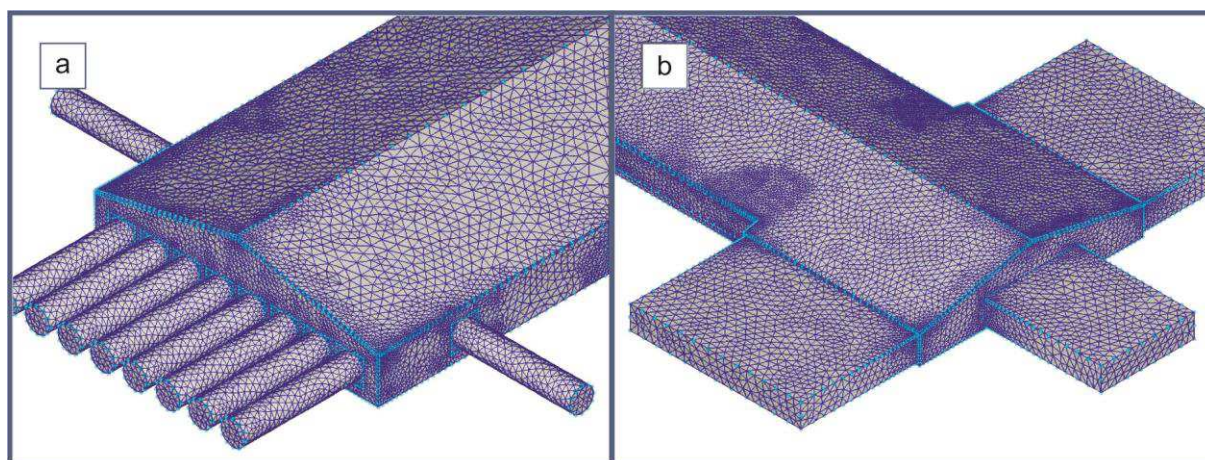


Figura 60. Detalhes da distribuição externa da malha para TiFisA20L nas saídas (a) e entradas de ar (b)
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

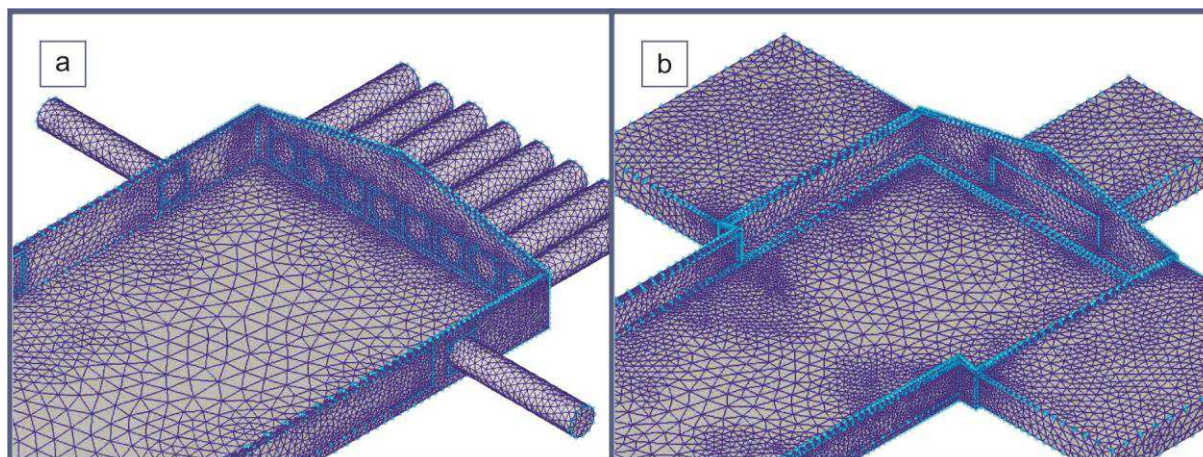


Figura 61. Detalhes da distribuição interna da malha para TiFisA20L nas saídas (a) e entradas de ar (b)

Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

A malha de elementos finitos para TiFisA40L, ilustrada pelas Figuras 62 a 64, foi composta de 855.182 nós (748.541 em fluidos e 106.641 em sólidos), 3.133.177 elementos (2.620.703 em fluidos e 512.474 em sólidos) com relação de aspecto nodal máxima de 11,68. No modelo CFD para TiFisA40L, foram necessárias 975 iterações para atingir a convergência.

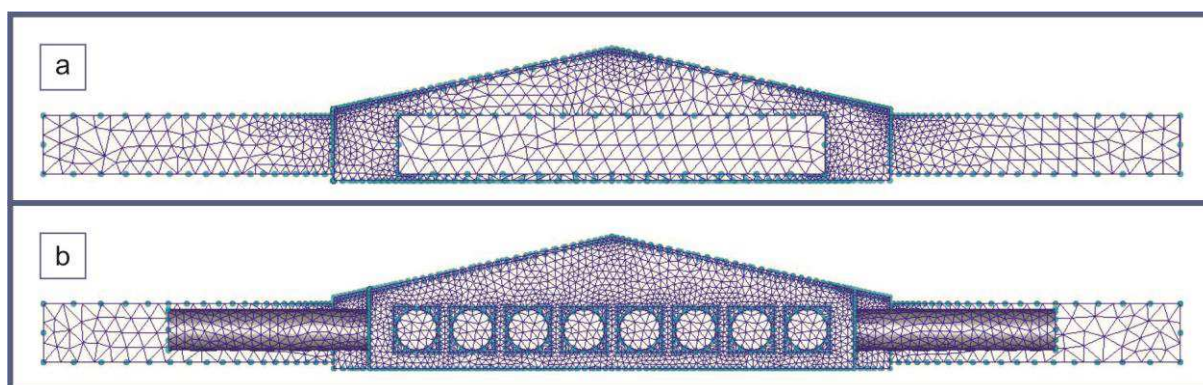


Figura 62. Distribuição da malha final para TiFisA40L nas faces Leste (a) e Oeste(b)

Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

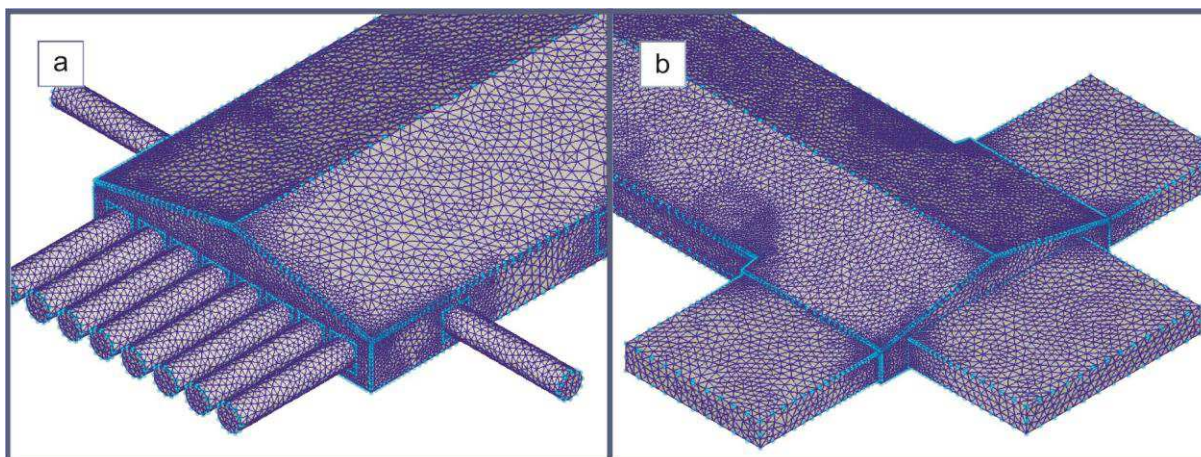


Figura 63. Detalhes da distribuição externa da malha para TiFisA40L nas saídas (a) e entradas de ar (b)

Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

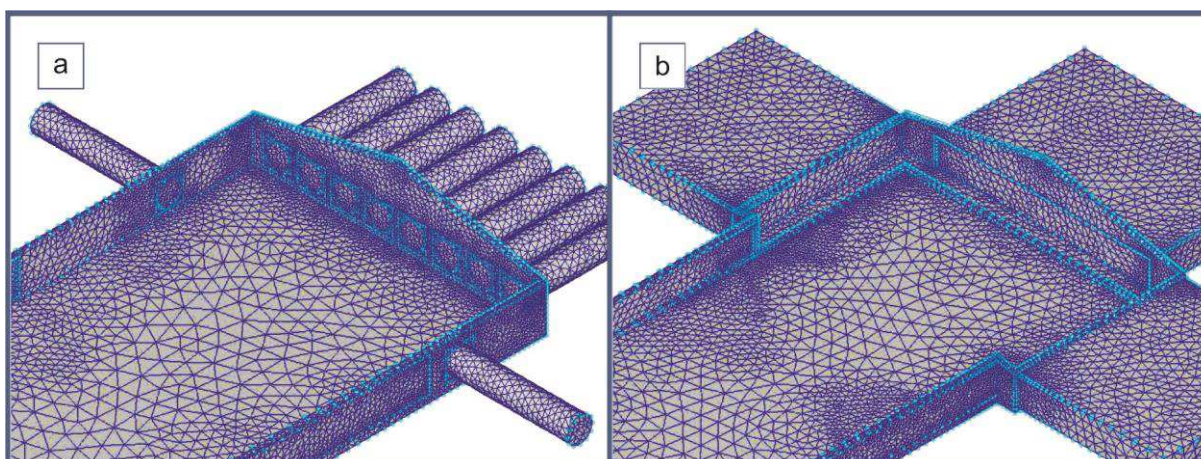


Figura 64. Detalhes da distribuição interna da malha para TiFisA40L nas saídas (a) e entradas de ar (b)

Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016 - Adaptada pela autora

De posse dos resultados das simulações de TiFisA20L e TiFisA40L, apresentados logo a seguir, procedeu-se à análise da influência da disposição dos painéis evaporativos sobre o padrão de distribuição das variáveis temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento e à caracterização do ambiente térmico por ITUV.

4.5.2 Distribuição da temperatura do ar em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L

As variações da temperatura do ar (T_{ar}) a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L estão representadas na Figura 65,

juntamente com a zona de conforto, adotada por Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), definida entre 18 e 28 °C, para frangos adultos.

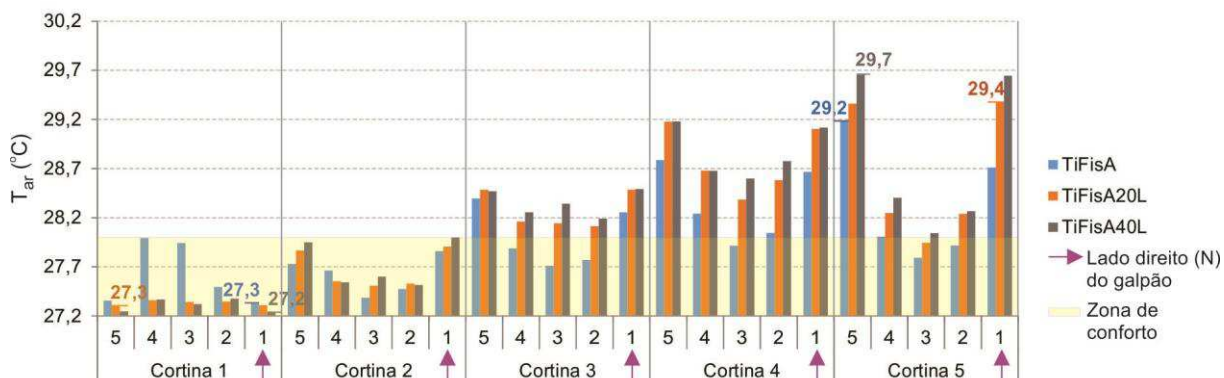


Figura 65. Variação da temperatura do ar simulada a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Acervo da autora

Os valores máximos simulados, em ordem decrescente e por tratamento foram de 29,7 °C em TiFisA40L, 29,4 °C em TiFisA20L e 29,2 °C em TiFisA; os valores mínimos foram de 27,3 °C em TiFisA e TiFisA20L e 27,2 °C em TiFisA40L. Pode-se observar que em todos os pontos da Cortina 1, as temperaturas simuladas para TiFisA foram superiores às dos demais tratamentos; o contrário pôde ser notado nas cortinas de 2 a 5, nas quais as temperaturas nos pontos, em TiFisA, foram inferiores a seus pares em TiFisA20L e TiFisA40L. Isto aconteceu pela inexistência, em TiFisA, de painel evaporativo à Leste.

Como apresentado na Tabela 24, as temperaturas médias do ar mais elevadas foram obtidas em TiFisA na Cortina 1 e em TiFisA40L nas quatro últimas cortinas; já as mínimas ocorreram na Cortina 1 em TiFisA20L e TiFisA40L, na Cortina 2 em TiFisA20L e nas Cortinas 3, 4 e 5 em TiFisA. As temperaturas médias nos galpões foram de 28,2 °C para TiFisA40L, 28,1 °C para TiFisA20L e 28,0 °C para TiFisA.

Tabela 24. Valores médios de temperatura do ar, por cortina e tratamento de painéis evaporativos, e amplitude da variável (ΔT_{ar}) por tratamento

Tratamento	Valores médios de T_{ar} ($^{\circ}C$)						ΔT_{ar}
	Por cortina					Por tratamento	
	1	2	3	4	5		
TiFisA	27,6	27,6	28,0	28,3	28,3	28,0	0,7
TiFisA20L	27,3	27,2	28,3	28,8	28,6	28,1	1,1
TiFisA40L	27,3	27,7	28,3	28,9	28,8	28,2	1,6

LEGENDA:

- T_{ar} média máxima por cortina

- T_{ar} média mínima por cortina

Da comparação entre os três tratamentos chamam atenção os valores médios da temperatura do ar nas Cortinas 1 e 2, de maneira geral, imputados à proximidade relativa entre parede/cortina e painel/cortina.

Vale ressaltar que, em TiFisA, a parede à Leste foi modelada ora em cortina flexível, ora em alvenaria de tijolos cerâmicos, materiais que nas condições térmicas simuladas, acumulam calor do exterior e liberam calor para o interior; já em TiFisA20L e TiFisA40L, parte destes materiais foi substituída por superfície evaporativa cuja temperatura atribuída foi bem menor que as internas calculadas para cortinas e alvenarias.

Outra questão é a maior proximidade entre a Cortina 1 e a parede Leste em TiFisA, quando comparada à TiFisA20L e TiFisA40L; nestes dois tratamentos, houve acréscimo de circulação entre a parede frontal e a área de alojamento das aves, em virtude de especificidades projetuais; isto implica na maior influência das trocas radiativas sobre o aumento da temperatura do ar, na Cortina 1, em TiFisA.

Justificativa semelhante aplica-se à média mais elevada de T_{ar} , na Cortina 2 em TiFisA40L, quando comparada à TiFisA20L. Deduz-se que isso ocorreu em função da maior distância entre esta cortina e as placas evaporativas laterais, visto que, em TiFisA40L, houve redução de mais de 20% do comprimento dos painéis se comparado à TiFisA20L.

Em todos os tratamentos, nos trechos correspondentes às Cortinas 1 e 2, os valores médios de T_{ar} foram pertinentes à zona de conforto recomendada por Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), enquanto nas Cortinas 4 e 5 excederam o limite máximo estabelecido para bem-estar de frangos adultos. Nas imediações da Cortina 3, apenas em TiFisA, a T_{ar} esteve dentro da zona de conforto.

Considerando-se a média global e a amplitude de T_{ar} , pode-se afirmar que o tratamento TiFisA e TiFisA40L, respectivamente, foi o mais e o menos apropriado ao conforto das aves.

A distribuição da temperatura do ar em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L, simuladas à 0,30 m de distância da cama e nos cortes transversais gerados no alinhamento das cortinas de 1 a 5, está representada por cores nas Figuras 66 e 67.

