

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO
APLICADO A GALPÕES AVÍCOLAS COM USO DE
ELEMENTOS FINITOS

FLÁVIA FERNANDES DE LEVA

NOVEMBRO
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



**NERFAE – NÚCLEO DE ELETRICIDADE
RURAL E FONTES ALTERNATIVAS DE
ENERGIA**

**ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO
APLICADO A GALPÕES AVÍCOLAS COM USO DE
ELEMENTOS FINITOS**

TESE APRESENTADA POR **FLÁVIA FERNANDES DE
LEVA** À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA,
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTORA EM
CIÊNCIAS.

BANCA EXAMINADORA:

PROF. CARLOS HENRIQUE SALERNO, DR. (UFU) ;

PROF. DELLY OLIVEIRA FILHO, PhD. (UFV);

PROF^a. CECÍLIA DE FÁTIMA SOUZA, Dra. (UFV);

PROF. JOSE ROBERTO CAMACHO, PhD. (UFU) – ORIENTADOR;

PROF. SEBASTIÃO CAMARGO GUIMARÃES JUNIOR, DR. (UFU).

UBERLÂNDIA - MG, NOVEMBRO DE 2010.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

L655e Leva, Flávia Fernandes de, 1972-
 Estudo de sistemas de aquecimento aplicado a galpões avícolas com
 uso de elementos finitos [manuscrito] / Flávia Fernandes de Leva. - 2010.
 172 f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Aquecimento - Teses. 2. Indústria avícola - Aquecimento e ventilação - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 62-69:636.5

**ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO
APLICADO A GALPÕES AVÍCOLAS COM USO DE
ELEMENTOS FINITOS**

FLÁVIA FERNANDES DE LEVA

TESE APRESENTADA POR **FLÁVIA FERNANDES DE LEVA** À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE DOUTORA EM CIÊNCIAS.

PROF. JOSÉ ROBERTO CAMACHO, PhD.
Orientador

PROF. ALEXANDRE CARDOSO, Dr.
Coordenador do curso de Pós-Graduação

PORQUE HÁ ESPERANÇA PARA A ÁRVORE,
QUE, SE FOR CORTADA, AINDA TORNE A
BROTAR, E QUE NÃO CEsSEM OS SEUS
RENOVOS. AINDA QUE ENVELHEÇA A SUA
RAIZ NA TERRA, E MORRA O SEU TRONCO
NO PÓ, CONTUDO AO CHEIRO DAS ÁGUAS
BROTARÁ, E LANÇARÁ RAMOS COMO UMA
PLANTA NOVA. (JÓ 14; 7-9)

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO A MEU ESPOSO
LINDOLFO MARRA DE CASTRO NETO, A MEU PAI
EDSON FERNANDES DE LIMA, MINHA MÃE
TEREZINHA FERNANDES DE LIMA, MINHAS IRMÃS
VÂNIA FERNANDES DE LEVA E ELAINE
FERNANDES DE LEVA E À MEUS IRMÃOS EDSON
FERNANDES DE LIMA JUNIOR, JOSÉ HUMBERTO
FERNANDES E VALDEIR DONIZETE RIBEIRO.

AGRADECIMENTOS

*DEUS – ÚNICO E SOBERANO, E SEM ELE NADA É
POSSÍVEL.*

AGRADEÇO:

- A MEU ESPOSO LINDOLFO MARRA DE CASTRO NETO, POR SUA PACIÊNCIA E DEDICAÇÃO;
- AO MEU PAI EDSON FERNANDES DE LIMA, MINHA MÃE TEREZINHA FERNANDES DE LIMA;
- AO PROFESSOR JOSÉ ROBERTO CAMACHO PELA SUA DEDICAÇÃO À PESQUISA, SEM ELE EU NÃO TERIA DESENVOLVIDO OS ESTUDOS NESSE ASSUNTO.
- ESTENDO MEUS AGRADECIMENTOS A TODOS QUE PORVENTURA CONTRIBUÍRAM DE ALGUMA FORMA PARA A REALIZAÇÃO DESSE TRABALHO.

RESUMO

Essa pesquisa foi conduzida com o objetivo de avaliar e comparar o comportamento da temperatura dentro do galpão avícola com aquecimento convencional tipo campânula a gás com o aquecimento pelo piso com o uso de serpentina. Foi utilizado para a análise do comportamento da temperatura o programa de computador de domínio público FEMM 4.2 que utiliza técnicas de elementos finitos, com base em 2 dos lotes coletados. O aquecimento pelo piso se dá com a utilização de água quente passando por um sistema tipo serpentina, que é instalada abaixo da cama, essa água quente é proveniente de aquecedor solar. A partir dos resultados obtidos com as simulações nota-se que o aquecimento através do piso fornece uma distribuição mais homogênea da temperatura quando comparado com o aquecimento tipo campânula. O fluxo de calor se dá de baixo para cima suprimindo assim a necessidade maior de aquecimento da ave que é na parte peitoral. Foi realizada uma avaliação do consumo energético com a utilização do GLP, o que possibilitou uma análise comparativa da quantidade de energia elétrica necessária para fornecer a mesma energia térmica e os gastos financeiros obtidos com o aquecimento via GLP ou energia elétrica para cada lote.

PALAVRA-CHAVE:

Consumo energético, aquecimento pelo piso, ambiência, conforto térmico, energia solar.

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate and compare the behavior of temperature inside poultry sheds with bell jar type gas conventional heating and heating in the floor with use of a heat exchanger. It was used the public domain program FEMM 4.2 for the analysis of temperature through the use of finite elements techniques with data collected from two lots. Heating in the floor is made with the hot water flowing through a heat exchanger, which is installed below the bed; this hot water is from solar heaters. From the results obtained with the simulations can be observed that the heating through the floor provides a more homogeneous distribution breast when compared with the bell jar type heating. The flow of heat is upwards supplying thus the most needed heating of the bird that is the pectoral part. Energy consumption evaluation was made with use of LPG; this has enabled a comparative analysis of the quantity of electric energy necessary to provide the same thermal energy and the financial expenses obtained with the heating though LPG or electric energy for each lot.

KEY-WORDS:

Energy consumption, floor heating, environment, thermal comfort, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Produção de calor versus temperatura ambiente (FREEMAN, 1988).....	7
Figura 2.2	Lanternim.....	14
Figura 2.3a	Sistema de aquecimento a lenha por tambor.....	24
Figura 2.3b	Sistema de aquecimento a lenha tipo fornalha.....	24
Figura 2.4	Campânulas a gás.....	27
Figura 2.5	Aquecimento com lâmpada infravermelha.....	28

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Modos de transferência de calor.....	35
Figura 3.2	Volume de controle diferencial $dz dy dx$, para análise da condução de calor em coordenadas cartesianas, Incropera e DeWitt (1998).....	37
Figura 3.3	Efeitos local e total da transferência de calor por convecção (a) Superfície de forma arbitrária. (b) Placa plana.....	42
Figura 3.4	Desenvolvimento da camada limite fluidodinâmica sobre uma placa plana.....	44
Figura 3.5	Desenvolvimento da camada limite térmica sobre uma placa plana isotérmica.....	46
Figura 3.6	Desenvolvimento da camada limite de concentração de espécie em uma placa plana.....	47
Figura 3.7	Desenvolvimento das camadas limites de velocidade, térmica e de concentração para uma superfície arbitrária.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.8	Natureza direcional da radiação. (a) Emissão de radiação de uma área diferencial dA_1 no interior de um ângulo sólido $d\omega$ subtendido por dA_n em um ponto sobre dA_1 . (b) Sistema de coordenadas esféricas.....	50
Figura 3.9	Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente.....	51

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Malha de Elementos Finitos (para problema plano).....	54
Figura 4.2	Diferentes tipos de elementos finitos.....	54
Figura 4.3	Especificação da posição dos nós da malha.....	56
Figura 4.4	Elemento finito triangular linear, com referência ao sistema de eixos cartesianos.....	57
Figura 4.5	Vetores definidos pelas arestas do elemento, para determinação da área do triângulo.....	60
Figura 4.6	Malha simples de Elementos Finito.....	63
Figura 4.7	Programa FEMM.....	73
Figura 4.8	Definição do problema de estado estacionário.....	73
Figura 4.9	Vista frontal (a) e lateral do galpão (b).....	74
Figura 4.10	Lista de Materiais.....	75
Figura 4.11	Bloco de propriedades dos materiais.....	75
Figura 4.12	Distribuição dos materiais no modelo do galpão.....	76
Figura 4.13	Bloco de propriedades das condições de contorno.....	77
Figura 4.14	Malha de Triangularização do programa em corte transversal da estrutura geométrica do galpão.....	77
Figura 4.15	Tela de simulação.....	78
Figura 4.16	Tela de solução do programa FEMM 4.2.....	78

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	Vista lateral do galpão 1 de criação de aves (Fazenda do Glória)...	83
Figura 5.2	Vista das baias de alojamento das aves.....	84
Figura 5.3	Vista lateral do galpão de criação de aves (TFTM).....	84
Figura 5.4	Mapa de Localização da EAFUDI – Atual IFTM Campus Uberlândia.....	85
Figura 5.5	Vista interior do galpão da avicultura com os círculos de contenção de aves.....	86
Figura 5.6	Sugestão de instalação do sistema de aquecimento pelo piso.....	87
Figura 5.7	Disposição da serpentina no galpão - vista superior.....	88
Figura 5.8	Disposição da serpentina no galpão.....	88

CAPÍTULO 6

Figura 6.1	Perfil da temperatura na altura da cama para várias temperaturas da água considerando a temperatura ambiente de 22°C.....	93
Figura 6.2	Comportamento da temperatura no Galpão 1 utilizando dados medidos no dia 21/01/08 às 08:00 h, corte transversal.....	94
Figura 6.3	Perfil da temperatura dentro do galpão com aquecimento por campânula em posições específicas, piso, cama, mureta, e baia. No dia 21/01/2008 às 08 h.....	95
Figura 6.4	Perfil da temperatura dentro do galpão com uso do aquecimento por campânula em posições específicas, piso, cama, mureta, e forro. No dia 21/01/2008 às 10 h.....	95
Figura 6.5	Comportamento da temperatura no galpão da Fazenda do Glória,	

LISTA DE FIGURAS

	considerando aquecimento por serpentina e os dados do dia 21/01/08 às 08 h.....	96
Figura 6.6	Perfil da temperatura dentro do galpão com uso do aquecimento por serpentina e os dados coletados dia 21/01/08 às 08 h.....	97
Figura 6.7	Comportamento da temperatura com o forro – Aquecimento com Campânulas.....	97
Figura 6.8	Comportamento da temperatura sem o forro – Aquecimento com Campânulas.....	98
Figura 6.9	Perfil da temperatura dentro do galpão com uso do aquecimento por campânulas, com e sem uso do forro, e os dados coletados dia 21/01/08 às 07 h e 30 min.....	99
Figura 6.10	Perfil da temperatura dentro do galpão comparando aquecimento por campânula e pelo piso.....	99
Figura 6.11	Comportamento da temperatura no galpão utilizando dados medidos no dia 20 de outubro de 2007, corte transversal.....	100
Figura 6.12	Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor por campânula, valor medido, dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min.....	101
Figura 6.13	Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 20 de outubro de 2007 às 07 h e 30 min.....	101
Figura 6.14	Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor pelo piso, valor simulado, dia 20 de outubro de 2007 às 07 h e 30 min.....	102
Figura 6.15	Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min.....	103
Figura 6.16	Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 11 h e 30 min.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.17	Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 às 8 h.....	104
Figura 6.18	Comparação do dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 às 11 h.....	105
Figura 6.19	Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 18 de Janeiro de 2009 às 08 h e 30 min.....	105
Figura 6.20	Comparação do dos perfis da temperatura na altura da cama com uso de aquecimento a gás.....	107
Figura 6.21	Comparação do dos perfis da temperatura na altura da cama com uso de aquecimento pelo piso.....	107
Figura 6.22	Retorno de investimento ao trocar aquecimento com campânula a gás e Elétrica pelo aquecimento tipo piso.....	114

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1	Distâncias sugeridas para melhor isolamento das instalações avícolas.....	10
Tabela 2.2	Limite máximo recomendado para a largura do galpão avícola de acordo com o clima.....	11
Tabela 2.3	Altura do pé direito do galpão em função da largura, em climas quentes.....	12
Tabela 2.4	Tipos de Aquecedores.....	16
Tabela 2.5	Temperaturas ambientais ideais para frangos de corte.....	19

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1	Incidência nodais dos elementos.....	63
Tabela 4.2	Dados do galpão padrão avícola.....	74

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1	Dados físicos dos galpões.....	83
Tabela 5.2	Valores de coeficiente de Condutividade térmica (k) para diferentes materiais.....	90

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1	Valores medidos e simulados para a temperatura na altura da cama. Para dia 18 de Janeiro de 2009 às 08 h e 30 min.....	106
Tabela 6.2	Aquecimento Lote 1.....	109
Tabela 6.3	Aquecimento Lote 2.....	110
Tabela 6.4	Aquecimento Lote 3.....	110
Tabela 6.5	Aquecimento Lote 4.....	111
Tabela 6.6	Média de consumo de gás GLP e de energia elétrica.....	112
Tabela 6.7	Preço obtido via orçamento pela Empresa: ALUZIN Calhas Ltda...	113

SIMBOLOGIA

CAPÍTULO 3

A	- área da seção transversal perpendicular ao fluxo de calor (m^2);
A_{sup}	- área da superfície de contato do fluido (m^2);
$C_{A,s}$	- concentração da espécie A na superfície;
C_A	- concentração da espécie A;
$C_{A,\infty}$	- concentração encontrada na corrente livre;
C_f	- coeficiente de atrito local;
C_p	- calor específico do material ($J/kg\ K$);
D_{AB}	- coeficiente de difusão binária (m^2/s);
ε	- constante de Stefan-Boltzmann ($\approx 5,67\ 10^{-8}\ W/(m^2\ K^4)$);
$\dot{E}_e$	- taxa de condução de calor que entra (W);
$\dot{E}_s$	- taxa de condução de calor que sai (W);
$\dot{E}_g$	- taxa de geração de energia térmica (W);
$\dot{E}_{ar}$	- quantidade de energia térmica interna armazenada (J);
G_λ	- irradiação espectral (W/m^2);
$G_{\lambda ref}$	- componente espectral da Irradiação refletida (W/m^2);
$G_{\lambda abs}$	- componente espectral da Irradiação absorvida (W/m^2);
$G_{\lambda tr}$	- componente espectral da Irradiação transmitida (W/m^2);
h	- coeficiente de troca de calor por convecção (W/m^2K);
$I_{\lambda,e}$	- intensidade espectral ($W/m^2.sr.\mu m$);

SIMBOLOGIA

- k - condutividade térmica do material ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), propriedade que caracteriza o componente dos materiais;
- p - pressão estática (N/m^2);
- $\dot{q}$ - taxa de energia gerada por unidade de volume do meio (W/m^3);
- q - fluxo de calor por condução que atravessa o corpo na direção x (W);
- q'' - fluxo térmico local (W/m^2);
- T_{Sup} - temperatura na superfície de contato do fluido (K);
- T_∞ - temperatura do fluido na corrente livre (K);
- T_{Sup} - temperatura na superfície de contato do fluido (K);
- T_∞ - temperatura do fluido na corrente livre (K);
- T - temperatura (K);
- u - componente em x da velocidade média (m/s);
- u_∞ - componente da velocidade mássica média de um fluido (m/s) na corrente livre;
- v - componente em y da velocidade média (m/s);
- X - forças do corpo em x (N/m^3);
- Y - forças do corpo em y (N/m^3);
- ∂T - diferença de temperatura ($^\circ\text{C}$) entre duas posições do material;
- ∂x - espessura do corpo na direção x (m);
- μ - viscosidade dinâmica ($\text{kg/s} \cdot \text{m}$);
- ρ - massa específica (kg/m^3);
- ϕ - ângulo de azimute (rad);
- ρ - densidade (kg/m^3);
- α - difusividade térmica (m^2/s);
- τ - tensão de cisalhamento (N/m^2).

CAPÍTULO 4

A_t	- área do elemento (m^2);
$\mathbf{F}$	- vetor de coeficientes;
$\mathbf{F}^a$	- vetor de fontes nodais do elemento a ;
$\mathbf{F}^b$	- vetor de fontes nodais do elemento b ;
$\mathbf{F}^c$	- vetor de fontes nodais do elemento c ;
$\mathbf{F}^d$	- vetor de fontes nodais do elemento d ;
f	- fluxo do calor (W/m);
F	- densidade do fluxo do calor (W/m^2);
F_1	- fonte de calor correspondente ao gdl 1;
F_2	- fonte correspondente ao gdl 2;
G	- gradiente de temperatura;
$\mathbf{G}$	- matriz contendo as coordenadas dos nós do elemento;
h	- é o coeficiente de transferência calor (W/m^2K);
H^a	- matriz de incidência do elemento a ;
$\hat{\mathbf{i}}$	- versor do sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z);
$\hat{\mathbf{j}}$	- versor do sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z);
$\mathbf{K}$	- matriz de condutividade do problema;
$\hat{\mathbf{k}}$	- versor do sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z);
k	- condutividade térmica ($W/m.K$);
k_{sb}	- é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$);
T	- temperatura em um ponto (x, y) (K);
n	- representa o sentido da normal ao contorno;
N_g	- número de graus de liberdade da malha;
q	- representa a geração do calor (K) do volume;
T	- temperatura (K);
$\mathbf{T}^e$	- temperatura nodal (K);
$\mathbf{T}$	- vetor de incógnitas das temperaturas nodais da malha;

SIMBOLOGIA

- $\mathbf{T}^a$ - vetor de temperaturas nodais do elemento a ;
 $\mathbf{T}^b$ - vetor de temperaturas nodais do elemento b ;
 $\mathbf{T}^c$ - vetor de temperaturas nodais do elemento c ;
 $\mathbf{T}^d$ - vetor de temperaturas nodais do elemento d ;
 ∇ - gradiente;
 β - é a emissividade da superfície (um valor dimensionado entre 0 e 1).

CAPÍTULO 5

- 860 - constante;
 c - calor específico da substância ($\text{kcal kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);
 h - tempo desejado para aquecimento em horas (h);
 m - massa da substância a ser aquecida (kg);
 P - Potência (kW);
 Q - quantidade de calor (kcal);
 T_1 - temperatura inicial ($^\circ\text{C}$);
 T_2 - temperatura final ($^\circ\text{C}$).

ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO APLICADO A GALPÕES AVÍCOLAS COM USO DE ELEMENTOS FINITOS

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – ESTRUTURA DA TESE.....	1
1.2 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.3 – OBJETIVOS.....	4

CAPÍTULO 2

HISTÓRICO SOBRE A DEMANDA DE ENERGIA EM AVIÁRIOS

2.1 – INTRODUÇÃO.....	6
2.2 – ASPECTOS CONSTRUTIVOS E TOPOLOGIA DOS GALPÕES AVÍCOLAS.....	9
2.2.1 – Localização dos Galpões.....	9
2.2.2 – Características construtivas.....	10
a) Orientação.....	10
b) Largura.....	10
c) Pé direito.....	11
d) Cobertura.....	12

SUMÁRIO

e) Inclinação do telhado e beiral.....	13
f) Lanternim.....	13
g) Piso, área externa e cama.....	14
2.3 – AQUECIMENTO DOS GALPÕES.....	16
2.4 – FATORES TÉRMICOS E AMBIENTAIS EM GALPÕES.....	17
2.4.1 – Influência da temperatura ambiente.....	17
2.4.2 - Umidade Relativa.....	19
2.4.3 - Renovação do ar.....	20
2.4.4 – Amônia.....	21
2.5 – TIPOS DE AQUECEDORES.....	22
a) Aquecedores a Lenha.....	23
b) Campânulas a gás.....	25
c) Os aquecedores a gás com placa cerâmica.....	27
d) Aquecedores a gás tipo infravermelho.....	28
e) Aquecedores Elétricos.....	28
f) Aquecedores em Piso.....	28
g) Outros Aquecedores.....	29
2.6 – USO RACIONAL E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA... ..	31
2.7 – MÉTODOS E MODELOS DE ESTUDOS PARA MELHORIA DO CONFORTO TÉRMICO.....	32
2.8 – O SISTEMA PROPOSTO.....	33

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

3.1 – INTRODUÇÃO.....	35
3.2 – CONDUÇÃO.....	36
a) Coordenadas cartesianas.....	37

SUMÁRIO

b) Coordenadas Cilíndricas.....	40
c) Coordenadas Esféricas.....	40
3.2.1 – Regime estacionário.....	40
3.2.2 – Regime não-estacionário.....	41
3.3 – CONVECÇÃO.....	40
3.3.1 – Camada limite fluidodinâmica.....	43
3.3.2 – Camada limite térmica.....	45
3.3.3 – Camada limite de concentração.....	46
3.3.4 – Aspectos importantes no equacionamento da camada limite.....	47
3.3.5 - Equações aplicadas à camada limite.....	48
3.4 – RADIAÇÃO.....	49
3.4.1 - Absorção, Reflexão e Transmissão em Superfícies.....	51

CAPÍTULO 4

ANÁLISE TÉRMICA POR ELEMENTOS FINITOS

4.1 – INTRODUÇÃO.....	53
4.1.1 - Idéia básica do Método dos Elementos Finitos.....	53
4.1.2 – Aplicação do Método de Elementos Finitos.....	55
a) Formulação do elemento finito triangular linear para o problema de condução de calor bidimensional.....	57
b) Montagem da matriz de condutividade e do vetor de fontes nodais do modelo.....	62
c) Relação entre os vetores de temperaturas nodais do elemento e do modelo.....	63
d) Relação entre os vetores de fontes nodais do elemento e do modelo.....	65
e) Obtenção da matriz de condutividade do modelo.....	67
4.1.3 - Imposição das condições de contorno e solução do sistema de equações.....	69

4.1.4 - Campos de aplicação do Método de Elementos Finitos.....	71
4.2 – O FEMM 4.2 NA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	72
4.3 – EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARCIAIS RELEVANTES USADAS	79
4.4 - CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	80

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 – INTRODUÇÃO.....	82
5.2 – FONTES DE AQUECIMENTO.....	86
5.3 – SIMULAÇÃO.....	89
5.4 – ANÁLISE ECONÔMICA.....	90

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA COM O USO DO FEMM

6.1 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ELEMENTOS FINITOS DOS GALPÕES AVÍCOLAS (VISTA LATERAL).....	93
6.1.1 – FAZENDA DO GLÓRIA.....	93
6.1.2 – PERFIL DA TEMPERATURA NO GALPÃO 2.....	100
6.1.3 – ANÁLISE DE MATERIAIS.....	106

SUMÁRIO

6.1.4 – ANÁLISE ECONÔMICA DOS AQUECEDORES.....	108
a) Lote 1.....	108
b) Lote 2.....	109
c) Lote 3.....	110
d) Lote 4.....	110
6.2 – CÁLCULO DE RETORNO DE INVESTIMENTO.....	112
6.3- OUTRAS ANÁLISES IMPORTANTES.....	114

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 – CONCLUSÕES.....	116
7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
--	------------

ANEXOS

ANEXO A – PERFÍS DE TEMPERATURA.....	128
ANEXO B - ORÇAMENTOS.....	144

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – ESTRUTURA DA TESE

A Tese está dividida em sete capítulos descritos resumidamente a seguir:

CAPÍTULO 1 – Introdução: avaliação do estado da arte da avicultura no Brasil em termos de tecnologia e busca pelo conforto térmico nos aviários;

CAPÍTULO 2 – Histórico sobre a necessidade de energia em aviários: como deve ser construído um aviário, os tipos de aquecedores que estão disponíveis no mercado e o conforto térmico ao qual as aves necessitam;

CAPÍTULO 3 – Fundamentos da transferência de calor: tipos de transferência de calor que auxiliarão na análise da temperatura para que se obtenha a temperatura ideal para o conforto térmico;

CAPÍTULO 4 – Análise térmica por elementos finitos com o programa computacional FEMM: é feita avaliação pelo método de elementos finitos do perfil da temperatura;

CAPÍTULO 5 – Materiais e métodos estabelecem onde e como foram realizadas as coletas de dados;

CAPÍTULO 6 – Dados obtidos e análise de resultados do comportamento da temperatura com o uso do FEMM: parte onde estão resultados de simulações para dois tipos diferentes de aquecedores (solar e campânula a gás);

CAPÍTULO 7 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

1.2 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A avicultura é a atividade agropecuária brasileira que possui o maior e mais avançado acervo tecnológico e tem passado por constantes inovações com o objetivo de melhorar o rendimento do processo produtivo. Para TINÔCO (2001), a indústria avícola brasileira vem buscando tanto nas instalações quanto no ambiente as possibilidades de

melhoria no desempenho das aves e na redução de custos de produção, como forma de manter a competitividade. Segundo MOURA (2001), a criação em alta densidade, número de aves por m², visa o aumento da produção, com o mínimo de investimento em construção e a otimização dos custos fixos.

Nos últimos anos, a avicultura tem-se mostrado como uma atividade incorporadora de novas tecnologias, alcançando altos índices de produtividade, posicionando o Brasil como uma das principais potências mundiais no setor avícola. No início dos anos 80, um frango com 70 dias de idade atingia aproximadamente 2,0 kg de peso vivo, com conversão alimentar média de 3,5. Atualmente, em apenas 42 dias é possível obter frangos com 2,3 kg de peso vivo e conversão alimentar de 1,8. A alta produção de carne por área em um curto espaço de tempo se deve aos avanços tecnológicos e científicos conquistados na genética, nutrição, sanidade e manejo, fazendo com que a produção de frangos atingisse um nível elevado no que diz respeito à produção animal.

Apesar da crise internacional, o mundo produziu mais frango em 2009. Segundo a União Brasileira de Avicultura (UBA), a avicultura mundial produziu no período 71,715 milhões de toneladas. Em termos de consumo os Estados Unidos lidera com 13,058 milhões de toneladas de frango em 2009, seguido pela China, com um consumo de 12,22 milhões de toneladas. O Brasil ficou em quarto lugar, uma produção de 10.932 milhões de toneladas de carne de frango, desse total, cerca de 7,298 milhões de toneladas é para o mercado interno e 3,634 milhões de toneladas para o mercado externo, (UBA, 2010).

A tendência de estudos na área de projetos agrícolas está concentrada na avaliação técnica e econômica de tecnologias, que visam o aumento de eficiência, uma vez que a globalização da economia exige que o setor agrícola seja mais produtivo e ao mesmo tempo mais rentável. Para isso, há necessidade de estudos que conduzam a novas pesquisas que poderão influenciar tanto no aumento da produção quanto na redução de custos de produção, especialmente quando reduzem o consumo energético específico que é um dos grandes desafios do país (BUENO, 2004).

A avaliação do ambiente de criação animal pode ser sob diferentes enfoques, como a da qualidade do ar disponível nas proximidades dos animais e do conforto térmico. Isto é realizado por meio da avaliação dos poluentes presentes que podem ser inalados e, eventualmente, causar danos à saúde humana e animal (NÃÃS et al., 2004). Como no caso da amônia proveniente das fezes das aves.

Recentes estudos demonstram que o domínio da ambiência é uma das áreas que melhor responderá pela melhora de resultados de produção nos próximos anos. As técnicas de manejo e configurações de galpões e equipamentos nas novas fronteiras agrícolas tornam promissor o desempenho esperado para os próximos anos. Neste contexto, poderá haver grande contribuição por parte dos fabricantes de equipamentos (UBA, 2009).

Apesar de ter conquistado altos índices em produção, a instalação avícola é um dos pontos em que existem atualmente maiores preocupações, em se tratando do conforto térmico para frangos de corte (ABREU & ABREU, 2001).

Vários aspectos construtivos devem ser levados em consideração para que se tenha uma maior produção a um menor custo final. TEIXEIRA (1997) recomenda para construções dos aviários o uso de pilares de madeira tratada, concreto ou alvenaria. AZEVEDO & NASCIMENTO (1999) citam que a estrutura de madeira para cobertura de aviário com oitões abertos é mais onerosa, em virtude do maior consumo de material exigido no contraventamento horizontal. NÄÄS et al. (2001) consideram o telhado o elemento construtivo mais importante em uma instalação avícola, quanto ao controle da radiação solar incidente.

Para ENGLERT (1987) e HARDOIN (1995), especial atenção deve ser dada ao lanternim, que deverá estar presente para perfeita ventilação, sendo sua largura de, aproximadamente, 10% da largura do telhado. Em climas quentes, os beirais devem ser projetados de forma a evitar a penetração de chuvas, ventos e raios solares, devendo ter de 1,2 a 2,5 m, em ambas as faces, norte e sul, do telhado (TINÔCO, 1996). Entre a borda da mureta e o telhado, deve ser colocada uma tela de arame à prova de pássaros e insetos (TEIXEIRA, 1997), como também a instalação de cortinas para evitar penetração de sol e chuva e controlar a ventilação no interior do aviário.

As trocas de ar inadequadas aumentam as concentrações de partículas de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), e amônia (NH₃) no interior das instalações, diminuindo as concentrações de oxigênio (O₂) favorecendo, assim, a incidência de ascite em aves de corte (ALENCAR et al., 2004; OWADA et al., 2007).

Em períodos frios é necessário evitar perda de calor para fora do aviário; portanto, o controle das aberturas é de fundamental importância. Por outro lado, a ventilação apresenta função relevante, principalmente por razões higiênicas, fazendo-se a renovação do ar para evitar concentrações de gases indesejáveis dentro do aviário (TINÔCO, 2001; NÄÄS et al., 2007).

Aquecedores a gás são bastante funcionais, devido a sua durabilidade, baixo índice de manutenção e mobilidade, podendo ser reinstalados com facilidade e rapidez (ABREU, 2002). Já os aquecedores pelo piso são pouco utilizados, há trabalhos na área utilizando resistência elétrica, enquanto que usando água quente não há uma pesquisa muito vasta. Acredita-se que, as razões da menor uso de instalações com aquecimento de piso sejam puramente econômicas e de dificuldade de instalação. Por outro lado os custos operacionais, especialmente com energia, podem ser bem menores com os sistemas de aquecimento de piso.

O sistema de aquecimento de pisos, também chamado de aquecimento radiante, constitui importante alternativa para a obtenção de conforto térmico e apesar de sua simplicidade, implica em cuidado no projeto como a escolha da fonte de calor, estratégia de controle, seleção de materiais e detalhes construtivos.

Segundo BOKZIR & CANBAZOGLU (2004), o aquecimento de piso é uma modalidade de fonte interna de calor caracterizada, principalmente, pela uniformidade de distribuição da temperatura e eficiência na obtenção de uma sensação térmica favorável. Sendo de importância fundamental a compreensão do conceito do aquecimento de piso. A mesma é implementada em modelos simplificados do desempenho térmico com utilização de aquecedores solares de água.

Porém, projetos de aquecimento de galpões avícolas envolvem diversas variáveis de estudo. De forma que o uso de softwares de análise comportamental surge como importantes opções para uma avaliação mais precisa, ágil, coerente com a realidade local e principalmente reduzindo custos.

1.3 – OBJETIVOS

Esta tese tem por objetivo realizar a avaliação energética e econômica de aquecimento de galpão para criação de frangos para análise térmica em galpões avícolas, o que auxiliará em:

- verificar a distribuição do calor dentro do galpão avícola;
- comparar o perfil da temperatura fornecida pelos sistemas campânulas a gás, que é a mais utilizada pelos avicultores e pelo piso, cuja proposta é utilizar água aquecida por coletores solares circulando em serpentina instalada abaixo da cama das aves (sistema proposto);

- verificar a possibilidade do uso da energia solar para aquecimento de galpões avícolas;

- verificar a viabilidade do aquecimento do ambiente via água quente circulando por serpentinas debaixo da cama das aves (acima do piso);

- fazer uma análise da temperatura mínima da água suficiente para manter o aquecimento do galpão;

- avaliar a quantidade de energia gasta para o aquecimento do galpão;

- fazer análise econômica da implantação desse sistema;

- fazer o cálculo do retorno do investimento necessário para implantação do novo sistema.

E também verificar dentro da bibliografia a possibilidade de utilização dos biodigestores para produção de gás, o qual poderá ser utilizado para aquecer a água que circula em baixo da cama das aves.

CAPÍTULO 2

HISTÓRICO SOBRE A DEMANDA DE ENERGIA EM AVIÁRIOS

2.1 – INTRODUÇÃO

Para se manter competitiva, a indústria avícola brasileira está tendo que evoluir rapidamente de uma situação de quase indiferença aos princípios do acondicionamento térmico ambiental. Para uma situação em que cada empresa ou associadas deve tomar decisões relativas à adoção de concepções arquitetônicas e manejos inovadores, associados aos sistemas de acondicionamento térmico, naturais e artificiais, compatíveis com a sua realidade (TINÔCO, 2001).

O ambiente é caracterizado por um conjunto de fatores climáticos que atuando simultaneamente exercem influências sobre os animais de maneira favorável ou desfavorável ao desenvolvimento biológico, e ao desempenho produtivo e reprodutivo dos mesmos (CURTIS, 1983).

O microclima de uma determinada região sofre a influência da temperatura do ar, da umidade relativa, do vento, da radiação solar, da pluviosidade, da luminosidade e da altitude, sendo funções dinâmicas das estações do ano. Os animais coexistem em um processo ininterrupto de interação com o ambiente no qual se encontram inseridos reagindo de diversas maneiras às distintas condições que são impostas (ESMAY, 1969).

Já no projeto da instalação avícola deve-se levar em consideração a influência térmica natural, onde se observa a localização, orientação do galpão, a influência da radiação solar, o paisagismo e os materiais que serão utilizados, dentre outros (TINÔCO, 2001).

As necessidades térmicas no inverno e nas fases iniciais da vida da ave devem ser satisfeitas. Caso não se atente para esses fatores ao se planejar uma instalação avícola, fatalmente ocorrerá uma situação de desconforto térmico que podem comprometer de forma substancial o desenvolvimento das aves.

Dentre os fatores do ambiente, os térmicos são os que afetam mais diretamente a ave, pois comprometem sua função vital mais significativa, que é a manutenção de sua homeotermia, e nas fases iniciais de vida o fornecimento de calor para as aves é

essencial, quando existe risco de estresse por frio (TINÔCO, 2001; MENEGALI et al, 2009).

Na Figura 2.1 é representada a curva de produção de calor versus temperatura ambiente, onde pode ser identificada a faixa de termoneutralidade onde a ave despende o mínimo de energia para se proteger do calor ou do frio. A localização desta faixa varia conforme a temperatura ambiente, tamanho do animal, manejo, aspectos nutricionais e estrutura física da instalação (FREEMAN, 1988).

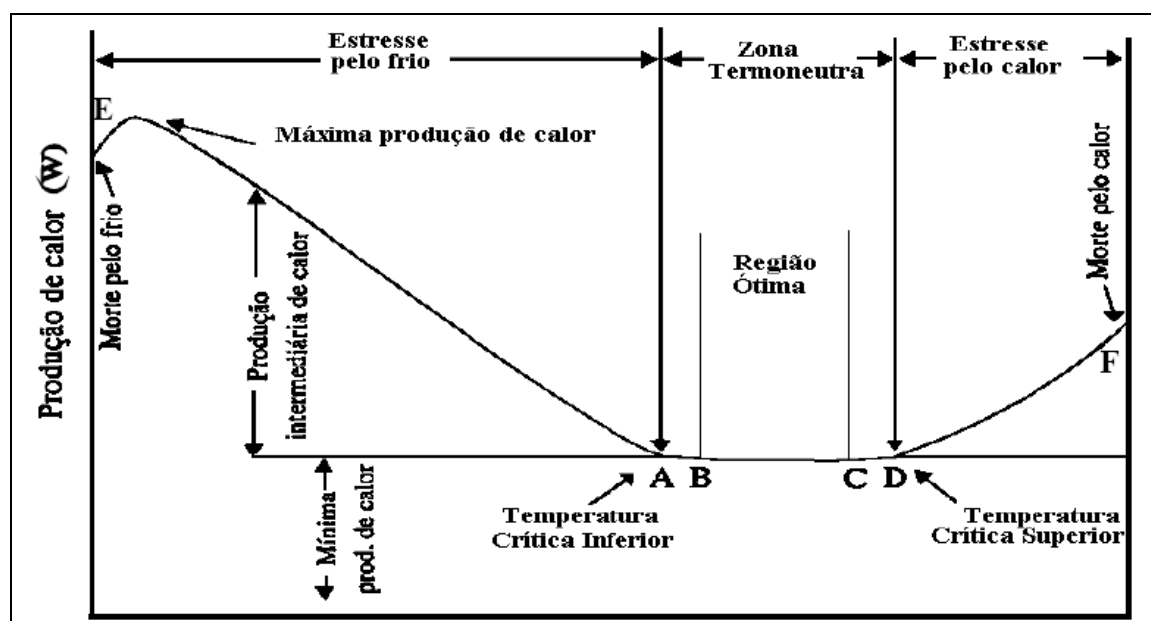


Figura 2.1 - Produção de calor versus temperatura ambiente (FREEMAN, 1988).

Na representação gráfica da equação do balanço térmico, a temperatura ambiente, representada no eixo horizontal, incorpora o efeito da radiação, vento e umidade relativa. A zona BC corresponde à faixa de temperatura ambiente onde o animal exerce o menor esforço de termorregulação (maior eficiência térmica), sendo chamada de zona de conforto térmico.

A faixa AD é chamada de zona de termoneutralidade, correspondendo a um esforço mínimo para que o animal acione os mecanismos de termorregulação. O ponto A chamado de temperatura crítica inferior é aquele em que o animal aciona os mecanismos de produção de calor sensível, de modo a manter o equilíbrio térmico interno.

Para aves recém nascidas tem-se: A = 30°C; B = 32°C; C = 35°C; D = 37°C. Enquanto que para aves adultas tem-se: A = 14°C; B = 20°C; C = 24°C; D = 29°C. Na

faixa de D até E a ave sofre estresse pelo calor, provocando a hipertermia; na faixa de A até E a ave sofre o estresse por frio, provocando a hipotermia. Os valores de E e F não são bem definidos, pois cada lote reage de forma diferente a esse estresse, porém representam as regiões onde há óbito, seja pelo frio ou pelo calor.

O ambiente térmico representado por temperatura, umidade, velocidade do ar e radiação, cujo efeito combinado pode ser quantificado pelo índice de temperatura de globo e umidade (ITGU), afeta diretamente as aves, comprometendo sua função vital mais importante, que é a manutenção de sua homeotermia (SARTORI et al., 2001).

Adequar a edificação avícola ao clima de um determinado local e a uma determinada exploração significa criar e construir espaços, tanto interiores quanto exteriores, ajustados às necessidades dos indivíduos que a ocupam e que possibilitem aos mesmos, condições favoráveis de conforto. O projeto deve amenizar as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, tais como os de excessivo calor, frio ou vento, como também propiciar ambientes os quais sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos, para que altos índices de produtividade sejam atingidos (TINÔCO, 2001).

O controle e averiguação do conforto de forma geral, onde um dos fatores é a temperatura dos galpões em avicultura podem trazer grandes benefícios além de economia financeira, pois se a ave se sente confortável, ela se alimenta de forma adequada, sem excesso nem falta, o que lhe proporciona um bom desenvolvimento e num período de tempo consideravelmente baixo.

Normalmente o tipo de instalação avícola brasileiro é construído sem isolamento térmico satisfatório, o que leva a um elevado gasto energético na produção do aquecimento do ambiente, onde, muitas das vezes não é atingido o conforto térmico que as aves necessitam.

