

Universidade Estadual de Maringá



CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TIAGO FRANCISCONI BORGES CAMARGO

**Determinação de Distribuição de Temperatura em Aviário Utilizando
Fluidodinâmica Computacional e Sistema de Medição com Arduino**

PEM
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica | UEM

**Maringá
2015**

TIAGO FRANCISCONI BORGES CAMARGO

DETERMINAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM
AVIÁRIO UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E
SISTEMA DE MEDIÇÃO COM ARDUINO

Dissertação apresentada Ào Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Maringá como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Ciências Térmicas.

Orientador: Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição

Co-orientador Prof. Dr. Márcio Higa

MARINGÁ

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

C172d Camargo, Tiago Francisconi Borges
Determinação de distribuição de temperatura em
aviário utilizando fluidodinâmica computacional e
sistema de medição com arduino / Tiago Francisconi
Borges Camargo. - - Maringá, 2015.
62 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Wagner André dos Santos
Conceição.

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Higa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, 2015.

1. Edificações rurais - Ambiência. 2. Construção -
Conforto ambiental. 3. Construção rural - Sistema de
ventilação. 4. Temperatura - Sistema de medição. 5.
Fluidodinâmica computacional. I. Conceição, Wagner
André dos Santos, orient. II. Higa, Marcio, co-
orient. III. Universidade Estadual de Maringá.
Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia
Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

CDD 21. ed. 631.2

MGC-001824



Este é o exemplar definitivo da Dissertação apresentada por Tiago Francisoni Borges Camargo, perante a Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 30 de junho de 2015.

COMISSÃO JULGADORA

Wagner André dos S. Conceição

Wagner André dos Santos Conceição
Presidente – PEM/UEM

Márcio Higa

Márcio Higa
Coorientador – PEM/UEM

Cid Marcos Gonçalves Andrade

Cid Marcos Gonçalves Andrade
Membro – DEQ/UEM

Mônica Ronobo Coutinho

Mônica Ronobo Coutinho
Membro – Unicentro – DEALI - Guarapuava

RESUMO

Este trabalho propôs analisar a distribuição de temperatura e velocidade do ar em um aviário utilizando a fluidodinâmica computacional e experimentalmente por meio de um sistema de medição utilizando o Arduino. Este sistema de medição foi utilizado posteriormente para validação dos dados obtidos qualitativamente e quantitativamente das simulações computacionais. Este trabalho foi realizado em uma unidade de criação de aves de corte em uma propriedade particular no Noroeste do Estado do Paraná, na cidade de Cianorte. A construção está instalada no sentido leste-oeste, com dimensões de 160 m de comprimento e 15 m de largura de seu interior. A avaliação da distribuição espacial da temperatura do ar (em graus celsius) no interior do ambiente contido foi avaliada por meio da medição com sensores termoresistivos acoplados a higrômetros capacitivos digitais instalados formando uma malha, com espaçamento de 3,0 m e 25,0 m em uma altura de 0,5 m do solo, constituindo um arranjo de 20 pontos de amostragem. A comunicação, tratamento e armazenagem de dados foram elaboradas através da criação de um sistema utilizando a plataforma Arduino e o software matemático Scilab. Buscou-se o menor custo para o desenvolvimento desse sistema com uma flexibilidade importante no uso da quantidade de sensores e o tipo do mesmo, analógico ou digital. Por meio desse sistema de medição, também foram coletadas medidas da saída e entrada de ar com sensores de temperatura e pressão, necessárias para definir condições de contorno, ou mesmo uma verificação da consistência dos dados teóricos. Além disso, para medidas de dados meteorológicos desenvolveu-se um sensor para obter a direção e velocidade em 2D do ar a 5 m de altura do solo, no qual é complementado com sensor higrômetro e barômetro instalado. Este sistema conseguiu obter dados a cada 1 minuto para somente uma leitura de cada sensor. Para fins de complementar a validação da simulação foram coletados dados utilizando um anemômetro portátil no mesmos locais de posicionamento dos sensores de amostragem de temperatura e umidade. A análise fluidodinâmica computacional foi realizada pelo pacote de código ANSYS Fluent e gerador de malha ANSYS Meshing. Com dados dos equipamentos, correlações da literatura e os dados obtidos pelas medições, utilizou-se as capacidades de modelagem do pacote CFD para obter um equacionamento e solução com a finalidade de prever a distribuição de temperatura. Estes dados foram colocados em contraponto pelo cálculo do erro entre dados simulados de medidos e visualmente por meio de perfis obtidos pelo software Scilab. Observou-se erros toleráveis para as simulações em diferentes condições de contorno empregadas em relação ao movimento do ar. Após simulação de casos com a configuração utilizada na unidade de produção e verificados os erros desses casos, a utilização do fluxo de calor como condição de contorno gerou o menor erro para a previsão da distribuição da temperatura, com isso ela foi escolhida pelo autor para simular casos de

configuração de equipamento e construção distintas da atual.

Palavras-chaves: Fluidodinâmica Computacional; Granjas de Frango; Distribuição de Temperatura; Arduino.

Abstract

In this work it has been proposed to analyze the temperature distribution in a poultry using computational fluid dynamics and experimentally using a measurement system with the Arduino. This measurement system was later used for validation of data obtained qualitatively and quantitatively of computer simulations. This work was carried out in a broiler building at a private farm in the state of Paraná Northwest in the city of Cianorte. Construction is installed on the east-west direction, with dimensions of 160 m long and 15 m wide within. The assessment of the spatial distribution of the air temperature (in degrees centigrade) within the contained environment was evaluated by measurement with thermoresistance sensors coupled to digital capacitive hygrometer installed in a grid pattern with spacing of 3.0 m and 25.0 m and height of 0.5 m above the ground, constituting an arrangement of 20 sampling points. The communication, processing and storage of data have been done by creating a system using the Arduino platform and the mathematical software Scilab. The lowest cost to develop this system with a large flexibility for use and the number of sensors of the same type, analog or digital was sought. Through this measurement system, also the input and output of air with temperature sensors and pressure measurements were necessary to set boundary conditions, or even a check on the consistency of theoretical data. Moreover, for meteorological measurements developed a sensor for the direction and speed of air in 2D to 5 m above the ground, which is complemented with hygrometer installed sensor and barometer. This system could obtain data every 1 minute for only one reading for each sensor. In addition to the purpose of the validation of simulation data were collected through a portable anemometer on the same local positioning of temperature and humidity sensors sampling. Computational fluid dynamics analysis was performed by ANSYS Fluent code package and mesh generator ANSYS Meshing. Using data from the equipment, correlations from literature and the data obtained by the measurements has been used on CFD package modeling capabilities equation and to obtain a solution with the purpose of predicting the temperature distribution. These data were placed in counterpoint by calculating the error between simulated data and measured visually through profiles obtained by the Scilab software. It was observed tolerable errors for the simulations in different boundary conditions employed

in relation to the movement of air. After the simulation cases with the configuration used on the farm and checked the error of those cases. The boundary condition used with less error was chosen by the author to simulate cases of equipment and different arrangements from the current building configuration.

Keywords: Computational Fluid Dynamics; Poultry Building; Temperature Distribution; Arduino.

SUMÁRIO

1	Introdução	3
1.1	Objetivo geral	4
1.2	Objetivos Específicos	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Controle de Temperatura na Avicultura	7
2.1.1	Sistemas de ventilação	7
2.1.2	Resfriamento Evaporativo	9
2.1.3	Umidade	10
2.1.4	Manejo de Cortinas, Nebulizadores e Placas Evaporativas na Avicultura	10
2.1.5	Fontes e Sumidouros de Energia	11
2.2	Modelagem	12
2.2.1	Método Numérico	13
2.2.2	Equacionamento	13
2.2.3	Ansys Fluent	14
2.3	Validação do modelo	15
2.4	Aquisição e Tratamento de Dados	16
2.4.1	Arduino	16
2.4.2	Scilab	17
2.4.3	Sensores	17
3	Materiais e Métodos	19
3.1	Aspectos gerais do aviário comercial	19
3.1.1	Geometria e estrutura	20
3.1.2	Especificação dos locais de medição	21
3.2	Sistema de aquisição de dados	22
3.2.1	Comunicação entre Sensor e Microcontrolador	22
3.2.2	Pressão	24
3.2.3	Velocidade do vento	25
3.2.4	Comunicação entre Microcontrolador e Computador	26
3.2.5	Armazenamento e tratamento dos dados	26
3.2.6	Velocidade do ar	27
3.2.7	Temperatura de Superfícies	28
3.3	Parâmetros do modelo	28
3.3.1	Coefficiente Convectivo	29

3.3.2	Pressão no Exaustor	29
3.3.3	Perda de carga no Evaporador	30
3.3.4	Temperatura e Umidade de Entrada	30
3.3.5	Transferência de calor do forro e paredes	31
3.4	Modelo	31
3.4.1	Malha	32
3.4.2	Modelos pré-estabelecidos	33
3.4.3	Condições de Contorno	33
3.4.3.1	Piso	33
3.4.3.2	Saída	34
3.4.3.3	Entrada	34
3.4.3.4	Laterais e forro	34
3.4.3.5	Paredes adjacentes	35
3.4.4	Solução	35
3.4.5	Pós-processamento	35
3.5	Análise do erro	35
3.6	Casos de novas propostas de configurações do sistema	36
4	Resultados	38
4.1	Dados psicrométricos medidos	38
4.1.1	Dados adquiridos pelo sistema de medição elaborado	38
4.1.2	Situação de um dia de verão	39
4.2	Produção de Energia	40
4.3	Casos de condição de contorno	41
4.3.1	Previsão CFD utilizando o coeficiente convectivo fixo na condição de contorno	41
4.3.2	Previsão CFD utilizando o fluxo de calor aplicada na condição de contorno	42
4.4	Desvios do modelo	44
4.4.1	Erros dos casos simulados	44
4.5	Análise do ambiente interno e externo	45
4.5.1	Sensores Ambientais	46
4.6	Casos de novas propostas de configurações do sistema	48
	Conclusão	50
	Sugestões para trabalhos futuros	51
	Referências	52

Anexos	56
ANEXO A Casos com novas configurações	57

Aos meus pais e irmãs.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela educação e aprendizado a mim realizado até aqui. Pelo suporte dado para o início e continuação do curso de Pós-Graduação.

Ao Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição pela orientação, amizade, sabedoria, confiança e, principalmente, pela grande oportunidade.

Ao Prof Dr. Márcio Higa pela co-orientação e suporte acadêmico.

Aos Professores do DEM , em especial o Prof. Reginaldo e Prof. Flávio que ajudaram nas ideias e resolução de problemas.

Aos funcionários do DEM pelo auxílio na pesquisa, serviços prestados e amizade.

Às secretarias de Pós-Graduação e a de Graduação pela amizade, auxílio e administração.

Ao proprietário do aviário Ajenor e ao integrado Bulla responsável que permitiram a realização deste estudo, bem como Pedro Quitério da Silva e seus familiares pela atenção prestada e possibilidade de elaborar o estudo juntamente com as atividades de criação de aves.

Aos órgãos de pesquisa CNPq pela bolsa de apoio e auxílio à pesquisa.

Em especial aos colegas de mestrado, entre eles Bruna, Carla, Juliano e Rodrigo, pela amizade e a ajuda em vários temas e dúvidas.

“A ciência explica o que é, a engenharia cria o que nunca foi.”
(Joseph E. Shigley)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Foto do aviário estudado	19
Figura 2 – Disposição das entradas e saídas em vista superior	21
Figura 3 – Locais de posicionamento dos sensores	22
Figura 4 – Coleta de dados	22
Figura 5 – Montagem de cabos e sensores	23
Figura 6 – Sensor de pressão	24
Figura 7 – Esquema para Detectar Direção do Escoamento	25
Figura 8 – Corrente do coletor <i>versus</i> Distância do sensor QRD1114	26
Figura 9 – Anemômetro Portátil	27
Figura 10 – Medidor de temperatura por infravermelho	28
Figura 11 – Desempenho do Exaustor	30
Figura 12 – Perda de carga do Evaporador	31
Figura 13 – Detalhe da malha na condição de contorno de saída	32
Figura 14 – Detalhe da malha na condição de contorno de entrada	32
Figura 15 – Detalhe da malha em corte de seção	33
Figura 16 – Histórico de dados psicométricos em 7 dias	38
Figura 17 – Perfil de Temperatura Experimental em [°C]	39
Figura 18 – Perfil de Umidade Relativa das medições em campo em [%]	39
Figura 19 – Perfil de Velocidade Experimental em [m/s]	40
Figura 20 – Perfil de Temperatura CFD x Experimental	41
Figura 21 – Perfil de Velocidade CFD x Experimental	42
Figura 22 – Perfil de Temperatura CFD x Experimental	43
Figura 23 – Perfil de Velocidade CFD x Experimental	44
Figura 24 – Pressão externa e no exaustor no período de 7 dias	46
Figura 25 – Diferencial de pressão do exaustor no período de 7 dias	46
Figura 26 – Dados de período de 16 horas indicador de velocidade do vento	47
Figura 27 – Dados de período de 16 horas da pressão externa	47
Figura 28 – Casos simulados	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desenvolvimento do frango	20
Tabela 2 – Características de Ambiência	20
Tabela 3 – Dimensões principais do aviário	20
Tabela 4 – Características do anemômetro AD-250	27
Tabela 5 – Termômetro de Superfície Infravermelho	28
Tabela 6 – Valores obtido pelas correlações	40
Tabela 7 – Erros obtidos para correlações	44
Tabela 8 – Erros obtidos para condições de contorno de saída	45
Tabela 9 – Comparações entre os casos	48

LISTA DE SÍMBOLOS

CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
x	coordenada [m]
u	componete da velocidade [m/s]
t	tempo [s]
p	pressão [Pa]
g	aceleração da gravidade [m/s^2]
c	capacidade térmica específica [$W/kg.K$]
s_T	geração ou consumo térmico [W/m^3]
T	temperatura [K]
ρ	densidade [kg/m^3]
μ	viscosidade dinâmica [$kg/m.s$]
δ	delta de Kronecker
λ	condutividade térmica [$W/m.K$]
i, j	índice de coordenada cartesiana
q''	Fluxo de Energia [W/m^2]
h	Coefficiente Convectivo [W/m^2K] ;
T_∞	Temperatura do ar [K]
T_s	Temperatura da Superfície [K]
THP	calor total produzido (<i>total heat production</i>)[W/kg] ;
M	massa corporal do indivíduo [kg]
LT	índice de luminosidade, $LT=1$ escuro
T_{db}	temperatura interna de bulbo seco [$^{\circ}C$]

$\%LHP$	Calor latente produzido em porcentagem do THP
RH	Umidade Relativa Média no interior do aviário
SHP	calor sensível produzido [W/kg] ;
$NMSE$	<i>Normalized Mean Square Error</i> (Erro Médio Quadrático Normalizado)
V_{CFD}	Valor ponto simulado
V_{md}	Valor ponto experimental
$\overline{V_{CFD}}$	Valor médio dos pontos simulados
$\overline{V_{md}}$	Valor médio dos pontos experimentais
n	Número de pontos

1 INTRODUÇÃO

As análises de ambientes confinados para produção de animais vivos, como exemplo as granjas de frango, basicamente se preocupam com o conforto térmico dos animais para aumento de produção, tendo como fatores de importância a faixa ideal e a homogeneidade da distribuição de temperatura e umidade. Aves ou qualquer animal podem estar sujeitos a variações de temperatura. A resposta desses organismos frente a essas variações é a mudança do metabolismo ou mudança de sua atividade como locomoção para lugares com temperaturas agradáveis. Isto se reflete na energia, provida pelo alimento, consumida para realizar tais mudanças. Consequentemente, há uma menor reversão alimentar para o crescimento e ganho de peso.

Equipamentos de ventilação e resfriamento são utilizados em variáveis de manipulação para o controle de temperatura no interior de aviários. Outro objetivo da ventilação nesses ambientes, além de controlar a temperatura, é retirar umidade e gases hostis para melhorar a sanidade dos animais. Neste contexto, a característica nessas análises é a busca pela economia de energia, proporcionando redução da utilização de combustíveis e eletricidade para aquecimento, resfriamento ou ventilação, e conseqüente diminuição do impacto ambiental e econômico.

Uso de equipamentos e seus arranjos são feitos para a melhora da distribuição térmica de um ambiente de produção. A estrutura de uma granja de frango e seus equipamentos são grandes e custosas, dificultando enormemente a mudança dos mesmos para uma análise experimental completa. Existe ainda, a dificuldade para realizar todos esses experimentos em uma unidade em funcionamento, destacando a extensão da estrutura e interferência na atividade dos animais. Desta maneira, uma boa alternativa é a utilização da ferramenta de método numérico conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD: *Computational Fluid Dynamics*) para obter dados do comportamento do ambiente interno frente a tentativas de novos arranjos no sistema. Uma análise experimental em conjunto com uma simulação fluidodinâmica traz a possibilidade de validar o método, e a possibilidade de entender o comportamento de um sistema existente e aplicar novos arranjos nesse sistema. (MOSTAFA et al., 2012)

Neste texto inicialmente são apresentados alguns trabalhos que têm sido conduzidos durante os últimos anos, a utilização do CFD vem crescendo por conta do avanço dos métodos computacionais no campo da pesquisa e ciência, com foco na predição do comportamento

climático de ambientes de produção de animais. Em seguida, uma análise sobre o modelo de estrutura existente é conduzida, investigando primordialmente as tecnologias empregadas para novas construções em crescimento no setor aviário. Sistemáticamente uma estrutura para análise é escolhida, bem como equipamentos utilizados nesse sistema de produção. Os fenômenos fluidodinâmicos podem ser representados por equações matemáticas, geralmente já incorporadas em para aplicação em pacotes CFD. Posteriormente é apresentada a metodologia empregada no equacionamento em conjunto com a experimental para validação da predição CFD dos resultados do modelo. Nesta mesma questão são tratados os dados para equiparação de modelos. Com os dados obtidos, os resultados são analisados e discutidos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar Metodologia de Análise Experimental e Fluidodinâmica Computacional para uma unidade de produção de frangos de corte.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desenvolver um sistema de aquisição dados e monitoramento em tempo real da temperatura e umidade dentro de um aviário, utilizando software e hardware “livres”, respectivamente Scilab e Arduino.

Utilizar a ferramenta CFD para avaliação computacional da distribuição da temperatura e velocidade do ar dentro do aviário, comparando com os resultados experimentais coletados no sistema de aquisição.

Realizar uma investigação de novas configurações da posição e do tamanho dos evaporadores dentro do aviário, buscando uma melhor distribuição de temperatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de aves de corte está preocupada em atingir o máximo de rentabilidade. Muitos avanços estão sendo feitos e percebe-se uma evolução em áreas como manejo, genética, insumos, entre outros. Nas últimas décadas surgiu a necessidade de se obter melhores resultados também através do conforto animal, investigando maneiras de melhorar o ambiente no interior de um aviário em relação a temperatura, poluição sonora e de gases nocivos. Todos esses esforços tem como objetivo reduzir o estresse do animal, contribuindo para um maior retorno financeiro ao produtor.

O conforto animal e o ambiente no qual está inserido é chamado de ambiência: Inclui-se nessa definição o bem-estar animal em relação ao ambiente e a zona de conforto térmico da espécie. Profissionais da área estão interessados em estudar ambiência para melhorar esse bem-estar do animal, buscando informações sobre a qualidade do ar, temperatura, influências acústica e lumínica. (SILVA; VIEIRA, 2010)

As aves são mais adaptadas para viver em ambientes de baixa temperatura e o estresse térmico prejudica seu desenvolvimento e temperaturas elevadas geram um menor consumo de ração. Essas temperaturas altas causam queda na produção e aumento na mortalidade. Para cada idade tem-se uma faixa adequada de temperatura, com isso, necessita-se de um controle sobre essa temperatura através de equipamentos para abaixar ou até mesmo aumentar a temperatura. (SARTOR et al., 2001)

Elaborar um melhor controle da temperatura e sua distribuição, proporciona maior produção. Torna-se importante maior coleta de informações para assim otimizar a ambiência. Fatores como temperatura, umidade e contaminantes são influenciados pela forma de ventilação.(SEO et al., 2011)

Blanes-Vidal et al. (2008) estudaram através de modelagem CFD e experimento em campo quatro casos de condições de contorno em uma granja com ventilação cruzada. Dados obtidos em experimentos de campo foram tratados e comparados com os dados gerados no CFD. Alguns erros passaram por uma abordagem estatística em uma regressão numérica, possibilitando identificar entre os casos de condições de contorno e pontos de medida fatores que influenciavam os erros. O método de testes de escore Chi-square (χ^2) ajudou a identificar a qualidade da modelagem em relação aos dados experimentais.