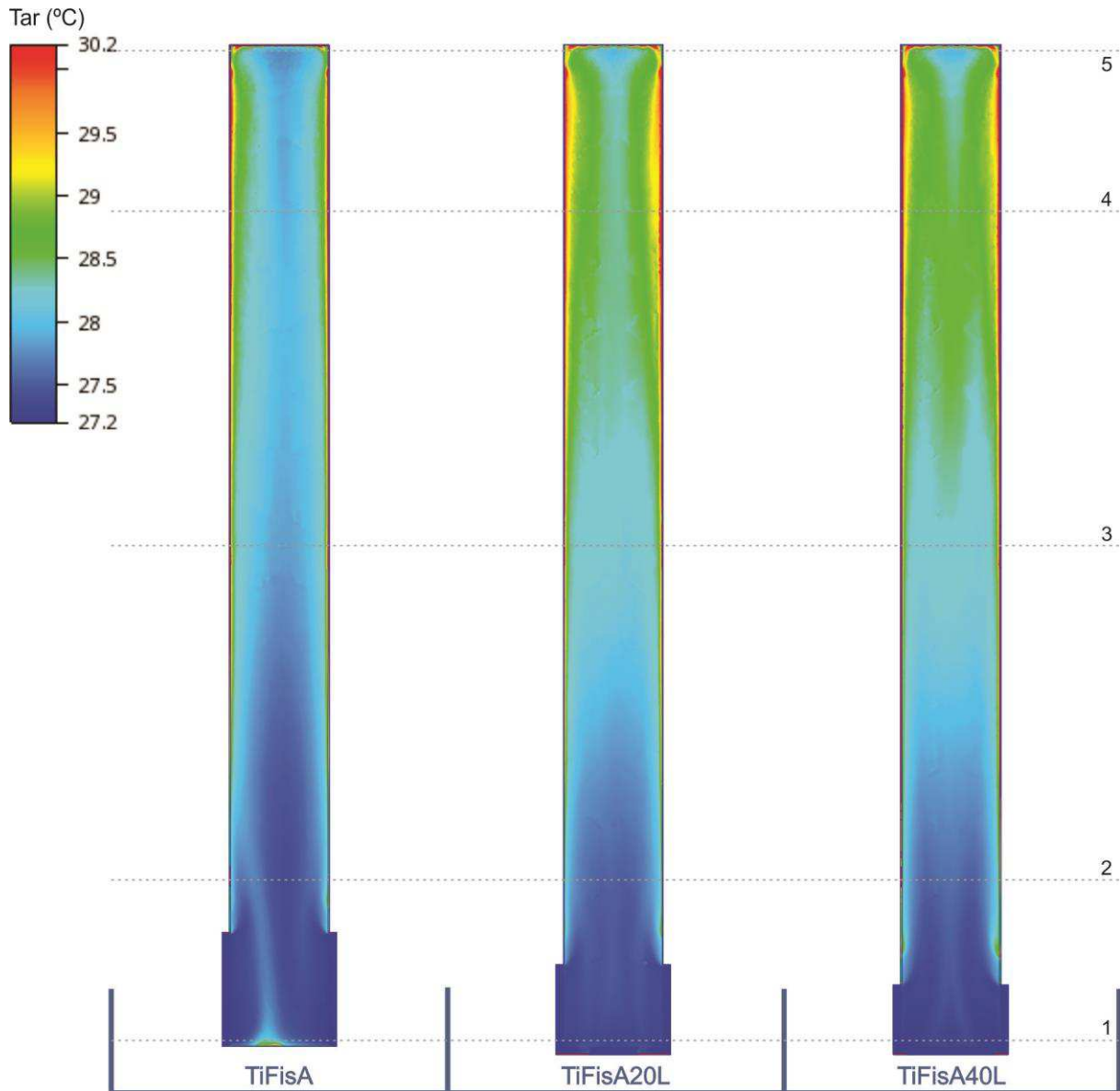


Figura 66. Simulação da temperatura do ar a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
Adaptada pela autora

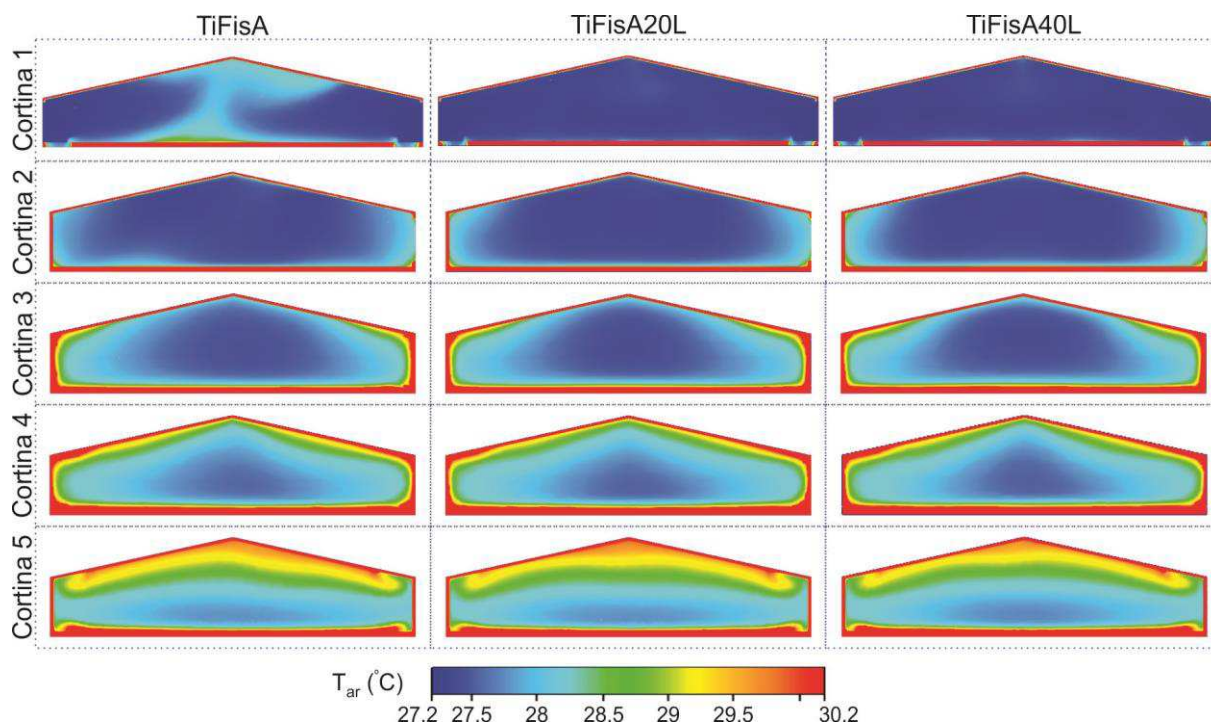


Figura 67. Simulação da temperatura do ar, por cortina, para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
 Adaptada pela autora

Na Figura 66, observa-se que a inclusão do painel evaporativo na fachada Leste, como em TiFisA20L e em TiFisA40L, contribuiu para a distribuição mais uniforme da temperatura do ar nas proximidades da parede frontal, entretanto, colaborou para a elevação da T_{ar} além dos limites pertinentes à zona de conforto para aves adultas, nas Cortinas 3, 4 e 5.

Da análise da Figura 67, percebe-se que este padrão é extrapolado para além do nível das aves, apenas no trecho correspondente à Cortina 1; comportamento sugestivo da contribuição do calor metabólico para majoração da T_{ar} , a 0,30 m de altura, na segunda metade do galpão, em TiFisA20L e TiFisA40L.

4.5.3 Distribuição da umidade relativa em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L

As variações da umidade relativa do ar (UR) a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L, estão representadas na Figura 68. Considerou-se o intervalo entre 50 e 70%, em conformidade com Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), como a faixa recomendada para alcance do conforto de frangos adultos.

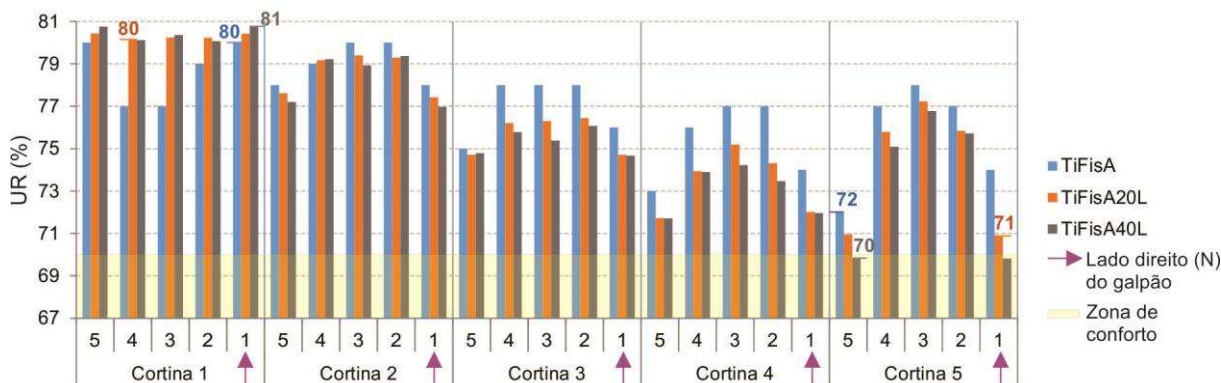


Figura 68. Variação da umidade relativa simulada a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Acervo da autora

Valores máximos simulados de umidade relativa foram encontrados na Cortina 1, sendo 81% em TiFisA40L e 80% em TiFisA e TiFisA20L, enquanto os valores mínimos, na Cortina 5, sendo 72% em TiFisA, 71% em TiFisA20L e 70% em TiFisA40L.