Os sistemas de aquecimento usados tradicionalmente nas granjas são geralmente compostos por campânulas a gás e fornalhas, que em muitos casos são ineficientes para aquecer os pintinhos de forma adequada e satisfatória.

Para que isso seja amenizado, especialmente nas regiões de invernos mais intensos, quanto à renovação e qualidade do ar, ambiente térmico e conseqüentemente desempenho das aves sob diferentes sistemas de aquecimento, é necessário definir questões relativas a projetos mais eficientes de aquecimento ambiental, sem desperdício de energia.

2.2 – ASPECTOS CONSTRUTIVOS E TIPOLOGIA DOS GALPÕES AVÍCOLAS

O bem-estar dos animais alojados vem, ao longo dos últimos anos, ganhando força, não apenas para atender às necessidades dos animais, mas para atender aspectos étnicos e culturais dos consumidores (PRESTES 2005). Uma forma de auxílio nessa satisfação é à escolha do local adequado para implantação do aviário, assim como os materiais construtivos.

2.2.1 – Localização dos Galpões

A escolha do local adequado para implantação do aviário visa a otimização dos processos construtivos, de conforto térmico e sanitário. O local deve ser escolhido de tal modo que se aproveitem as vantagens da circulação natural do ar e se evite a obstrução do ar por outras construções, barreiras naturais ou artificiais. Essas obstruções podem ser desejáveis, contudo, do ponto de vista sanitário ou no caso de regiões com ventos dominantes muito intensos e perigosos. O aviário deve estar situado em relação à principal direção do vento se este provir do sul ou do norte. Caso isso não ocorra, a localização do aviário para diminuir os efeitos da radiação solar no interior do aviário prevalece sobre a direção do vento dominante. A direção dos ventos dominantes e as brisas devem ser levadas em consideração para se aproveitar as vantagens do efeito de resfriamento no trópico úmido.

Escolher o local com declividade suave, entre 2% a 5%, voltada para o norte, é desejável para uma boa ventilação. No entanto, os ventos dominantes locais, devem ser levados em conta, principalmente no período de inverno, devendo-se prever barreiras naturais. É recomendável dentro do possível, que os galpões estejam situados em locais de topografia plana ou levemente ondulada, onde não sejam necessários serviços de terraplenagem excessivo nem construções de muros de contenção. Contudo é interessante observar o comportamento da corrente de ar, por entre vales e planícies, nesses locais é comum o vento ganhar grandes velocidades e causar danos nas construções.

Tabela 2.1 – Distâncias sugeridas para melhor isolamento das instalações avícolas.

Distâncias Externas e Internas	Distância Sugerida
Da granja ao abatedouro	5 – 10km
De uma granja a outra	3km
Entre os galpões aos limites periféricos da propriedade	200m
Do galpão à estrada	500m
Entre núcleos de diferentes idades	100m
Entre recria e produção	300m
Entre galpões de mesma idade	22 – 50m

Fonte: Martins, 1995.

O afastamento entre aviários deve ser suficiente para que uns não atuem como barreira à ventilação natural aos outros. Assim, recomenda-se afastamento de 10 vezes a altura da construção, entre os dois primeiros aviários, sendo que do segundo aviário em diante o afastamento deverá ser de 20 a 25 vezes esta altura (ABREU, 2003a). Na Tabela 2.1 estão descritas algumas distâncias que devem ser consideradas na implantação do aviário (MARTINS, 1995).

2.2.2 – Características construtivas

a) Orientação

O sol deve ser evitado dentro do aviário, por isso a construção do galpão em climas quentes deve ser em seu eixo longitudinal, na direção leste-oeste, o qual propicia às aves melhor conforto térmico (TINÔCO, 1996; MORAES et al., 1999 e MOURA, 2001). Este detalhe resulta em uma diminuição do sobreaquecimento pela forte insolação nas longas tardes de verão, enquanto que no inverno haverá incidência direta de radiação solar em seu interior em algumas horas do dia na face norte, no período de inverno, o que é desejável (NEUBAUER, 1972).

Caso o galpão esteja posicionado no sentido norte-sul, faz-se necessário o plantio de árvores, que será comentado no item g.

b) Largura

A largura do aviário está relacionada com o clima da região onde o mesmo será construído. Normalmente recomenda-se largura até 10m para clima quente e úmido e

largura de 10 até 14m para clima quente e seco. A largura de 12m tem sido utilizada com frequência e se mostrado adequada para o custo estrutural, possibilitando bom acondicionamento térmico natural, desde que associada à presença do lanternim e altura do pé-direito adequadamente dimensionado.

Tabela 2.2 – Limite máximo recomendado para a largura do galpão avícola de acordo com o clima

Limite máximo	Clima
8 a 10m	Quente e úmido
10 a 14m	Quente e seco

Fonte: Tinoco, 2001

Uma tendência mundial é a construção de galpões com 12m de largura por 125m de comprimento, o que otimiza o uso de bebedouros e comedouros. Na Tabela 2.2 é apresentado o limite máximo recomendado para a largura do galpão de acordo com o clima.

c) Pé direito

O pé direito do aviário pode ser estabelecido em função da largura adotada, de forma que os dois parâmetros em conjunto favoreçam a ventilação natural no interior do aviário com acondicionamento térmico natural. Quanto mais largo for o aviário, maior será a sua altura. Em regiões onde existe incidência de ventos fortes, aviários com pé-direito acima de 3m, exigem estrutura reforçada. KELLY *et al* (1958). Verifica-se que à medida que se aumenta o pé-direito de uma cobertura, não se altera o tamanho da sombra, mas diminui a temperatura do solo, porque a sombra se move mais rapidamente. Pé-direito alto é recomendado para áreas com céu claro e baixa umidade relativa do ar.

Segundo CURTIS (1983), animais pequenos, estando mais próximos do piso sombreado e mais distantes da superfície inferior do material de cobertura, receberão menor quantidade de energia radiante por unidade de superfície do corpo, sob condições usuais de radiação diária. Quanto maior o pé-direito na instalação, menor a carga térmica vinda do telhado sobre as aves, sendo aconselhável um pé-direito de no mínimo 3,2m.

Estudos realizados por Moraes e Santos demonstraram que os valores da Carga Térmica de Radiação (CTR) e ITGU são mais elevados em galpões com pés direitos mais baixos. Modernamente, no que diz respeito ao pé direito do galpão, esse deve ser estabelecido em função da largura adotada, de forma que os dois parâmetros, em conjunto, favoreçam a ventilação natural no interior da instalação (MORAES, 1998 e SANTOS, 2001).

O fato é que a altura do pé direito tem influência direta sobre a ventilação natural, sobre a quantidade de radiação solar que poderá atingir o interior do galpão, que influi na troca de calor por radiação entre o animal e a cobertura e entre o animal e o exterior, dentre outros. Um pé direito muito alto favorece o condicionamento térmico em condições de calor, enquanto um pé direito baixo favorece o condicionamento térmico em condições de frio.

O pé direito do aviário pode ser estabelecido em função da largura adotada, de forma que os dois parâmetros em conjunto favoreçam a ventilação natural no interior do aviário com acondicionamento térmico natural. Quanto mais largo for o aviário, maior será a sua altura, sendo que em climas quentes, ou seja: Tropical úmido, Tropical típico ou semi-úmido, Semi-árido e Subtropical, utiliza-se a altura mínima conforme mostrado na Tabela 2.3. Por exemplo, para uma largura de 10 m pode-se adotar o pé direito de 3,50m até 4,20m.

Tabela 2.3 – Altura do pé direito do galpão em função da largura, em climas quentes.

Largura	Pé direito mínimo em climas quentes
Até 8m	2,80
De 8 a 9m	3,15
De 9 a 10m	3,50
De 10 a 12m	4,20
De 12 a 14m	4,90

Fonte: Tinoco, 1996.

d) Cobertura

De acordo com RIVERO (1986), para as condições brasileiras a cobertura ideal de instalações para animais deve apresentar grande capacidade para refletir a radiação solar, com grande capacidade de isolamento térmico, assim como retardo térmico em

torno de 12 horas, o que provocará o aquecimento do ambiente interior quando a temperatura deste estiver mais baixa.

Os materiais mais utilizados para instalação dos telhados são:

- telha de barro;
- madeiriti;
- alumínio simples;
- isopor entre duas lâminas de alumínio;
- sapé;
- cimento-amianto;
- chapa zincada ou ferro galvanizado.

As telhas de barro são as melhores do ponto de vista de isolamento térmico, porém encarecem a construção, em virtude da estrutura de madeira ou metálica necessária para a sustentação do telhado. As mais econômicas são as telhas de cimento-amianto; entretanto, a cobertura deve ser provida obrigatoriamente de lanternim.

e) Inclinação do telhado e beiral

De acordo com BAETA e SOUZA (1997), a inclinação do telhado afeta o condicionamento térmico ambiental no interior do aviário, através da mudança do fator de forma correspondente às trocas de calor por radiação entre o animal e o telhado, e modificando a altura entre as aberturas de entrada e saída de ar. Quanto maior a inclinação do telhado, maior será a ventilação natural devido ao termossifão. Inclinações entre 20° e 30° têm sido consideradas adequadas, para atender às condições estruturais e térmicas.

O telhado deve ser provido de beiral, cuja finalidade é evitar a entrada de radiação solar direta e de chuva no galpão, e ter uma largura de 1,0 a 1,50m, sendo necessário conhecer a latitude.

f) Lanternim

Lanternim é a abertura superior do telhado, como na Figura 2.2, com a função de permitir a saída de ar quente, principalmente durante o período de calor. Quando bem planejado o lanternim permite a renovação contínua do ar pelo processo de termossifão.

O lanternim deve permitir abertura mínima de 10% da largura do aviário, com sobreposição de telhados com afastamento de 5% da largura do aviário ou 40 cm no mínimo. Devendo ser equipado com sistema que permita fácil fechamento e com tela de

arame nas aberturas para evitar a entrada de pássaros. A inclinação usada para o lanternim é a mesma do telhado.

Em períodos mais frios o lanternim pode provocar a saída indesejada do ar mais quente para o exterior do galpão, por isso em muitos galpões tem-se utilizado uma espécie de forro a uma altura de aproximadamente dois metros e meio do piso, para o qual é utilizada a lona plástica, essa lona é a mesma usada na proteção lateral do galpão.

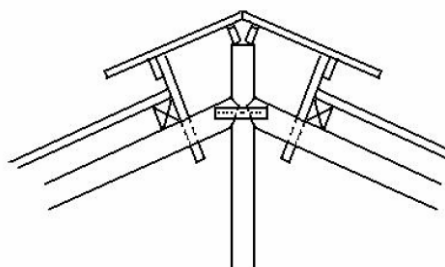


Figura 2.2 – Lanternim

g) Piso, área externa e cama

O piso deve ser impermeável e acima do nível do solo. Normalmente, é construído em concreto com 5 a 10cm de espessura, deixando-se uma inclinação de 2% a partir do centro para as laterais, suficiente para se obter um bom escoamento da água de lavagem, por ocasião da limpeza.

O objetivo do uso da cama de aviário é evitar o contato direto da ave com o piso, servir de substrato para a absorção da água, incorporação das fezes e penas e contribuir para a redução das oscilações de temperatura no galpão. A cama deve ser homogeneamente distribuída, com uma profundidade de 8 a 10 cm e não compactada. Uma distribuição irregular da cama causará problemas com disponibilidade de água e ração. Vários materiais podem ser usados como cama de aviários, em função de seu poder de absorção, biodegradabilidade, conforto, limpeza e, sobretudo, disponibilidade, (ABREU, 1999). Deve-se utilizar sempre material macio, sendo os mais utilizados :

- maravalha de pinus;
- casca de arroz;
- areia;
- capim napier picado e murcho;
- casca de café;
- sabugo de milho triturado.

A mureta deve ter a menor altura possível, aproximadamente 0,2m, permitindo a entrada do ar ao nível das aves, evitando a entrada de água de chuva e que a cama seja arremessada para fora do aviário (TINÔCO, 1998). Entre o bordo da mureta e o telhado, deve ser colocada uma tela de arame à prova de pássaros e insetos (TEIXEIRA, 1997).

Deve-se instalar cortinas nas laterais, pelo lado de fora, para evitar penetração de sol, chuva e controlar a ventilação no interior do aviário. As cortinas poderão ser de plástico especial trançado, lona ou PVC, confeccionadas em fibras diversas, porosas para permitirem a troca gasosa com o exterior, funcionando apenas como quebra-vento, sem capacidade de isolamento térmico. Devem ser fixadas para possibilitar ventilação diferenciada para condição de inverno e verão.

Para atender ambas as situações é ideal que seja fixada a dois terços da altura do pé-direito e que seja aberta das extremidades para o ponto de fixação. Sob condições de inverno esta deve ser aberta de cima para baixo e em condições de verão, de baixo para cima. Para se obter maior eficiência da ventilação natural devido ao termossifão e ao vento, deve-se abrir as duas partes, juntando-as na altura da fixação. Nos primeiros dias de vida, recomenda-se o uso de sobrecortinas em regiões frias, para auxiliar a cortina propriamente dita, evitando a entrada de correntes de ar no aviário.

Calçadas externas, com largura igual à projeção do beiral, devem ser construídas em volta do galpão, a fim de evitar a entrada de umidade na instalação e deve haver um canal que permita o escoamento da água do telhado. As laterais devem ser providas de cortinas entre a mureta e o respaldo do telhado. Geralmente elas são de polietileno e servem para facilitar o manejo da ventilação. Com um sistema de roldanas, cabo de aço e manivela pode-se levantar toda a cortina de um lado do galpão de uma só vez, devendo fechar de baixo para cima e abrir de cima para baixo, para de evitar correntes de vento diretamente sobre as aves (TEIXEIRA, 1997).

O emprego de árvores altas produz micro clima ameno nas instalações, devido à projeção de sombra sobre o telhado. Para as regiões onde o inverno é mais intenso as árvores devem ser caducifólias. Assim, durante o inverno as folhas caem permitindo o aquecimento da cobertura e no verão a copa das árvores torna-se compacta sombreando a cobertura e diminuindo a carga térmica radiante para o interior do aviário. Para regiões onde a amplitude térmica entre as estações do ano não é acentuada e a radiação solar constitui em elevado incremento de calor para o interior do galpão o ano todo, as árvores não precisam ser necessariamente caducifólias. Devem ser plantadas nas faces norte e oeste do aviário e mantidas desganhadas na região do tronco, preservando a copa

superior. Desta forma a ventilação natural não fica prejudicada. Recomenda-se fazer verificação constante das calhas para evitar entupimento com folhas (ABREU, 2003a).

2.3 – AQUECIMENTO DOS GALPÕES

No período frio, a maior preocupação é com as aves jovens, pois não possuem ainda o sistema termorregulador desenvolvido e devido ao fato das condições ambientais não se encontrarem dentro da região de conforto para aves. Nesse período, os valores de temperatura ambiental se encontram abaixo das condições ideais, principalmente na região sul do Brasil, em que o frio é mais intenso, obrigando o avicultor a fornecer fonte de aquecimento suplementar para as aves.

Uma medida para facilitar o manejo, a identificação da fonte de calor e evitar correntes de ar diretas nas aves é a utilização de proteção. Quando o aviário não possuir sistema de alimentação em linha as divisórias utilizadas são os tradicionais círculos de proteção.

Tabela 2.4 – Tipos de Aquecedores

Tipos de aquecedores	Características
Aquecedores a lenha	Campânulas e fornalhas.
Aquecedores elétricos	Campânulas elétricas, lâmpadas infravermelhas e resistência embutida no piso.
Aquecedores a gás	Campânulas a gás, campânulas de placa cerâmica, campânulas infravermelhas e geradores de ar quente.
Alternativos	Aproveitamento de resíduos (Fornalhas e Biogás), canalização de água quente no piso e aquecimento solar.

Fonte: Abreu, 1998

Vários tipos de aquecedores foram desenvolvidos, buscando a melhor forma de fornecer calor e proporcionar conforto térmico às aves com menor consumo de energia. Esses equipamentos estão cada vez mais aperfeiçoados, funcionais e eficientes. Na

Tabela 2.4 são mostradas as categorias de aquecedores, que serão melhor analisados no item 2.5.

Segundo RONCHI (2004) na escolha do sistema de aquecimento, não se deve levar em consideração unicamente o custo, mas a capacidade de produção de calor e as consequências que esse sistema trará para a qualidade do ar e a cama do aviário.

2.4 – FATORES TÉRMICOS E AMBIENTAIS EM GALPÕES

MACARI e CAMPOS (1997) afirmam que, em um ambiente, o equilíbrio térmico é alcançado quando a quantidade de calor resultante do metabolismo animal mais a quantidade de calor absorvida do meio ambiente é igual à quantidade de calor dissipada. Desse modo, o aperfeiçoamento do galpão avícola e das técnicas de manejo possibilita superar efeitos prejudiciais de alguns elementos climáticos específicos de determinadas regiões e, com isso, alcançar um bom desempenho produtivo.

É conveniente separar os fatores que influenciam as aves em: térmicos (temperatura, umidade, amônia, radiação e velocidade do ar), físicos (espaço, luz, som e pressão) e sociais (número de aves por gaiola, arranjo dos animais). O grau de controle do ambiente depende muito das condições climáticas do local e da situação econômica da indústria avícola.

Com relação aos animais, BAÊTA e SOUZA (1997) afirmam que estes podem ser considerados sistemas termodinâmicos abertos, por estarem em troca constante de energia com o ambiente. Entretanto, algumas vezes fatores ambientais tendem a provocar mudanças na homeocinese animal, como a tensão e o estresse.

2.4.1 – Influência da temperatura ambiente

Nas aves, a zona termoneutra muda com a sua constituição genética, idade, sexo, tamanho corporal, peso, dieta, estado fisiológico, exposição prévia ao calor (aclimatação), variação da temperatura ambiente, radiação, umidade e velocidade do ar (YOUSEF, 1985; TEETER, 1990). Nos ambientes frios quando a temperatura ambiente está abaixo da crítica inferior, esses animais, para manter o calor, ativam através de seu centro termorregulador, localizado no sistema nervoso central, certos processos fisiológicos, como vasoconstrição, redução da frequência respiratória, elevação da taxa

metabólica, maior isolamento da pele com ereção dos pêlos e produção de calor por meio da ocorrência de tremor muscular e arrepio. Nos ambientes quentes quando essa temperatura está acima da crítica superior, as aves reagem por meio da respiração acelerada e produção de suor, (HAFEZ, 1973).

A aclimação ao calor ocorre devido à diminuição da taxa de metabolismo básico, aproximadamente uma semana após a exposição da ave (ARRIELI et al., 1980). A partir da segunda e terceira semanas de vida das aves, as temperaturas de conforto oscilam entre 15 e 26°C, para valores de umidade relativa do ar de 50 a 70%, embora dentro desta faixa exista uma temperatura tida como a ideal para determinado tipo de desempenho. As faixas de conforto, de acordo com as diferentes idades são compatíveis para aves de corte, postura e matrizes (CLARK, 1981; YOUSEF, 1985).

Os estudos realizados até hoje mostram que aves expostas a temperaturas oscilando dentro da zona de conforto (limites superior e inferior) produzem melhor que aquelas submetidas a uma temperatura fixa de conforto (ARRIELI et al., 1980).

No que tange à dissipação de calor, este se transfere do corpo da ave para o meio, e vice-versa, por convecção, evaporação, condução e radiação, as quais são influenciadas pela temperatura, umidade e velocidade do ar e temperatura da vizinhança. A condução é a principal forma de transportar calor do núcleo central do animal até a periferia. Na radiação, o fluxo de calor depende da natureza da superfície considerada, sendo que o animal transfere calor para os objetos mais frios que ele e absorve calor de objetos mais quentes que ele. A convecção é o fenômeno em que o transporte do calor é feito por Transferência de calor e massa (sendo influenciada pela movimentação do ar e pelo aumento da superfície considerada). Na evaporação, a dissipação de calor se dá pela passagem da água do estado líquido para o vapor, ou seja, envolve mudança de estado físico (INCROPERA e DEWITT, 1992).