Seo et al. (2011) propuseram estudar o ambiente interno de uma pocilga instalada em uma região com grande variação térmica no qual o experimento se deu em uma ambiente

externo de $-2,6^{\circ}\text{C}$. Neste trabalho houve um esforço para simulação do ambiente interno com foco na ventilação, distribuição de temperatura e amônia. Foi considerado o corpo dos animais na simulação computacional fluidodinâmica. Durante as análises houve a possibilidade de melhora no conforto térmico e a economia de energia, somente pela diminuição da área das entradas de ar e aumento de velocidade. Isso proporcionou utilizar ar quente estagnado no teto da granja de porcos verificado pela análise CFD. O resultado positivo de melhora foi observado pelo aumento de atividade dos animais que estavam aglomerados anteriormente devido ao frio.

Norton et al. (2007) realizaram uma revisão sobre os trabalhos que abordavam a aplicação de modelagem CFD em sistemas de ventilação na agricultura. Os autores fazem uma breve descrição cronológica desses trabalhos em estufas, ou seja, plantação, e sobre os sistemas ambientais de criação de animais. Nesta revisão é observado que, até a data de sua publicação, os trabalhos produzidos para plantações tinham avanços em pesquisa com aplicação CFD em quantidades e qualidade maiores que os de criação animal, mostrando que há muito o que ser melhorado para alcançar um realismo dos resultados das modelagens CFD. Observam também que os códigos dos pacotes comerciais CFD e a capacidade de processamento dos computadores vem avançando tecnicamente, o que pode aumentar o realismo dos modelos. Para cada caso é necessário obter um modelo que aproveite a excelente ferramenta que é o CFD. Norton et al. (2007) menciona, ainda, que os pacotes de programas CFD estão cada vez mais capazes de simular em três dimensões. Os autores ressaltam que os códigos estão sendo construídos para obter robustez, prejudicando a precisão dos resultados. Dessa forma, os modelos devem sempre almejar a precisão sabendo a dificuldade de obtê-la adequadamente somente pelo poder dos pacotes. Esse mesmo trabalho analisa o uso dos modelos de turbulência e respectivas qualidades de resultado, concluindo que o modelo *standard- $k\epsilon$* é o mais usado, apesar de ter menos qualidade. Outros modelos devem ser escolhidos dependendo dos fenômenos envolvidos, como o efeito de pressões adversas em ambientes contidos causando escoamentos não previstos pelo modelo *standard- $k\epsilon$* .

A ventilação cruzada é o método mais antigo utilizado para controlar a temperatura e renovar o ar de aviários e pode ser chamada de sistema convencional. No final do século passado o sistema em túnel de ventilação iniciou sua expansão entre as novas construções. Com ele alguns estudos se preocuparam em verificar as variáveis cruciais para a homogeneidade da temperatura ao longo da extensão do ambiente e o comportamento do controle da temperatura desses sistemas (XIN et al., 1994). No estudo de Xin et al. (1994) conclui-se que o sistema de túnel de ventilação, apesar de mostrar um maior gradiente de temperatura ao longo da construção, seu controle de temperatura é mais eficiente, apresentando menor variação de temperatura durante as horas de um dia de verão.

A validação dos resultados da simulação é fundamental para estabelecer a precisão desses estudos usando metodologia semelhante. Segundo Norton et al. (2007) os modelos fluidodinâmicos dificilmente contém análises microscópicas, recorrendo a simplificações, parte disso para reduzir o número de cálculos. O sistema de medição que é utilizado ajuda na qualidade da validação dos resultados encontrados na simulação CFD. Há diversas maneiras de obter os valores experimentais, desde modelos semelhantes reduzidos em banhos de sal e túnel de vento, até técnicas bem utilizadas em medições em campo tradicionais e de traçador de gás. (NORTON et al., 2007)

O sistema de medição adequado para verificação da simulação de ambiente de uma granja de frango é o sistema experimental com sensores de temperatura espalhados dentro da estrutura. Apesar de se ter a dificuldade da grande extensão do ambiente, podem ser feitas medidas sistemáticas para obter parâmetros adequados e realistas do estado de energia do ambiente. Alguns trabalhos tratam desses sistemas de medidas e descrevem os pontos de interesse dentro do ambiente dos animais. Blanes-Vidal et al. (2010) descreve a construção de um sistema de medição para uma pesquisa experimental e posterior aplicação em uma validação da metodologia CFD (BLANES-VIDAL et al., 2008). No trabalho do autor alguns dos dispositivos usados podem ser citados o Módulo de Aquisição de Dados (*DAQ - Data Acquisition Card*), Computador Pessoal Portátil, Sensores de temperatura, velocidade do ar e pressão diferencial. O sistema tem possibilidade de 16 entradas analógicas, foram utilizados 7 sensores de temperatura, 5 anemômetros e 4 sensores de pressão diferencial nessas entradas.

2.1 CONTROLE DE TEMPERATURA NA AVICULTURA

Ambientes contidos são necessários para se obter proteção de intempéries climáticas, radiação direta e predadores. Apesar da proteção, ainda existe muita influência do meio externo. Podem ser citados o calor em seus modos de transferência e o escoamento de massa de ar. Quando o objetivo desses ambientes se destina a seres vivos tem-se a preocupação com o bem-estar dos mesmos, sendo necessário o controle sobre a ambiência. Os efeitos de um sistema térmico ambiental sem controle é a redução da eficiência energética através da perda de calor ou redução da ingestão de alimento.(SCOTT, 1984)

2.1.1 Sistemas de ventilação

O ar quente no interior dos ambientes são forçados a subir pelo efeito de diferença da densidade, chamado estratificação. Esse efeito gera uma separação do ar quente e do ar frio, possibilitando a melhor qualidade do ambiente nos residentes perto do chão em climas quentes, e uma ventilação natural, também atribuída como convecção natural, criada por esse

fenômeno quando existe aberturas no telhado. Construções como os hangares de aeronaves no qual tem 9-13 m de altura do teto ao chão e área de planta industrial, são ambientes com um bom aproveitamento desse efeito para ventilação natural e retirada de contaminantes .(SAiD; MACDONALD; DURRANT, 1996)

A ventilação natural pode ser aplicada em granjas de aves de corte, especialmente em localidades e períodos em que as temperaturas são baixas. Controlando os ventos laterais por meio de cortinas, pode-se obter um qualidade de ambiência de forma eficiente e de baixo custo. O problema dessa ventilação, principalmente devido ao macroclima frio que se aplica, é a perda de calor pela entrada de ar externo e a grande presença de contaminantes que permanecem enquanto o ar não se renova. Pode-se descobrir os problemas de ventilação natural em uma determinada construção com dados experimentais, posteriormente, investigar com CFD o sistema ótimo de ventilação para resolver esses problemas e, ainda, verificar por dados experimentais se a nova configuração representa o que a análise computacional predisse. (SEO et al., 2009)

A estratificação em ambientes fechados é indesejável em ambientes que são aquecidos. Isso torna granjas de frango susceptíveis a estratificação. Em aviários com aquecimento através de dutos, a diferença de temperatura entre o chão e o teto pode chegar a 10°C ou mais. (TEITEL; TANNY, 1996)

Para que aconteça a destratificação torna-se necessário o uso de ventiladores. Regiões frias são propícias a restringir a entrada de ar externo podendo ter ausência de ventilação natural adequada. Os ventiladores são utilizados de diversas formas dentro de um galpão de criação de frango, o posicionamento do ventilador perto da cumeeira levando o ar em direção de subida em espaços de 12 m no comprimento da construção tornou-se a melhor forma para a destratificação e distribuição de temperatura com menor consumo de energia.(BOON; BATTAMS, 1988)

Sistemas de ventilação podem ser por exaustão ou insuflação. Na exaustão ou pressão negativa o ar é mecanicamente extraído do interior da construção, criando um vácuo parcial. A insuflação ou pressão positiva caracteriza-se por forçar o ar externo entrar dentro do aviário. As duas maneiras têm o objetivo de criar uma diferença de pressão proporcionando a passagem do ar por aberturas para dentro ou para fora. Utilizam dois tipos de ventiladores, o axial e o centrífugo, sendo o axial mais silencioso. (VENTURA, 1998)

Há ainda um sistema de ventilação de ar forçada que pode-se dizer que em trabalhos são chamados de Ventilação Convencional. Segundo Corría (2001), constitui de ventiladores pendurados ao longo do interior do aviário. É um complemento da ventilação natural externa, no qual deve-ser ter cuidado para não posicionar o ventilador contra os ventos abaixando

sua eficiência. Este sistema está em decadência com o surgimento do Túnel de Ventilação e Ventilação Cruzada em regiões temperadas e quentes. Esses sistemas de ventilação forçada proporcionam uma alta densidade de aves com até 40 kg de *carne/m²*, proporcionando um melhor custo/benefício. Observando essa tendência, infere-se que há um limite no custo da climatização, pois, dependendo do custo de uma nova instalação de tamanho reduzido frente a um sistema de ventilação e resfriamento de alto custo e ótimo, deve-se ser analisado o aumento da área de produção.

Sistema de ventilação cruzada ou lateral trata-se do posicionamento dos ventiladores para que ocorra o escoamento ao longo da largura da estrutura, os ventiladores ou exaustores podem ser colocados lado a lado em uma das laterais. As cortinas devem estar abertas para o funcionamento do sistema. (ZANOLLA et al., 1999)

Ventilação em túnel é uma forma do qual ventiladores ou exaustores estão em uma extremidade e a abertura em outra, formando assim um "túnel" em que o ar flui ao longo da granja de frango com uma velocidade relativamente alta. (CORRÍA, 2001)

No sistema de túnel os ventiladores podem ser dispostos de diversas formas, entre elas, pode ser utilizado a ventilação forçada de ventiladores pendurados ao longo da construção, com as aberturas nas extremidades proporcionam o efeito de túnel. A insuflação em uma extremidade e abertura em outra também proporciona esse efeito. O sistema mais utilizado na avicultura brasileira é o de túnel por pressão negativa, no qual exaustores em uma extremidade succionam o ar de dentro da construção, e caso haja somente abertura na parte oposta forma-se então um corredor de vento. (MENEGALI, 2005)

Ventilação forçada é amplamente utilizada em aviários, útil para mistura e destratificação, além de ser o principal recurso em sistemas de ventilação em regiões e períodos quentes e amenos. A ventilação de aviários em climas temperados e quentes devem ser equipados com sistemas de ventilação que controle a temperatura, arranjos diversos de ventiladores/exaustores podem ser feitos para atender os limites do bem-estar animal. Variáveis como nível tecnológico, poder de investimento, posição climática da região a ser aplicada, espécie/raça animal são fatores que influenciam o tipo de construção e sistema de controle ambiental.

2.1.2 Resfriamento Evaporativo

Novas construções na região do estudo estão utilizando o sistema de Ventilação em Túnel, o sistema favorece a distribuição mais uniforme de velocidades do ar no interior do aviário. Quando utilizado em conjunto com placas evaporativas é um sistema de controle eficiente de temperatura e umidade. Esses equipamentos caracterizam-se como elementos

porosos feitos de argila ou celulose, capaz de umidificar o ar que o atravessa. (CORRÍA, 2001)

2.1.3 Umidade

O aumento da umidade contribui para a dificuldade das aves de suportar o calor devido a evaporação por vias respiratórias, que gera um aumento da atividade respiratória, induzindo a ave a ingerir mais água e aumento de urina, resultando assim em uma umidade maior na cama e no ambiente.(MEDEIROS, 2001)

A umidade relativa no interior de um ambiente contido é inversamente relacionado á temperatura, mínima durante o dia e máxima entre as horas da noite.

A cama de frango é uma camada de palha ou cavaco de madeira para absorção dejetos. É necessário retirar umidade da cama, pois a cama úmida aumenta a multiplicação de bactérias realizando um processo de fermentação, ou seja, uma reação exotérmica contribuidora de carga térmica e sendo propício para multiplicação de doenças.

Os nebulizadores e placas evaporativas são equipamentos utilizados para resfriar o ar mediante a mudança do estado psicrométrico para maior umidade e menor temperatura, o calor para vaporização de uma porção de água em contato com o ar é cedido pelo calor sensível do ar, e nesse processo nenhuma energia é transferida caso o sistema ar-água seja fechado, mantendo a entalpia constante.(FURLAN, 2001)

2.1.4 Manejo de Cortinas, Nebulizadores e Placas Evaporativas na Avicultura

As cortinas são barreiras nos períodos de inverno e no período de verão são utilizadas no controle da temperatura. O sistema ventilação tipo túnel utiliza cortinas laterais para que haja vedação do ambiente externo, porém, possibilita abertura gradual similares nas duas laterais, ajustando de acordo com o manejo.(ZANOLLA et al., 1999)

No manejo descrito por Zanolla et al. (1999), com as cortinas abertas, os ventiladores ligavam quando atingia-se 25 °C, limite superior do conforto térmico de aves adultas. As cortinas são fechadas ao atingir 29 °C e a nebulização ligada até que a umidade fosse igual ou inferior a 80%, máximo desejável para o ambiente das aves, após esse valor as cortinas são abertas e nebulizadores desligados.

Usando ventilação natural pode-se usar as cortinas de modo a aproveitar o efeito de termossifão, as cortinas são abertas na parte superior aproximadamente 0,2 m (VENTURA, 1998) e 0,3 m (CORRÍA, 2001) para que o ar interno saia, proporcionando a ventilação.

Os termos Ventilação mínima são característicos de sistemas sempre fechados. As cortinas seguem fechadas durante todo período de desenvolvimento. Esses sistemas almejam controlar a luminosidade, além da temperatura, utilizando cortinas que atravessam pouca luz como o sistema *Blue House/ Green House* ou sistema *Dark House* com nenhuma incidência de luz solar para dentro do ambiente.

2.1.5 Fontes e Sumidouros de Energia

Pode-se determinar o calor produzido pelos frangos através da massa pela Equação 2.1 sem ajustes, ou pela Equação 2.2 ajustada para as condições de ambiência, sendo essas a luminosidade e temperatura, (XIN et al., 2001):

$$THP = 9.974 \times M^{-0.46} \quad (2.1)$$

onde:

THP - calor total produzido (*total heat production*)[W/kg] ;

M - massa corporal do indivíduo [kg]

$$THP = 9.974 \times M^{-0.466} \times e^{(-1.727 - 0.1969LT + 0.4066T_{db} - 0.00983T_{db}^2)} \quad (2.2)$$

LT - índice de luminosidade, $LT=1$ escuro

T_{db} - temperatura interna de bulbo seco [°C]

Outras relações também são utilizadas com objetivo de comparação e verificação com os dados de campo pela Equação 2.3 (XIN et al., 2001) e a Equação 2.4 (SEO et al., 2009; BLANES-VIDAL et al., 2008):

$$THP = 10 \times M^{0.75} \quad (2.3)$$

$$THP = 9.84 \times M^{0.75} (4 \times 10^{-5} (20 - T)^3 + 1) \quad (2.4)$$

As correlações anteriores são utilizadas para encontrar o calor total produzido pelos frangos de corte e reações exotérmicas das bactérias na cama de frango. Porém, parte desse calor é consumido pela evaporação de líquidos presentes e a transpiração, ou seja, mudança de fase. Dessa forma, é necessário conhecer a quantidade de calor utilizado na evaporação, Xin et al. (2001) elabora outra correlação para estimar esse calor latente . A expressão da Equação 2.5 é quantificada como uma porcentagem do THP (calor total produzido), como

exemplo, no mesmo trabalho diz que o calor latente consumido em média de todos os dados foi 50,6% do calor total produzido.

$$\%LHP = 149.7 - 10.36 \times T_{db} + 0.3002 \times T_{db}^2 - 0.3409 \times RH \quad (2.5)$$

$\%LHP$ - Calor latente produzido em porcentagem do THP

RH - Umidade Relativa Média no interior do aviário

2.2 MODELAGEM

A Fluidodinâmica Computacional tem evoluído ao longo dos anos, se encontra hoje em um patamar de ferramenta sofisticada para análise e projeto baseada em computadores, desempenho voltado para esta aplicação. Programas tem se tornado mais fáceis de manipulação, com uma maior abstração na programação chegando a ser muita vezes isentos de linhas de programação, sendo necessário atribuir parâmetros do modelo e configurando as condições de contorno. (NORTON et al., 2007)

Esta ferramenta é capaz de simular escoamento, transferência de calor, reações químicas, interações e mudança de fase. Baseada em métodos numéricos que se aproveitam do poder de cálculo dos processadores cada vez mais rápidos, discretizam o espaço ou domínio para resolver equações que governam a mecânica dos fluidos e a termodinâmica. Essa discretização é chamada de malha, as malhas podem ser construídas por um nível mais baixo de programação ou de forma automática, por programas geradores de malha. (NORTON et al., 2007)

Modelos físicos de transferência de calor, massa e momento avaliado por Fluidodinâmica Computacional apresentam uma ferramenta para redução de experimentos e custos em estudos da ambiência, podendo ser feitas mudanças variadas no sistema ambiental para otimização das instalações. (OSORIO, 2011)

Este tipo de estudo vem sendo usado em diversas áreas de análise de ambiente contido. Nas últimas décadas, devido a evolução dos programas de simulação numérica, houve essa abordagem em sistemas ambientais na agroindústria. (NORTON et al., 2007; OSORIO et al., 2012)

A geometria de uma construção como a de um aviário é melhor tratada através de software ANSYS ICEM CFD para a obtenção da malha com melhores resultados (LEE; SASE; SUNG, 2007 apud OSORIO, 2011). No trabalho de (LEE; SASE; SUNG, 2007) usa-se

o Gambit para formar a malha, atualmente o Workbench é uma ferramenta de integração dos programas utilizados na análise CFD no qual compõe do ANSYS *Meshing*.