Na Cortina 1, em TiFisA, todos os pontos analisados apresentaram os menores valores de UR, enquanto nas cortinas subsequentes, maiores valores de UR foram simulados para este tratamento.

A umidade relativa média, em todas as cortinas e tratamentos, foi superior ao limite máximo de 70%, estabelecido por Tinôco (2001) e Baêta e Souza (2010), como consta na Tabela 25. A umidade relativa média máxima de 77,1% ocorreu em TiFisA e a média mínima de 76,1%, em TiFisA40L. A amplitude média máxima foi calculada em 7,3% para TiFisA40L, seguida de 6,9% em TiFisA20L e 3,6% em TiFisA.

Tabela 25. Valores médios de umidade relativa, por cortina e tratamento de painéis evaporativos, e amplitude da variável (ΔUR) por tratamento

Tratamento	Valores médios de UR (%)						Por tratamento	ΔUR
	Por cortina							
	1	2	3	4	5			
TiFisA	78,6	79,0	77,0	75,4	75,6	77,1	3,6	
TiFisA20L	80,3	78,6	75,7	73,4	74,1	76,4	6,9	
TiFisA40L	80,4	78,3	75,3	73,1	73,4	76,1	7,3	

LEGENDA:

- UR média máxima por cortina

- UR média mínima por cortina

A distribuição da umidade relativa do ar em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L, simuladas à 0,30 m de distância da cama e nos cortes transversais gerados no alinhamento das cortinas de 1 a 5, está representada por cores nas Figuras 69 e 70.

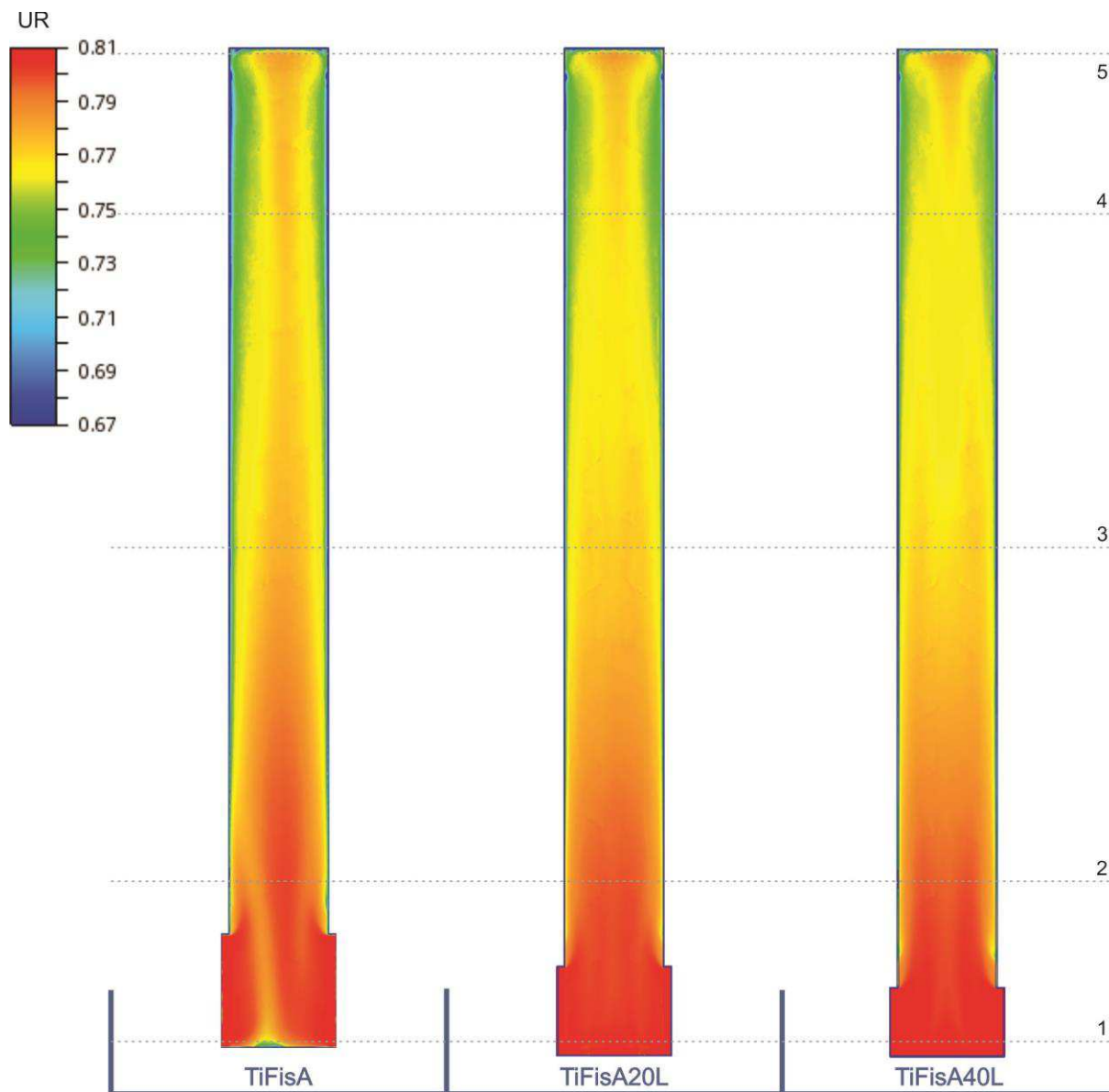


Figura 69. Simulação da umidade relativa a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
Adaptada pela autora

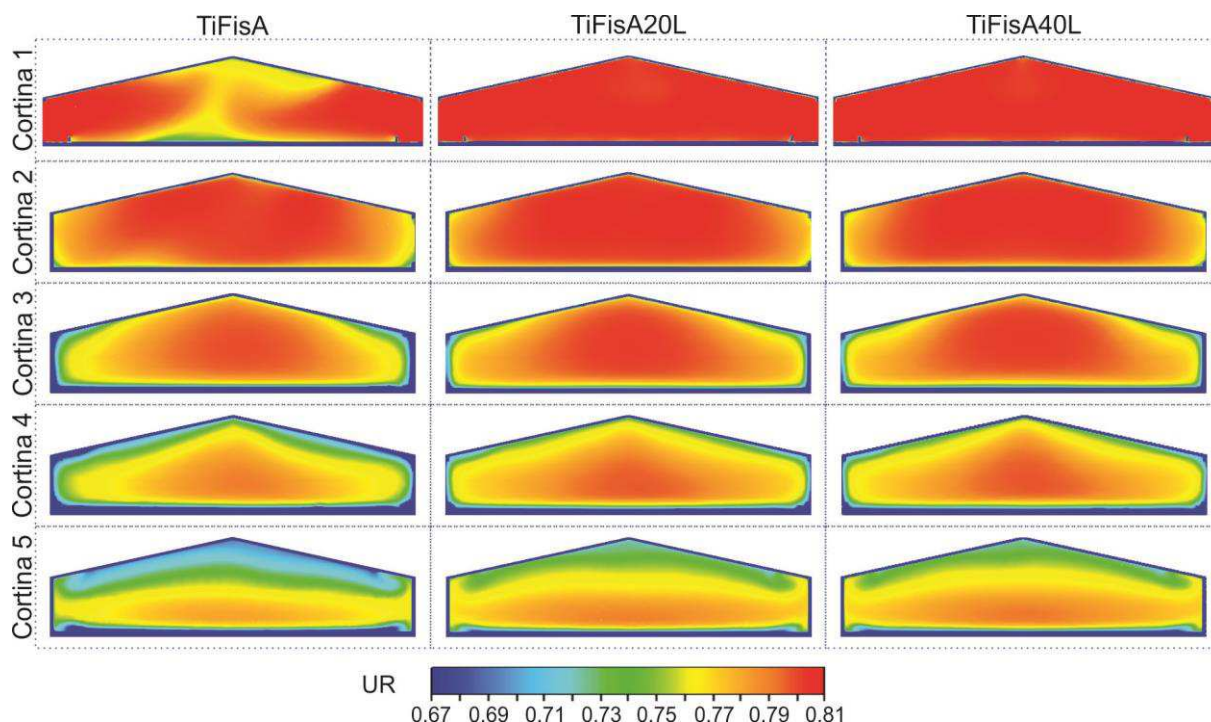


Figura 70. Simulação da umidade relativa, por cortina, para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
 Adaptada pela autora

A análise simultânea da Tabela 25, da Figura 69 e, em especial, dos cortes gerados para as Cortinas 1, 3, 4 e 5 da Figura 70 denota menor uniformidade na distribuição da umidade ao nível das aves e elevação da UR global (considerando-se todo o volume de ar) em função da inclusão de painéis evaporativos na face Leste. Nota-se que, na segunda metade final do volume total de ar do galpão, a umidade é maior em TiFisA20L e TiFisA40L, inclusive nas camadas mais altas, próximas ao forro.