Dessa forma, os mecanismos de dissipação de calor são influenciados não somente pelos fatores climáticos e do ambiente circunvizinho, como também pelo fatores intrínsecos ao próprio animal, como: área da superfície corporal, cobertura pilosa, cor, emissividade, difusão de água pela pele e pelo pulmão, condutividade térmica dos tecidos e fluxos sanguíneos, troca térmica da água bebida ou excretada, entre outros (CURTIS, 1983).

De acordo com TEETER (1990), quando a temperatura ambiente está dentro da zona de termoneutralidade, quase todo o calor dissipado ocorre na forma de calor sensível (radiação, convecção ou condução). Esse tipo de liberação de calor altera a

temperatura ambiente. À medida que a temperatura ambiente aumenta além do limite superior da zona de conforto, gradualmente aumenta de importância a dissipação de calor por evaporação, a qual ocorre nas aves principalmente pelo trato respiratório; contudo, com o aumento da frequência respiratória, a ave começa a apresentar polipnéia (frequência de respiração acima do normal), atingindo uma frequência máxima de 140 a 170 respirações por minuto aos 44°C.

O aumento da frequência respiratória não é totalmente favorável, pois acrescenta calor ao sistema da ave, que também precisam ser dissipadas, e altera o equilíbrio ácido-básico. De acordo com MÜLLER (1982), nesta situação, a quantidade de ar inspirado vai diminuindo a cada movimento respiratório, ocorrendo diminuição de CO₂ no sangue, pois o nível de CO₂ expirado aumenta, com conseqüente incremento da alcalose (aumento do pH do sangue).

Tabela 2.5 - Temperaturas ambientais ideais para frangos de corte

Manual Cobb de frangos de corte		Sadia-Concórdia S/A		Colégio Agrícola - Udia	
Idade (dias)	Temp (°C)	Idade (dias)	Temp (°C)	Idade (dias)	Temp (°C)
1 – 7	35	1 – 3	32	1 – 7	32 - 35
8 – 14	32	4 – 7	29	8 – 14	29 - 32
15 – 21	29	8 – 14	26	15 – 21	26 - 29
22 – 28	27	15 – 21	24	22 – 28	23 - 26
29 – 35	24	22 – 30	23	29 – 35	20 - 23
35 – abate	21	31 – abate	21	35 – abate	20

A faixa de temperatura de conforto térmico ou zona termoneutra varia de acordo com a espécie e sua constituição genética, idade, peso e tamanho corporal, estado fisiológico, dieta alimentar, exposição prévia ao calor (aclimação), variação da temperatura de bulbo seco do ar (t_{bs}), umidade relativa do ar (UR), velocidade do ar (v), e radiação incidente no ambiente de criação (CURTIS, 1983; TEETER, 1990). Na Tabela 2.5 são apresentados os valores adequados de temperatura ambiente para que a ave possa ter conforto térmico para o seu desenvolvimento. Segundo ABREU (2003b), à medida que a ave cresce, essa temperatura cai em média 3°C por semana.

2.4.2 - Umidade Relativa

A Umidade Relativa – UR, em conjunto com a Temperatura do Bulbo Seco - t_{bs} , possui papel importante na dissipação de calor pelos animais. Altos valores de t_{bs} e UR

são extremamente danosos para a produção zootécnica, sendo que, no interior de instalações zootécnicas, a UR é função da temperatura do ambiente de criação, do fluxo de vapor d'água oriundo dos animais, das fezes e/ou da cama e do sistema de ventilação (BAIÃO, 1995; ZANOLLA, 1998).

Em ambientes no qual a t_{bs} atinge valores próximos ou acima da temperatura corporal do animal (t_c), a perda de calor passa a ocorrer principalmente pela evaporação, que é influenciada pela UR. Nestas condições climáticas, a evaporação cutânea sofre os efeitos da elevação da UR, que reduz o gradiente de vapor d'água presente no local, diminuindo, o potencial de evaporação do vapor de água entre a pele do animal e o meio que o cerca.

Segundo HICKS (1973), para as aves, a faixa de UR considerada satisfatória para a melhor produção de frangos de corte está situada entre 35% e 75%, enquanto DONALD (1998) recomenda a faixa de UR entre 50% e 60%. De acordo com estes autores, as trocas térmicas entre o animal e o meio, não são afetadas nesse intervalo de UR.

2.4.3 - Renovação do ar

A renovação do ar influencia positivamente na condição de conforto dos animais, auxiliando-os na manutenção de sua produtividade. Assim, a partir do conhecimento das necessidades ambientais das espécies, do tipo de manejo, clima local e das características da tipologia construtiva, pode-se projetar o sistema de ventilação natural ou artificial que atendam às necessidades de ventilação para os animais.

A renovação do ar no interior da instalação permite a redução da transferência de calor da cobertura, facilitando as trocas de calor corporal por convecção e evaporação (BAETA e SOUZA, 1997), diminui o excesso de umidade ambiente e de outros gases como NH_3 , CO_2 e H_2S , advindos da cama, da respiração e dos excrementos, evitando as doenças pulmonares.

Para as aves adultas, a velocidade do ar máxima (v_{ar}) recomendada é de aproximadamente $0,2 \text{ m s}^{-1}$ no inverno e $0,5 \text{ m s}^{-1}$ no verão, segundo estudos de LLOBET e GONDOLBEU (1980), VAQUERO (1981) e CURTIS (1983). Contudo, esse limite pode ser menor para as aves mais jovens, para evitar a ocorrência de doenças pulmonares (CURTIS, 1983).

Estudos realizados por YOUSEF (1985) e MEDEIROS (2001), sobre a influência do ambiente térmico na produtividade de frangos de corte entre a 4ª e a 6ª semanas de idade, verificaram que as faixas de t_{bs} , UR e v_{ar} que resultam em maior desempenho, ocorrem entre 21 e 27°C, 50 e 70% e 0,5 e 1,5 m s⁻¹, respectivamente.

2.4.4 - Amônia

A amônia é o poluente tóxico mais freqüentemente encontrado onde os dejetos se decompõem formando pisos sólidos. Sendo o nível de amônia afetado por fatores como a temperatura, taxa de ventilação, densidade, qualidade da cama, e decomposição da ração.

A espessura, ou altura da cama, assim como o número de aves/m² são decisivos para aumentar ou diminuir o nível da amônia, de forma que o ideal é ter uma camada de cama mais espessa, cerca de 10 cm e menor concentração de aves/m². Como a tendência é ter cada vez um número maior de aves em um mesmo espaço torna-se necessário que se diminua o índice de amônia. Uma forma para que isso ocorra é a retirada, ou diminuição, de proteína bruta e lisina na dieta das aves, pois 18% da quantidade de nitrogênio da ração é lançada na atmosfera como amônia.

A amônia é um gás incolor e irritante às mucosas, sendo formado a partir da decomposição microbiana do ácido úrico eliminado pelas aves e quando disposta no ar faz com que as membranas mucosas dos olhos e do aparelho respiratório sensibilizem. Quando a quantidade de amônia inalada é superior a 60 ppm, a ave fica predisposta a doenças respiratórias, aumentando os riscos de infecções secundárias às vacinações. Quando o nível de amônia no ambiente atinge 100 ppm, há redução da taxa e profundidade da respiração, prejudicando os processos fisiológicos de trocas gasosas. Esses níveis altos de amônia (60 a 100 ppm) podem ser observados no início da criação em galpões, com a reutilização da cama (GONZÁLES & SALDANHA, 2001).

LOTT & DONALD (2005) lembram que a formação da amônia nos aviários requer três condições: 1) dejetos, 2) calor, 3) umidade. De acordo com os autores, o mais importante destes fatores, dentro do manejo de cama, é o controle de umidade. Um bom manejo começa com um controle rigoroso da umidade das forrações, mesmo antes de colocá-las no aviário. Uma forração manuseada incorretamente e úmida, certamente ocasionará problema de controle de amônia.

Para SANTOS et al., (2005) o aumento de umidade leva a uma piora na qualidade da cama (empastamento) comprometendo a perda de calor das aves por meio da evaporação por via respiratória e favorece a decomposição microbiana do ácido úrico, ambos prejudiciais à produção avícola. Segundo FURLAN (2000) a umidade excessiva da cama, freqüentemente se relaciona a pouca espessura do substrato e ao derramamento de água, criando condições favoráveis para a produção de amônia e propiciando o crescimento de agentes patogênicos.

O emprego de práticas adequadas de manejo dos dejetos avícolas (processamento visando à redução de sua carga poluente e dos microorganismos patogênicos) e o estabelecimento de critérios de utilização eficientes e seguros são essenciais para a manutenção e crescimento da avicultura como atividade econômica. Desse modo, essa atividade requer o controle eficaz da amônia (ZANATTA, 2007).

Outra forma de se diminuir esse índice de amônia é fazer com que a cama permaneça seca, ou seja, que se diminua ao máximo possível a umidade da cama. Isso porque o aumento da quantidade de água na cama provoca um aumento da temperatura fazendo que a cama seja um berço para atividade de microorganismos e formação da amônia.

Em pesquisas anteriores com aquecedores de placa cerâmica, que fazem o aquecimento de baixo para cima, foi detectado uma melhora substancial da qualidade do ar devido ao fato de que com a cama seca a produção de amônia é extremamente baixa.

2.5 – TIPOS DE AQUECEDORES

Para suprir a necessidade de fonte de aquecimento suplementar para as aves existem dois grupos de aquecimento: o primeiro é do aquecimento central, que, para alcançar temperaturas adequadas nos aviários, se baseia no aquecimento relativamente homogêneo de todo o volume dos mesmos.

Esse processo é muito utilizado em aviários climatizados e em regiões muito frias. Para reduzir o volume de ar a ser aquecido, é providenciado o alojamento das aves em 2/3 do aviário por meio de divisórias e o uso de forro de lona plástica. Como, nesse processo, o consumo de energia ou de gás é maior, tem-se adotado, além das campânulas, suplementação com fontes de aquecimento a carvão. Dessa forma, o ambiente à altura das aves e do avicultor é aquecido.

O segundo grupo é o de aquecimento local, que se baseia no aquecimento somente da superfície do local onde se alojam os pintos, em relação ao volume do aviário. É nesse grupo que se encontram as campânulas a gás, as campânulas a carvão, as resistências elétricas e as lâmpadas infravermelhas. Sendo um processo bastante eficiente em termos de economia de energia, ou de gás, uma vez que o aquecimento é fornecido somente para as aves (ABREU, 2003b). Para melhorar a eficiência do sistema, são utilizados círculos de proteção, que têm a finalidade de proteger as aves de correntes de ar e demarcar a área de aquecimento. Essa prática é muito comum em aviários convencionais, sem muita tecnologia empregada para o condicionamento ambiental e em regiões onde as condições climáticas não são rigorosas no período de inverno. Nos dois sistemas pode-se adotar sobrecortinas fixadas na parte interna do aviário para auxiliar a cortina propriamente dita.

Um dos primeiros métodos utilizados para o aquecimento de aves caracteriza-se por utilizar a lenha como combustível. No aquecedor a lenha o calor é transmitido às aves principalmente por meio da condução, através do ar. O uso de lenha, como fonte de calor em uma campânula ou fornalha, no interior de aviários, não produz temperatura constante e muitas das vezes excede ao necessário, requer maior mão-de-obra e quando o sistema de distribuição de calor se dá de forma direta é de difícil controle da temperatura (VIGODERIS, 2007). Como a combustão geralmente não é completa, devem ser providos de filtros ou de trocadores de calor nas entradas de ar com o objetivo de minimizar a passagem de gases tóxicos, principalmente o CO₂, para o interior do aviário. É prática comum no sul do Brasil, principalmente no inverno, o uso de queimadores a lenha para suplementar o aquecimento proporcionado pelas campânulas a gás.

Em 2008 os aquecedores a gás foram mais utilizados que os elétricos pelo fato de que o gás apresentava menor custo em relação à energia elétrica, além de se poder utilizar tanto o gás natural quanto o gás liquefeito de petróleo (GLP). Existem no mercado vários tipos desses aquecedores, com diversas concepções quanto à forma de transmitir calor, maneiras de instalação e meios de controle da temperatura de operação.

a) Aquecedores a Lenha

Os aquecedores a lenha constituíram um dos primeiros métodos utilizados para o aquecimento de aves e caracteriza-se por utilizar a lenha como combustível. O calor é transmitido às aves principalmente por meio da condução e convecção, através do ar.

O uso de lenha como fonte de calor em uma campânula ou fornalha, nem sempre produz temperatura constante no interior do aviário e muitas vezes a temperatura excede o necessário, sendo que ainda a manutenção do sistema requer muita mão de obra. Como a combustão geralmente não é completa, devem ser providos de filtros ou trocadores de calor ou chaminés de entradas de ar com o objetivo de minimizar a passagem de gases tóxicos, principalmente o CO_2 , para o interior do aviário (ABREU, 2003b).

Esse tipo de aquecimento é muito usado no sul do Brasil, principalmente no inverno, esse sistema consiste de uma câmara de combustão constituída de tanques de óleo vazio, modificados artesanalmente, como pode ser observado na Figura 2.3 (a) e (b). As funilarias normalmente fornecem esses equipamentos, os quais têm a função de amenizar as condições ambientais e não atender totalmente as exigências das aves.

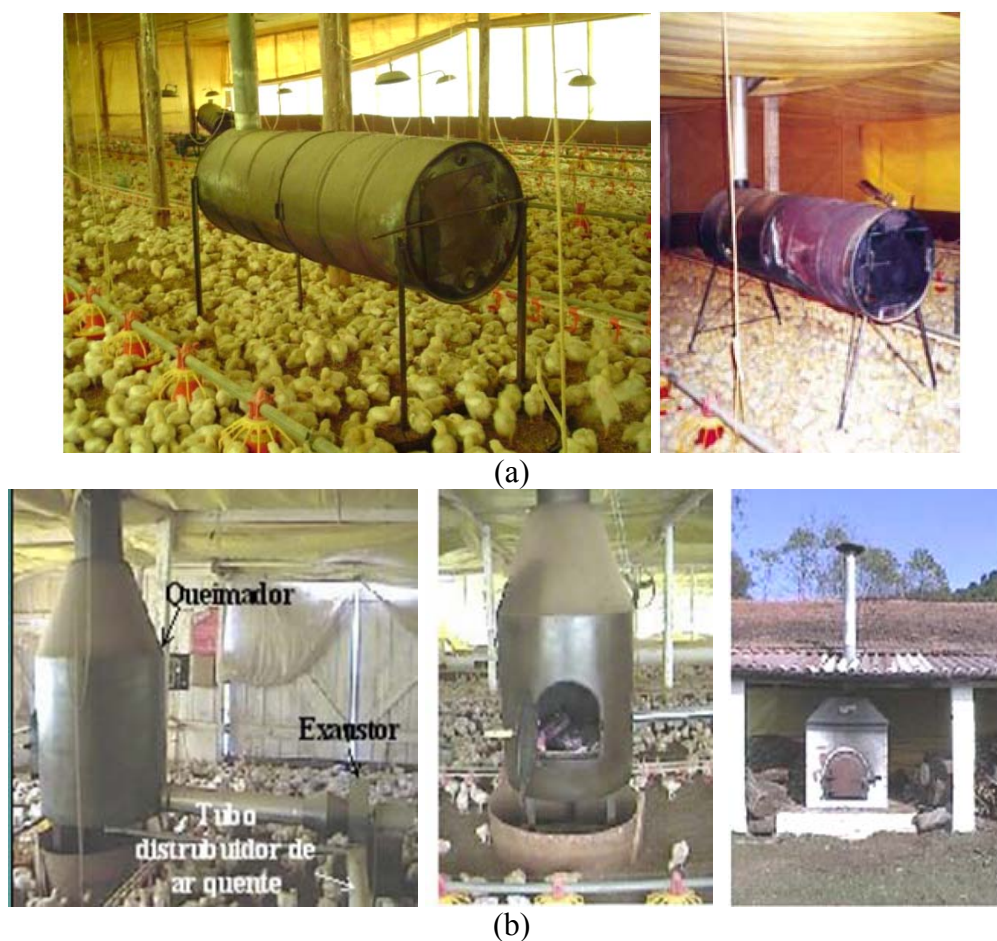


Figura 2.3 (a) - Sistema de aquecimento a lenha por tambor, (b) Sistema de aquecimento a lenha tipo fornalha (Fonte: ABREU, 2003b).

Os tanques têm capacidade de 200 litros podendo ser soldados uns aos outros de acordo com o desejo do produtor. Alguns cuidados devem ser tomados em relação a seu uso, como a colocação de areis no fundo do tanque para isolamento do mesmo, diminuindo o risco de incêndio.

b) Campânulas a gás

Os aquecedores tipo campânulas foram os primeiros aquecedores a gás a serem utilizados na avicultura, possuem um queimador de gás convencional, onde o calor é transmitido às aves por condução e convecção. É instalada a pouca altura do chão e, conseqüentemente, das aves, o que ocasiona uma distribuição não uniforme da temperatura em seu raio de ação.

O uso de campânulas a gás é um dos mais adquiridos pelos avicultores, podendo utilizar como combustível tanto o gás natural, o biogás quanto o gás liquefeito de petróleo (GLP).

A utilização do biogás se dá com o uso de biodigestores. O biodigestor é um sistema utilizado para a produção de gás natural (metano - CH_4) através de um processo anaeróbico onde matéria orgânica é decomposta por bactérias metanogênicas.

O biogás produzido a partir da biodigestão da cama de frango pode ser utilizado para o aquecimento dos pintinhos, em equipamentos onde ocorrerá a queima do biogás e conseqüente a produção de calor, fundamental para a sobrevivência nas duas primeiras semanas de vida destes animais.

Além da possibilidade de ser usado como combustível em substituição do gás natural ou do gás liquefeito de petróleo, ambos extraídos de reservas minerais, o biogás pode também ser utilizado na produção rural como no aquecimento de estufas de produção vegetal. Pode ser usado também na geração de energia elétrica, através de geradores elétricos acoplados a motores de explosão adaptados ao consumo de gás.

A biodigestão anaeróbia permite o isolamento dos resíduos, possibilitando a redução de moscas, de parasitos e patógenos ao homem e aos animais; assim como redução de odores, de sólidos e das demandas químicas e bioquímicas de oxigênio dos resíduos (LUCAS JR. e SANTOS 2000). E ainda, o efluente da biodigestão, pode ser utilizado como biofertilizante de plantas, por ser fonte de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, ferro, cobre, manganês, e outros minerais (MAGALHÃES et al., 2001).

O biofertilizante deve ser encarado como um benefício a mais e sua aplicação pode ser feita, desde que sejam levados em consideração os princípios da ciência do solo, a saúde pública e a hidrologia.

O poder calorífico do biogás depende diretamente do seu teor de metano, considerado como sub-produto da Biodigestão, e consequentemente do Biodigestor, pois atinge somente de 2,0 a 4,0 % do peso da Matéria Orgânica inicial utilizada no processo, o Biogás é uma mistura de gases, e em sua composição encontramos, em média:

- 60% de Metano (CH_4),
- 38% de Gás Carbônico (CO_2),
- 1,5% de Gás (Ácido) Sulfídrico (SH_2) e outros gases.

Segundo OLIVEIRA (2005) comparando o biogás com as demais fontes de energia, 1 metro cúbico (m^3) de biogás é equivalente a:

- 1,5 m^3 de gás de cozinha;
- 0,8 litros de gasolina;
- 1,3 litros de álcool;
- 7 kW de eletricidade; e
- 2,7 kg de madeira queimada.