2.2.1 Método Numérico

Há dificuldade de se calcular essas equações em uma análise de espaço contínua, logo, o CFD consegue lidar com esse estudo com maior flexibilidade. O domínio é discretizado, facilitando a solução do modelo matemático, aproveitando a computação através de iterações das equações nesses pequenos espaços. Busca-se, com isso, uma convergência de uma solução discretizada para o domínio, sensível as mudanças das condições de contorno caso análise transiente ou predição de comportamento do do fluido em um regime permanente. (NORTON et al., 2007)

Método de volume finito, utilizado pelo Fluent, é um método de discretização muito apropriado para simulações de vários tipos de leis de conservação. Este método está sendo extensivamente utilizado em vários campos de engenharia, como mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa ou mesmo área de engenharia de petróleo como todo. Apesar desse método apresentar uma precisão menor que o método de elemento finito, uma característica adicional é a conservação local dos fluxos numéricos, conservando o fluxo numérico de uma célula discretizada para a sua vizinhança. Isto a torna atraente para problemas envolvendo fluxos de qualquer espécie, também aumentando o poder de convergência. (EYMARD; GALLOUËT; HERBIN, 2000)

2.2.2 Equacionamento

Os softwares de simulação CFD são baseados nas soluções das equações que governam os fenômenos, os quais são as mesmas leis e formulações matemáticas de conservação da mecânica e energia. Utiliza-se nesses códigos as condições de contorno adequados para cada caso.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j) = 0 \quad (2.6)$$

Conservação do Momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}[-p\delta_i + \mu(\frac{\partial u_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j})] + \rho g_i \quad (2.7)$$

Conservação de energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cT) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j cT) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}) = s_T \quad (2.8)$$

Sendo:

x - coordenada [m]

u - componente da velocidade [m/s]

t - tempo [s]

p - pressão [Pa]

g - aceleração da gravidade [m/s^2]

c - capacidade térmica específica [$W/kg.K$]

s_T - geração ou consumo térmico [W/m^3]

T - temperatura [K]

ρ - densidade [kg/m^3]

μ - viscosidade dinâmica [$kg/m.s$]

δ - delta de Kronecker

λ - condutividade térmica [$W/m.K$]

i, j - índice de coordenada cartesiana

2.2.3 Ansys Fluent

ANSYS Fluent é um software para análise fluidodinâmica computacional. Com ele pode-se simular escoamento, transferência de calor e massa, mudança de fase, reações químicas, movimentos mecânicos e interações sólido e fluido. O Fluent tem essas capacidades de modelagens físicas para que através do conhecimento do problema e do software possa empregar restrições e considerações refletidas na malha, condições de contorno e equacionamento que suprem o objetivo proposto. (NORTON et al., 2007; ANSYS INC., 2015)

Alguns trabalhos foram desenvolvidos com o uso de ferramenta CFD na previsão de ambientes contidos na agricultura nos últimos anos, e entre eles predomina o uso do software comercial Fluent. (BLANES-VIDAL et al., 2008; BJERG et al., 1999; BJERG et al., 2000; BJERG et al., 2002; BUSTAMANTE et al., 2013; MOSTAFA et al., 2012; NORTON et al., 2007; NORTON et al., 2009; OSORIO, 2011; SEO et al., 2009; SEO et al., 2011; XIA; SUN, 2002; ZHANG et al., 2000; LEE; SASE; SUNG, 2007; LEE et al., 2009; CURI, 2014)

2.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Apesar de muitos avanços na área de simulação computacional e cada vez mais perto do que os fenômenos físicos comportam-se na realidade, a validação de uma análise CFD ainda é muito importante, não só no ramo da pesquisa, como para projetos na indústria.

Alguns métodos de validação podem ser citados (NORTON et al., 2007) para a análise de aviários:

- a) Modelo de escala reduzida em banho de sal, conveniente em análises considerando a convecção natural;
- b) Modelo de escala reduzida em túnel de vento;
- c) *Particle image velocitometry* (PIV), técnica utilizada para medir o gradiente 2D de velocidade do escoamento;
- d) Modelo em escala real;
- e) Método de Traçado de gás(SEO et al., 2009);
- f) Anemômetro Sônico 3D;

Há ainda, medições em escala real, feitas de forma convencional:

- a) Amostras atemporais de pressão(BLANES-VIDAL et al., 2008), velocidade do ar (OSORIO, 2011), concentrações de contaminantes (OSORIO, 2011), umidade e temperatura (MENEGALI, 2005);
- b) Amostragem de todos os pontos em tempo real de velocidade do ar, umidade(XIN et al., 1994) e temperatura (XIN et al., 1994; OSORIO, 2011)

O método traçador de gás (SEO et al., 2009) além de determinar fluxo de massa e calor, ajuda a determinar concentrações de gases nocivos como a amônia. Osorio (2011) também desenvolveu um método para determinar o perfil de concentração de amônia em uma construção avícola.

As medições em aviários de escala real seriam extremamente custosas caso fosse usada uma construção somente para a atividade da pesquisa. No começo das novas técnicas, agora consolidadas, de ventilação em túnel e a utilização de placas evaporativas, o estudo de Xin et al. (1994), Xin, Berry e Costello (1994); se preocupou com a construção de aviários similares para a pesquisa dessas técnicas e a denominada convencional. (BLANES-VIDAL et al., 2008) elaborou um estudo em uma seção de um aviário comercial. Os experimentos foram conduzidos sem a presença das aves.

Em complemento aos métodos de medição para validação pode ocorrer uma comparação qualitativa ou quantitativa entre os dados/perfis coletados e os dados obtidos pela análise numérica. Para as análises quantitativas, Blanes-Vidal et al. (2008) tratou os dados obtidos pela análise de comportamento χ^2 (Chi-quadrado) para dizer se os dados obtidos no método numérico correspondem aos dados medidos, ainda, Curi (2014) empregou o método NMSE (Erro Médio Quadrático Normalizado) para dizer quanto os dados da análise dinâmica fluida computacional são confiáveis, utilizando-se ainda de um valor de referência de erro máximo para dados simulados de boa concordância.

2.4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Para aumentar a confiabilidade do estudo CFD são necessárias as coletas de dados em avião em estudo. Este procedimento requer criar um método de aquisição de dados necessários para determinar parâmetros condizentes com a realidade, ou seja, com qualidade e com variáveis importantes para o estudo. Autores se utilizaram de medidas de cada ponto feitas de forma manual e elaboraram ajustes estatísticos devido a diferença de tempo entre as coletas, (BLANES-VIDAL et al., 2008). Após a primeira coleta de vários pontos, se utilizou de poucos pontos que representavam o estado do ambiente para o acompanhamento durante todo o experimento, (MENEGALI, 2005). Outros autores fizeram uma coleta de dados procurando observar o comportamento dinâmico das variáveis, (XIN; BERRY; COSTELLO, 1994) distribuindo sensores na construção para determinar o perfil psicrométrico do ambiente.

2.4.1 Arduino

Arduino é uma ferramenta projetada com a intenção de facilitar o computador pessoal interagir com o mundo físico. É uma plataforma física de código aberto baseada em uma placa microcontroladora, adicionada a um ambiente de desenvolvimento de programas livre para instalação dos mesmos na placa. O Arduino possibilita desenvolver objetos interativos, ter entradas de vários sensores e controlar luzes, motores e outros dispositivos, sendo possível o uso sozinho ou em comunicação com outros softwares instalados no computador. (ARDUINO, 2015)

O Arduino simplifica o processo de se trabalhar com placas microcontroladoras e oferece algumas vantagens em relação a outras do tipo por ser um dispositivo barato, *Cross-platform* (independe do sistema operacional), ambiente de programação simples e claro, software de código aberto e extensível, hardware de "código aberto" e extensível. (ARDUINO, 2015)

2.4.2 Scilab

Scilab é um software livre e de código aberto para computação numérica, destinado a aplicações de engenharia e pesquisa científica. Ele é compatível com sistemas operacionais mais utilizados, tem a capacidade de programação em alto nível permitindo acesso a estruturas de dados e funções gráficas importantes. (SCILAB ENTERPRISES S.A.S, 2014)

O software comporta pacotes adicionais desenvolvido por colaboradores, tem possibilidade uma comunicação serial, comportando-se como um terminal serial estabelecendo essa transferência de informação e ainda podendo utilizar o potencial do programa numérico para manipulação dos dados obtidos. Aliado a isso, a plataforma Arduino capta os dados dos sensores e é capaz de enviar através dessa comunicação as informações.

2.4.3 Sensores

Os sensores são dispositivos capazes de detectar, reagir e enviar outro estímulo correspondente (DICIO, 2014), geralmente envia um sinal elétrico que uma placa de aquisição é capaz de ler. A parte crucial de um sistema de medição são os sensores, ao montar-se um sistema de aquisição de dados para análise de um ambiente, preocupa-se em determinar os parâmetros medidos e os sensores adequados para a tarefa.

Há diversos sensores no mercado que podem ser utilizados para se medir a temperatura. Na perspectiva de se medir a umidade em conjunto são encontradas algumas opções, sensores como o DHT11, DHT22, SHT1x servem adequadamente a aplicação para medir temperatura e umidade.(REVIEW..., 2014)

O sensor DHT22, também chamado RHT03 ou AM2302, é utilizado por Jazizadeh et al. (2014) em um sistema de sensores utilizando plataforma Arduino. O sensor é pré-calibrado na fábrica em câmeras de calibração sendo o coeficiente de ajuste memorizado no próprio sensor. O valor obtido por esse sensor tem uma precisão de $\pm 2\%$ de umidade relativa e $\pm 0,5^\circ\text{C}$ da temperatura.(ELECTRONICS AOSONG CO. LTD, 2010)

Conhecer o gradiente de velocidade do ar é determinante para investigar conforto térmico e qualidade do ar em uma instalação de produção de animais vivos. As velocidades encontradas dentro de um aviário são pequenas, o sensor adequado utilizado é o anemômetro de fio quente (*hot wire anemometry*) por ter vantagens nesta faixa de escoamento (BUSTAMANTE et al., 2012). O anemômetro de fio quente tem sua base de funcionamento na perda de calor por convecção, realizando um balanço térmico pode-se encontrar a relação entre a voltagem e a velocidade do escoamento (BUSTAMANTE et al., 2012; BLANES-VIDAL et al., 2010). Além do anemômetro de fio quente, existem outras maneiras de se medir a velocidade

do ar. Podendo citar o anemômetro de copos, de hélice, ultrasônico, entre outros.

Existem muitos sensores de pressão disponíveis e compatíveis com o Arduino nas mais diversas faixas de pressão. Porém, para as pressões atmosféricas dificilmente é encontrado um capaz de medir diferencial de pressão. A alternativa foi utilizar-se de dois medidores de pressão/altímetros capazes de medir a pressão atmosférica com uma resolução de 1 Pa e precisão de pressão relativa de $\pm 12Pa$. Juntamente com esse sensor existe um termômetro digital usado em conjunto para fins de compensação dos valores de pressão lidos. De acordo com as especificações a temperatura lida tem resolução de $0,1^{\circ}C$ e precisão de $\pm 0,5^{\circ}C$ (BOSCH SENSORTEC, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o aviário comercial estudado, incluindo geometria, equipamentos, manejo, resultados de produção, entre outros. Logo após, é descrito como é feita o sistema de aquisição de dados e características de elaboração do tratamento dos dados. Ainda, é feita uma exposição dos modelos CFD utilizados, também as condições de contorno e a malha. Finalmente, tem-se os erros para comparações entre os dados medidos e os previstos pela análise computacional, seguido de uma apresentação de casos de tentativas de melhoria através do procedimento apresentado.

3.1 ASPECTOS GERAIS DO AVIÁRIO COMERCIAL

A propriedade no qual foram realizadas os experimentos está localizada na cidade de Cianorte, no Noroeste do Estado do Paraná. Segundo a classificação Koppen, o clima é denominado Cfa (IAPAR, 1998), ou seja, clima subtropical temperado e quente. O aviário escolhido é mostrado na foto da Figura 1. Uma informação importante do local é a existência de uma fileira de árvores do lado norte a 10 m da construção, proporcionando sombreamento.

Figura 1 – Foto do aviário estudado



Fonte: Autor.

A Tabela 1 apresenta o desenvolvimento da ave. Essa medida é feita através de amostra de 8 a 10 animais pesados juntos. As massas de desenvolvimento da ave é um dado necessário para o uso das correlações descritas na Seção 2.1.5 no cálculo de calor total produzido pelos frangos.

Tabela 1 – Desenvolvimento do frango

Idade [dias]	Massa [g]
7	199
14	514
21	1049
28	1670
35	2179
42	2884

Fonte: Autor.

3.1.1 Geometria e estrutura

Apesar de não haver uma padronização da geometria das construções, nem do arranjo dos equipamentos, deve-se considerar aquelas que são mais comuns na região estudada. Sistemas de Ventilação em Túnel com sistemas de baixa incidência da luz solar já são exigências de integradoras para construções novas na região. O caso estudado emprega este tipo de sistema, mais especificamente o sistema *Dark House*, incluindo o controle gradual de luminosidade com lâmpadas de LED (*Dimmer*). As características mais importantes são apresentadas nas Tabela 2 e 3 para estrutura com capacidade de 30.000 aves.

Tabela 2 – Características de Ambiência

Sistema	Sistema Dark House com Ventilação em Túnel
Climatização	Placas Evaporativas e Nebulização
Iluminação	140 Lâmpadas de LED 5 W
Exaustor	10 Exaustores 50"736 W
Cortinado	Lateral Duplo. Forro de Alta Densidade
Cobertura	Zinco sem isolamento

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Dimensões principais do aviário

Dimensões principais do aviário			
Comprimento	160 m	Largura interior	15 m
Altura	2,5 m	Cama	0,1 m
Altura Evaporador	1,8 m	Comprimento Evaporador	15,6 m
Altura Exaustor	1,4 m	Largura Exaustor	1,4 m

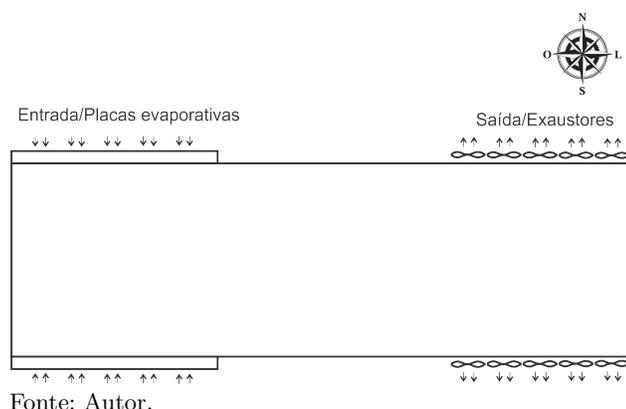
Fonte: Autor.

Na pesquisa em campo dentro de ambientes de criação precisa-se executar medições via sensores sem a influência de poeira, umidade, gotas e gases durante os experimentos. Isso segue uma preocupação para proteger os sensores ou obter sensores resistentes a tais condições.

A Figura 2 apresenta a disposição das entradas e saídas de ar do caso estudado. Pelas entradas o ar atravessa as placas evaporativas, enquanto os exaustores adicionam energia mecânica ao escoamento de ar de saída.

Nas entradas existem evaporadores em duas camadas de colmeias de celulose molhadas de 15 cm. Um anteparo é colocado logo após a entrada direcionando o ar fresco para o forro, também funcionando como um regulador de pressão de entrada. O ar segue pelo comprimento do aviário até alcançar os exaustores, cada um ligado de acordo com a necessidade.

Figura 2 – Disposição das entradas e saídas em vista superior

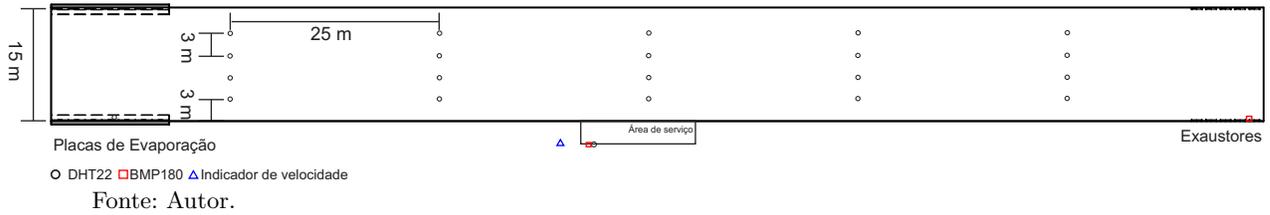


3.1.2 Especificação dos locais de medição

A distribuição de temperatura é importante para a melhoria do conforto dos animais. Assim, também é importante um melhor conhecimento da temperatura no nível dos animais, sendo mais interessante para as medições e validação. Devido à possibilidade assimétrica de sistemas do tipo túnel de ventilação em condições diferentes de acionamento de exaustores, selecionou-se um plano paralelo ao piso para obter uma amostra do ambiente do interior do aviário. O ideal seria realizar medições exatamente no nível dos animais para adquirir dados do espaço do qual a ave realmente ocupa. Entretanto, medições com animais podem não retratar a realidade se ele estiver aglomerado, ou não, ao redor do sensor. Os dados devem ser obtidos um pouco acima dos animais, ou mesmo no nível da cabeça. Com isso o corpo dos animais não interferiria nos resultados e os dados seriam próximos do nível médio destes. (BUSTAMANTE et al., 2012)

Os sensores para este trabalho foram posicionados a uma altura de 0,5 m do chão. Os locais dentro do aviário estão afastados da entrada e da saída e foram distribuídos conforme a Figura 3.

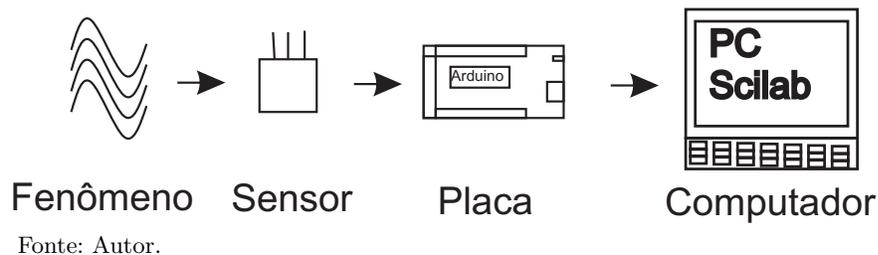
Figura 3 – Locais de posicionamento dos sensores



3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste trabalho buscou-se elaborar um sistema de medição de baixo custo, com aquisição "online", comunicação com software matemático e armazenamento dos dados. Para suprir a necessidade da proposta de medir temperatura, umidade, velocidade do ar e pressão nos locais necessários, ou seja, condições de contorno ou amostras para validação. Para isso foram utilizados a plataforma Arduino[®] com sensores disponíveis de boa precisão e compatíveis. Também, foram empregados cabeamento e acessórios mais comuns no mercado. Com utilização do Scilab[®] juntamente com o software de desenvolvimento de programas do Arduino[®] foi possível realizar a aquisição e armazenamento dos dados. A Figura 4 tem-se o fluxograma de processo de coleta de dados.

Figura 4 – Coleta de dados



3.2.1 Comunicação entre Sensor e Microcontrolador

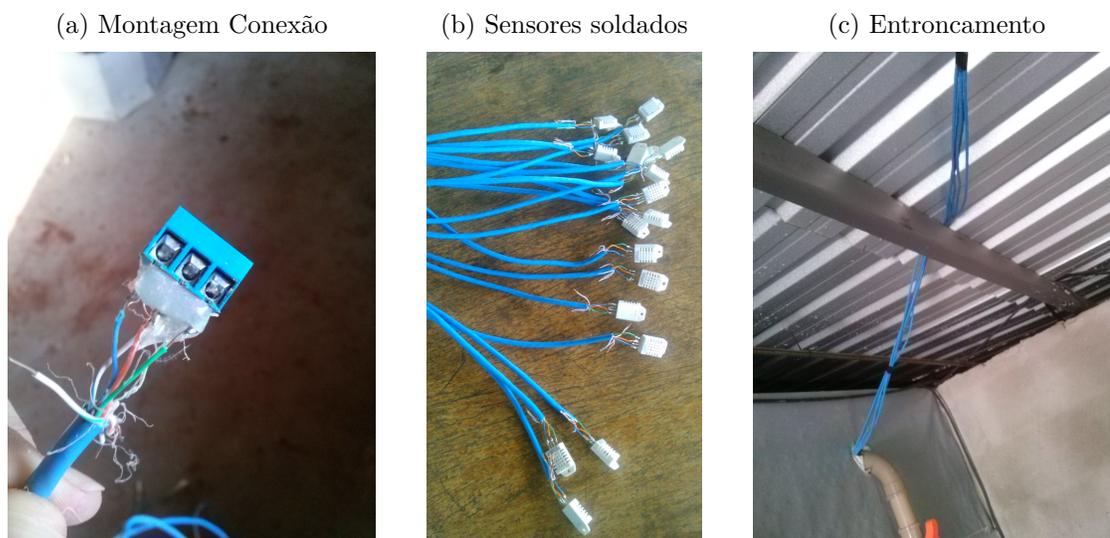
A comunicação entre Arduino[®] e sensores pode ocorrer de forma analógica ou digital. A distância dos sensores para o microcontrolador é extensa, podendo ocorrer decaimento expressivo do sinal dependendo da qualidade da conexão ou cabeamento empregado.