4.5.4 Distribuição da velocidade do vento em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L

As variações da velocidade do vento (V_v) a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L estão representadas na Figura 71, juntamente com a faixa, entre 1,75 e 3,00 $m.s^{-1}$, recomendada por Cobb (2012) para melhoria do conforto de frangos adultos.

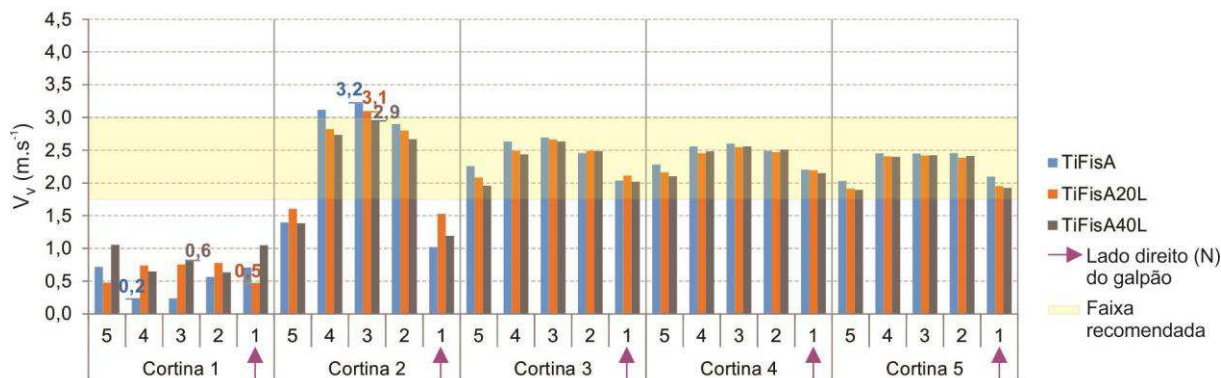


Figura 71. Variação da velocidade do vento simulada a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Acervo da autora

Os valores máximos de V_v foram, em ordem decrescente, de $3,2 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA, $3,1$ em TiFisA20L e $2,9 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA40L; os mínimos de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA40L, $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA20L e $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ em TiFisA.

Observa-se que, em todos os tratamentos, as maiores velocidades do vento ocorreram nos pontos centrais da Cortina 2, próximos à zona de escoamento turbulento, o que reforça os achados das simulações para os tratamentos de coberta.


Em especial, infere-se que os menores valores de V_v achados pontualmente na Cortina 2, em TiFisA40L, foram ocasionados pela maior distância relativa entre a cortina e a zona de turbulência, quando comparados à TiFisA e TiFisA20L.


Os valores médios da velocidade do vento, por cortina e tratamento, juntamente com a amplitude de V_v por tratamento, estão registradas na Tabela 26. A velocidade do vento média, na Cortina 1, em todos os tratamentos, foram inferiores ao limite mínimo estabelecido por Cobb (2012); no entanto, em TiFisA20L e TiFisA40L foi identificado ligeiro acréscimo na V_v quando comparado à TiFisA. Nas cortinas subsequentes, os valores médios para esta variável foram pertinentes à faixa desejada. Ao nível das aves, a velocidade do vento média no galpão de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ não sofreu alteração em função dos tratamentos estabelecidos. A menor amplitude da velocidade do vento foi encontrada para TiFisA40L, o que sugere padrão mais uniforme na distribuição dessa variável ao longo do galpão.

Tabela 26. Valores médios de velocidade do vento, por cortina e tratamento de painéis evaporativos, e amplitude da variável (ΔV_v) por tratamento

Tratamento	Valores médios de V_v ($m.s^{-1}$)					Por tratamento	ΔV_v
	Por cortina						
	1	2	3	4	5		
TiFisA	0,5	2,3	2,4	2,4	2,3	2,0	1,9
TiFisA20L	0,6	2,4	2,4	2,4	2,2	2,0	1,8
TiFisA40L	0,8	2,2	2,3	2,4	2,2	2,0	1,6

LEGENDA:

 - V_v média máxima por cortina

 - V_v média mínima por cortina

O padrão do escoamento quanto ao vento está representado graficamente por meio de cores e vetores na Figura 72, na qual constam os resultados simulados a partir de uma seção horizontal gerada a 0,30 m da cama de frango e na Figura 73 onde são apresentadas, por cores, as velocidades do vento simuladas em cinco cortes transversais alinhados às cortinas.

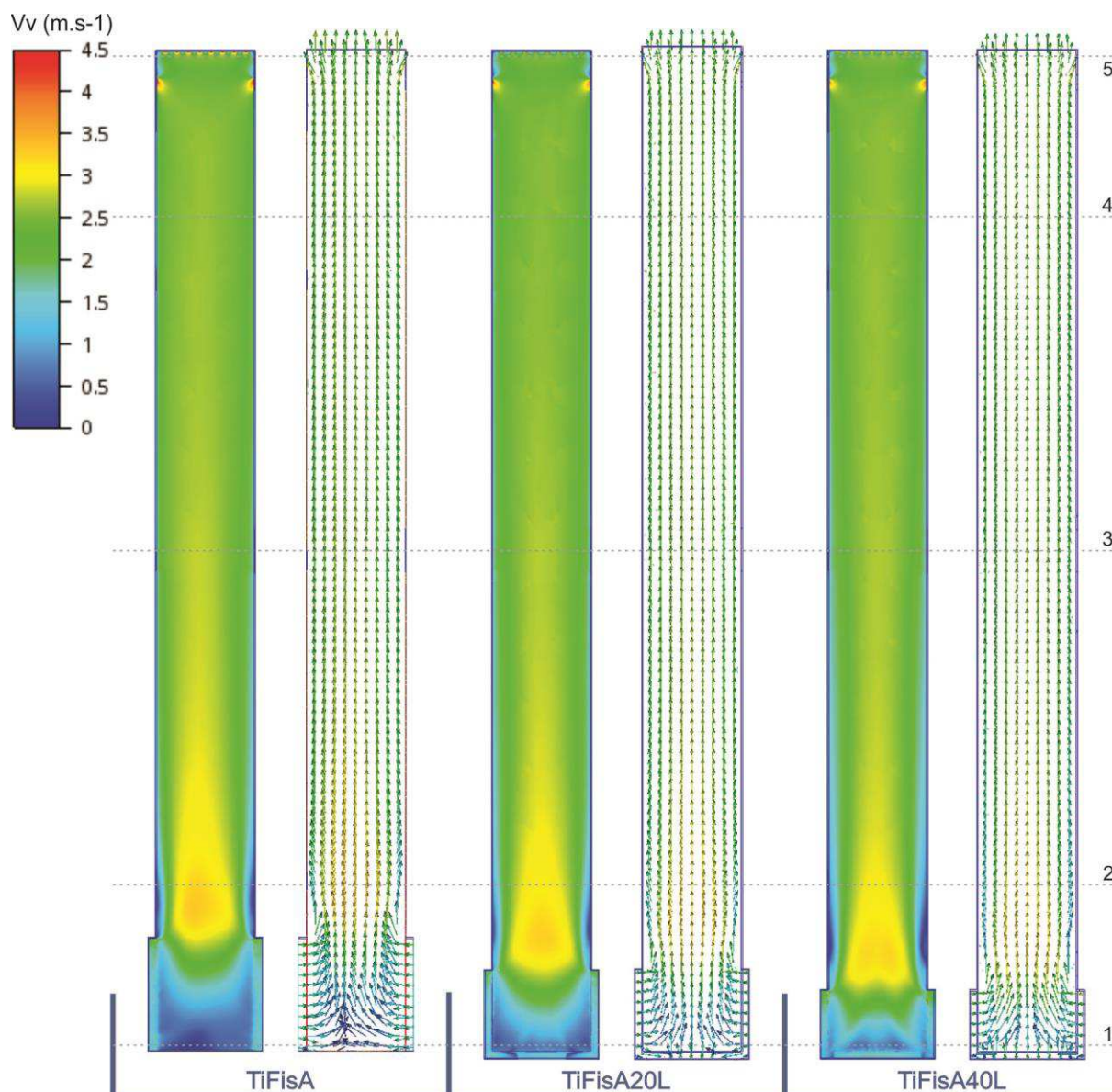


Figura 72. Simulação da velocidade do vento a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
Adaptada pela autora

As imagens simuladas no plano horizontal, apresentadas na Figura 72, corroboram as impressões tiradas a partir dos dados de amplitude média constantes da Tabela 26: dentre os tratamentos testados, TiFisA40L foi aquele que propiciou maior uniformidade na distribuição da velocidade do vento ao nível das aves, com redução da área de galpão submetida à velocidade de vento muito abaixo do intervalo desejável.