Dessa forma entre outros usos, sendo que 55 m^3 de biogás resultam em três horas/dia de funcionamento do gerador e produção de 86.000 kW ano⁻¹.

Segundo AFONSO (2006) em seu experimento foi queimado o biogás para a avaliação qualitativa do potencial energético do biogás. Em termos de equivalência energética 1 m^3 de biogás equivale a:

- 1,5 m^3 de gás de cozinha;
- 0,52 a 0,6 litros de gasolina;
- 0,9 litros de álcool;
- 1,43 kWh de eletricidade; e
- 2,7 kg de lenha.

A produção de biogás se dá através de biodigestores, sendo mais comum o uso do processo de biodigestão anaeróbia da cama, que pode retornar ao sistema 46,7% da

quantidade de energia que sai, possibilitando a diminuição dos custos com aquecimento das aves, já que o biogás produzido poderá substituir o GLP, além dos benefícios adicionais creditados à economia ambiental (SANTOS, 2004).

Segundo ABREU et al. (2002), as campânulas a gás são instaladas a pouca altura do chão e, conseqüentemente, das aves, o que ocasiona uma distribuição não uniforme da temperatura em seu raio de ação. Com a baixa altura de instalação, os gases provenientes da combustão se alojam abaixo da campânula, podendo atingir os pintos, prejudicando o aparelho respiratório.

Possuem duas regulagens de temperatura, alta e baixa, feitas manualmente e uma capacidade reduzida de aquecimento, sendo recomendados para no máximo 500 pintos. São bastante funcionais devido a sua resistência, baixo índice de manutenção e mobilidade, podendo ser reinstalados com facilidade e rapidez.



Figura 2.4 - Campânulas a gás

c) Os aquecedores a gás com placa cerâmica

É uma evolução dos aquecedores de campânulas, onde se adicionou uma placa de cerâmica refratária para que se possa fazer uso do efeito da radiação. A chama do queimador incidente na placa de cerâmica faz com que a mesma se torne incandescente e, dessa forma, transfira calor por meio da radiação.

Devido à utilização do efeito de radiação esses aquecedores podem ser instalados a uma altura um pouco superior aos anteriores, sendo que a distribuição da temperatura é relativamente melhorada. Apresentam como desvantagem a fragilidade da placa cerâmica, que pode quebrar-se no manuseio do aquecedor. Possuem uma capacidade mediana de aquecimento, sendo recomendados para aquecer entre 700 a 800 pintos.

d) Aquecedores a gás tipo infravermelho

Foram desenvolvidos para utilizar plenamente o princípio de transmissão de calor através da radiação. A combustão do gás se dá diretamente em queimadores metálicos de alta capacidade de suportar o calor, tornando sua superfície totalmente incandescente e desta forma transferindo o calor principalmente pela radiação. Esse sistema primeiro aquece o ar que depois é repassado aos animais e à cama. A razão da popularidade do sistema vem da comodidade de sua regulação termostática, porém é um dos sistemas mais caros em consumo, sem considerar a mão de obra, Figura 2.4.

e) Aquecedores Elétricos

Os aquecedores elétricos são constituídos de resistências elétricas, blindadas ou não e lâmpadas infravermelhas, Figura 2.5, que são colocadas embaixo de uma campânula (refletor) a fim de projetar o calor de cima para baixo ou resistências embutidas no piso a fim de projetar o calor de baixo para cima.



Figura 2.5. – Aquecimento com lâmpada infravermelha

O sistema, em si, é o mais limpo e fácil de manutenção existente, devendo-se adequar à potência do elemento aquecedor ao número de aves a ser criado. São caracterizados por transmitirem o calor por meio da condução e da radiação, ser de fácil manuseio, possuem produção de calor constante e a não geração de gases tóxicos (CO e CO_2). A grande desvantagem desse tipo de aquecedor é o custo da energia elétrica.

f) Aquecedores em Piso

O aquecimento em piso por resistência elétrica, de acordo com WICKLEN & CZARICK (1988), pode ser usado para ajustar o conteúdo de umidade da cama, o qual poderá reduzir a produção de amônia. De acordo com ABREU (1994), foi observado

que valores de temperatura acima de 35°C na superfície superior da camada de cama sobre os sistemas de aquecimento em piso podem torrar a cama.

Segundo ROSSI (2002), esse sistema de aquecimento apresenta excelentes resultados, pois consegue manter a temperatura no piso bem próxima da temperatura regulada e mostra confiabilidade.

Outra forma de aquecimento pode ser fornecendo calor às aves, no piso, por meio de canalizações que levam o calor por intermédio de um fluido térmico. Esse sistema caracteriza-se pela passagem de água quente em tubos de polietileno instalados no piso.

O sistema permite um controle eficiente da temperatura do ambiente próximo das aves, a cama permanece mais seca e o teor de amônia do ar fica em níveis inferiores ao usual. Conforme GARCÍA (1997), o sistema de aquecimento em piso, por meio de água quente, tem custo elevado de instalação e quando o sistema não é embutido no piso dificulta a limpeza do local após cada cria.

O aquecimento elétrico sob o piso em relação a outros tipos de aquecedores tem como grande vantagem a não necessidade do armazenamento de combustível o que diminuiu o risco de acidentes em geral e incêndio em particular.

g) Outros Aquecedores

Existem outros sistemas de aquecimento como os que procuram aproveitar os resíduos da produção avícola. Dentre esses sistemas, destacam-se os fornos de resíduos de aves para aquecimento das aves, que apesar de apresentarem menor custo estão em desuso pelo considerável trabalho que acarretam, por não permitir o uso do poder fertilizante e pelos odores que produzem ao redor da granja. Esses fornos são de material refratário e situam-se no exterior do aviário no centro de uma das fachadas. Podem funcionar com outros materiais sólidos combustíveis, mas o material prioritário é o resíduo de aves, geralmente da cria anterior e quanto mais seco, melhor.

Acredita-se que o sistema de aquecimento de pisos constitui uma importante alternativa para a obtenção de conforto térmico e que apesar de sua simplicidade, implica em cuidado no projeto como a escolha da fonte de calor e sua estratégia de controle, seleção de materiais e dos detalhes construtivos. Entretanto, de importância fundamental é a compreensão do conceito do aquecimento de piso. A mesma é implementada em modelos simplificados do desempenho térmico de uma edificação que utiliza tal sistema em conjunto com aquecedores solares de água.

Os registros mais remotos da utilização de piso aquecido remontam aos anos 100 A.C., quando era utilizado pelos coreanos. O calor proveniente do fogo mantido abaixo da laje do piso, na parede oposta, era usado para aquecer a massa deste mesmo piso. Um sistema semelhante, conhecido por hipocausto, também foi utilizado pelos romanos mais ou menos na mesma época e é encontrado nas ruínas.

Na história mais recente tem-se o arquiteto Frank Lloyd Wright como um importante incentivador, responsável pela introdução desta técnica por volta de 1930, nos Estados Unidos. Na Europa Central, o aquecimento de pisos por tubulação de água quente tem início no ano de 1950. Pode-se falar em maturidade tecnológica a partir dos anos 70 conjugada à melhoria do isolamento térmico das edificações. Após o ano 2000, já era encontrado em 30% a 50% das novas residências na Alemanha, Áustria e Dinamarca. É notável a utilização do aquecimento de piso na Coreia, encontrado em 90% das residências (OLESEN, 2002).

A utilização de piso aquecido remonta somente aos anos 90 no Brasil, sendo utilizado apenas em residências, onde a necessidade de aquecimento artificial ocorre em partes da região Sul, de clima temperado, com importante oscilação térmica ao longo do ano e ainda exposta, quase o ano inteiro, as bruscas mudanças de tempo causadas pelo advento de massas de ar polares (NIMER, 1989). Em grande parte da região existe pelo menos um mês com temperatura inferior à média de 15 °C e, em quase 50% dele, ocorre o frio abaixo de 13 °C.

Aquecedores pelo piso são pouco utilizados, há trabalhos na área com resistência elétrica no piso, enquanto que o uso de água quente para aquecer ambientes não há uma pesquisa muito vasta. Em algumas residências no Brasil tem sido implantado esse tipo de aquecedor como, por exemplo, em Belo Horizonte onde já se pode obter esse sistema, o qual ainda tem um custo elevado.

Outro sistema que vem merecendo destaque é o uso de biodigestores. São reaproveitados os resíduos da produção avícola ou suína para a produção de biogás. As campânulas, nesses sistemas, devem ser adaptadas para queimarem o biogás. Para se converter campânulas a GLP para biogás deve ser considerado o menor poder calorífico do biogás, a baixa pressão de serviço dos biodigestores e a baixa velocidade de combustão.

2.6 – USO RACIONAL E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O desenvolvimento de projetos e avaliação de sistemas de criação de aves que otimizem a produção, custo da instalação e da energia, ainda é um desafio para a ampla extensão de condições existentes na produção comercial (REECE & LOTT, 1982).

O DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), atualmente ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), criou, a partir de 1980, tarifas diferenciadas para os consumidores que demandam cargas acima de 50 kW. Tais tarifas visam fazer com que os consumidores adotem um tipo de conduta visando à redução de custos e, indiretamente, ao consumo de energia no horário de ponta, no qual há grande concentração de carga (CODI, 1994).

A tendência atual de estudos na área de projetos agrícolas está concentrada na avaliação técnica e econômica de tecnologias que visam o aumento de eficiência, uma vez que a globalização da economia exige que o setor agrícola seja mais produtivo e ao mesmo tempo mais rentável. Para isso, há necessidade de estudos que conduzam a novos equipamentos que poderão influir tanto na produção quanto na redução de custos de produção, especialmente quando produzem diminuição do consumo energético, que é ao mesmo tempo importante em termos de custo operacional e um desafio para o país.

Durante muito tempo o preço da energia elétrica foi um fator inibidor da adoção de medidas de conservação. Sucessivos governos reduziram tarifas de energia elétrica como parte de políticas econômicas para baixar a inflação a curto prazo. O preço médio da energia elétrica no Brasil caiu quase 50% desde o início da década de 70 até 1993, quando ficou abaixo de US\$35/MWh. Entretanto, este processo não foi contínuo. Ocasionalmente, predominava uma política contrária, que buscava o realismo tarifário, o que resultou em grandes oscilações na tarifa média. Estas oscilações somadas a alta inflação, criaram problemas adicionais de planejamento, tanto para os fornecedores de energia como para os consumidores (POOLE & GELLER, 1997).

A otimização da energia elétrica na avicultura foi matéria de diversos estudos realizados pela CEMIG/PROCEL (1996) que constatou a importância dos avicultores medirem seus próprios consumos específicos e identificar meios de otimizá-los. POGI & PIEDADE JR. (1991) estudaram o uso da eletricidade em atividades ligadas à avicultura e relataram que na atividade avícola ela é imprescindível e cada vez mais se torna necessária à racionalização da energia elétrica, devido ao seu custo sempre crescente.

O entendimento da questão da conservação da energia sob o ponto de vista do consumidor não é uma tarefa trivial. As empresas do setor energético do país, quando deparadas com o desafio de promover ações de conservação de energia, dificilmente conseguem ultrapassar os limites do paternalismo. Mudar este paradigma requer não apenas uma disposição de caráter de política empresarial, mas uma verdadeira reeducação dos quadros gerenciais das empresas que comandam o setor energético (BUENO, 2004).

A escassez de investimento no setor energético aliado à falta de recursos naturais faz a racionalização do uso de energia elétrica uma ferramenta de apoio imprescindível para o crescimento do país (TEIXEIRA et al, 2001).

2.7 – MÉTODOS E MODELOS DE ESTUDOS PARA MELHORIA DO CONFORTO TÉRMICO

Diversos modelos matemáticos têm sido propostos para prever a transferência de calor e/ou massa entre o animal e o ambiente circundante (BOUCHILLON et al., 1970; WATHEN et al., 1971; MITCHELL, 1976; MAHONEY & KING, 1977; BAKKEN, 1981; WATHES & CLARK, 1981a; WATHES & CLARK, 1981b; WEBB & KING, 1983; GEBREMEDHIN, 1987; McARTUR, 1991; GEBREMEDHIN & WU, 2000; YANAGI JUNIOR et al., 2001a; AERTS & BERCKMANS, 2004), para estudar a transferência de calor e/ou massa em instalações agrícolas (MEDEIROS, 1997; TURNPENNY et al., 2000; YANAGI JUNIOR, 2000; YANAGI JUNIOR et al., 2001b) e para otimizar sistemas de resfriamento evaporativo (GATES et al., 1991a,b; GATES et al., 1992; SINGLETARY et al., 1996; SIMMONS & LOTT, 1996).

Modelos para predição do estado de conforto de animais em função das condições climáticas podem ser usados na geração de mapas temáticos para se fazer o zoneamento bioclimático de uma determinada região, auxiliando na tomada de decisão com relação à ambiência animal. Outras técnicas matemáticas, como a lógica *fuzzy* e redes neurais tem sido usadas para predição de condições de conforto e desconforto térmico de animais, bem como o seu desempenho produtivo e reprodutivo, além de permitir o controle de ambientes. Dentre as variáveis usadas nestes modelos, destacam-se as climáticas, que auxiliam na caracterização do ambiente térmico. A proposta do

trabalho aqui apresentado destaca o uso de elementos finitos para análise térmica dos galpões.

Problemas físicos, como transferência de calor são geralmente regidos pela equação de *Navier-Stokes*, pois ela descreve uma série de fenômenos estacionários, servindo de base para solução de outras equações mais complicadas. As soluções podem ser encontradas por meio de métodos analíticos ou métodos numéricos.

Mesmo nos problemas mais simples os métodos analíticos não são recomendados, pois apresentam soluções complicadas, devido aos esquemas necessários para modelar a realidade. No que diz respeito aos esquemas simplificadores, esses muitas vezes se afastam do problema de engenharia, podendo até conduzir a soluções que não se verificam na prática. Já, os métodos numéricos oferecem a possibilidade de solucionar problemas em condições complexas permitindo encontrar soluções para inúmeras variantes do problema em tempo satisfatório, pois contam com auxílio computacional na realização de seus cálculos.

Os métodos numéricos mais utilizados são: o Método dos Elementos de Contorno (MEC), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF). O MDF aproxima os operadores diferenciais nas equações governantes do problema, usando expansões locais para as variáveis, geralmente séries de Taylor truncadas. O MEF tem a particularidade de poder dividir o meio contínuo em uma série de elementos de forma geométrica simples, os quais podem se associar as diferentes partes físicas. Segundo BREBBIA et al, (1984). O MEC consiste, basicamente, na transformação da equação diferencial que governa o problema em uma equação integral. Seu contorno pode ser discretizado em elementos de superfície e seu domínio por células, quando existir integral no domínio. A partir desta discretização, suas integrais no contorno são aproximadas por integrações efetuadas em todos os elementos e, da mesma forma, para suas integrais no domínio em relação às células. Esse assunto será tratado em detalhes nos capítulos que se seguem.

2.8 – O SISTEMA PROPOSTO

Um dos sistemas mais simples de aproveitar a energia solar é o do aquecimento de água para fins de consumo doméstico e ou/industrial. Este sistema compreende as fases de captação da energia realizada por meio de um captador de energia solar, e a de

armazenamento desta energia para ser utilizada quando for necessária, obtida por meio de um depósito de água quente.

A energia solar é um sistema ecologicamente correto, gratuito e econômico, nos proporcionando um grande conforto, e a absorção da energia proveniente do sol é realizado por meio dos captadores de energia solar. Os captadores de energia solar normalmente são instalados sobre o telhado da construção, pois devem estar ao máximo expostos ao sol, orientados para o Norte (Hemisfério Sul).

O aquecimento de pisos é uma modalidade de fonte interna de calor caracterizada principalmente pela uniformidade de distribuição da temperatura e eficiência na obtenção de uma sensação térmica favorável (OLESEN, 2002; BOZKIR & CANBAZOGLU, 2004).

Nesta tese foi desenvolvida a pesquisa para aquecimento de galpões avícolas pelo piso usando água quente, sendo esta proveniente de aquecimento solar. Este tipo de aquecimento já vem sendo utilizado em residências.

Em pesquisa para aquecimento residencial percebeu-se que os pisos aquecidos apresentam efetiva melhora no que diz respeito a sua temperatura radiante e expressa a influência da temperatura das superfícies dos recintos sobre a sensação térmica das pessoas presentes. Com respeito à transmissão de calor por contato, diversos estudos sobre a sensação térmica das pessoas, dependendo de seu calçamento, sobre materiais como concreto e pedra, foram sintetizados e comentados por FANGER (1982).

O PEX vem se firmando no mercado como excelente material para compor a serpentina, por onde circula a água quente. Mais flexíveis e maleáveis, os tubos PEX são fabricados em polietileno reticulado com ligação cruzada por processo termoquímico. A reticulação é obtida por reação química com peróxido de hidrogênio, o que lhe confere alta resistência à pressão, à temperatura e à fadiga mecânica.

O mais importante diferencial do aquecimento de piso em relação a outros sistemas, conforme WIRSBO (2006) é a temperatura constante do ambiente. O ar aquecido pelo piso torna-se menos denso que o ar frio e sobe. Dando continuidade ao ciclo, o ar frio desce e é aquecido. Essa circulação de ar proporciona a todo o ambiente um aquecimento com uma distribuição mais uniforme.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

3.1 – INTRODUÇÃO

Transferência de calor é o transito de energia provocado por uma diferença de temperatura, ou seja, é a transmissão de calor entre locais diferentes, situados no mesmo meio ou não e é um dos fenômenos físicos mais comuns. Basicamente, ela se dá em três modos distintos, condução, convecção e radiação, como representado na Figura 3.1, ou pela combinação deles.

A condução ocorre no interior do meio. O calor passa de um ponto para outro sem movimentação desse meio. É o caso comum da transmissão através de sólidos.

Na convecção o calor se transmite por partículas do meio que se movimentam de um local para outro. Ocorre com líquidos e gases. *Convecção natural* (ou *convecção livre*) é a que acontece sem ação de agentes externos. O movimento se dá pela diferença de temperatura entre partículas. Na *convecção forçada* o movimento é provocado predominantemente pela ação de agentes externos como ventiladores ou bombas hidráulicas.

Na radiação a transmissão ocorre sem o contato físico entre os corpos, através de ondas eletromagnéticas de comprimentos de onda na faixa de 0,75 a 400 μm .

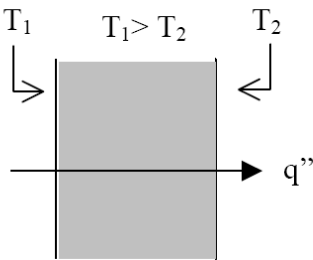
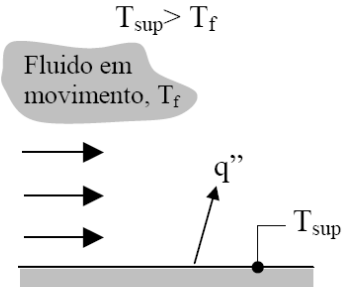
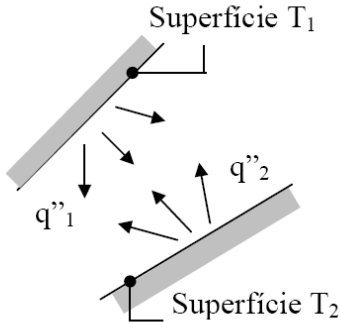
Condução através de um sólido ou fluido estacionário	Convecção de uma superfície para um fluido em movimento	Transferência de calor líquida por radiação entre duas superfícies
		

Figura 3.1 – Modos de transferência de calor

3.2 – CONDUÇÃO

É um processo pelo qual o processo flui de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa. Em seu fluxo de calor a energia é transmitida por meio de comunicação molecular direta sem apreciável deslocamento molecular.