No objetivo de buscar baixo custo o melhor cabo escolhido pelo autor foi o par trançado, extensivamente empregado em redes de computadores que são de boa resistência e fio sólido, facilitando a soldagem e conexões. Este tipo de cabo tem boa impedância, diminuindo a perda de sinal a grandes distâncias.

Alguns sensores de temperatura foram testados como LM35 e 18DS20, respectivamente analógico e digital, mas não conseguiram transmitir sinal adequado acima de 20 metros mesmo aumentando o número de vias utilizados no cabo na intenção de diminuir a resistência elétrica. O sensor DHT22 foi adquirido para medir a umidade em alguns locais, mas tornou-se a melhor escolha para todos os pontos de temperatura. Com o DHT22 foi possível medir todos os pontos de temperatura e umidade. Mas, para que a utilização do sensor fosse possível foi necessário elaborar uma programação de comunicação entre os softwares. O sensor funciona através de tecnologia de comunicação digital por meio de somente um fio no qual é necessário ter um protocolo programado no Arduino. Essa programação é possível por meio de bibliotecas disponíveis (ARDUINO, 2015). Com as bibliotecas pode-se acionar a comunicação do microcontrolador com o sensor buscando os dados e enviando-os pela comunicação serial com o computador com o terminal serial, ou seja, o Scilab.

Os sensores foram montados em cabos de 2,0 m, para que pudesse ser feita a montagem em campo. O sensor foi soldado aos fios de uma ponta de cabo (Figura 5b) e a um conector (Figura 5a).

Figura 5 – Montagem de cabos e sensores



Fonte: Autor.

Os vinte sensores foram distribuídos ao longo do aviário na altura de 0,5 m, bem próximo da área de atividade dos animais. Distribuídos formando uma matriz 4X5, sendo 4 sensores ao longo da largura da construção conforme a Figura 3. Foi utilizado um cabo par trançado CAT6 para cada 4 sensores utilizando 6 vias, quatro para os sinais e duas para fonte de 5V e o terra. No total foram usados 5 cabos longos para instalação dos sensores, como mostrado na Figura 5c, no entroncamento conectando-os ao microcontrolador.

3.2.2 Pressão

O sensor de pressão BMP180 (Figura 6b) pode vir embarcado, com circuito necessário incluso, neste estudo foi adquirido o GY-68 (Figura 6a) com quatro conexões das quais são elas SDA, SCL, GND e 3.3V. As conexões SDA e SCL são de transmissão de dados pelo protocolo I2C. O sensor foi instalado na entrada de um exaustor, próximo a um de seus lados. O exaustor escolhido para instalação é o utilizado na ventilação mínima. Dessa forma, ele sempre estará ligado no período de desenvolvimento dos animais.

Figura 6 – Sensor de pressão

(a) GY-68



Fonte: Autor.

(b) BMP180



Fonte:(BOSCH SENSORTEC, 2013)

A instalação elétrica do sensor de pressão foi feita da mesma forma que os higrômetros. Cabos de par trançado foram levados do computador ao exaustor, onde foi colocado um dos sensores, totalizando 90 metros. Outro sensor foi posicionado à sombra no ambiente externo, considerando-se essa posição como equivalente a entrada do ar. A altura de fixação desse sensor foi aproximadamente 1,5 m do sensor do exaustor. Essa diferença de pressão relacionada a altura deve ser ajustada para que se leia somente a diferença entre os sensores devido ao trabalho do exaustores.

Para medir essa diferença de leitura de pressão entre os sensores foram feitas 10 medidas quando o aviário estava vazio e com exaustores desligados. Foram armazenadas e feita uma média. Esse valor é considerado o valor de ajuste de leitura da queda de pressão do exaustor. O valor obtido de 48,7 Pa foi utilizado para ajustar essa pressão diferencial necessária para verificação.

Para programação no microcontrolador é necessário a utilização das bibliotecas I2C e do próprio sensor. A leitura é feita em unidade Hectopascal [$10^{-2} Pa$] acionada pelo Scilab através da comunicação elaborada. Para esses sensores são utilizados os caracteres ASCII de código 61 e 63 para fazer a chamada de leitura. Quando esses caracteres são enviados ao microcontrolador ele entende que deve ser feita a leitura de um respectivo sensor e as envia para o computador. São feitas 10 leituras para cada ciclo de aquisição para retirar o valor da mediana dessa amostra.

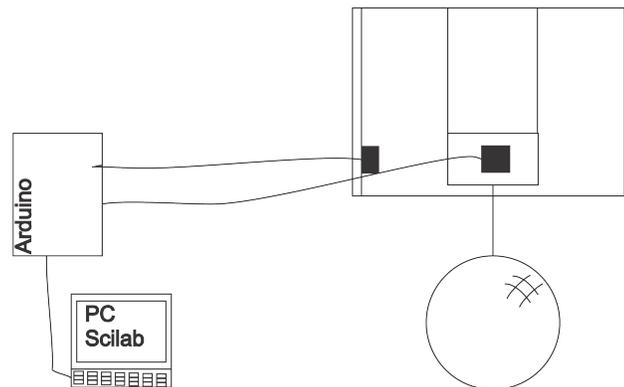
O sensor no interior do aviário foi protegido com uma tela contra deposição de poeira, assim garantindo que tenha contato com o ar.

3.2.3 Velocidade do vento

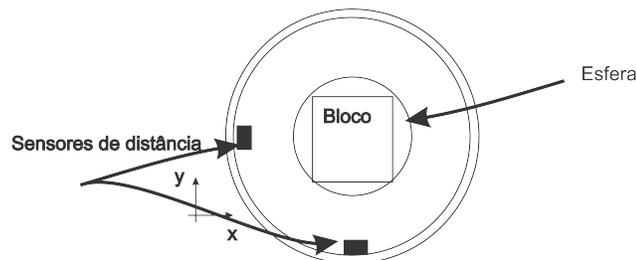
Para identificar a direção e velocidade do vento foi desenvolvido um aparato de baixo custo, no qual pode ser conectado a plataforma Arduino. Na Figura 7 é mostrado o esquema desse aparato constituído de dois sensores de distância, uma esfera de plástico, dois blocos de isopor, arame, linha de algodão e suporte de aço.

Figura 7 – Esquema para Detectar Direção do Escoamento

(a) Vista Lateral com esquema de conexão com Arduino e Computador

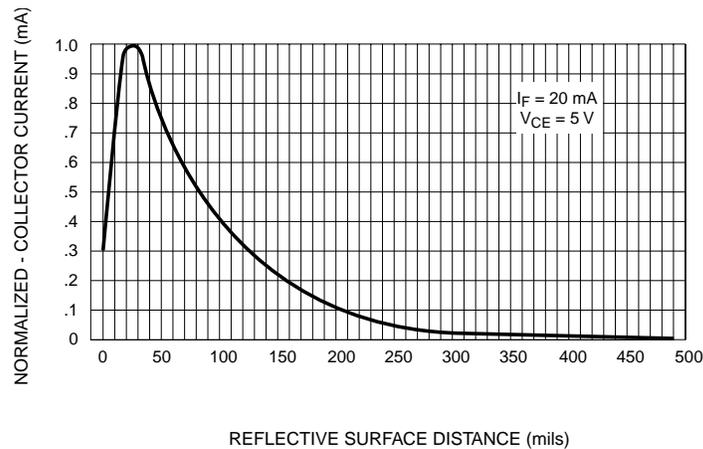


(b) Vista Superior evidencia o plano de livre movimento da esfera e bloco com sensores detectando os deslocamentos em x e y



Fonte: Autor.

Os sensores são colocados para detectar a distância do bloco que está preso à esfera pelo arame sem flexão, estes componentes estão livres para mover-se pela força do arraste ligados por 4 fios ao suporte. Os sensores reagem eletricamente de acordo com a distância do objeto (Figura 8). Na montagem é utilizado um resistor de 200Ω e outro resistor (*pull up*) de $4,7k\Omega$.

Figura 8 – Corrente do coletor *versus* Distância do sensor QRD1114

Fonte: QRD1114 Datasheet.

O dispositivo foi instalado a 5 m de altura, distante 0,5 m da torre que o suporta, no lado sul junto a construção conforme a Figura 3 em um cabo de 30 m conectado ao Arduino.

3.2.4 Comunicação entre Microcontrolador e Computador

A programação de escrita e leitura por comunicação serial foi elaborada para que as leituras de sensores digitais de 1 e 2 barramentos fosse possível, usou-se as bibliotecas e protocolo de comunicação dos sensores OneWire e I2C, respectivamente. Cada entrada de sinal é chamada através de caracteres ASCII pela porta serial, a programação no Arduino[®] entende esse caractere como a leitura da respectiva entrada, com esses valores na memória, o microcontrolador envia pela porta serial para que o Scilab leia os conjuntos de caracteres e os transforme em valores *Doble* manipuláveis.

3.2.5 Armazenamento e tratamento dos dados

Os valores deveriam ser armazenados para que pudessem ser utilizados no presente estudo ou mesmo em trabalhos futuros. Para isso foi elaborado um algoritmo, no qual o sinal foi convertido e guardado em banco de dados externos ao Scilab no formato de arquivo CSV (*comma separated values*) compatível com muitos programas, como por exemplo o Microsoft[®] Excel[®]. Um arquivo com nomeação de hora e data de aquisição é gerado possibilitando a identificação do momento de leitura dos sensores. Os valores de cada sensor foram gravados em colunas distintas. O agrupamento das colunas inicia-se com os 20 pontos do interior do aviário de temperatura e umidade, dados do ambiente externo, do exaustor e finalmente com o diferencial de pressão.

O Scilab oferece várias ferramentas para tratamento de dados e funções diversas. Elas foram usadas para montar matrizes, realizar leituras de arquivos CSV, manipulação de variáveis e dados, cálculos e construções gráficas apresentadas no presente trabalho.

3.2.6 Velocidade do ar

A determinação da velocidade do ar no interior do aviário é necessária para uma completa análise, pois a influência desse parâmetro na temperatura pode afetar a real qualidade da análise computacional. O sensor utilizado é um anemômetro portátil da Instruterm, modelo AD-250, Figura 9. Este sensor é baseado no movimento das pás de acordo com a velocidade do vento, algumas características importantes estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do anemômetro AD-250

Especificações	
Display de Cristal Líquido (LCD):	de 3 1/2 dígitos
Escalas:	0.4 a 30.0 m/s; 80 a 5910 ft/min; 1.4 a 108.0 km/h 0.9 a 67.0 mile/h; 0.8 a 58.3 knots
Precisão:	≤ 20 m/s: 3% da escala cheia > 20 m/s: 4% da escala cheia
Resolução:	0.1 m/s; 1 ft/min; 0.1 km/h; 0.1 MPH; 0.1 knots
Sensor	Sensor (ventoinha) incorporado ao aparelho
Memória:	Máxima e Mínima
Temperatura de Operação:	0 a 50°C
Umidade de Operação:	Máx. 80% RH

Fonte:(INSTRUTHERM, 2015)

Figura 9 – Anemômetro Portátil



Fonte: (INSTRUTHERM, 2015).

3.2.7 Temperatura de Superfícies

Houve necessidade de conhecer a temperatura de superfície de paredes, forro, componentes e cabos. Para isso, foi utilizado um medidor sem contato infravermelho. A coleta de temperatura é feita apontando em direção da superfície e apertando o botão. O medidor de temperatura modelo RC002i da FeverWatcher[®] foi utilizado no seu modo de leitura de temperatura de superfície. Algumas de suas características são técnicas apresentadas na Tabela 5. Na Figura 10 é apresentada imagens do aparelho utilizado.

Figura 10 – Medidor de temperatura por infravermelho



Fonte: (FEVERWATCHER, 2015).

Tabela 5 – Termômetro de Superfície Infravermelho

Especificações	
Display de Cristal Líquido (LCD):	de 3 1/2 dígitos
Escalas:	0°C- 60°C
Precisão:	+/-0.3°C
Resolução:	+/-0.1°C
Sensor	Infravermelho
Temperatura de Operação:	10°C a 40°C
Umidade de Operação:	Máx. 85% RH

Fonte: (FEVERWATCHER, 2015)

3.3 PARÂMETROS DO MODELO

Para gerar a simulação em CFD é necessário conhecer informações sobre as condições de contorno do sistema. Primeiramente, foi analisado um modelo utilizando as correlações fornecidas na Seção 2.1.5 para encontrar o coeficiente de convecção. Para o caso do aviário tem-se o seguinte: coeficiente convectivo, pressão do exaustor, perda de carga no evaporador, temperatura e umidade de entrada, transferência de calor de forros e paredes, que são informações importantes para a simulação em CFD.

3.3.1 Coeficiente Convectivo

O animal, devido ao seu metabolismo, gera uma quantidade de calor que pode ser percebida pela temperatura de sua pele que está em torno de 32°C. Existe, dessa forma, uma geração de calor no interior do aviário, mais precisamente no ambiente próximo ao piso o qual ele reside.

O calor proveniente das aves é assumido como uma transferência de calor vindo da superfície da cama. O coeficiente é encontrado segundo a Lei de Resfriamento de Newton (Equação 3.1) para o fluxo de calor:

$$q'' = h \cdot (T_\infty - T_s) \quad (3.1)$$

onde:

q'' - Fluxo de Energia [W/m^2]

h - Coeficiente Convectivo [W/m^2K];

T_∞ - Temperatura do ar [K]

T_s - Temperatura da Superfície [K]

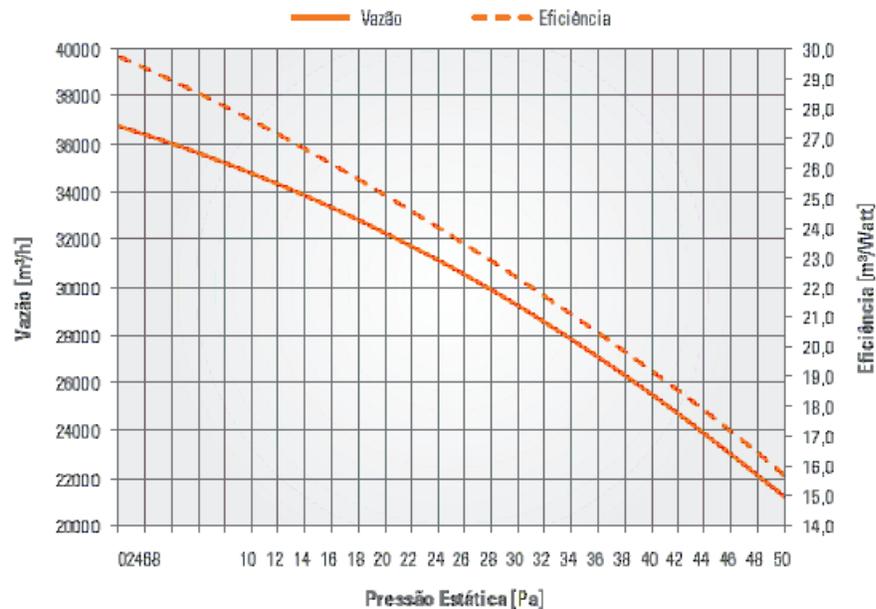
O fluxo de calor pode ser determinado através da geometria do aviário e peso do animal através da Equação 2.1. Em contrapartida ao que se pode inferir, o fluxo de calor que sai da superfície da pele da ave é substituído pelo calor oriundo da cama, ou chão. Logo, o coeficiente de transferência de calor, que seria calculado diretamente pela área da pele do frango, muda a forma sendo simplificada para utilizar-se uma superfície plana a ser usada no CFD. Esse coeficiente é utilizado de maneira restrita para a área plana como referência a cama.

3.3.2 Pressão no Exaustor

A pressão de sucção do exaustor é uma variável importante para o modelo. Define uma das condições de contorno do problema. Ele pode ser fixo, no qual poderia ser usado as medições em campo ou, numa situação de avaliação de um sistema em projeto, utilizando os dados de desempenho do exaustor. A curva de *pressão* \times *vazão* do exaustor do sistema estudado é mostrada na Figura 11.

O exaustor tem forma geométrica quadrada em sua entrada devido aos dispositivos de abertura e fechamento, chamado de persianas. Após a passagem das persianas a geométrica torna-se circular novamente, até sua saída em forma de um cone. No modelo elaborado

Figura 11 – Desempenho do Exaustor



Fonte: (BIG DUTCHMAN, 2015)

considera-se a entrada quadrada como as persianas, desconsiderando o efeito que a mudança de geometria logo após a entrada poderia causar.

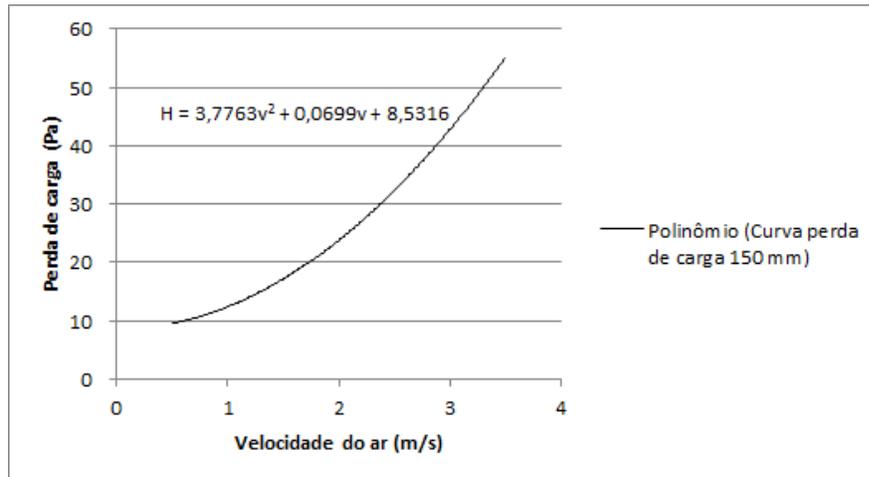
3.3.3 Perda de carga no Evaporador

Outra condição de contorno é a entrada do aviário. As placas evaporativas são exatamente a entrada de ar do aviário. Pelas colmeias o ar externo atravessa para o interior do ambiente, nas quais existe uma certa perda de carga como um meio poroso. As colmeias são feitas de celulose com espaços de passagem com uma angulação variando de 15° a 60° em relação ao plano de entrada, ou da placa evaporativa. Oferecem uma resistência à passagem do ar e aumento de eficiência de umidificação de acordo com a configuração. No equipamento em campo existem duas angulações de 30° e 60° e uma espessura de 150 mm da placa evaporativa. A curva de perda de carga para uma espessura de 150 mm é apresentada na Figura 12.

3.3.4 Temperatura e Umidade de Entrada

O parâmetro monitorado foi a temperatura e a umidade da entrada. O sensor utilizado foi o DHT22, o mesmo empregado nos pontos do interior do ambiente. O sinal também foi convertido e guardado em banco de dados externos ao Scilab no formato de arquivo CSV (*comma separated values*) compatível com muitos programas.

Figura 12 – Perda de carga do Evaporador



Fonte: Adaptado (MUNTERS, 2015)

3.3.5 Transferência de calor do forro e paredes

O ambiente também é alterado pela transferência de calor através das paredes e do forro, além de afetar o escoamento de ar em movimento ao longo do seu caminho.

Na elaboração de um caso genérico, no qual os dados de temperatura superficial não são informados pode-se utilizar um recurso *Shell Conduction*, criando uma malha temporária na face aplicada segundo ANSYS Inc. (2009). A condição de contorno é aplicada externamente dessa face, considerando assim a transferência de calor por essa malha, ou sólido. Dessa forma, há uma transferência por condução pelas paredes. Devem ser determinadas as propriedades e a espessura do material que ocorre a condução, no caso estudado, no polietileno laminado. Informações do material foram retiradas de (SEO et al., 2009), das quais a densidade, coeficiente de condutividade e calor específico são, respectivamente, 30 kg/m^3 , $0,030 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e $0,960 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. A temperatura externa do ambiente, no qual foi medido, é utilizada como condição de contorno, ou seja, é assumido que a temperatura da superfície externa do modelo é igual a temperatura externa do ar.