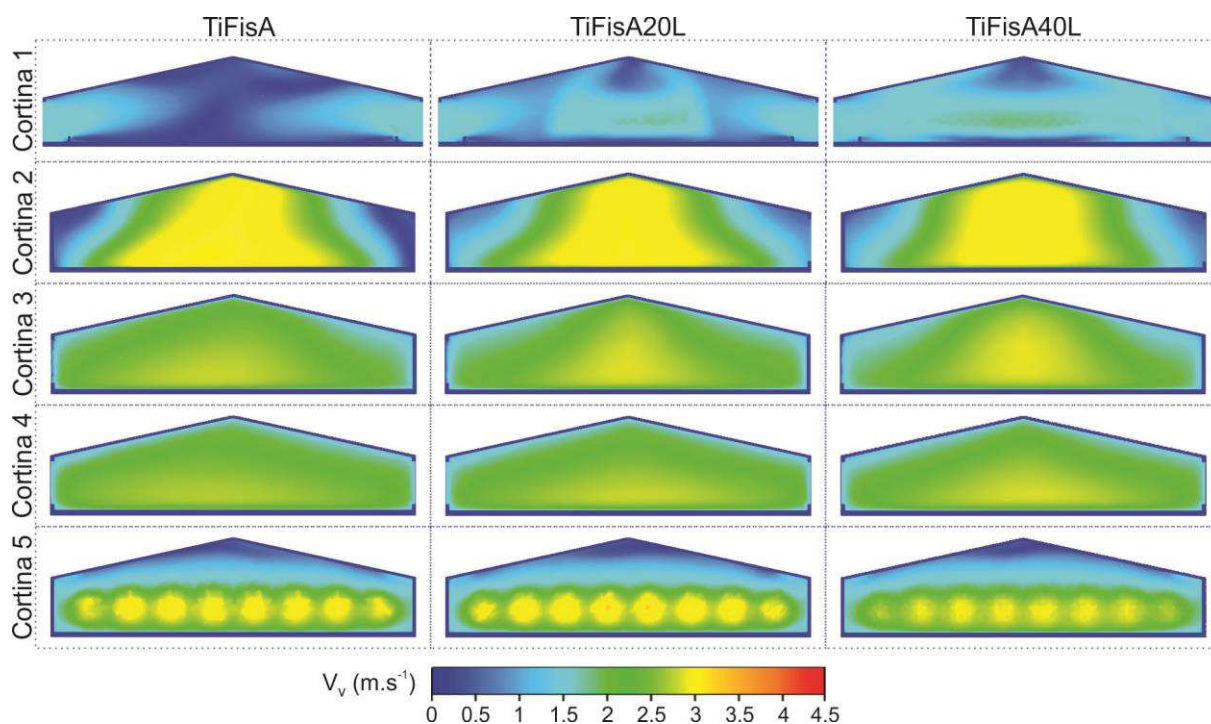


Figura 73. Simulação da velocidade do vento, por cortina, para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
 Fonte: Gerada no Autodesk CFD 2016, versão 16.2, licença estudantil
 Adaptada pela autora

Os cortes transversais gerados para a Cortina 1 permitem notar a contribuição das muretas divisórias, entre as circulações dos painéis e área de alojamento, sobre a redução da V_v próxima à cama; uma hipótese é que ao diminuir seu peitoril, elevar-se-ia a velocidade ao nível das aves.

Das seções geradas para as zonas mais críticas da instalação, nos trechos correspondentes às Cortinas 1, 2 e 5, confirma-se que a maior uniformidade identificada ao longo do comprimento, em TiFisA40L, aos 0,30 m de altura da cama, se estende também por toda a altura do galpão.

4.5.5 Ambiente térmico em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L, segundo ITUV

As variações encontradas para ITUV a 0,30 m de altura relativa à cama, simuladas para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L, juntamente com as faixas interpretativas prescritas por Tao e Xing (2003), estão representadas na Figura 74. De acordo com os autores, ambientes com $ITUV \leq 24$ são considerados confortáveis, enquanto com $24 < ITUV \leq 34$ com certo grau de desconforto para aves em terminação.

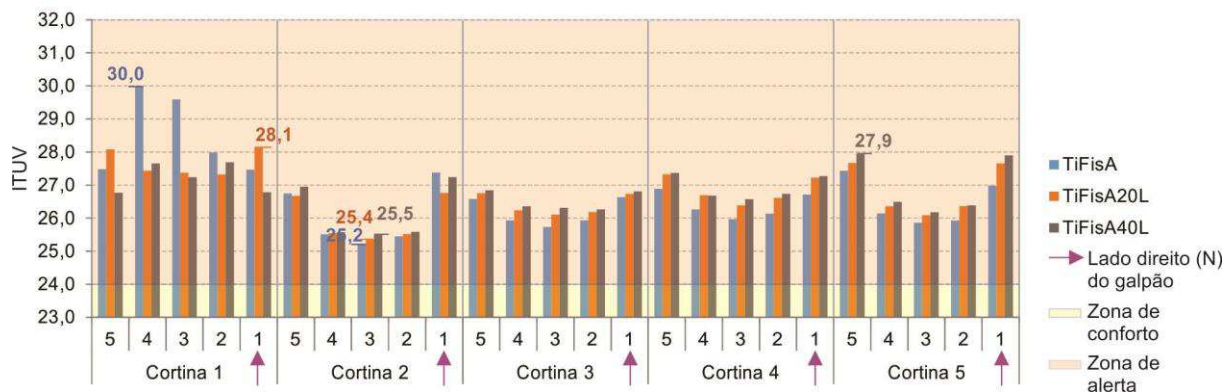


Figura 74. Variação do ITUV calculado a partir de dados simulados a 0,30 m para TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L
Fonte: Acervo da autora

Os valores máximos pontuais de ITUV foram de 30,0 em TiFisA, 28,1 em TiFisA20L, ambos na Cortina 1, e de 27,9 em TiFisA40L, na Cortina 5; os mínimos foram encontrados na Cortina 2, sendo, em ordem decrescente, iguais a 25,5 em TiFisA40L, 25,4 em TiFisA20L e 25,2 em TiFisA. Em todos os tratamentos, os valores pontuais, mínimos e máximos, extrapolaram os limites superiores estabelecidos por Tao e Xing (2003) para ambientes caracterizados como confortáveis.

As médias de ITUV, por tratamento e por cortina, calculadas a partir dos dados simulados a 0,30 m de distância da cama, estão listadas na Tabela 27. De sua análise, deduz-se que, dentre os arranjos de painéis evaporativos experimentados, TiFisA40L foi o menos apropriado, por apresentar ITUV médios mais elevados nas Cortinas 2, 3, 4 e 5; TiFisA foi o mais adequado por apresentar, nas Cortinas 3, 4 e 5, ITUV médios mais próximos de 24, valor máximo admissível para conforto de aves adultas.

Tabela 27. Valores médios de ITUV por cortina em TiFisA, TiFisA20L e TiFisA40L e amplitude do índice (Δ ITUV)

Tratamento	Valores médios de ITUV					Por tratamento	Δ ITUV
	Por cortina						
	1	2	3	4	5		
TiFisA	28,5	26,1	26,2	26,4	26,5	26,7	2,4
TiFisA20L	27,7	26,0	26,4	26,8	26,8	26,7	1,7
TiFisA40L	27,2	26,2	26,5	26,9	27,0	26,8	1,0

LEGENDA:

- ITUV médio máximo por cortina

- ITUV médio mínimo por cortina

O ITUV médio por tratamento foi igual a 26,7 em TiFisA e TiFisA20L e 26,8 em TiFisA40L. Há que se atentar, porém, que em TiFisA a amplitude de ITUV médio foi superior às calculadas para TiFisA20L e para TiFisA40L, o que demonstra inadequação de TiFisA quanto à regularidade das condições de conforto nos diversos trechos do galpão. As mais elevadas temperaturas do ar, em TiFisA, nas proximidades do oitão Leste, justificam tal comportamento.