É possível avaliar com precisão e quantificar processo de transferência de calor em termos da equação da taxa apropriada. Uma equação pode ser usada para calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo pela condução. Na condução a equação da taxa é conhecida como Lei de Fourier. Para um objeto unidimensional, que apresenta uma distribuição de temperatura $T(x)$, a equação do fluxo de calor é dada por:

$$q = -k \times A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

Onde:

- q - fluxo de calor por condução que atravessa o corpo na direção x (W);
- k - condutividade térmica do material (W/m.°C), propriedade que caracteriza o componente dos materiais;
- A - área da seção transversal do corpo, perpendicular ao fluxo de calor (m²);
- ∂T - diferença de temperatura (°C) entre duas posições do material;
- ∂x - espessura do corpo na direção x (m).

O principal objetivo na análise da condução é determinar o campo da temperatura em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras, isto é, deseja-se saber a distribuição da temperatura versus a posição. Uma vez que a distribuição de temperatura seja conhecida, o fluxo de calor por condução em qualquer ponto de um meio ou em sua superfície pode ser calculado pela Lei de Fourier e expressa pela Equação 3.1, onde o sinal negativo significa que o calor é transferido na direção decrescente da temperatura.

A distribuição da temperatura também pode ser utilizada para otimizar a espessura de um material isolante ou mesmo para se determinar a compatibilidade entre revestimentos especiais ou adesivos e a superfície sobre a qual são aplicados. O resultado é uma equação diferencial cuja solução depende das condições de contorno. Podendo ser analisada para coordenadas cartesianas, cilíndricas ou esféricas.

a) Coordenadas cartesianas

Segundo a lei da conservação de energia, define-se um pequeno volume de controle infinitesimal (diferencial) dx, dy, dz , conforme mostrado na Figura 3.2.

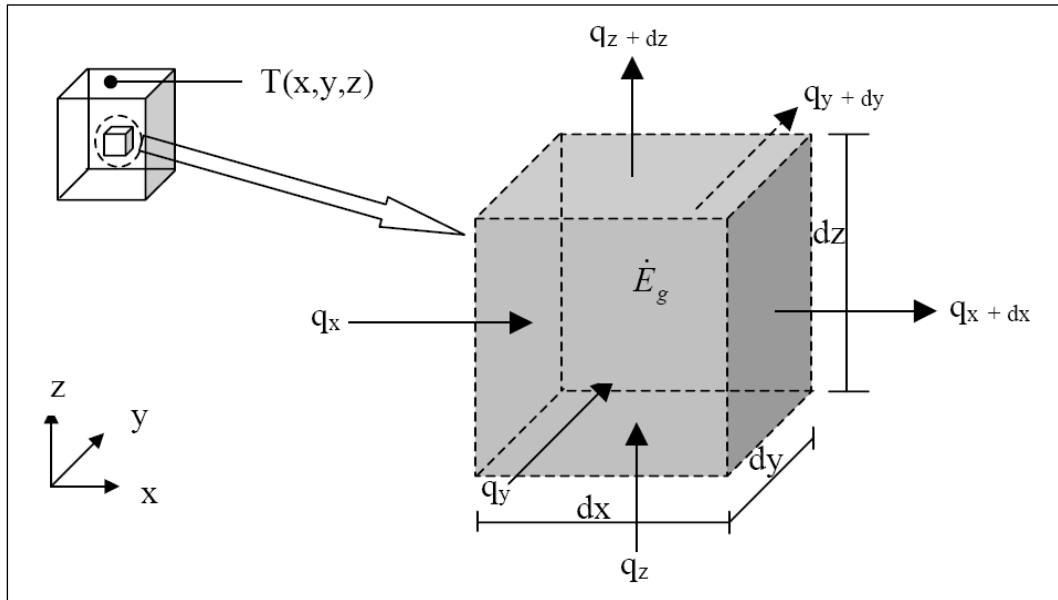


Figura 3.2 – Volume de controle diferencial $dz dy dx$, para análise da condução de calor em coordenadas cartesianas, Incropera e DeWitt (1998).

Baseado no Primeiro Princípio da Termodinâmica formula-se o problema em um dado instante de tempo. As taxas de calor por condução perpendicular a cada uma das superfícies de contorno nos pontos de coordenadas x, y, z são indicadas pelos termos q_x, q_y, q_z respectivamente. As taxas de transferência de calor por condução nas superfícies opostas podem ser então expressas como uma expressão da série de Taylor, onde desprezando os termos de ordens superiores tem-se:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.2a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (3.2b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (3.2c)$$

Isto significa que a componente x da taxa de transferência de calor na direção do eixo $x+dx$, é igual ao valor dessa componente em x somando à quantidade pela qual ela varia em relação à x multiplicado por dx .

No interior do meio pode haver também um termo para representar uma fonte de energia, que está associada à taxa de geração de energia térmica no volume de controle. Essa taxa é representada pela Equação 3.3. Também podem ocorrer variações na quantidade de energia térmica interna acumulada pela matéria no interior do volume de controle. Supõe-se que não há mudança de fase, o termo referente à taxa de acúmulo de energia, considerando ρ e C_p constantes, pode ser escrito de acordo com a Equação 3.4.

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (3.3)$$

$$\dot{E}_{ar} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.4)$$

Onde:

- $\dot{E}_g$ - taxa de geração de energia térmica (W);
- $\dot{q}$ - taxa de energia gerada por unidade de volume do meio (W/m^3);
- $\dot{E}_{ar}$ - taxa de variação de energia térmica interna armazenada (J);
- ρ - densidade (kg/m^3);
- C_p - calor específico da matéria (J/kg.K).

Com base nas taxas mostradas acima, a forma da conservação da energia é:

$$\dot{E}_e + \dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_{ar} \quad (3.5)$$

Onde:

- $\dot{E}_e$ - taxa de condução de calor que entra (W);
- $\dot{E}_s$ - taxa de condução de calor que sai (W).

Substituindo as Equações (3.3) e (3.4) na Equação (3.5) tem-se:

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.6)$$

Substituindo as Equações 3.2 na Equação 3.6 tem-se:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.7)$$

O principal objetivo na análise da condução é determinar o campo da temperatura em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras, isto é, deseja-se saber a distribuição da temperatura do meio varia com a posição.

Uma vez que a distribuição de temperatura seja conhecida, o fluxo de calor por condução em qualquer ponto de um meio ou em sua superfície pode ser calculado pela Lei de Fourier.

$$q_x = -k dz dy \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.9)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.10)$$

Como o fluxo é uma grandeza vetorial tem-se:

$$q'' = -kA \nabla T = -kA \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.11)$$

onde:

q'' = fluxo térmico local

Em que ∇ é o operador diferencial tridimensional e $T(x,y,z)$ é o campo de temperatura escalar.

Assim tem-se a equação de forma geral da difusão de calor em coordenadas cartesianas, a qual é conhecida como equação do calor e é uma ferramenta básica para a análise da condução de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.12)$$

Onde:

$\dot{q}$ - taxa de energia gerada por unidade de volume do meio (W/m^3);

$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ - taxa de variação com o tempo da energia sensível (térmica) do meio por unidade de volume;

ρ - massa específica (kg/m^3);

C_p - calor específico (J/kg K).

Trabalhando com as equações anteriores, para k constante, tem-se a fórmula geral para a condução de calor, em regime transitório:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.13)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \text{ - difusividade térmica (m}^2\text{/s)}$$

Quanto maior o valor de α , mais rapidamente o calor irá se difundir através do material.

b) Coordenadas Cilíndricas

Para analisar a condução de calor em um cilindro, são utilizadas coordenadas cilíndricas, sendo a forma geral da equação do fluxo de calor dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.14)$$

c) Coordenadas Esféricas

Para o caso de transmissão de calor através de uma esfera, a equação será:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.15)$$

3.2.1 – Regime estacionário

Para condições bidimensionais em regime estacionário, sem geração interna de calor e com condutividade térmica constante tem-se a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3.16)$$

Para a solução dessa equação pode-se utilizar procedimentos analíticos, gráficos e numéricos (diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno).

3.2.2 – Regime não-estacionário

Vários problemas de transmissão de calor são dependentes do tempo. Esses problemas são chamados de não estacionários ou transientes, e aparecem quando as condições de contorno são alteradas. Com isso se a temperatura da superfície de um sistema for alterada implica na mudança da temperatura em cada ponto do sistema, o que ocorre até que se atinja o regime permanente.

Quando se considera que a temperatura em um sólido é uniforme para qualquer instante durante o transiente pode-se usar o método da capacidade concentrada que implica que o gradiente de temperatura no interior do sólido seja desprezível.

Com a ausência do gradiente de temperatura a partir da Lei de Fourier tem-se que a condução de calor implica na existência de uma condutividade térmica infinita, o que é impossível de se ocorrer. Embora essa condição nunca seja completamente satisfeita ela pode se aproximar em casos que a resistência a condução no sólido for pequena comparada com a resistência à transferência de calor entre o sólido e a sua vizinhança.

3.3 – CONVECÇÃO

Um fluido com velocidade V e temperatura T_∞ (o símbolo ∞ representa as condições na corrente livre), escoar sobre uma superfície de forma arbitrária e área superficial A_{sup} . Presume-se que a superfície se encontra a uma temperatura uniforme, T_{sup} e se $T_{sup} \neq T_\infty$ sabe-se que irá ocorrer transferência de calor por convecção entre a superfície e o fluido. O fluxo térmico local q'' pode ser representado por:

$$q'' = h(T_{sup} - T_\infty) \quad (3.17)$$

Onde:

q'' - fluxo térmico local (W/m²);

- h - coeficiente de troca de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
 T_{sup} - temperatura na superfície de contato do fluido (K);
 T_{∞} - temperatura do fluido na corrente livre (K).

Uma vez que as condições do escoamento variam de ponto para ponto na superfície, tanto q'' , ver Figura 3.3, quanto h também variam ao longo da superfície.

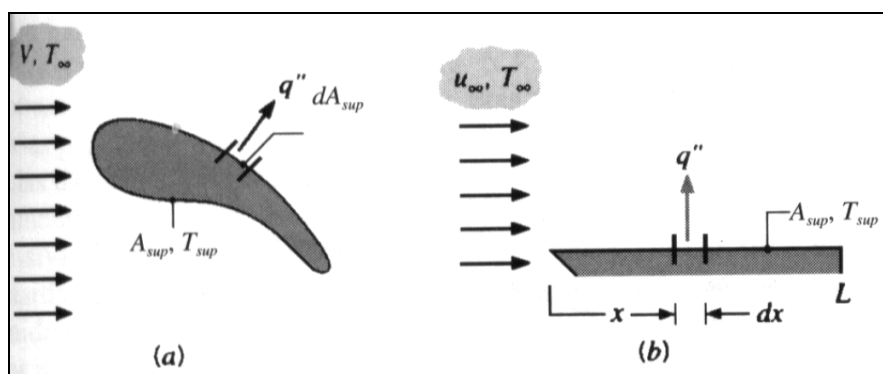


Figura 3.3 - Efeitos local e total da transferência de calor por convecção (a) Superfície de forma arbitrária. (b) Placa plana.

A taxa total de transferência de calor (q) pode ser obtida pela integração do fluxo local ao longo da totalidade da superfície. Ou seja,

$$q = \int_{A_{\text{sup}}} q'' dA_{\text{sup}} \quad (3.18)$$

Onde:

A_{sup} - área da superfície de contato do fluido (m^2).

Substituindo a Equação (3.17) em (3.18) tem-se:

$$q = (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \int_{A_{\text{sup}}} h dA_{\text{sup}} \quad (3.19)$$

Onde:

- h - coeficiente de troca de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
 T_{sup} - temperatura na superfície de contato do fluido (K);

T_{∞} - temperatura do fluido na corrente livre (K);

A_{sup} - área da superfície de contato do fluido (m^2).

Definindo um coeficiente médio de transferência de calor por convecção $\bar{h}$ para toda a superfície, a taxa total de transferência de calor também pode ser expressa por:

$$q = \bar{h}A_{sup}(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (3.20)$$

Para que se entenda o processo de troca de calor por convecção, necessita-se entender as propriedades do fluido e da geometria da superfície, assim como das condições de escoamento, ou seja, é necessário que se tenha conhecimento sobre massa específica; viscosidade; condutividade térmica; calor específico; tipos de escoamento: externo ou interno, laminar ou turbulento; dentre outros.

Dessas múltiplas variáveis é atribuída à dependência da transferência por convecção nas camadas limites que se desenvolvem na superfície. Camada limite é a região do escoamento que se desenvolve a partir da borda da superfície, até onde os efeitos da viscosidade são observados. Pode-se encontrar na camada limite:

- camada fluidodinâmica;
- camada térmica;
- camada de concentração.

3.3.1 – Camada limite fluidodinâmica

Para introduzir o conceito de camada limite, considere o escoamento sobre a placa plana mostrada na Figura 3.4. Quando as partículas do fluido entram em contato com a superfície, elas passam a ter velocidade nula. Essas partículas atuam então no retardamento do movimento do movimento das partículas da camada de fluido adjacente, que, por sua vez, atuam no retardamento do movimento das partículas da próxima camada e assim sucessivamente, até uma distância da superfície $y = \delta$, onde o efeito de retardamento se torna desprezível. Esse retardamento do movimento do fluido está associado às tensões de cisalhamento τ que atuam em planos paralelos à velocidade do fluido (Figura 3.4).

Com o aumento da distância y da superfície, o componente da velocidade do fluido na direção x , u deve então aumentar até atingir o valor na corrente livre, u_{∞} . O índice subscrito ∞ é usado para designar condições na corrente livre, exterior à camada limite.

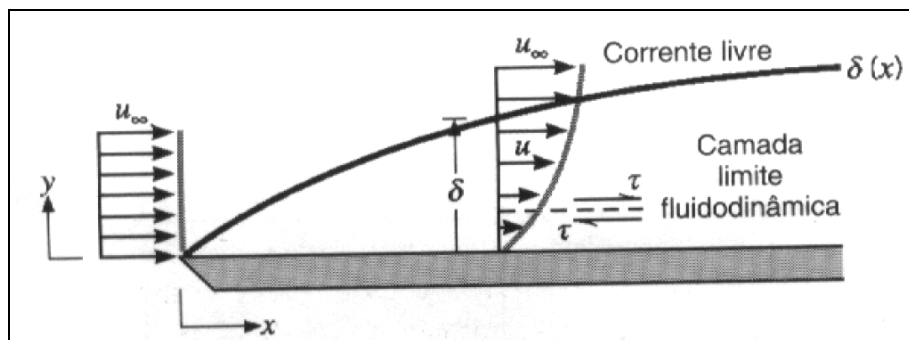


Figura 3.4 - Desenvolvimento da camada limite fluidodinâmica sobre uma placa plana.

A grandeza δ é conhecida como espessura da camada limite e é, freqüentemente, definida como o valor de y para o qual $u = 0,99 u_{\infty}$. O perfil de velocidades na camada limite se refere à maneira pela qual u varia em função de y através da camada limite. Dessa forma, o escoamento do fluido é caracterizado pela existência de duas regiões distintas, uma fina camada de fluido (a camada limite) onde os gradientes de velocidade e as tensões cisalhantes são grandes, e uma região exterior à camada limite, onde os gradientes de velocidade e as tensões cisalhantes são desprezíveis. Com o aumento da distância da aresta frontal da placa, os efeitos da viscosidade penetram cada vez mais na corrente livre, e a camada limite aumenta (δ aumenta com x).

Uma vez que está relacionada com a velocidade do fluido, a camada limite descrita anteriormente pode ser chamada de camada limite fluidodinâmico. Ela se desenvolve sempre que há escoamento de um fluido sobre uma superfície e é de fundamental importância para o entendimento de questões de transferência de calor que envolvem transporte convectivo. Na mecânica dos fluidos, sua importância para a engenharia baseia-se na sua relação com a tensão de cisalhamento na superfície τ_{sup} e portanto com efeitos do atrito na superfície. Para os escoamentos externos, ela fornece a base para a determinação do coeficiente de atrito local é dada por:

$$C_f \equiv \frac{2\tau_{\text{sup}}}{\rho u_{\infty}^2} \quad (3.21)$$

Onde:

C_f - coeficiente de atrito local;

τ - tensão de cisalhamento (N/m^2);

ρ - densidade de fluido (kg/m^3);

u_{∞} - componente da velocidade mássica média de um fluido (m/s) na corrente livre.

3.3.2 – Camada limite térmica

Definida com a região do fluido na qual existe um gradiente de temperatura. Da mesma forma que há a formação de uma camada limite fluidodinâmica no escoamento de um fluido sobre uma superfície, uma camada limite térmica deve desenvolver se houver diferença entre as temperaturas do fluido na corrente livre e da superfície. Considere o escoamento sobre uma placa plana isotérmica (Figura 3.5). Na aresta frontal o perfil de temperaturas é uniforme, com $T(y) = T_{\infty}$, contudo, as partículas do fluido que entram em contato com a placa atingem o equilíbrio térmico na temperatura superficial da placa. Por sua vez, essas partículas trocam energia com as da camada de fluido adjacente, causando o desenvolvimento de gradientes de temperatura no fluido. A região do fluido onde existem esses gradientes de temperatura é conhecida por camada limite térmica, e sua espessura δ , é definida, freqüentemente, como sendo o valor de y no qual a razão:

$$\frac{(T_{\text{sup}} - T)}{(T_{\text{sup}} - T_{\infty})} = 0,99 \quad (3.22)$$

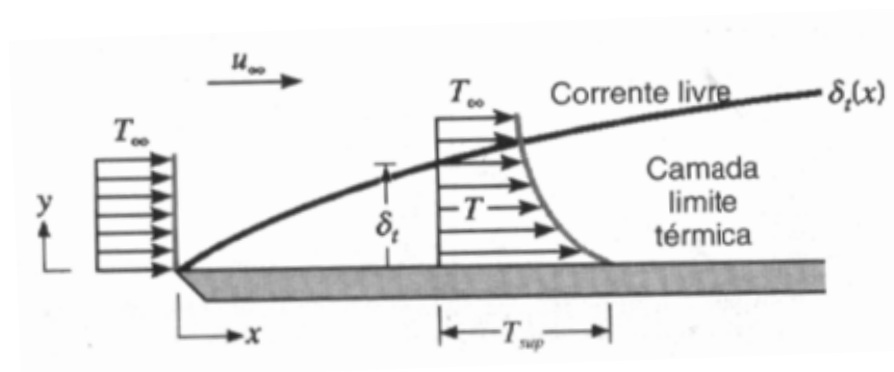


Figura 3.5 - Desenvolvimento da camada limite térmica sobre uma placa plana isotérmica.

A relação entre as condições nessa camada limite e o coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser facilmente demonstrada. A qualquer distância x da aresta frontal, o fluxo térmico local pode ser obtido utilizando-se a lei de Fourier no fluido, em $y = 0$. Isto é,

$$q'' = -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3.23)$$

Aplicando a Lei de Fourier combinando com a lei de Newton do resfriamento tem-se:

$$h = - \frac{k(\partial T / \partial y)}{T_{\text{sup}} - T_{\infty}} \quad (3.24)$$

3.3.3 – Camada limite de concentração

Assim como as camadas limites de velocidade e térmica determinam o atrito e a transferência de calor por convecção em uma parede, a camada limite de concentração determina a transferência de massa por convecção. Sendo assim definida como a região do fluido na qual existe um gradiente de concentração, ou seja, existe uma variação da concentração em função da posição de y , Figura (3.6). A espessura δ é tipicamente definida como o valor de y , para o qual resulta:

$$\frac{(C_{A,s} - C_A)}{(C_{A,s} - C_{A,\infty})} = 0,99 \quad (3.25)$$

Onde:

$C_{A,s}$ - concentração da espécie A na superfície;

C_A - concentração da espécie A;

$C_{A,\infty}$ - concentração encontrada na corrente livre.