3.4 MODELO

Nesta seção é apresentada o uso da ferramenta CFD, construção da malha, modelos do pacote do código empregados no escoamento, configurações de propriedades e condições de contorno do problema proposto.

3.4.1 Malha

A malha encontrada em trabalhos como Seo et al. (2009) e Mostafa et al. (2012) é mista, feita de elementos tetraedros e hexaedros. Ainda não foi obtido malha de boa estatística de obliquidade e qualidade de elementos dentro dos valores considerados bons, (ANSYS, 2009). A simulação feita até o momento está com malha somente tetraédrica (Vide Figuras 13, 14 e 15).

A malha foi criada através do ANSYS Meshing utilizando seus recursos e ferramentas. O algoritmo *Inflation* foi utilizado nas condições de contorno do piso, entrada e saída. A utilização do *Inflation* melhorou muito o comportamento de dissipação térmica normal ao piso. Nas condições de contorno de entrada e saída foi usado o recurso *Sizing*, que diminui a granulometria dos elementos próximos a essas faces. A utilização desse recurso diminui os erros nessas porções melhorando consequentemente todo o escoamento .

A malha gerada contém 1.500.000 de elementos com uma qualidade média de 0,77 e obliquidade máxima de 0,84. De acordo com ANSYS (2009) a qualidade satisfatória é acima de 0,8 e obliquidade máxima abaixo de 0,95.

Figura 13 – Detalhe da malha na condição de contorno de saída

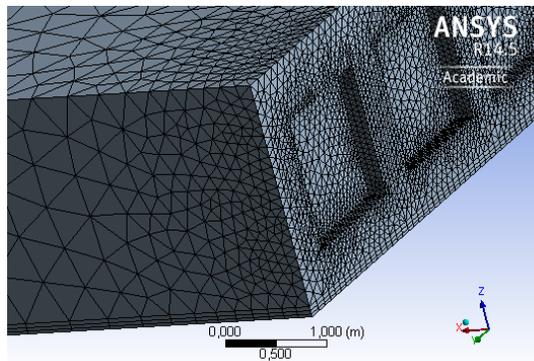


Figura 14 – Detalhe da malha na condição de contorno de entrada

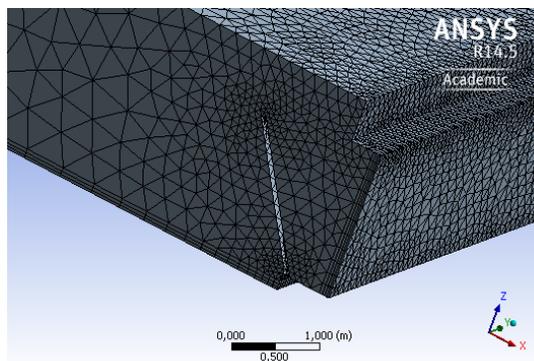
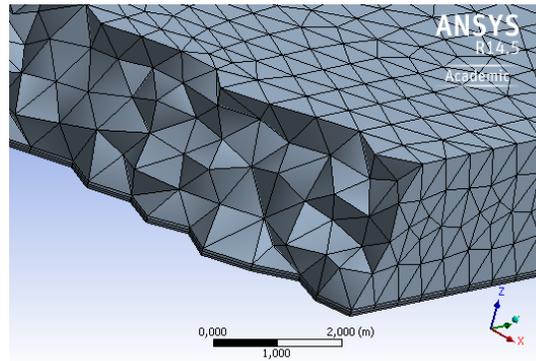


Figura 15 – Detalhe da malha em corte de seção



3.4.2 Modelos pré-estabelecidos

Segundo Norton et al. (2007) o modelo que descreve o escoamento $k - \epsilon$ *standard* deve ser evitado. Devido a baixa previsão de turbulência no escoamento, o modelo utilizado é o $k - \epsilon$ *realizable*. Este modelo oferece melhor previsão do escoamento satisfazendo algumas restrições da tensão de Reynolds, consistente com a física do escoamento turbulento, (ANSYS, 2009).

Os modelos de turbulência para as condições de contorno devem ser caracterizadas de acordo com dados experimentais ou equações que as descrevem, seja um valor fixo, um o perfil da entrada ou saída do escoamento. De acordo com (ANSYS, 2009), pode-se equacionar *Turbulent Kinetic Energy* e *Turbulent Dissipation Rate*, podendo ser utilizado esses métodos inserindo o raio hidráulico e a intensidade de turbulência, este último de 10% para escoamentos ordenados e diminuindo de acordo com o grau de desordem.

3.4.3 Condições de Contorno

Para estabelecer as condições de contorno no equacionamento feito pela ferramenta CFD, deve ser feita configurações através do software. A seguir, é feito esse procedimento dentro do Fluent.

3.4.3.1 Piso

Foram utilizadas considerações de energia distintas para avaliar a melhor previsão da condição de contorno em relação ao piso. Primeiramente, avaliou-se a condição de contorno utilizando um coeficiente convectivo fixo obtido pelo calor encontrado nas correlações da Seção 2.1.5 e a Equação 3.1.

Para este equacionamento deve ser determinado o coeficiente convectivo, temperatura do escoamento e a geração de calor em um domínio junto ao piso de 5 mm de espessura.

Em outro caso, a condição de contorno utilizada foi o fluxo através do piso correspondente a quantidade de animais em toda a área do mesmo e o calor obtido pelas correlações da Seção 2.1.5 por cada ave. Para o equacionamento deve ser determinado somente o fluxo de energia aplicada nessa face. A transferência de calor para o escoamento ocorre de acordo com as características de seu movimento e/ou suas propriedades.

As equações utilizadas pelo CFD são utilizadas com uma rugosidade, modelada como esferas lado a lado, de diâmetro dependendo do tamanho do animal. Esse diâmetro é a consideração no qual os animais ocupam todo o espaço comportando-se como esferas. Para a situação analisada o diâmetro foi 30 cm.

3.4.3.2 Saída

A saída no qual está o exaustor empregou-se a pressão como condição de contorno. A curva de desempenho do fabricante foi utilizada com um polinômio na qual a pressão depende da velocidade. A energia cinética e taxa de dissipação foram modeladas com um raio hidráulico de 1,27 m e intensidade de 5% de turbulência de jusante. Na condição de contorno foi aplicado uma vazão alvo dependendo do caso, nos quais são 7,7 kg/s, 9,7 kg/s e 11 kg/s. A temperatura de jusante foi especificada como a temperatura medida pelos sensores externos dependendo da situação estudada.

3.4.3.3 Entrada

A condição de contorno na entrada tem pressão diferencial nula, representando o meio externo. A temperatura especificada é a medida pelo sensor posicionado no interior imediatamente após as placas evaporativas, já resfriado. Na face da entrada foi aplicada como condição de contorno a perda de carga no evaporador, por meio do polinômio que a define. Raio hidráulico e intensidade de turbulência foi utilizado 2,5 m e 7 %.

3.4.3.4 Laterais e forro

Nas faces nas quais são os forros e laterais foram aplicadas condições de contorno semelhantes. Nelas, a velocidade é igual a zero, e rugosidade de 10 mm. Em relação a energia, é utilizado o recurso *Shell Conduction* para a condução térmica do meio externo para o interno através do polietileno. Para isso, foi especificado a temperatura externa de superfície e a espessura do material. A temperatura externa da malha criada para condução no sólido foi a

mesma temperatura do ar externo. A espessura do forro de 6 mm e das cortinas de 5,16 mm de acordo com as densidades de área fornecidas pelo fabricante.

3.4.3.5 Paredes adjacentes

Para as paredes de fechamento, leste e oeste, as quais são de concreto, foram utilizadas rugosidades de 10 mm e velocidades zero, e ainda, considerou-se paredes adiabáticas.

3.4.4 Solução

O método utiliza um algoritmo de segregação da solução das equações resolvendo de forma sequencial. As equações governantes são acopladas. Este algoritmo segrega essas equações resolvendo em partes, variável após variável, equação após equação. O método de discretização espacial utilizado é o de primeira ordem para o começo da solução. (ANSYS INC., 2009)

3.4.5 Pós-processamento

O programa de pós-processamento utilizado é o CFD-Post para realizar as análises dos resultados da solução. Para a comparação de resultados ele foi utilizado para conferir consistência de resultados para as configurações realizadas até chegar nas apresentadas no trabalho.

Para as situações e a geometria analisada podemos inserir pontos e obter o valor de alguma propriedade do escoamento. Dessa forma, foram configurados primeiramente 20 pontos, em coordenadas das quais se identificam como os locais posicionados os sensores. As propriedades desses pontos foram colocadas em uma tabela formando a matriz idêntica à que é obtida nas medições. Essa matriz de dados de simulação é utilizada no Scilab para o estudo.

No CFD-Post é possível analisar médias, integrais, máximo e mínimo de planos. Pode-se extrair dados de pontos de temperatura e velocidades desses planos para cada caso estudado. Comparar esses gráficos é uma forma de avaliar as possíveis configurações em um estudo de melhoria no sistema.

3.5 ANÁLISE DO ERRO

Para avaliar a predição de um estudo de Dinâmica Fluida Computacional podem ser obtidos por erro diferencial. Esse método para comparação é bem visível considerando as

grandezas medidas. Ele fornece uma quantidade direta do desvio, mas para melhor comparação é utilizado o erro relativo expresso pela Equação 3.2.

$$E\% = \frac{V_{CFD} - V_{md}}{V_{md}} \times 100 \quad (3.2)$$

Para um estudo de validação é necessário a utilização de métodos que avalie os pontos e obtenha a representação do modelo. Valores de desvios altos em determinados pontos podem não atender a predição pelo CFD. A maneira de avaliar comportamentos inconsistentes por toda a amostra pode ser feito pelo erro médio quadrático normalizado (NMSE) expresso na Equação 3.3 . O valor do NMSE compreendido abaixo de 0,25 é sinônimo de boa concordância do valor adquirido com o valor simulado,(CURI, 2014).

$$NMSE = \frac{\left(\frac{\sum_i^n (V_{CFD_i} - V_{md_i})^2}{n} \right)}{\overline{V}_{CFD}^2 \overline{V}_{md}^2} \quad (3.3)$$

NMSE - *Normalized Mean Square Error* (Erro Médio Quadrático Normalizado)

V_{CFD} - Valor ponto simulado

V_{md} - Valor ponto experimental

\overline{V}_{CFD} - Valor médio dos pontos simulados

\overline{V}_{md} - Valor médio dos pontos experimentais

n - Número de pontos

3.6 CASOS DE NOVAS PROPOSTAS DE CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA

Neste trabalho utilizou-se de um método para prever a distribuição de temperatura no interior de um aviário. A partir desses métodos, pode-se verificar possíveis arranjos de equipamentos que podem melhorar a distribuição de temperatura através do processo proposto. Os resultados de novos arranjos são comparados com a distribuição prevista de menor erro NMSE. Elas estão expostas em forma de perfis de temperatura e velocidade como um resultado qualitativo. Em termos de valores são extraídos os máximos e mínimos dos mesmos pontos de coleta de dados experimentais.

Os perfis são apresentados em contornos preenchidas com cores variando de 300 a 307 K, este último sendo o máximo de temperatura para que não ocorra estresse térmico do frango

segundo Blanes-Vidal et al. (2008). Para essa apresentação é utilizado o ANSYS CFD-Post, no qual são apresentados o caso simulado de menor erro e, em seguida, as modificações.

4 RESULTADOS

Os dados foram obtidos de maneira a conhecer-se o perfil do estado termodinâmico do ambiente para comparar com o método numérico. Os dados servem para garantir que a análise e simulação de fluidodinâmica computacional ajude na previsão adequada das condições desse tipo de problema, em caso de mudanças para otimização.

4.1 DADOS PSICROMÉTRICOS MEDIDOS

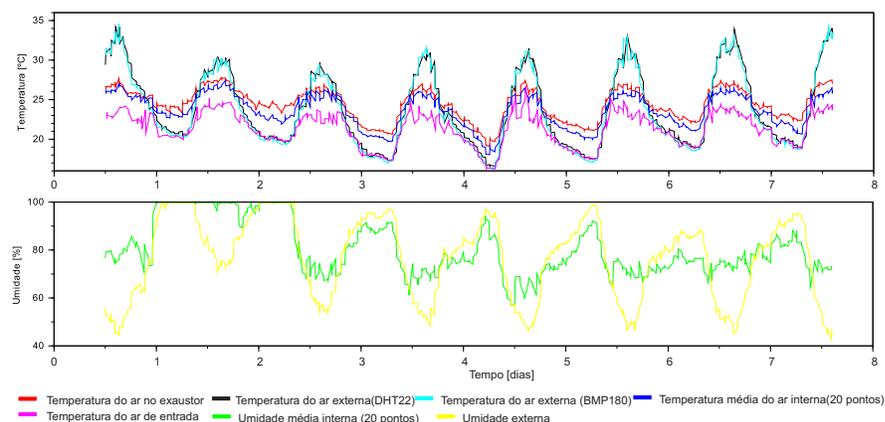
4.1.1 Dados adquiridos pelo sistema de medição elaborado

O sistema de medição elaborado foi utilizado para realizar medição em períodos com a intenção de apresentar o comportamento ao longo do tempo, as quais puderam ser feitas por meio desse sistema utilizando o Arduino. Os dados de saída e entrada determinam as propriedades das condições de contorno do ar durante o período. Os dados foram adquiridos a cada 30 min e apresentados na Figura 16.

Os vários picos térmicos ocorrem depois do meio dia (12 h). Os picos de maior temperatura foram os de interesse do estudo para identificar o momento de maior temperatura no dia e realizar uma análise de previsão através do CFD com as mesmas condições de contorno desse horário.

Na Figura 16 nota-se momentos de alta umidade no segundo dia por mudanças no tempo com conseqüente precipitação de chuva.

Figura 16 – Histórico de dados psicrométricos em 7 dias



4.1.2 Situação de um dia de verão

O perfis de temperatura (Figura 17) e umidade (Figura 18) para um horário de pico térmico 13h:56min (Horário Local) com temperatura externa na sombra de 36,8 °C são mostrados a seguir em isolinhas com seus valores apresentados. Por meio do Scilab é gerado o perfil de temperatura. Assim, representa os 20 pontos medidos ao longo da construção, o espaço observado por essas isotermais é uma amostra do estado termodinâmico do ambiente. Pode-se notar que há uma queda de umidade em uma das saídas, mais que na entrada. Observando, ainda, que o aumento da temperatura, leva consequentemente a mudança da pressão de vapor.

Figura 17 – Perfil de Temperatura Experimental em [°C]

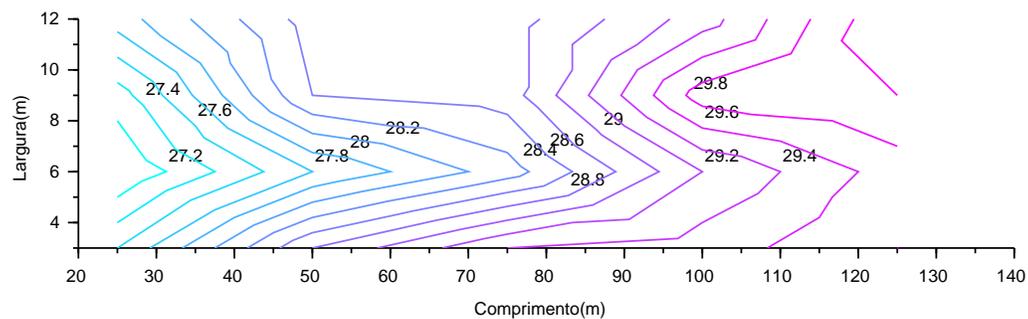
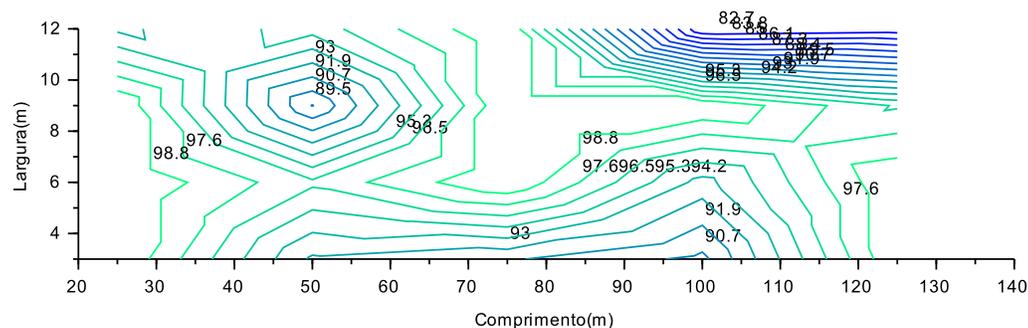
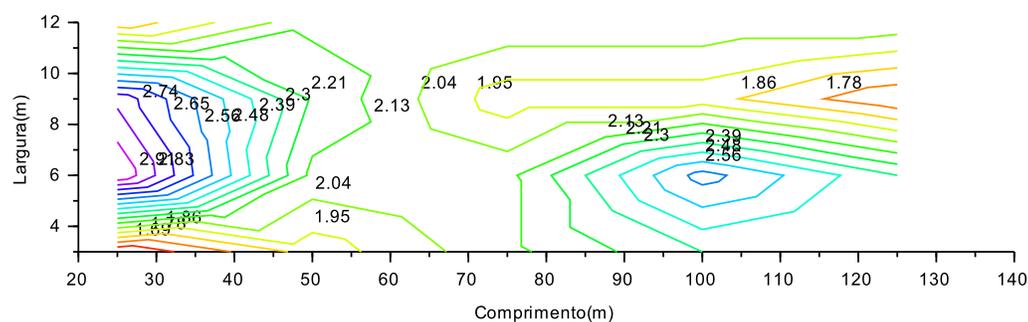


Figura 18 – Perfil de Umidade Relativa das medições em campo em [%]



Para as medições de velocidade o perfil foi construído e é apresentado na Figura 19. Nota-se velocidades altas no escoamento nas regiões próximo as entradas, devido aos defletores que direcionam o ar para cima, e encontrando o forro é redirecionando para baixo, local de início da amostra.

Figura 19 – Perfil de Velocidade Experimental em [m/s]



4.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA

Com os dados de entrada e saída pode-se calcular o calor sensível resultante utilizando o balanço de energia. Para os resultados da situação da Figura 17, a entrada estava $26,9^{\circ}\text{C}$ e a saída em $28,3^{\circ}\text{C}$. Com o perfil de velocidade sabemos a vazão volumétrica e mássica utilizando a temperatura média.

A Tabela 6 é elaborada com as Equações 2.1 a 2.4 do calor produzido total e, conseqüente, calor sensível acrescentado ao escoamento do contexto.

Tabela 6 – Valores obtido pelas correlações

Eguação	Correlação	THP [W/m^2]	SHP [W/m^2]
2.1	(XIN et al., 2001) sem ajuste	204.48	81.80
2.2	(XIN et al., 2001) com ajuste	151.72	55.99
2.3	CIGR	248.52	99.41
2.4	(XIN et al., 2001 apud SEO et al., 2009)	240.25	96.10

Podemos comparar primeiramente os resultados obtidos na Tabela 6 com o calor de $82,2 \text{ W}/\text{m}^2$ dado pelo balanço de energia. As correlações são usadas juntamente com a Equação 2.5 da energia de mudança de fase, observando também que os dados obtidos pelos sensores de temperatura são do calor sensível. Ainda, deve-se considerar que há certa transferência de calor do exterior pelo forro e paredes para o interior, ou vice versa, que está incluso na energia de saída.

Observando a Tabela 6, nota-se que o SHP calculado pela correlação com ajuste de temperatura e luminosidade (Equação 2.2) é menor que a energia líquida real adicionada ao escoamento, a correlação sem ajustes (Equação 2.1) ficou próximo a esse valor, o restante (Equação 2.3 e 2.4) ficou acima.