4.5.6 Seleção do arranjo de painéis evaporativos em função dos resultados alcançados

De posse de todos os dados e imagens geradas a partir das simulações CFD, foi possível identificar claramente a interligação entre temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. De modo que, na medida em que ocorre a elevação da temperatura do ar, a umidade relativa diminui e o ar fica mais denso¹¹; como consequência, maior quantidade de energia é necessária para movimentá-lo, o que induz à redução da velocidade do vento.

O pressuposto acima justifica as mais altas temperaturas do ar, a partir da Cortina 3, em TiFisA20L e TiFisA40L. Uma vez que a umidade relativa, na metade final do galpão, foi inferior nestes tratamentos, deduz-se que o ar mais denso contribuiu para a redução da velocidade do vento. Na seção horizontal ao nível das aves, a elevação da temperatura está associada à redução da velocidade do vento e consequente diminuição das trocas convectivas. Dessa forma, confirma-se a hipótese de que o calor metabólico colaborou para majoração da T_{ar} , a 0,30 m de altura, na segunda metade do galpão, em TiFisA20L e TiFisA40L.

Em resumo, os arranjos de painéis evaporativos considerados mais eficientes, tomando-se como parâmetros isolados os padrões de distribuições das variáveis e o índice térmico, foram: TiFisA para T_{ar} e ITUV; e TiFisA40L para UR e V_v .

Por considerar que a temperatura do ar no interior de galpões avícolas é, não somente o principal fator ambiental causador de perdas na produção, mas também a variável mais sujeita à influência das condições externas, escolheu-se, dentre os arranjos testados, TiFisA como aquele mais eficiente sob a ótica do conforto térmico,

¹¹ Ao contrário do senso comum, o ar úmido é menos denso que o ar seco, visto que o ar seco é formado, basicamente, por 78% de Nitrogênio ($MM_{N_2} = 32$ u) e 21% de Oxigênio ($MM_{O_2} = 28$ u), substâncias com massa molecular superior à da água ($MM_{H_2O} = 18$ u).

quando considerado o alojamento de aves adultas, em períodos quentes, quando todos os exaustores estiveram acionados.

5 CONCLUSÕES

O diagnóstico do galpão ventilado à pressão negativa apontou para ineficiência do sistema de climatização em propiciar condições internas de conforto térmico para aves adultas alojadas, em períodos quentes, nos horários entre 12 e 14h, quando o sistema de climatização foi requisitado em sua potência máxima. O padrão identificado através da análise isolada das variáveis indica que: a) os valores de T_{ar} foram pertinentes à zona de conforto apenas no trecho correspondente aos painéis evaporativos; b) a UR esteve acima da faixa recomendada ao longo de todo o galpão; e c) os valores de V_v foram sempre menores que o $1,75 \text{ m.s}^{-1}$ nas proximidades dos painéis evaporativos e superiores a $3,0 \text{ m.s}^{-1}$ nos demais trechos.

Foi viável criar um modelo CFD, utilizando-se do software Autodesk CFD 2016 e modelo de fechamento *Standard k-ε*, para análise dos padrões internos de distribuição das variáveis T_{ar} , UR e V_v e validá-lo, desde que adotadas as premissas de regime estacionário para escoamento incompressível e turbulento. No entanto, para evitar recirculação de fluxo de ar pelas aberturas, foi imprescindível o prolongamento de todas as entradas e saídas por um comprimento mínimo igual a cinco vezes os seus raios hidráulicos.

O modelo CFD baseado no protótipo (TiFisA) foi validado, em função da semelhança entre os dados oriundos das medições diretas e aqueles resultantes das simulações. Os resultados finais indicaram: a) variações das T_{ar} medidas no galpão de $27,75 \pm 1,35 \text{ }^\circ\text{C}$ e simuladas de $27,85 \pm 0,55 \text{ }^\circ\text{C}$; b) variações das UR medidas no galpão $83\% \pm 12\%$ e simuladas de $78\% \pm 3\%$ e c) variações das V_v medidas no galpão de $2,35 \pm 1,35 \text{ m.s}^{-1}$ e simuladas de $2,50 \pm 1,50 \text{ m.s}^{-1}$.

Das simulações para os tratamentos com diferentes arranjos de cobertura, concluiu-se que: a) a presença das aletas do modelo TiFiA contribuiu para o aumento da T_{ar} e da V_v , em ambos os casos, ocasionado pela turbulência gerada nas camadas mais próximas ao forro; b) a utilização de forro horizontal em TiFh colaborou para o aumento da temperatura interna ao nível das aves, e c) TiFisA mostrou ser o tratamento mais adequado ao conforto das aves em função do padrão de distribuição da T_{ar} e da V_v ; no primeiro caso, pela segregação entre o ar quente e frio, o que proporcionou a minoração da T_{ar} nas camadas mais baixas da edificação e no segundo, pela uniformidade de V_v nas zonas intermediárias (Cortinas 3 e 4) e mais à Oeste (Cortina 5) do galpão.

Verificou-se que, a proposta de utilização do ITUV, calculado para alguns pontos do modelo, como parâmetro indicativo de conforto térmico no ambiente interno das tipologias testadas foi inadequada.

Das simulações para os tratamentos com diferentes arranjos de painéis evaporativos, concluiu-se que: a) a inclusão do painel evaporativo na fachada Leste, em TiFisA20L e TiFisA40L, contribuiu tanto para a distribuição mais uniforme da temperatura do ar nas proximidades da parede frontal quanto para a elevação da T_{ar} além dos limites pertinentes à zona de conforto para aves adultas, na metade final do galpão; b) a presença dos painéis evaporativos à Leste colaborou para diminuição das áreas em que as velocidades do vento foram inferiores ao limite recomendado; e c) a velocidade do vento média no galpão, à 0,30 m de altura da cama, não sofreu alteração em função dos tratamentos estabelecidos.

Em função do padrão de distribuição da temperatura do ar ao nível dos frangos, escolheu-se o tratamento TiFisA como aquele mais eficiente sob a ótica do conforto térmico, quando considerado o alojamento de aves adultas, em períodos quentes, quando todos os exaustores estiveram acionados.

6 PROPOSTAS PARA ESTUDOS COMPLEMENTARES

- Desenvolvimento de rotinas de comando para o Autodesk CFD, que permita o mapeamento, a partir dos dados simulados para as variáveis, para a caracterização do ambiente interno por meio de índices térmicos voltados para pesquisas pecuárias;
- Emprego da ferramenta CFD para simulação da eficiência do resfriamento por nebulizadores internos em galpões climatizados à pressão negativa, combinados ou não com painéis evaporativos;
- Simulação da influência de frestas, como as existentes nas portas de acessos principais ao galpão, sobre a eficiência do sistema de climatização do tipo túnel em pressão negativa;
- Simulação de painéis evaporativos localizados na parte inferior e ao longo de todo o galpão, como substituto à nebulização interna; e
- Simulações de arranjos arquitetônicos alternativos para ventilação à pressão negativa com posicionamento, de painéis e exaustores em ângulos, baseado em traqueias de peixe.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPA- Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual 2016**. Disponível em: <http://abpa-br.com.br/storage/files/versao_final_para_envio_digital_1925a_final_abpa_relatorio_anual_2016_portugues_web1.pdf> Acesso em: 16 dez 2016.

Abreu, P. G. Desafios da pesquisa frente aos novos sistemas de produção. **Avicultura Industrial**, v.1189, n.5, p.20-29, 2010.

Abreu, V. M. N.; Abreu, P. G. Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, p.1-14, 2011 (suplemento especial).

AUTODESK CFD 2016. **Help**. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2016/ENU/>> Acesso em: 16 dez 2016.

Baêta, F.C.; Souza, C.F. **Ambiência em edificações rurais- Conforto animal**. 2ª ed. Viçosa: UFV, 2010, 269p.

Barnwell, B.; Rossi, A. Maximização da performance em períodos quentes. **Avicultura Industrial**, v.1107, n.11, p.72-80, 2003.

Bianchi, M. V. A. A presença da ciência da construção em galpões de frangos de corte. **Avicultura Industrial**, v.1231, n.3, p.30-39, 2014.

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**, v.100, n.1, p.105-116, 2008.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. **Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro**. Brasília: SDR, 2005. 32p.