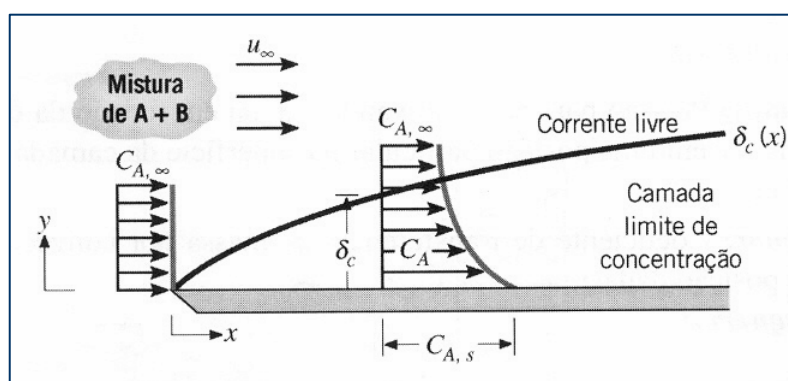


Figura 3.6 – Desenvolvimento da camada limite de concentração de espécie em uma placa plana.

3.3.4 – Aspectos importantes no equacionamento da camada limite

O desenvolvimento das camadas limites de velocidade, térmica e de concentração para uma superfície arbitrária é representado pela Figura 3.7. Considerando um escoamento bidimensional estacionário de um fluido incompressível viscoso em um sistema de coordenadas cartesianas. Deseja-se obter um conjunto de equações diferenciais que determinem um campo de velocidade, temperatura e concentração de espécie no fluido. As equações devem se basear na aplicação dos princípios de conservação e na segunda lei de Newton de movimento para um volume de controle.

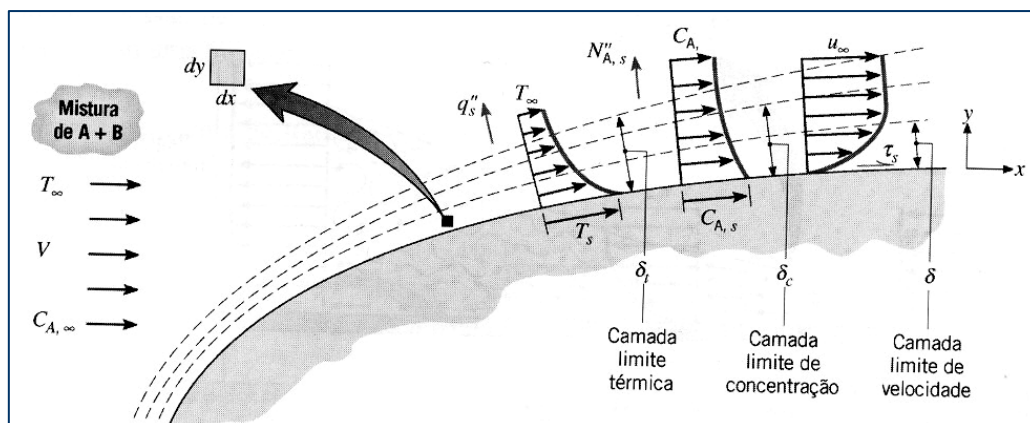


Figura 3.7 – Desenvolvimento das camadas limites de velocidade, térmica e de concentração para uma superfície arbitrária.

As equações da camada limite foram deduzidas aplicando leis a um volume de controle diferencial situado no escoamento bidimensional estacionário nas direções x e y e de valor unitário para medidas de profundidades.

3.3.5 - Equações aplicadas à camada limite

A Equação da conservação de massa é dada por:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} = 0 \quad (3.26)$$

Onde :

u - componente em x da velocidade média (m/s);

v - componente em y da velocidade média (m/s).

A equação do momento é dada por:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + X \quad (3.27a)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Y \quad (3.27b)$$

Onde:

μ - viscosidade dinâmica (kg/s.m);

p - pressão estática (N/m²);

- ρ - massa específica (kg/m³);
 X - forças do corpo em x (N/m²);
 Y - forças do corpo em y (N/m²);

A equação da conservação de energia é dada por:

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \phi + q \quad (3.28a)$$

$$\mu \phi = \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.28b)$$

Onde:

- ϕ - ângulo de azimuth (rad);
 T - temperatura (K);
 C_p - calor específico (J/kg.K).

Sendo a equação de espécie dada por:

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right) + N_A \quad (3.29)$$

onde:

- C_A -concentração da espécie A;
 D_{AB} -coeficiente de difusão binária.

3.4 – RADIAÇÃO

A radiação consiste na energia emitida pela matéria (sólido, líquido ou gás) a uma temperatura finita. O transporte ocorre por ondas eletromagnéticas, portanto, ocorre radiação mesmo sem meio sólido, líquido ou gás. Sendo a radiância calculada por:

$$q'' = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.30)$$

onde:

- T = temperatura absoluta do corpo em grau kelvin (K).
 ε = constante de Stefan-Boltzmann ($\approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$).

q'' = radiância em W/m^2 , isto é, a potência térmica da radiação emitida pelo corpo negro na temperatura T por unidade de sua área.

ε = emissividade do material do corpo. Para o corpo negro, $\varepsilon = 1$.

Não é necessário um meio material para a propagação de energia (como condução e convecção).

A Lei de Steffan-Boltzman fornece o fluxo máximo de radiação que pode ser emitida por uma superfície.

A superfície que emite radiação de acordo com esta relação é chamada de *corpo negro*.

Considerando a emissão em uma direção particular proveniente de um elemento de área dA_1 , conforme mostrado na Figura 3.8, onde a direção é especificada em termos dos ângulos de zênite e azimutal, θ e ϕ , respectivamente, em um sistema de coordenadas esféricas, nota-se que uma pequena superfície diferencial no espaço dA_n através da qual essa radiação passa, subtende o ângulo do sólido $d\omega$ quando vista de um ponto de dA_1 .

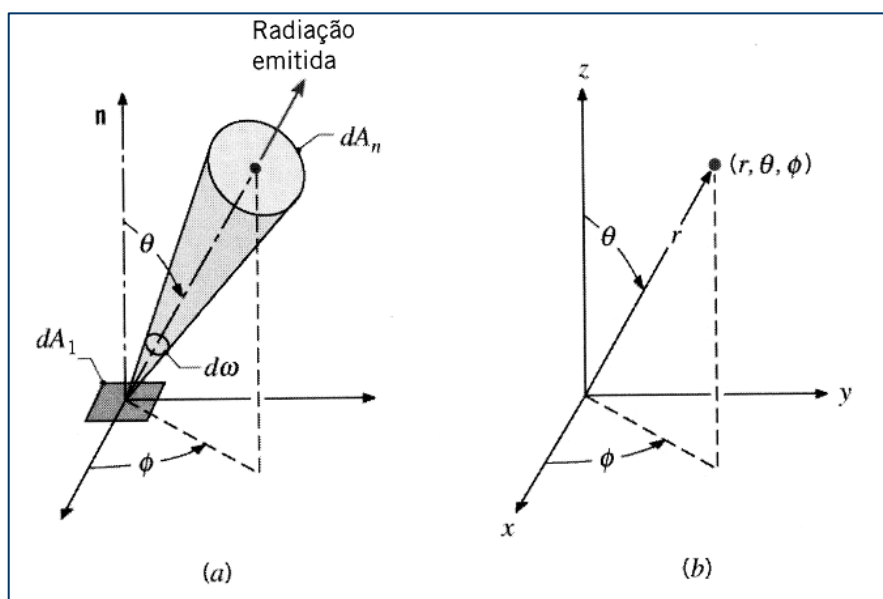


Figura 3.8 – Natureza direcional da radiação. (a) Emissão de radiação de uma área diferencial dA_1 no interior de um ângulo sólido $d\omega$ subtendido por dA_n em um ponto sobre dA_1 . (b) Sistema de coordenadas esféricas.

Observando-se a Figura 3.8 tem-se que a área projetada a um ângulo θ é utilizada para definir a intensidade espectral e é igual a $dA_1 \cos \theta$. Então:

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos \theta d\omega \quad dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos \theta d\omega \quad (3.31)$$

onde:

$I_{\lambda,e}$ - é a intensidade espectral ($\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$);

dA_1 - área diferencial no interior de um ângulo sólido $d\omega$;

sr - esterradiano;

$d\omega$ - ângulo sólido.

3.4.1 - Absorção, Reflexão e Transmissão em Superfícies

Primeiramente é necessário definir a irradiação espectral G_λ (W/m^2), que é a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é incidente sobre uma superfície por unidade de área da superfície e por intervalo de comprimento de onda unitário $d\lambda$ em torno de λ .

A irradiação pode ser incidente em todas as direções e pode ser originada de fontes diferentes. Assim deverá ser feita uma análise de forma geral, como mostrado na Figura 3.9.

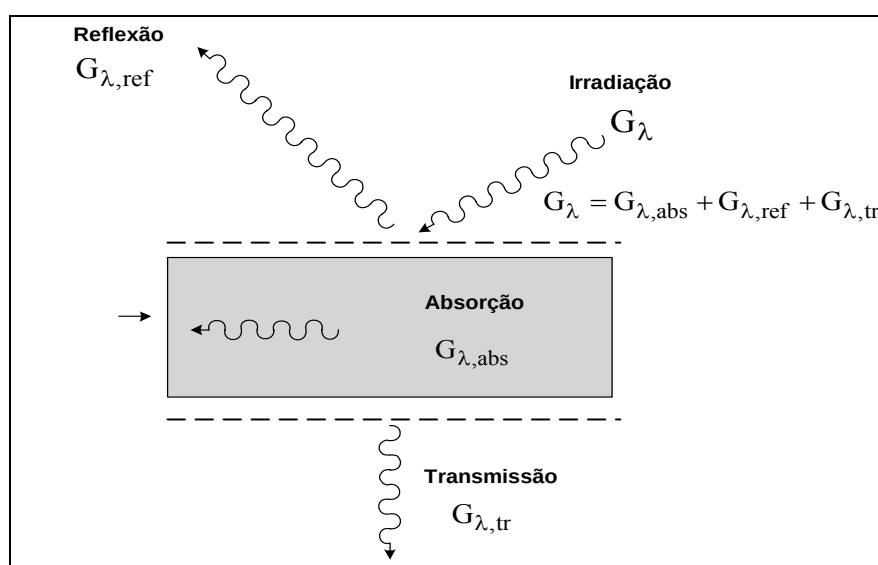


Figura 3.9 – Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente.

A irradiação interage com um meio semitransparente, tal como uma camada de água ou uma placa de vidro como mostrado na Figura 3.9, tem-se que para um componente espectral da irradiação, partes dessa radiação podem ser refletidas, absorvidas e transmitidas, como:

$$G_{\lambda} = G_{\lambda\text{ref}} + G_{\lambda\text{abs}} + G_{\lambda\text{tr}} \quad (3.32)$$

Onde:

G_{λ} - irradiação espectral (W/m^2);

$G_{\lambda\text{ref}}$ - componente espectral da irradiação refletida (W/m^2);

$G_{\lambda\text{abs}}$ - componente espectral da irradiação absorvida (W/m^2);

$G_{\lambda\text{tr}}$ - componente espectral da irradiação transmitida (W/m^2).

Em geral, a determinação desses componentes é complexa, dependendo das condições superior e inferior da superfície, do comprimento de onda da radiação e da composição e espessura do meio.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE TÉRMICA POR ELEMENTOS FINITOS

4.1 – INTRODUÇÃO

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno (Problemas de Valor de Contorno), e possivelmente com condições iniciais (para problemas variáveis no tempo). O MEF é bastante genérico, e pode ser aplicado na solução de inúmeros problemas da engenharia.

4.1.1 - Idéia básica do Método dos Elementos Finitos

A idéia principal do Método dos Elementos Finitos consiste em se dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples (formato triangular, quadrilateral, cúbico, etc.), conforme é ilustra do esquematicamente na Figura 4.1.

Esta idéia é bastante utilizada na engenharia, onde usualmente tenta-se resolver um problema complexo, subdividindo-o em uma série de problemas mais simples. Logo, trata-se de um procedimento intuitivo para os engenheiros.

Devido ao fato das sub-regiões apresentarem dimensões finitas, estas sub-regiões são chamadas “elementos finitos”, em contraste com os elementos infinitesimais utilizados no cálculo diferencial e integral. Advém daí, o nome “Método dos Elementos Finitos”, estabelecido por CLOUGH (1960), na década de 1950.

Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais, conforme é indica na Figura 4.1. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se, usualmente o nome de malha de elementos finitos.

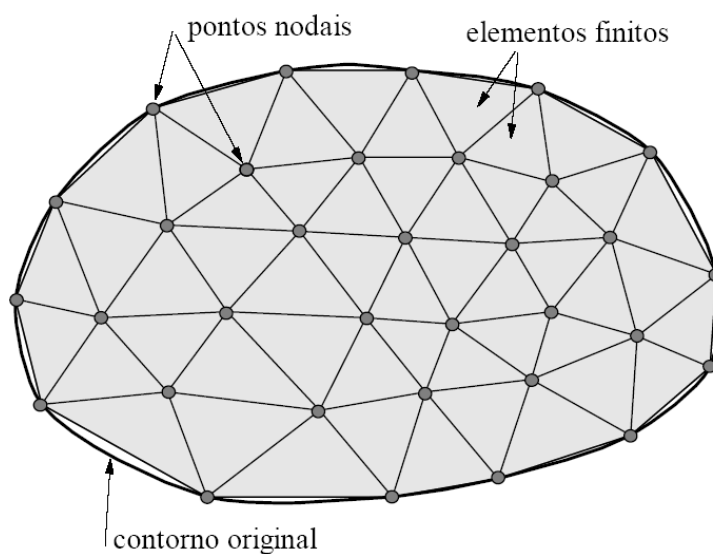


Figura 4.1 – Malha de Elementos Finitos (para um problema plano)

Diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos. Estes apresentam formas geométricas diversas (por exemplo, triangular, quadrilateral, cúbico, etc) em função do tipo e da dimensão do problema (se uni, bi, ou tridimensional). Na Figura 4.2 é apresentada a geometria de vários tipos de elementos finitos.

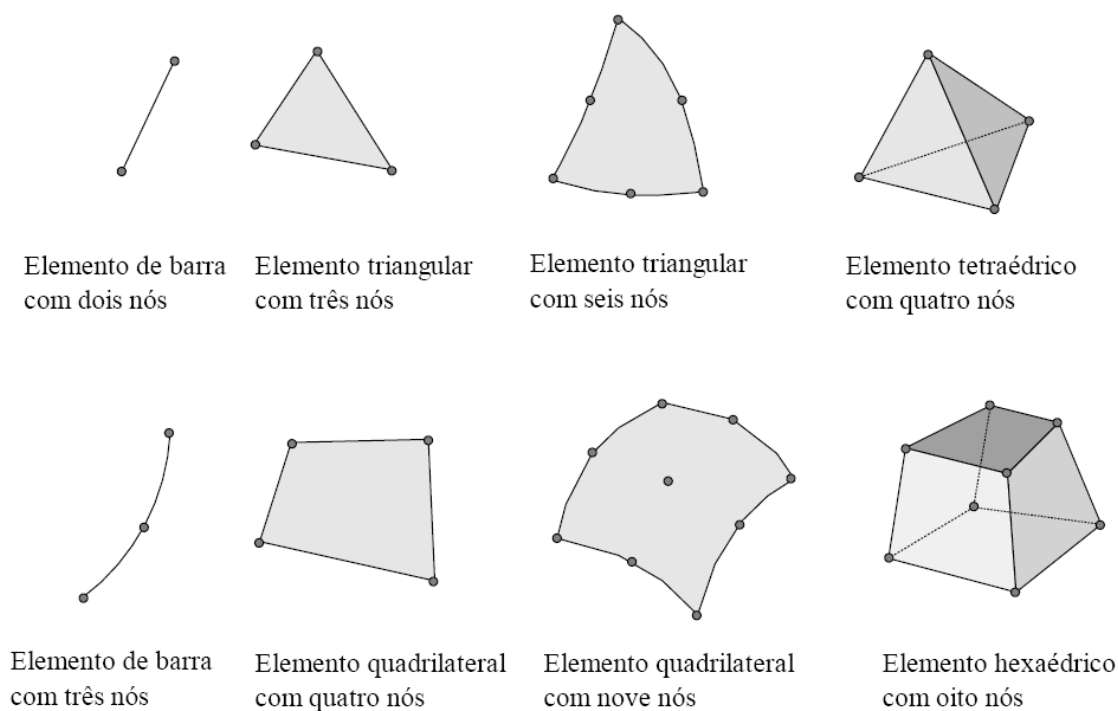


Figura 4.2 – Diferentes tipos de elementos finitos

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Apesar de tratar-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise.

4.1.2 – Aplicação do Método de Elementos Finitos

Para o caso geral (bi ou tridimensional), observa-se que o vetor fluxo de calor é função do gradiente de temperatura T , dada por:

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T \quad (4.1)$$

sendo que para o caso bidimensional tem-se:

$$\kappa = \kappa(x, y) = \begin{pmatrix} \kappa_{xx}(x, y) & \kappa_{xy}(x, y) \\ \kappa_{xy}(x, y) & \kappa_{yy}(x, y) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

A idéia básica do MEF consiste em se discretizar (subdividir) o domínio do problema utilizando-se uma malha de elementos finitos. Na malha, os elementos são interligados através dos nós, conforme é indicada na Figura 4.1. Para isso, o usuário especifica a localização dos nós, utilizando-se de um sistema de coordenadas cartesianas, em um posicionamento arbitrário, conforme é ilustrado na Figura 4.3.

Em geral, o número de graus de liberdade por nó da malha está relacionado com o tipo e a dimensão do problema em questão. No caso de problema de potencial, o objetivo inicial é a determinação de um campo escalar correspondente à solução do problema. Por exemplo, no problema de condução do calor, objetiva-se determinar o campo de temperaturas, o qual consiste em um campo escalar. Neste caso, os elementos empregados na análise devem possuir um grau de liberdade por nó, independentemente da dimensão do problema (se uni, bi ou tridimensional).

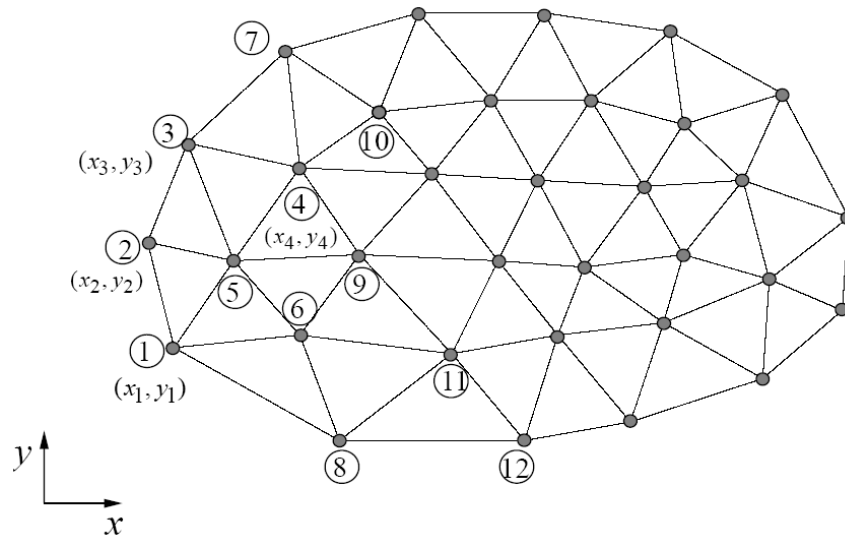


Figura 4.3 – Especificação da posição dos nós da malha.