As correlações elaboradas por (XIN et al., 2001) são apresentadas em trabalhos mais

recentes, abrangendo equipamentos mais modernos utilizados na avicultura. Por este motivo e estar próximo ao valor do balanço de energia, o resultado da correlação sem ajuste mostra previamente uma consistência com os valores reais.

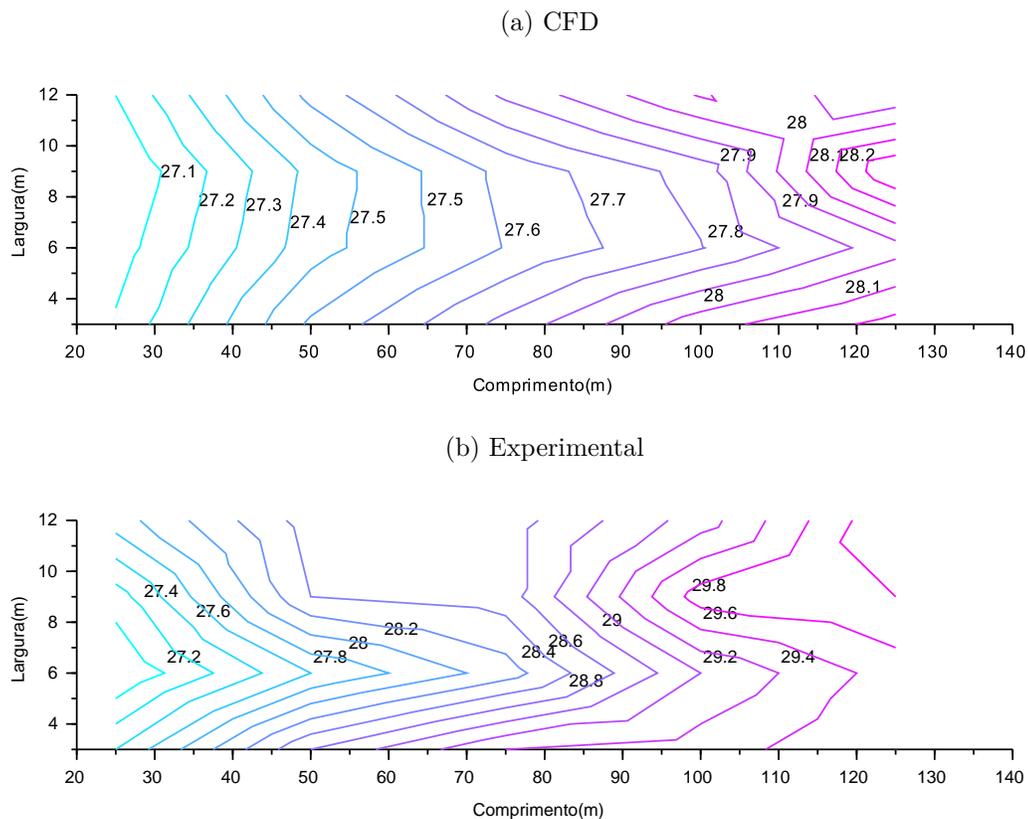
4.3 CASOS DE CONDIÇÃO DE CONTORNO

No passo a seguir serão apresentados os dados da simulação com base nas condições de contorno apresentadas.

4.3.1 Previsão CFD utilizando o coeficiente convectivo fixo na condição de contorno

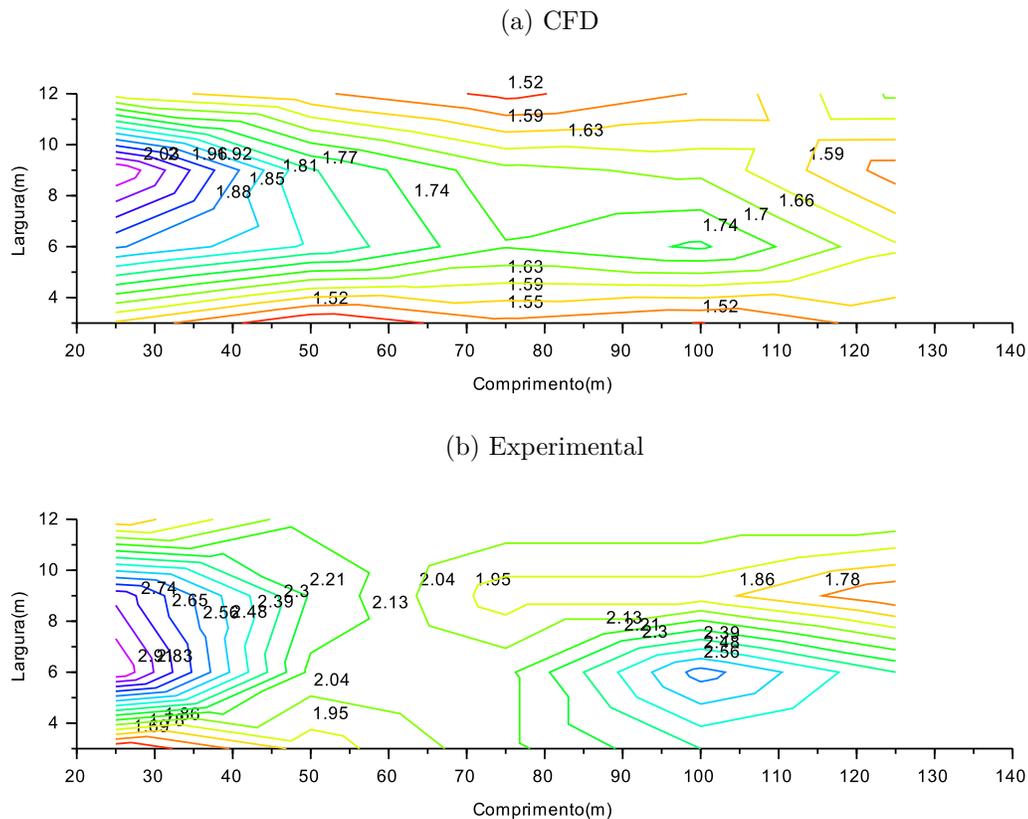
Nas Figuras 20 e 21, verifica-se diferenças visuais entre os dados experimentais e simulados. Encontra-se desvios consideráveis em ambos parâmetros nesta simulação.

Figura 20 – Perfil de Temperatura CFD x Experimental



O estudo de caso utilizando a convecção obteve um erro relativo de 3,9% para a temperatura e de 21,9% para a velocidade. A vazão de ar foi estipulada em 7,7 kg/s para

Figura 21 – Perfil de Velocidade CFD x Experimental



cada exaustor. O valor do NMSE para a velocidade para estas condições de contorno ficou em 0,088 abaixo do valor considerado satisfatório de 0,25 descrito pela literatura.

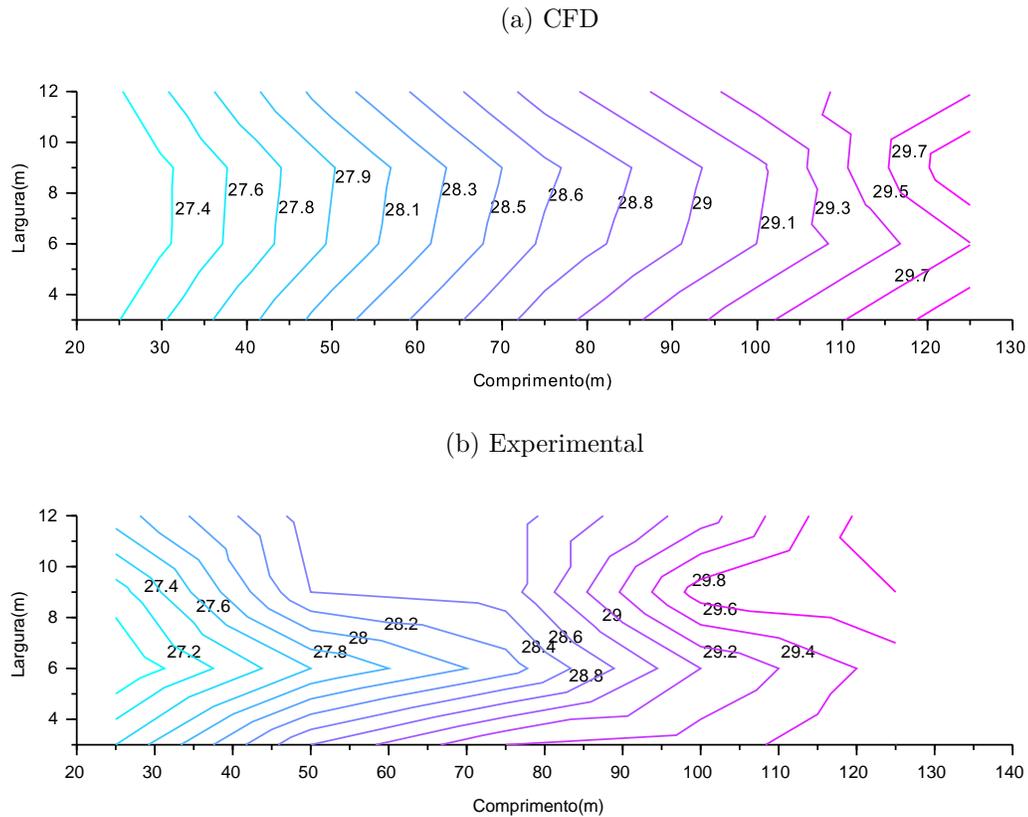
4.3.2 Previsão CFD utilizando o fluxo de calor aplicada na condição de contorno

O fluxo de calor pode ser usado como condição de contorno no modelo. Os sensores conseguem medir o estado termodinâmico do ar seco, ou seja, é possível medir o calor sensível gerado. Assim, os resultados do CFD irão tratar dessa parcela do calor e comparar com os obtidos pelo sensores.

Na Figura 22 é apresentado o perfil de temperatura obtido pela correlação sem ajustes, com um fluxo de calor de $81,80 \text{ W/m}^2$ aplicada como condição de contorno utilizando uma vazão de acordo com a curva do exaustor na pressão de 30 Pa na condição de saída. Na Figura 23 é mostrada a comparação entre as velocidades coletadas de forma manual e obtidas pela simulação.

As outras correlações foram verificadas para prever a melhor distribuição de temperatura. Essas distribuições de temperatura foram simuladas e na Tabela 7. Na próxima seção

Figura 22 – Perfil de Temperatura CFD x Experimental

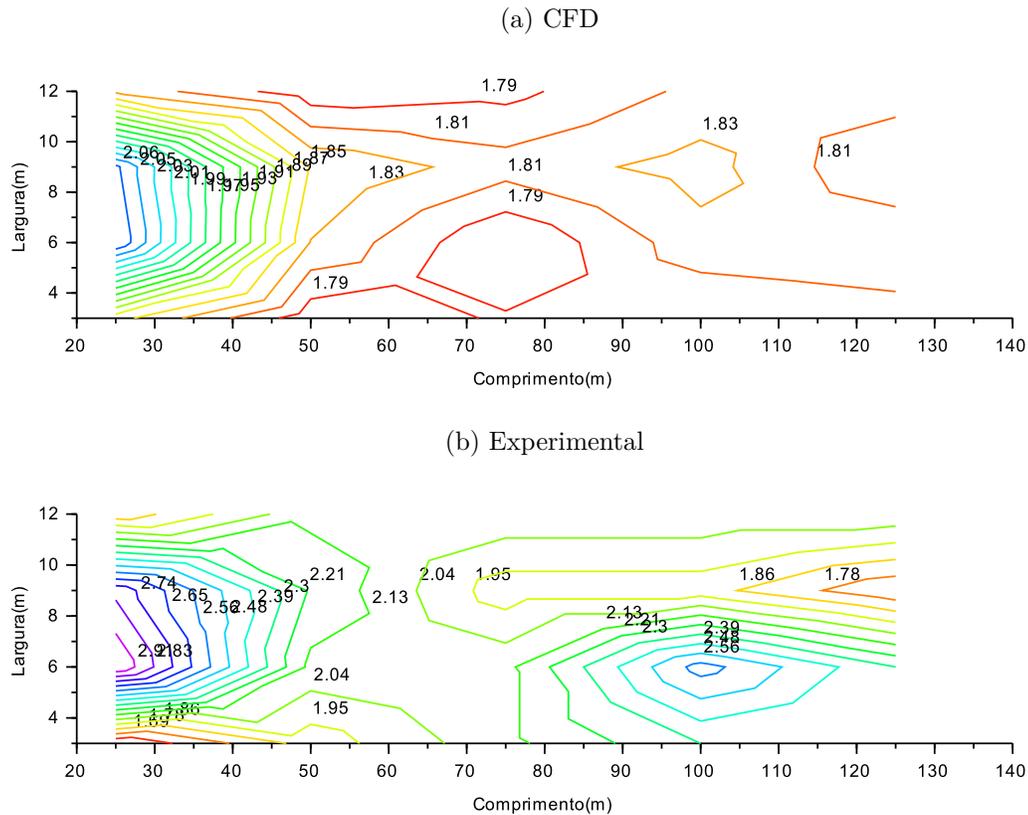


são apresentados os erros.

Nessa comparação os casos utilizaram condições de contorno considerando a transferência de calor por condução no interior do aviário com uma temperatura superficial externa igual a do ambiente externo registrada no horário. Uma situação que poderia ser usada para prever o ambiente de uma possível construção. Ou seja, a temperatura externa e a umidade interna são os únicos parâmetros medidos para realizar a simulação. A umidade ainda pode ser obtida pela eficiência da placa evaporativa, mas foi utilizado o valor medido para melhores resultados.

Para esta seção, o estudo de caso utilizando o fluxo de calor como condição de contorno obteve um erro relativo de 1,02% para a temperatura e de 15,25% para a velocidade e um valor de NMSE para a velocidade de 0,045, com a vazão alvo em 9,7 kg/s.

Figura 23 – Perfil de Velocidade CFD x Experimental



4.4 DESVIOS DO MODELO

O erros devem ser obtidos para a completa avaliação do modelo. Nesta seção os erros foram apresentados em conjunto para melhor visualização para fins de comparação e validação. O erro entre casos e sensores serão verificados, pelo seu comportamento durante períodos de medições e serão apresentados para melhor conhecimento sobre eles.

4.4.1 Erros dos casos simulados

Os erros para as diferentes correlações usadas são apresentadas na Tabela 7 para a temperatura utilizando a condição de contorno o fluxo de calor.

Tabela 7 – Erros obtidos para correlações

Condição de contorno	NMSE	Erro Relativo [%]
(XIN et al., 2001) sem ajuste	0.0001726	1.02
(XIN et al., 2001) com ajuste	0.0006688	2.20
CIGR	0.0002037	1.25
(XIN et al., 2001 apud SEO et al.; BLANES-VIDAL et al., 2009, 2008)	0.0001749	1.19

O erro da correlação sem ajustes de Xin et al. (2001) se mostrou a melhor previsão de acordo com a Tabela 7. Ele teve o menor erro entre as correlações utilizadas para o fluxo de calor como condição de contorno.

Os erros em relação a velocidade no interior do aviário foram verificados e comparados pela Equação 3.3 do Erro Médio Quadrático Normalizado. Na Tabela 8 é apresentado o erro em relação as velocidades utilizando a condição de contorno com a vazão alvo descrita.

Tabela 8 – Erros obtidos para condições de contorno de saída

Condição de contorno	NMSE
Vazão de 7,7 kg/s	0.0886397
Vazão de 9,7 kg/s	0.0453817
Vazão de 11,0 kg/s	0.0180922

4.5 ANÁLISE DO AMBIENTE INTERNO E EXTERNO

O ambiente interno, segundo a amostra coletada, teve uma variação de $3,2^{\circ}\text{C}$ ao longo de 125 m de escoamento. Esse valor de variação de temperatura ocorre na altura de 0,5 m em que os sensores foram instalados. Porém, a variação de temperatura da entrada para a saída no mesmo horário ficou em $1,7^{\circ}\text{C}$. As aves sofrem com essa diferença de temperatura que está muito mais elevada na porção do ambiente que elas residem.

Os erros dos casos previstos foram baixos para o parâmetro temperatura. Nota-se um menor erro para a correlação sem ajustes. A correlação com ajuste mostrou-se menos satisfatória como condição de contorno no método proposto. A temperatura média coletada da amostra foi de $28,82^{\circ}\text{C}$ com um desvio padrão de $0,93^{\circ}\text{C}$. A análise prevista de menor erro mostrou um valor médio em $28,65^{\circ}\text{C}$, com um desvio padrão de $0,91^{\circ}\text{C}$. Para o parâmetro analisado da temperatura pode-se dizer que está muito próximo do que foi obtido através do sistema de medição.

A velocidade média medida foi $2,15\text{ m/s}$ com um desvio de $0,344\text{ m/s}$ obtidos de todos os pontos. Os dados coletados em campo em comparação com o que foi obtido pelo CFD, de média $1,83\text{ m/s}$ com desvio padrão de $0,087\text{ m/s}$, pode-se ver uma grande variação entre os pontos. Na previsão do modelo computacional deve-se observar a consideração de regime permanente, o qual não prevê as variações no escoamento de forma completa.

As diferenças de temperatura entre medido e previsto obtidas pelo cálculo no erro médio quadrático normalizado são baixos em todas as correlações utilizadas. Observa-se que a temperatura é uma grandeza que deve ser investigada sobre o valor no NMSE que corresponde a uma boa previsão.

4.5.1 Sensores Ambientais

Os sensores localizados nas condições de contorno de entrada e saída foram analisados durante um período para observar o comportamento nesses locais. Primeiramente, tem-se que verificar as pressões de entrada e no exaustor, identificando a pressão negativa gerada pelos exaustores. Na Figura 24 tem-se o histórico de pressão externa e interna. Até o 4º dia não havia pintinhos e o exaustor estava desligado. Cada aquisição foi tomada a cada hora. No 4º dia ligou-se os exaustores para desinfecção e algumas horas depois para receber os pintinhos. Na Figura 25 percebe-se quando o exaustor está em funcionamento.

Figura 24 – Pressão externa e no exaustor no período de 7 dias

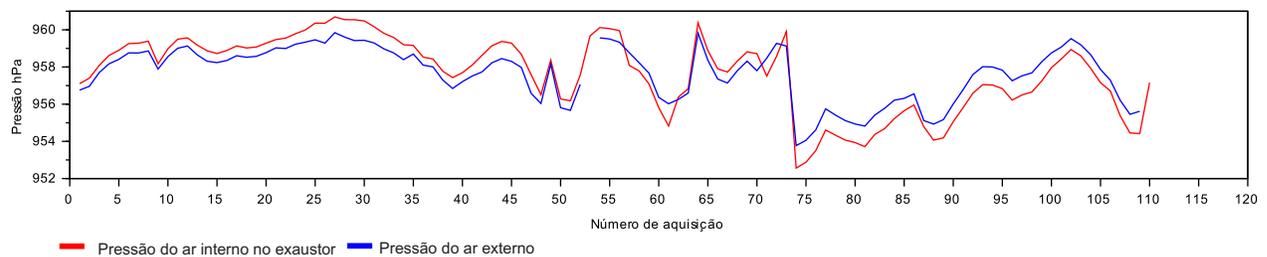
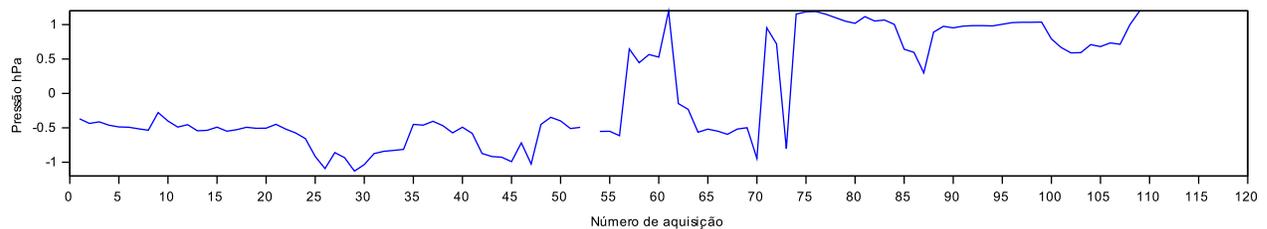


Figura 25 – Diferencial de pressão do exaustor no período de 7 dias



Durante o período das 03h:30min às 19h:30min (Horário Local) foi feita aquisição de dados do sensor elaborado para medir a velocidade e direção do vento observando a variação no tempo. (Figura 26)

Outra variável que foi mensurada do ambiente externo é a pressão absoluta no mesmo período (Figura 27), a variação detectada é devido a mudanças no clima como temperatura e massas de ar em movimento.