Bustamante, E.; García-Diego, F.; Calvet, S.; Estellés, F.; Beltrán, P.; Hospitaler, A.; Torres, A. G. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: the validation of

- computational fluid dynamics (CFD) in a cross mechanically ventilated broiler farm. **Energies**, n.6, p.2605-2623, 2013.
- Carvalho-Curi, T. M. R.; Moura, D. J. Ambiência de precisão na avicultura de corte: sua importância e ferramentas. **Avicultura Industrial**, v. 1231, n.3, p.40-49, 2014.
- Carvalho-Curi, T. M. R. **Avaliação do sistema de ventilação em instalações para frangos de corte através de diferentes modelagens**. Campinas: UNICAMP, 2014. 263p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- Carvalho, V. F.; Yanagi Junior, T.; Ferreira, L.; Damasceno, F. A.; Silva, E. M. P. Mapping of potential use of evaporative cooling systems in Southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.358-366, 2009.
- Curtis, S. E. **Environmental management in animal agriculture**. Iowa: The Iowa State University Press – Ames, 1983. 409p.
- DCA- DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS. **Dados Climatológicos do Estado da Paraíba**. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/clima/dadospb.htm> Acesso em: 13 jul 2015.
- Drury, L. N. Air velocity and broiler growth in diurnally cycled hot environment. **Transactions of the ASAE**, n.9, p.329-332, 1966.
- Franco, A.; Valera, D. L.; Peña, A.; Pérez, A. M. Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses. **Computers and Electronics in Agriculture**, n.76, p.218-230, 2011.
- Furtado, D. A.; Azevedo, P. V. de; Tinôco, I. F. F. Análise do conforto térmico em galpões avícolas com diferentes sistemas de condicionamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.559-564, 2003.
- Furtado, D. A.; Azevedo, P. V.; Santos Jr., R. L.; Assis, P. C. O. Parâmetros de conforto térmico para produção animal nas mesorregiões do Estado da Paraíba. In. Congresso Brasileiro

- de Meteorologia, 13, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz de Iguaçu: SBMET, 2002.
- Furtado, D. A.; Tinoco, I. F. F.; Nascimento, J. W. B. do; Leal, A. F.; Azevedo, M. A. Caracterização das Instalações avícolas na mesorregião do agreste paraibano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.831-840, 2005.
- Guerra-Galdo, E. H.; Sanz, S. C.; Barber, F.E.; López-Jiménez, P. A. CFD model for ventilation assessment in poultry houses with diferente distribution of windows. **Energy and Environment**, v.6, n.5, p.411-424, 2015.
- Hernández, R. O.; Tinôco, I. de F. F.; Saraz, J. A. O.; Rocha, K. S. O.; Garcia, L. M. G. Modelamiento del ambiente térmico y aéreo de um galpón de presión negativa tipo túnel para pollitos. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, Medellín, v.66, n.2, p.7085-7093, 2013.
- IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE- Estatística da produção pecuária**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Fasciculo_Indicadores_IBGE/abate-leite-couro-ovos_201603caderno.pdf> Acesso em: 16 dez 2016.
- IDEME- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO MUNICIPAL E ESTADUAL. **Produto interno bruto dos municípios do estado da Paraíba 2014**. Disponível em: <http://ideme.pb.gov.br/servicos/pib/nota-tecnica_pib-municipal_2014.pdf/view> Acesso em 16 dez 2016.
- Jensen, M.E.; Burman, R.D.; Allen, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332 p. (ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice, 70).
- Lima, R. V. dos S. **Modos projetuais de simulação: uso das ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura**. Natal: UFRN, 2012. 256p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- Lee, I. B.; Short, T. H. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. **Transactions of the ASAE**, v.43, n.3, p.745-753, 2009.

May, J. D.; Lott, B.D.; Simmons, J.D. The effect of air velocity on broiler performance and feed and water consumption. **Poultry Science**, n.79, p.1396-1400, 2000.

Medeiros, C. M. **Ajuste de modelos e determinação de índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte**. Viçosa: UFV, 2001. 125p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MUNTERS – Coolers & Humidifiers. Disponível em: https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/products/coolers--humidifiers/1782-celdek-7090_15_gb.pdf> Acesso em: 29 dez 2016.

Nääs, Irenilza de Alencar; Bem-estar na Avicultura: Fatos e Mitos, 08/2005, **AveWorld**, Campinas, v.3, p.32-35, 2005.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, **Mach Number**. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mach.html>> Acesso em: 25 dez 2016.

NATIONAL WEATHER SERVICE, **The Weather Calculators**. Disponível em: https://www.weather.gov/epz/wxcalc_rh Acesso em: 25 dez 2016.

Nazareno, A. C.; Pandorfi, H.; Almeida, G. L. P.; Giongo, P. R.; Pedrosa, E. M. R.; Guiseline, C. Avaliação do conforto térmico e desempenho de frangos de corte sob regime de criação diferenciado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.6, p.802-808, 2009.

Norton, T.; Grant, J.; Fallon, R.; Sun, D. W. A computational fluid dynamics study of air mixing in a naturally ventilated livestock building with different porous eave opening conditions. **Biosystems Engineering**, v.106, p.125-137, 2010.

_____. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v.103, p.78-99, 2009.

Norton, T.; Sun, D.; Grant, J. Fallon, R.; Dodd, V. Applications of computacional fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the

agricultural industry: A review. **Bioresource Technology**, n.98, p.2386-2414, 2007.

NTE- NATIONAL TRANSPORTATION LIBRARY, **Grid generation**. Disponível em: <<http://ntl.bts.gov/DOCS/ch5.html>> Acesso em: 29 jan 2017.

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) en instalaciones avícolas. **Dyna**, Medellín, v.79, n.175, p.142-149, 2012.

Silva, R. A., Evangelista-Rodrigues, A.; Aquino, I. de S.; Felix, L.P.; Mata, M. F.; Peronico, A. S. Caracterização da flora apícola do semiárido da Paraíba. **Archivos de Zootecnia**, v.57, n.220, p.427-438, 2008.

Simmons, J. D.; Lott, B. D.; May, J. D. Heat loss from broiler chickens subjected to various wind speeds and ambient temperatures. **Applied Engineering in Agriculture**, n.13 p.665-669, 1997.

Simmons, J. D.; Lott, B. D.; Miles, D. M. The effects of high-air velocity on broiler performance. **Poultry Science**, n.82, p.232-234, 2003.

Tao, X.; Xin, H. Acute synergistic effects of air temperature, humidity, and velocity on homeostasis of market-size broilers. **Agricultural and Biosystems Engineering**, v.46, n.2, p.491-497, 2003.

Tinôco, I. F. F. Avicultura industrial: novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola** [online], v.3, n.1, p.01-26, 2001.

_____. **Produção de frango de corte em alta densidade**. Viçosa: UFV- Centro de Produções Técnicas, 2009. 256p.

Tinôco, I. F. F.; Figueiredo, J. L. A.; Santos, R. C.; Silva, J. N.; Pugliesi, N. L. Porous pad used in evaporative cooling systems. **Engenharia Agrícola**, v.12, n.1, p.17-23.

Tinôco, I. F. F.; Saraz, J. A. O.; Paula, M. O.; Peixoto, R. A. F. Elaboración y evaluation de placas prefabricadas de concreto aligerado con argilla expandida para uso como coberturas de estructuras pecuarias. **Revista Facultad Nacional de Agronomia**, Medellín, v.63, p.5465-5744, 2010.

US DEPARTMENT OF ENERGY – Energy efficiency & Renewable Energy- EERE, **Building Energy Software Tools Directory**, USA.gov, 2015. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/> Acesso em: 13 jul 2015.

Vitorasso, G.; Pereira, D. F. Análise comparativa do ambiente de aviários de postura com diferentes sistemas de acondicionamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.6, p.788-794, 2009.

Welker, J. S.; Rosa, A. P.; Moura, D. J. de; Machado, L. P.; Catelan, F.; Uttpatel, R. Temperatura corporal de frangos de corte em diferentes sistemas de climatização. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.8, p.1463-1467, 2008.

Xue, H.; Qiang, Z.; Ni, J.; Baoming, L.; Zhengxiang, S.; Shumei, Z.; Yu, W. Effect of cooling pad installation on indoor airflow distribution in a tunnel-ventilated laying-hen house. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.9, n.4, p.169-177, 2016.

Young, H. D.; Freedman, R. A. **Física II - Termodinâmica e Ondas**. 12^a ed. São Paulo: Prentice Hall, 2008. 329p.