Figura 26 – Dados de período de 16 horas indicador de velocidade do vento

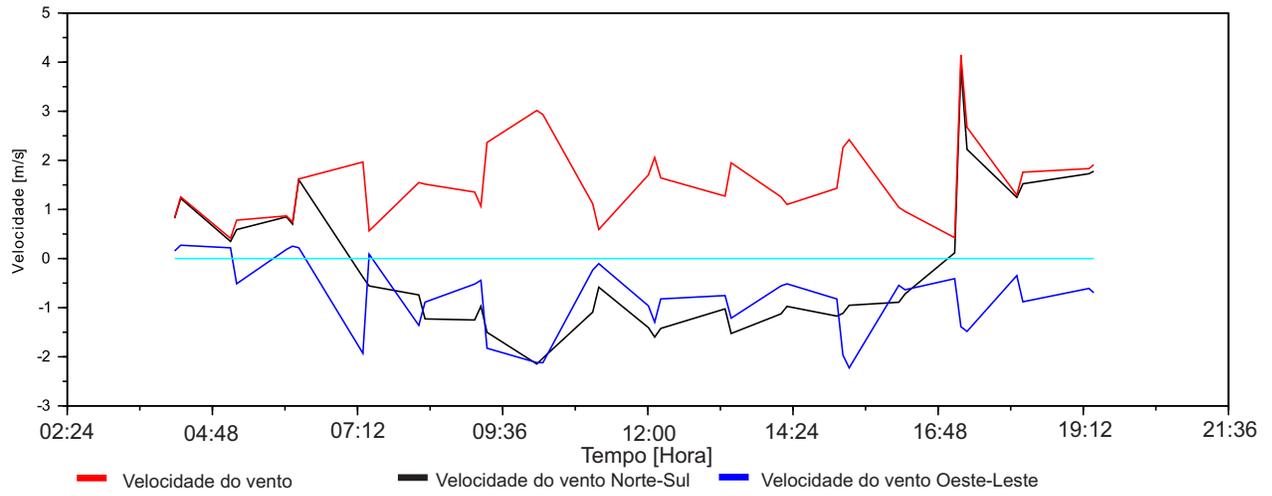
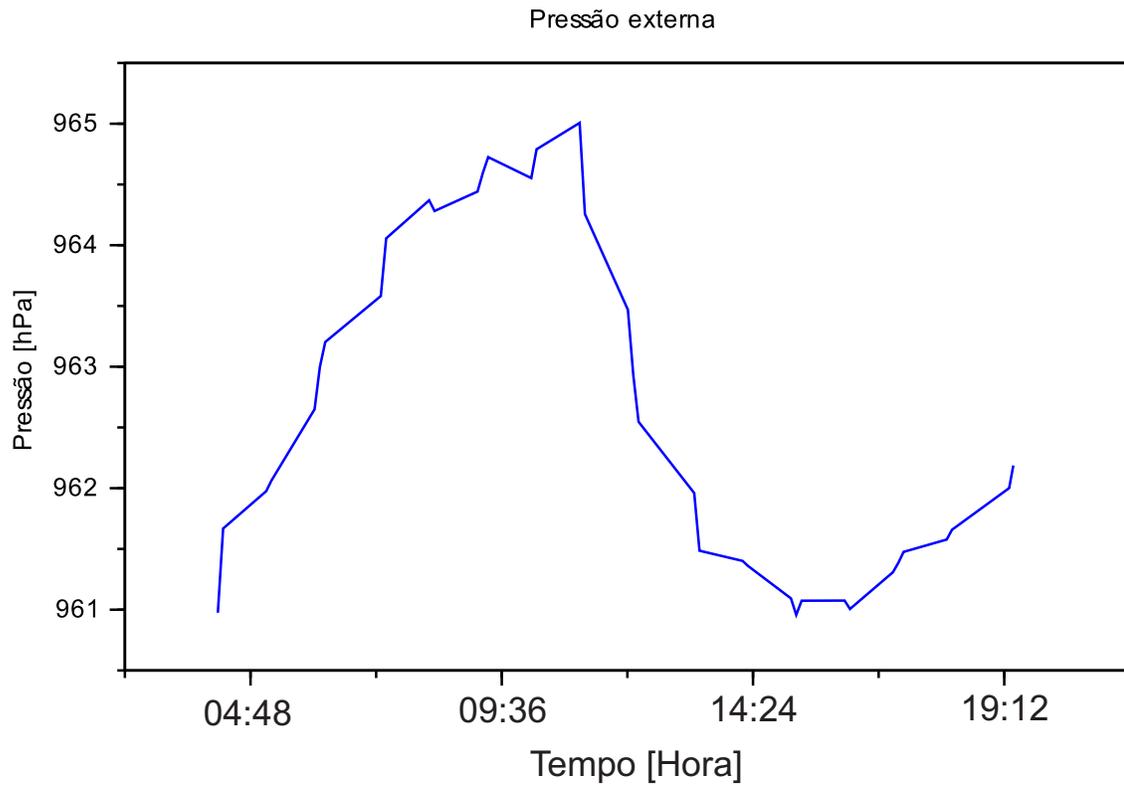


Figura 27 – Dados de período de 16 horas da pressão externa



4.6 CASOS DE NOVAS PROPOSTAS DE CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA

Neste trabalho foi proposto um método para prever a distribuição de temperatura no interior de um aviário. Resta verificar possíveis arranjos de equipamentos que podem melhorar a distribuição de temperatura através do processo proposto. Os resultados de novos arranjos são comparados com a distribuição prevista de menor erro NMSE. Elas estão expostas em forma de perfis de temperatura e velocidade como um resultado qualitativo. Em termos de valores são extraídos os máximos e mínimos.

Os novos arranjos do sistema foram simulados e são apresentados na Figura 28. Foram feitas 4 novos arranjos com mudanças nas entradas. Foram feitas algumas modificações descritas a seguir:

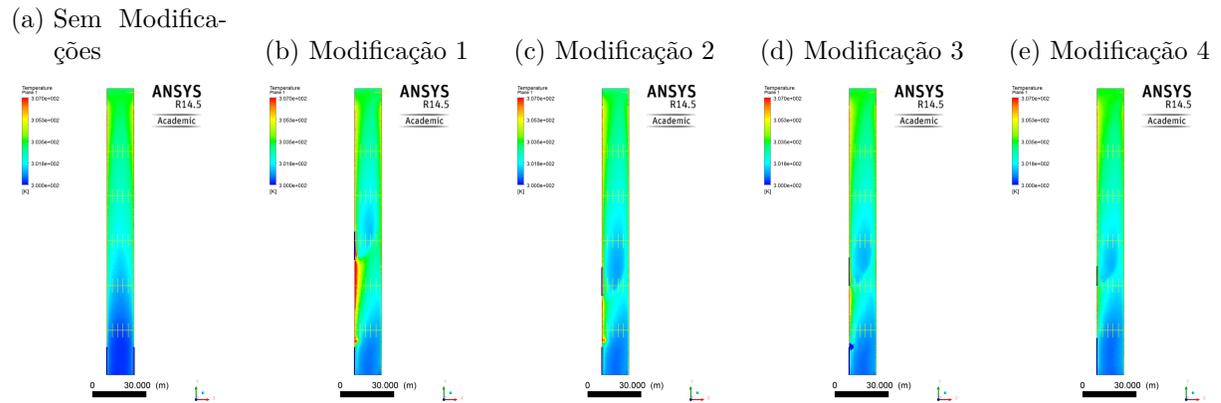
- a) Modificação 1 - Duas entradas do mesmo tamanho que a atual, mas ao invés de ser de lados opostos, os dois evaporadores foram colocados do mesmo lado a uma distância de com 60 m entre elas (Figura 28b).
- b) Modificação 2 - Duas entradas do mesmo tamanho que a atual e do mesmo lado a uma distância de com 30 m entre elas (Figura 28c).
- c) Modificação 3 - Duas entradas do mesmo tamanho que a atual e mesmo lado a uma distância de com 30 m entre elas, com variação de ângulação do regulador em metade no evaporador mais ao centro da estrutura (Figura 28e).
- d) Modificação 4 - Um evaporador com 1,5 do comprimento do original e outro com 0,5 do comprimento mantendo eles do mesmo lado e com uma distância de 40 m, sem variar a abertura entre eles (Figura 28d).

Em complemento, na Tabela 9 são apresentados dados sobre os mesmos pontos considerados na parte experimental. O Anexo A apresenta os perfis a seguir com tamanho de melhor visualização.

Tabela 9 – Comparações entre os casos

Caso	$T_{Média} [^{\circ}C]$	$T_{Máx} [^{\circ}C]$	$V_{Média} [m/s]$	$V_{Máx} [m/s]$	$V_{Mín} [m/s]$
Sem Modificações	28,65	30,01	1,83	2,08	1,76
Modificação 1	29,05	31,10	1,45	2,27	0,33
Modificação 2	28,75	30,22	1,63	2,48	0,33
Modificação 3	28,82	30,25	1,51	2,46	0,38
Modificação 4	28,79	30,28	1,60	2,38	0,61

Figura 28 – Casos simulados



Pode-se observar tanto pelos perfis simulados apresentados quanto na Tabela 9, que não há nenhum ganho nas modificações em relação a configuração atual.

Para os casos, apesar de ter um desvio da temperatura menor na modificação 3 e 4, percebe-se uma velocidade alta em alguns lugares. Isto não é muito desejável, pois locais de muita ventilação ficam, muitas vezes, sem aves devido ao incomodo do vento tornando o caso atual ainda a melhor opção.

CONCLUSÃO

Os parâmetros termodinâmicos que influenciam o ambiente interno do aviário foram identificados e medidos. Durante o trabalho foi elaborado um sistema para a coleta de temperatura, velocidade e pressão do ar, utilizando software e hardware de “código aberto”. O sistema de coleta dados desenvolvido é robusto e pode adquirir dados que podem ser utilizados tanto para monitoramento e controle, bem como serem utilizados como condições de contorno para simulação CFD. Além disso, o sistema mostrou-se flexível, extremamente barato e capaz de oferecer a precisão desejada dos dados.

Com o monitoramento pode-se acompanhar em tempo real o comportamento da temperatura e da umidade. Pode-se também concluir que o aviário de estudo se encontra acima do limite de umidade desejado, visto que ultrapassa os 80% descrito como ótimo de condição ambiental para o desenvolvimento dos frangos. Para a simulação, a condição de contorno que gera uma representação mais real do comportamento da temperatura dentro do aviário é a que utiliza o fluxo de calor , obtendo erro relativo de 1,02 % para temperatura. Para o fluxo de ar dentro do aviário a melhor condição foi a aplicação de uma vazão alvo de 11 kg/s para cada exaustor.

Utilizando os dados coletados pelo sistema de aquisição pode-se validar a utilização do CFD, tanto para distribuição de temperatura, quanto da velocidade do ar. O CFD se mostrou uma ferramenta muito útil na discussão de melhorias de ambientes confinados. No estudo de novas configurações de posição e tamanho dos evaporadores dentro do aviário, obteve-se a resposta que a situação atual empregada é a melhor, pois, nenhuma das configurações propostas se mostraram superiores à já existente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Módulos com sensores por meio de comunicação Wi-Fi.

Anemômetro digital juntamente com os sensores de termohigrômetros para aquisição real dos dados.

Fazer um sistema de controle de forma a poder atuar nas variáveis manipuladas, conforme se altera as variáveis/propriedade controladas.

REFERÊNCIAS

- ANSYS INC. **ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide**. Canonsburg, 2009. 816 p.
- ANSYS INC. **ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide**. Canonsburg, 2009. 2070 p.
- ANSYS INC. **ANSYS Fluent Product Overview**. Canonsburg, 2015.
- ARDUINO. **Introduction**. 2015. Arduino Website. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 02 jan. 2015.
- BIG DUTCHMAN. **Exaustor 50” 70**. 2015. Disponível em: <<http://bigdutchman.com.br/produtos/sobre/exaustor-50-70/59>>. Acesso em: 17 jan. 2015.
- BJERG, B. et al. Three-dimensional airflow in a livestock test room with two-dimensional boundary conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, n. 3, p. 267 – 274, 1999. ISSN 0021-8634.
- BJERG, B. et al. Se—structures and environment: The effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 77, n. 3, p. 317 – 326, 2000. ISSN 0021-8634.
- BJERG, B. et al. Modeling of air inlets in {CFD} prediction of airflow in ventilated animal houses. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, n. 1–3, p. 223 – 235, 2002. ISSN 0168-1699.
- BLANES-VIDAL, V. et al. 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. ISSN 1537-5110.
- BLANES-VIDAL, V. et al. Development and field test of an on-line computerized instrumentation system for air velocity, temperature and differential pressure measurements in poultry houses. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 3, 2010. ISSN 2171-9292.
- BOON, C.; BATTAMS, V. Air mixing fans in a broiler building —their use and efficiency. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 39, n. 2, p. 137 – 147, 1988. ISSN 0021-8634.
- BOSCH SENSORTEC. **Data sheet BMP180 Digital pressure sensor**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmp180/BST-BMP180-DS000-09.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2015.
- BUSTAMANTE, E. et al. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (cfd) in a cross-mechanically ventilated broiler farm. **Energies**, v. 6, n. 5, p. 2605–2623, 2013. ISSN 1996-1073.

BUSTAMANTE, E. et al. Multisensor system for isotemporal measurements to assess indoor climatic conditions in poultry farms. **Sensors**, v. 12, n. 5, p. 5752–5774, 2012. ISSN 1424-8220.

CORRÍA, A. M. E. **Avaliação do controle do ambiente em galpões de frangos de corte criados em alta densidade**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2001.

CURI, T. M. R. de C. **Avaliação do sistema de ventilação em instalações para frangos de corte através de diferentes modelagens**. Tese (Doutorado), Campinas, 2014.

DICIO. **O Dicio, Dicionário Online de Português**. 2014. Disponível em: <<http://www.dicio.com.br/>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

ELECTRONICS AOSONG CO. LTD. **DHT22 - Digital-output relative humidity & temperature sensor/module**. [S.l.], 2010. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

EYMARD, R.; GALLOUËT, T.; HERBIN, R. Finite volume methods. **Handbook of numerical analysis**, Elsevier, v. 7, p. 713–1018, 2000.

FEVERWATCHER. **FeverWatchers Non-Contact Infrared Thermometer**. 2015. Disponível em: <<http://www.feverwatcher.com/swine-flue-thermometer-p-190.html>>. Acesso em: 05 fev. 2015.

FURLAN, R. A. **Avaliação da nebulização e abertura de cortinas na redução da temperatura do ar em ambiente protegido**. Tese (Doutorado), Piracicaba, 2001.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Classificação Climática**. 1998. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 03 fev. 2015.

INSTRUTHERM. **Anemômetro Digital Portátil AD-250**. 2015. Disponível em: <<http://www.instrutherm.com.br/>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

JAZIZADEH, F. et al. User-led decentralized thermal comfort driven {HVAC} operations for improved efficiency in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 70, n. 0, p. 398 – 410, 2014. ISSN 0378-7788.

LEE, I.-B.; SASE, S.; SUNG, S.-H. Evaluation of cfd accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. **Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ**, v. 41, n. 1, p. 53–64, 2007.

LEE, I. bok et al. Ventilation design for a chick incubator using computational fluid dynamics. **Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ**, v. 43, n. 3, p. 227–237, 2009.

MEDEIROS, C. M. **Ajuste de modelos e determinação de índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa; Departamento de Engenharia Agrícola, 2001.

MENEGALI, I. **Diagnóstico da qualidade do ar na produção de frangos decorte em instalações semi-climatizadas por pressão negativa epositiva, no inverno, no sul do brasil**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa; Departamento de Engenharia Agrícola, 2005.

MOSTAFA, E. et al. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. **Biosystems Engineering**, p. 293–303, 06 2012.

MUNTERS. **Painel de Resfriamento Evaporativo**. 2015. Disponível em: <<https://www.munters.com/pt/munters/products/coolers--humidifiers/celdek-7060-15-evaporative-cooling-pad/>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

NORTON, T. et al. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 1, p. 78 – 99, 2009. ISSN 1537-5110.

NORTON, T. et al. Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural of ventilation systems in the agricultural industry: [a review]. **Bioresource Technology**, Food Refrigeration and Computerised Food Technology Research (FRCFT) Group, Biosystems Engineering, National University of Ireland, p. 2386–2414, 01 2007.

OSORIO, J. A. S. et al. Una revisión acerca de la dinamica de fluidos computacionales (cfd) en instalaciones avícolas. **DYNA**, v. 79, n. 175, p. 142–149, 2012. ISSN 00127353.

OSORIO, S. J. A. **Measurement and cfd modeling of ammonia concentration, flux and thermal environment variables in open side broiler housing**. [S.l.]: Universidade Federal de Viçosa; Departamento de Engenharia Agrícola, 2011.

REVIEW of 11 Temperature and Humidity Sensors, A. DFRobot - Driving the Future (ecommerce), 2014. Disponível em: <<http://www.dfrobot.com/index.php?route=DFblog/blog&id=45&search=motion+sensor>>. Acesso em: 23 dez. 2014.

SAiD, M.; MACDONALD, R.; DURRANT, G. Measurement of thermal stratification in large single-cell buildings. **Energy and Buildings**, v. 24, n. 2, p. 105 – 115, 1996. ISSN 0378-7788.

SARTOR, V. et al. Sistemas de resfriamento evaporativo e o desempenho de frangos de corte. **Scientia Agricola**, SciELO Brasil, v. 58, n. 1, p. 17–20, 2001.

SCILAB ENTERPRISES S.A.S. **About Scilab**. 2014. Disponível em: <<http://www.scilab.org/scilab/about>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

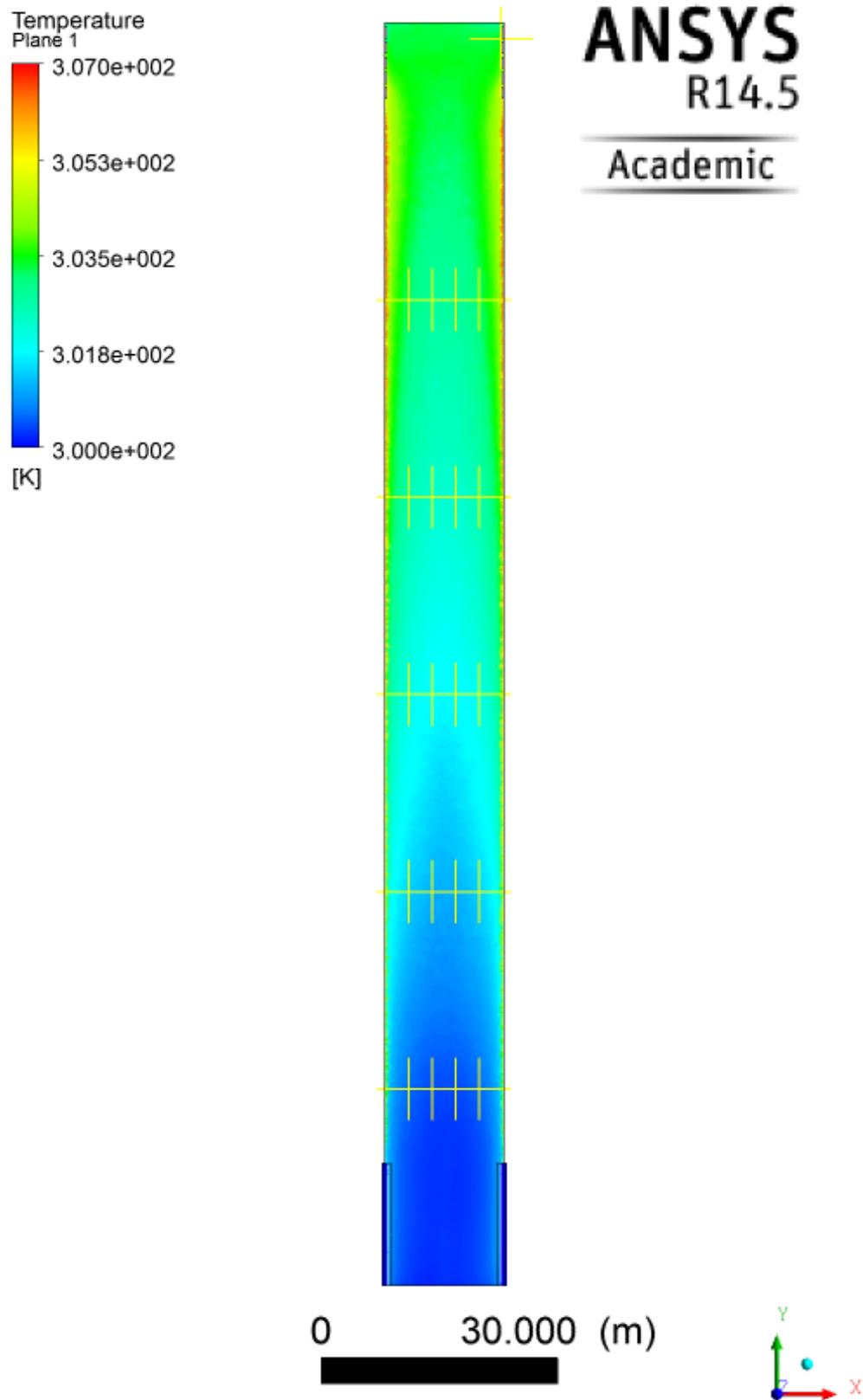
SCOTT, N. R. Livestock buildings and equipment: A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 29, n. 2, p. 93 – 114, 1984. ISSN 0021-8634.

SEO, I.-H. et al. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 1, p. 106 – 117, 2009. ISSN 1537-5110.

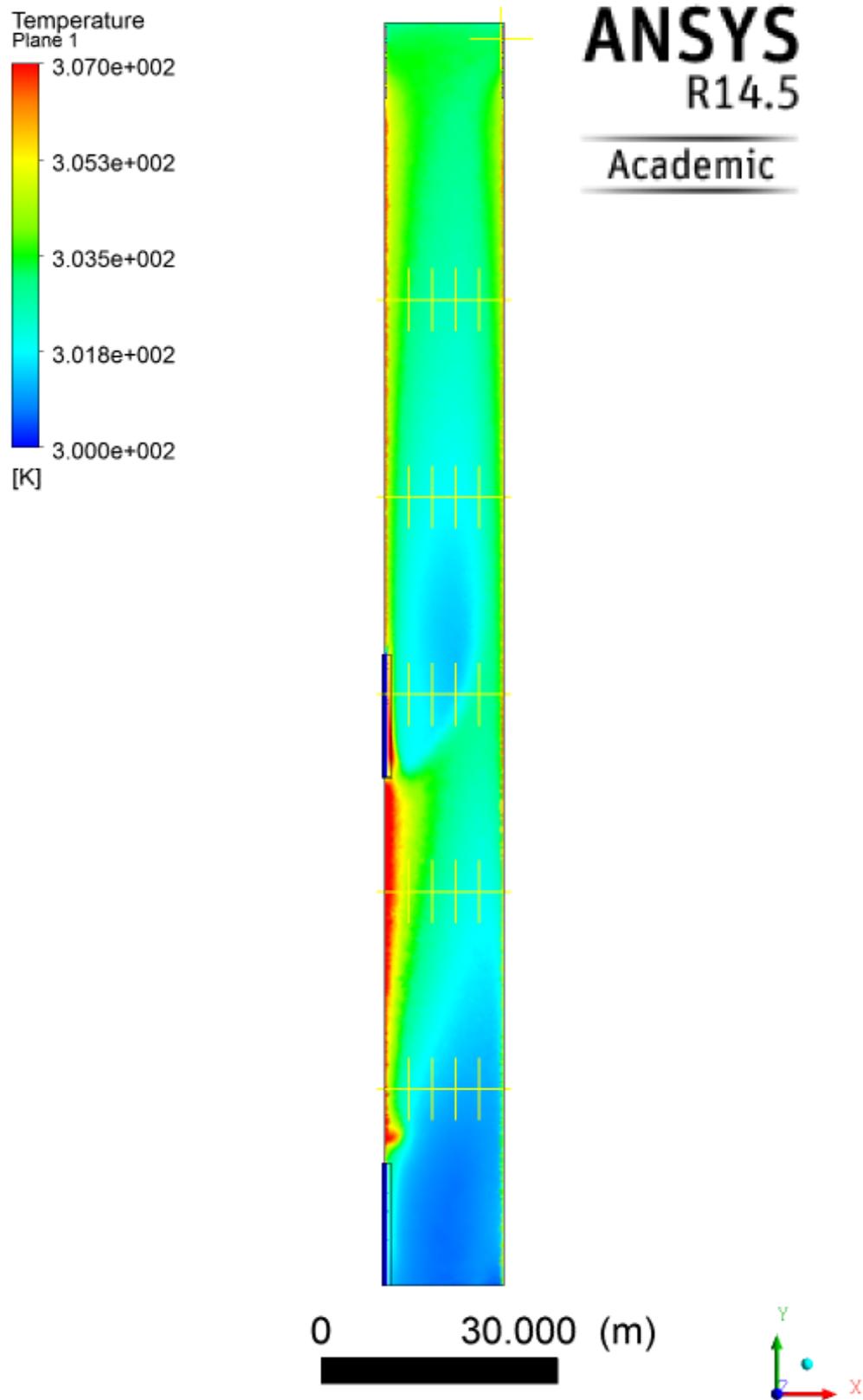
- SEO, I.-h. et al. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals. **Biosystems Engineering**, Seoul, p. 91–106, 11 2011.
- SILVA, I.; VIEIRA, F. Ambiência animal e as perdas produtivas no manejo pré-abate: o caso da avicultura de corte brasileira. **Archivos de Zootecnia**, v. 59, p. 113–131, 2010.
- TEITEL, M.; TANNY, J. A note on energy saving in heated enclosures. **Building and Environment**, v. 31, n. 6, p. 537 – 540, 1996. ISSN 0360-1323.
- VENTURA, R. E. H. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de resfriamento evaporativo, por aspersão intermitente, na cobertura de aviários usando modelos de escala distorcida**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas; Faculdade de Engenharia Agrícola, 1998.
- XIA, B.; SUN, D.-W. Applications of computational fluid dynamics (cfD) in the food industry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, n. 1–3, p. 5 – 24, 2002. ISSN 0168-1699.
- XIN, H.; BERRY, I.; COSTELLO, T. A computerized measurement and data acquisition system for field poultry research. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 11, n. 2-3, p. 143–156, 1994. Cited By 7.
- XIN, H. et al. Temperature and humidity profiles of broiler houses with experimental conventional and tunnel ventilation systems. **Agricultural and Biosystems Engineering**, 1994.
- XIN, H. et al. Heat and moisture production of poultry and their housing systems: broilers. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 6, p. 1851, 2001.
- ZANOLLA, N. et al. Sistemas de ventilação em túnel e lateral criação de frangos de corte com alta densidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, 1999.
- ZHANG, G. et al. Test room for validation of airflow patterns estimated by computational fluid dynamics. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, n. 2, p. 141 – 148, 2000. ISSN 0021-8634.

Anexos

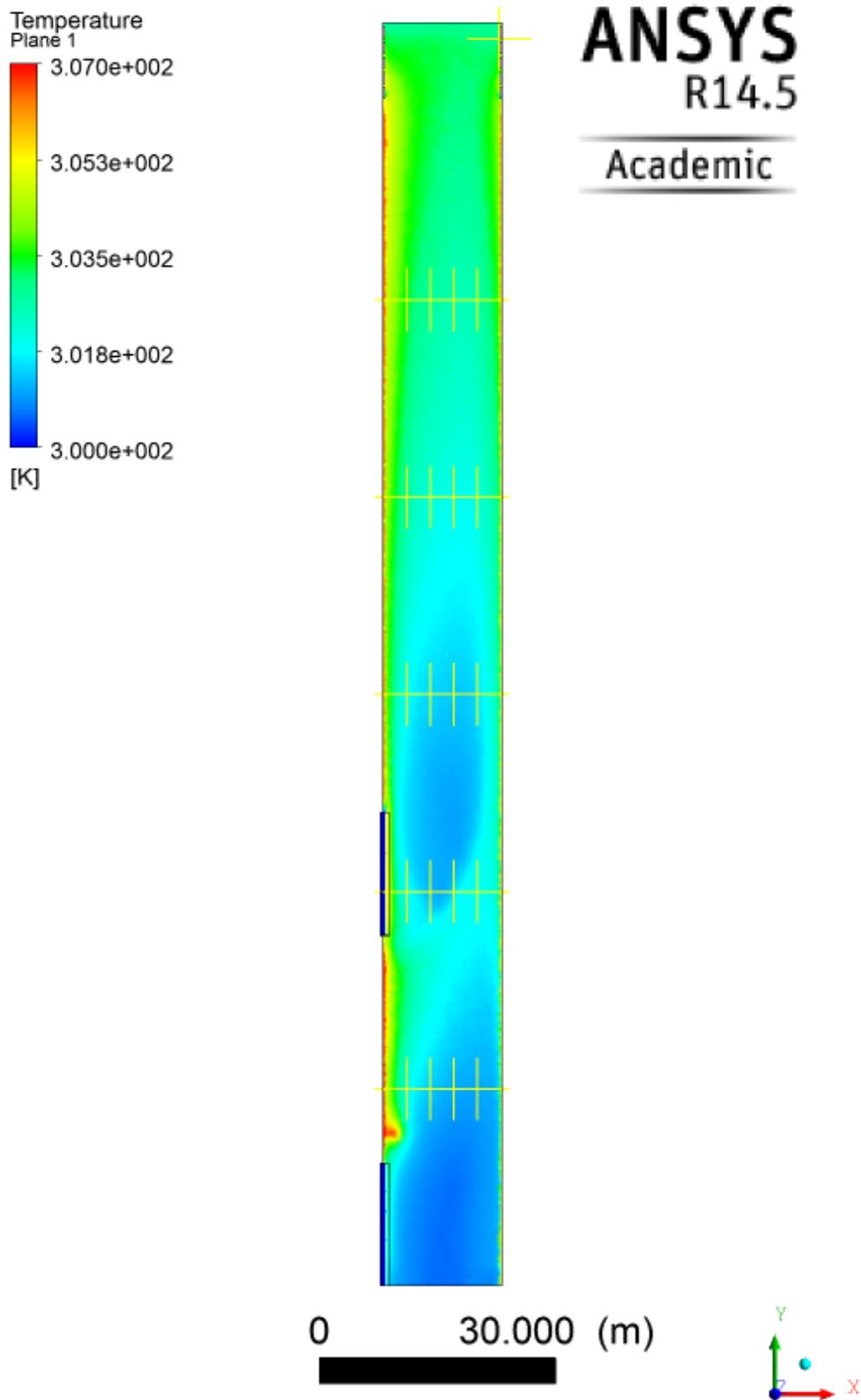
ANEXO A – CASOS COM NOVAS CONFIGURAÇÕES



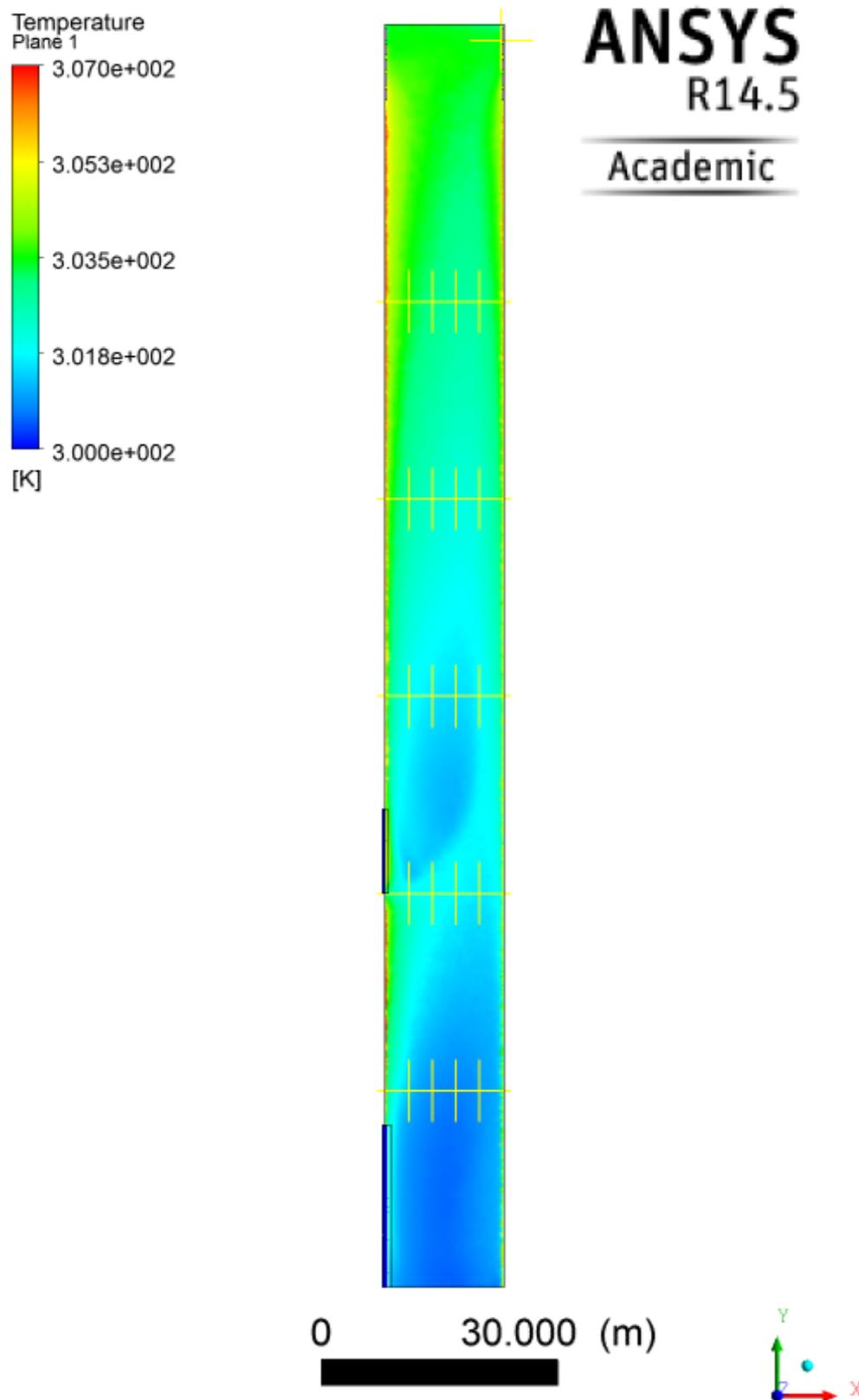
Caso simulado com configuração atual. Evaporadores de lados opostos com 15,60 m.



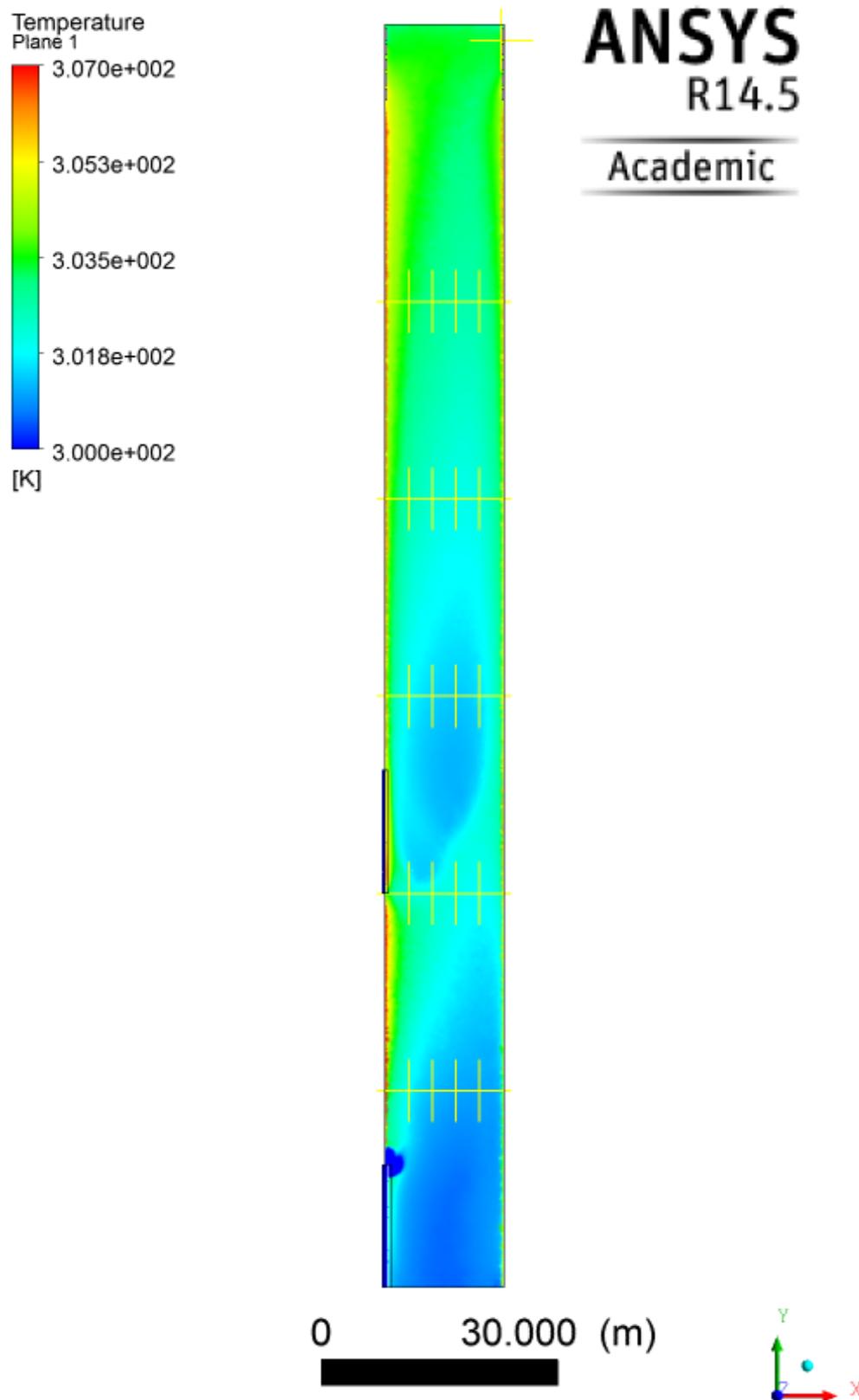
Caso simulado com evaporadores separados em 60 m instalados na face norte



Caso simulado com evaporadores separados em 30 m instalados na face norte



Caso simulado com evaporadores separados em 40 m instalados na face norte. Evaporadores com tamanhos de 20,80 m e 10,80 m.



Caso simulado com evaporadores separados em 30 m instalados na face norte. Evaporadores com tamanhos igual ao original, ângulo do anteparo do evaporador inicial com dobro do valor do segundo, logo ao centro.