No problema de condução de calor, quando se utiliza o MEF, as incógnitas principais do problema para o caso em estudo são as temperaturas nodais, ou seja, os valores do campo de temperaturas avaliados nos nós da malha. Essas temperaturas nodais podem ser armazenadas em um arranjo unidimensional (vetor) da seguinte maneira:

$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_{N_g} \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

onde:

T_1 é a temperatura correspondente ao grau de liberdade 1, T_2 é a temperatura correspondente ao grau de liberdade 2, e assim por diante, até o número de graus de liberdade N_g da malha. Através do MEF, a equação diferencial que governa o problema é transformada em um sistema de equações algébricas do tipo:

$$\mathbf{KT} = \mathbf{F} \quad (4.4)$$

onde $\mathbf{K}$ é uma matriz de condutividade do problema, (em geral denominada matriz de rigidez), de ordem $N_g \times N_g$, e $\mathbf{F}$ é um vetor de coeficientes (em geral denominado vetor de forças), de ordem $N_g \times 1$, e $\mathbf{T}$ é o vetor de incógnitas. No caso do problema de

condução de calor, $\mathbf{F}$ tem o sentido de fontes concentradas de calor (calor por unidade de tempo) nos nós da malha:

$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_{N_g} \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

onde F_1 é a fonte de calor correspondente ao grau de liberdade - gdl 1, F_2 é a fonte correspondente ao gdl 2, e assim por diante, até o número de graus de liberdade N_g da malha.

a - Formulação do elemento finito triangular linear para o problema de condução de calor bidimensional

Um dos elementos finitos mais simples já desenvolvidos é o elemento finito triangular com interpolação linear. Este elemento apresenta uma forma triangular, com três nós I , J , e K posicionados nos vértices do triângulo, conforme é indicado na Figura 4.4.

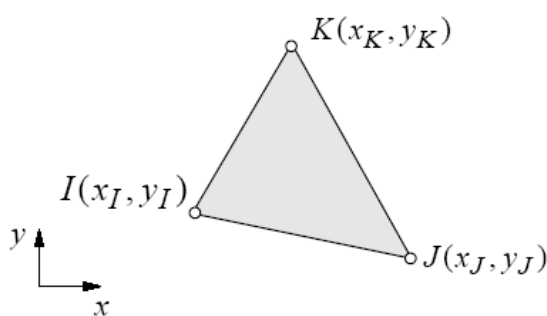


Figura 4.4 – Elemento finito triangular linear, com referência ao sistema de eixos cartesianos.

Na Figura 4.4 estão indicadas as coordenadas (x_I, y_I) , (x_J, y_J) e (x_K, y_K) , dos nós I , J , e K , respectivamente, do elemento triangular. Estas coordenadas são fornecidas como dados de entrada do problema.

O elemento triangular linear, quando utilizado em problemas de condução de calor, possui um grau de liberdade por nó, totalizando três graus de liberdade, quais sejam os valores T_I , T_J , e T_K . Estes graus de liberdade correspondem ao valor do campo de temperatura avaliado nos nós I , J , e K do elemento. Estes graus de liberdade são armazenados no vetor de temperaturas nodais $\mathbf{T}^e$ do elemento, como descrito:

$$\mathbf{T}^e = \begin{Bmatrix} T_I \\ T_J \\ T_K \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

A seguir determinam-se as funções de interpolação do elemento, as quais permitem calcular o valor do campo de temperatura T em um ponto (x, y) qualquer no interior deste elemento. A formulação do elemento triangular linear baseia-se na hipótese de que, no interior do elemento, o campo de temperatura seja uma função linear das coordenadas (x, y) . Assim, assume-se o seguinte campo de temperatura:

$$T(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (4.7)$$

onde a_1 , a_2 e a_3 são constantes a serem determinadas.

A Eq. (4.7) pode ser escrita de forma mais compacta como:

$$T(x, y) = \mathbf{x}(x, y)\mathbf{a} \quad (4.8)$$

onde:

$$\mathbf{x} = \langle 1 \quad x \quad y \rangle \quad (4.9)$$

e

$$\mathbf{a} = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

O vetor $\mathbf{a}$, contendo as constantes, pode ser determinado através da imposição do valor da temperatura em cada nó, ou seja:

$$\begin{aligned}
T(x_I, y_I) &= a_1 + a_2 x_I + a_3 y_I = T_I \\
T(x_J, y_J) &= a_1 + a_2 x_J + a_3 y_J = T_J \\
T(x_K, y_K) &= a_1 + a_2 x_K + a_3 y_K = T_K
\end{aligned} \tag{4.11}$$

As Eqs. (4.11) podem ser reescritas na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_I & y_I \\ 1 & x_J & y_J \\ 1 & x_K & y_K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_I \\ T_J \\ T_K \end{Bmatrix} \tag{4.12}$$

ou, em forma, mais compacta:

$$\mathbf{Ga} = \mathbf{T}^e \tag{4.13}$$

onde

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & x_I & y_I \\ 1 & x_J & y_J \\ 1 & x_K & y_K \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

é uma matriz contendo as coordenadas dos nós do elemento.

Pode-se determinar o vetor de constantes $\mathbf{a}$, invertendo-se a Eq. (4.13)

$$\mathbf{a} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{T}^e \tag{4.15}$$

onde:

$$\mathbf{G}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{G})} \begin{bmatrix} (x_J y_K - x_K y_J) & (x_K y_I - x_I y_K) & (x_I y_J - x_J y_I) \\ (y_J - y_K) & (y_K - y_I) & (y_I - y_J) \\ (x_K - x_J) & (x_I - x_K) & (x_J - x_I) \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

com:

$$\det(\mathbf{G}) = (x_J y_K + x_I y_J + x_K y_I) - (x_J y_I + x_K y_J + x_I y_K) \tag{4.17}$$

O determinante da matriz $\mathbf{G}$, como mostrado a seguir, corresponde a duas vezes a área A_t do elemento, pode ser feito facilmente calculando-se a norma do produto

vetorial entre dois vetores $\mathbf{r}$ e $\mathbf{s}$ definidos arbitrariamente por duas arestas do elemento, conforme é mostrado na Figura 4.5.

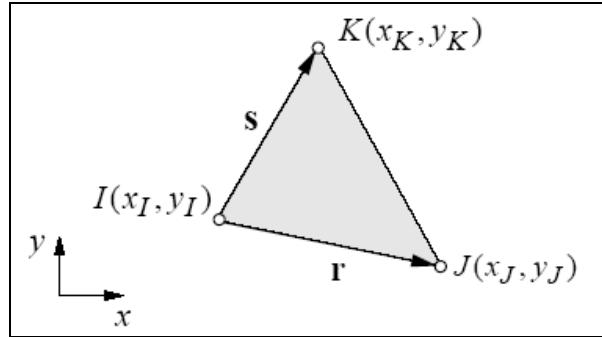


Figura 4.5 – Vetores definidos pelas arestas do elemento, para determinação da área do triângulo.

$$\mathbf{r} = \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_J - x_I \\ y_J - y_I \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{s} = \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_K - x_I \\ y_K - y_I \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.18a)$$

A área A_t do elemento pode ser calculada como:

$$A_t = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times \mathbf{s}| \quad (4.18b)$$

Assim,

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \times \mathbf{s} &= \begin{vmatrix} \hat{\mathbf{i}} & \hat{\mathbf{j}} & \hat{\mathbf{k}} \\ r_x & r_y & r_z \\ s_x & s_y & s_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \hat{\mathbf{i}} & \hat{\mathbf{j}} & \hat{\mathbf{k}} \\ x_J - x_I & y_J - y_I & 0 \\ x_K - x_I & y_K - y_I & 0 \end{vmatrix} \\ &= 0\hat{\mathbf{i}} + 0\hat{\mathbf{j}} + ((x_J - x_I)(y_K - y_I) - (x_K - x_I)(y_J - y_I))\hat{\mathbf{k}} \end{aligned} \quad (4.18c)$$

onde $\hat{\mathbf{i}}$, $\hat{\mathbf{j}}$ e $\hat{\mathbf{k}}$ são os vetores base unitários (versores) do sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) conforme indica a Figura 4.5.

Substituindo-se a eq. (4.18c) na eq. (4.18b), chega-se a:

$$\begin{aligned}
A_t &= \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times \mathbf{s}| = \frac{1}{2} ((x_J - x_I)(y_K - y_I) - (x_K - x_I)(y_J - y_I)) \\
&= \frac{1}{2} ((x_J y_K + x_I y_J + x_K y_I) - (x_J y_I + x_K y_J + x_I y_K))
\end{aligned} \tag{4.18d}$$

Comparando as equações (4.17) e (4.18d), conclui-se que:

$$\det(\mathbf{G}) = 2A_t \tag{4.18e}$$

ou seja, o determinante da matriz $\mathbf{G}$ corresponde a duas vezes a área do elemento.

Substituindo a Eq. (4.15) na Eq. (4.8), chega-se a:

$$T(x, y) = \mathbf{x}(x, y) \mathbf{G}^{-1} \mathbf{T}^e \tag{4.19}$$

ou ainda,

$$T(x, y) = \mathbf{N}(x, y) \mathbf{T}^e \tag{4.20}$$

onde

$$\mathbf{N}(x, y) = \mathbf{x}(x, y) \mathbf{G}^{-1} \tag{4.21}$$

Considerando a Eq. (4.18e), e desenvolvendo o produto dado na equação acima, chega-se a:

$$\mathbf{N}(x, y) = \langle N_1(x, y) \quad N_2(x, y) \quad N_3(x, y) \rangle \tag{4.22}$$

onde

$$\begin{aligned}
N_1(x, y) &= \frac{1}{2A_t} ((x_J y_K - x_K y_J) + (y_J - y_K)x + (x_K - x_J)y) \\
N_2(x, y) &= \frac{1}{2A_t} ((x_K y_I - x_I y_K) + (y_K - y_I)x + (x_I - x_K)y) \\
N_3(x, y) &= \frac{1}{2A_t} ((x_I y_J - x_J y_I) + (y_I - y_J)x + (x_J - x_I)y)
\end{aligned} \tag{4.23}$$

A matriz $\mathbf{N}(x, y)$ é uma matriz contendo funções de interpolação dos graus de liberdade nodais, neste caso, das temperaturas nodais. Esta matriz é usualmente denominada matriz de funções de forma. Observando-se a Eq. (4.20), conclui-se que a matriz de funções de forma permite determinar a temperatura T em um ponto (x, y) qualquer do elemento, a partir dos valores das temperaturas nodais $\mathbf{T}^e$.

Na solução do problema de condução de calor, torna-se necessário o cálculo de derivadas do campo de temperatura $T(x, y)$. As derivadas do campo de temperatura na formulação do elemento finito pode ser calculada a partir da Eq. (4.20).

$$\nabla T(x, y) = \nabla \mathbf{N}(x, y) \mathbf{T}^e = \mathbf{B}(x, y) \mathbf{T}^e \quad (4.24)$$

onde

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(x, y) = \nabla \mathbf{N}(x, y) &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} N_1(x, y) & N_2(x, y) & N_3(x, y) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial N_2(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial N_3(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial N_2(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial N_3(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Calculando as derivadas das funções de forma em relação às coordenadas cartesianas (ver Eqs. (4.20) e (4.21)), chega-se ao cálculo da matriz $\mathbf{B}$:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2A_t} \begin{bmatrix} (y_J - y_K) & (y_K - y_I) & (y_I - y_J) \\ (x_K - x_J) & (x_I - x_K) & (x_J - x_I) \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

b - Montagem da matriz de condutividade e do vetor de fontes nodais do modelo

A partir das matrizes de condutividade e vetores de fontes nodais dos elementos que formam a malha de elementos finitos, pode-se obter a matriz de condutividade e a matriz de fontes nodais do modelo. Para isso, será utilizada como exemplo uma malha simples ilustrada na Figura 4.6.

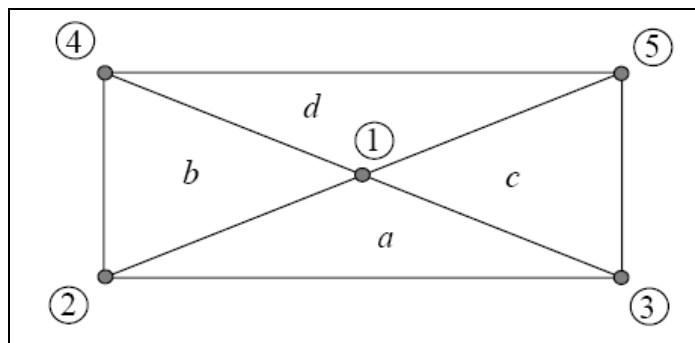


Figura 4.6 – Malha simples de Elementos Finitos

Na discussão seguinte, considera-se a conectividade dos elementos para a malha da Figura 4.6, sendo representado por 5 pontos: **1**, **2**, **3**, **4** e **5**, esses pontos dividem a malha em 4 áreas: **a**, **b**, **c** e **d**, conforme especificada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Incidência nodais dos elementos

Área do Elemento	Nó I	Nó J	Nó K
<i>a</i>	2	3	1
<i>b</i>	2	1	4
<i>c</i>	3	5	1
<i>d</i>	1	5	4

c - Relação entre os vetores de temperaturas nodais do elemento e do modelo

Seja **T** o vetor de temperaturas nodais da malha representada na Figura 4.6 e dado por:

$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

O vetor de temperaturas nodais do elemento *a* é:

$$\mathbf{T}^a = \begin{Bmatrix} T_I^a \\ T_J^a \\ T_K^a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} \quad (4.28)$$

Observa-se que a equação acima pode ser escrita como o seguinte produto matricial:

$$\mathbf{T}^a = \begin{Bmatrix} T_I^a \\ T_J^a \\ T_K^a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{Bmatrix} \quad (4.29)$$

ou ainda,

$$\mathbf{T}^a = \mathbf{H}^a \mathbf{T} \quad (4.30)$$

onde

$$\mathbf{H}^a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

onde $\mathbf{H}^a$ é denominada matriz de incidência do elemento a .

Procedendo-se de forma análoga, chega-se as seguintes relações para os outros elementos:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^b &= \mathbf{H}^b \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^c &= \mathbf{H}^c \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^d &= \mathbf{H}^d \mathbf{T} \end{aligned} \quad (4.32)$$

onde:

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}^b &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{T}^c &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{T}^d &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.33}$$

são as matrizes de incidência dos elementos b , c e d , respectivamente.

Deve-se notar que o número de linhas da matriz de incidência de um elemento é igual ao número de graus de liberdade do elemento (neste caso, três, para o elemento triangular linear), e o número de colunas é igual ao número de graus de liberdade do modelo (neste caso, cinco, para a malha mostrada na Figura (4.6). A matriz de incidência de cada elemento é facilmente determinada pelas seguintes regras simples:

- 1) Para a primeira linha, tem-se o valor um na coluna correspondente ao nó I do elemento, com as demais colunas iguais a zero;
- 2) Para a segunda linha, tem-se o valor um na coluna correspondente ao nó J do elemento, com as demais colunas iguais a zero;
- 3) Para a terceira linha, tem-se o valor um na coluna correspondente ao nó K do elemento, com as demais colunas iguais a zero;

ou seja, de forma mais geral, tem-se para cada linha n , o valor 1 na coluna correspondente ao grau de liberdade do nó n , com as demais colunas iguais a zero.

d - Relação entre os vetores de fontes nodais do elemento e do modelo

Seja $\mathbf{F}$ o vetor de fontes nodais da malha mostrada na Figura 4.6 e dado por:

$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{Bmatrix} \tag{4.34}$$

O vetor de fontes nodais do elemento a é:

$$\mathbf{F}^a = \begin{Bmatrix} F_I^a \\ F_J^a \\ F_K^a \end{Bmatrix} \quad (4.35)$$

Analogamente, para os outros elementos, tem-se:

$$\mathbf{F}^b = \begin{Bmatrix} F_I^b \\ F_J^b \\ F_K^b \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F}^c = \begin{Bmatrix} F_I^c \\ F_J^c \\ F_K^c \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F}^d = \begin{Bmatrix} F_I^d \\ F_J^d \\ F_K^d \end{Bmatrix} \quad (4.36)$$

Uma condição de “equilíbrio” a ser satisfeita, é que a soma das fontes nodais, referentes a um nó comum, de cada elemento que estão conectados a este nó comum, deve ser igual à fonte nodal total aplicada deste nó. Ou seja, para o nó 1, tem-se:

$$F_1 = F_K^a + F_J^b + F_K^c + F_I^d \quad (4.37)$$

Analogamente, têm-se para os demais nós:

$$\begin{aligned} F_2 &= F_I^a + F_I^b \\ F_3 &= F_J^a + F_I^c \\ F_4 &= F_K^b + F_K^d \\ F_5 &= F_J^c + F_J^d \end{aligned} \quad (4.38)$$

As Equações. (4.37) e (4.38) podem ser escritas na seguinte forma matricial:

$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_I^a \\ F_J^a \\ F_K^a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_I^b \\ F_J^b \\ F_K^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_I^c \\ F_J^c \\ F_K^c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_I^d \\ F_J^d \\ F_K^d \end{Bmatrix} \quad (4.39)$$

Observa-se que as matrizes mostradas na equação acima correspondem às matrizes transpostas das matrizes de incidência de cada elemento. Assim, a equação acima pode ser escrita, de forma compacta, como:

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}^a \mathbf{F}^a + \mathbf{H}^b \mathbf{F}^b + \mathbf{H}^c \mathbf{F}^c + \mathbf{H}^d \mathbf{F}^d \quad (4.40)$$

Para escrever a equação acima na forma de somatório, defini-se $a \equiv 1$, $b \equiv 2$, $c \equiv 3$ e $d \equiv 4$. Assim:

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}^1 \mathbf{F}^1 + \mathbf{H}^2 \mathbf{F}^2 + \mathbf{H}^3 \mathbf{F}^3 + \mathbf{H}^4 \mathbf{F}^4 \quad (4.41)$$

ou seja,

$$\mathbf{F} = \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{H}^e \mathbf{F}^e \quad (4.42)$$

onde e representa um elemento genérico e n_e é o número de elementos da malha (neste caso, $n_e = 4$).

Por meio da Eq. (4.42), pode-se, portanto, determinar o vetor de fontes nodais da malha.

e - Obtenção da matriz de condutividade do modelo

A Eq. (4.35) apresenta a relação entre os vetores de temperaturas e fontes nodais de um elemento genérico e . Assim, para a malha da Figura 4.6, pode-se escrever:

$$\mathbf{F}^a = \mathbf{K}^a \mathbf{T}^a \quad \mathbf{F}^b = \mathbf{K}^b \mathbf{T}^b \quad \mathbf{F}^c = \mathbf{K}^c \mathbf{T}^c \quad \mathbf{F}^d = \mathbf{K}^d \mathbf{T}^d \quad (4.43)$$

Substituindo as equações acima na Eq. (4.40), tem-se

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}^a \mathbf{K}^a \mathbf{T}^a + \mathbf{H}^b \mathbf{K}^b \mathbf{T}^b + \mathbf{H}^c \mathbf{K}^c \mathbf{T}^c + \mathbf{H}^d \mathbf{K}^d \mathbf{T}^d \quad (4.44)$$

Substituindo, agora, as Eqs. (4.30) e (4.32) na equação acima, tem-se

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}^a \mathbf{T}^T \mathbf{K}^a \mathbf{H}^a \mathbf{T} + \mathbf{H}^b \mathbf{T}^T \mathbf{K}^b \mathbf{H}^b \mathbf{T} + \mathbf{H}^c \mathbf{T}^T \mathbf{K}^c \mathbf{H}^c \mathbf{T} + \mathbf{H}^d \mathbf{T}^T \mathbf{K}^d \mathbf{H}^d \mathbf{T} \quad (4.45)$$

Colocando o vetor de temperaturas nodais do modelo $\mathbf{T}$ em evidência, chega-se a:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{H}^a \mathbf{T}^T \mathbf{K}^a \mathbf{H}^a + \mathbf{H}^b \mathbf{T}^T \mathbf{K}^b \mathbf{H}^b + \mathbf{H}^c \mathbf{T}^T \mathbf{K}^c \mathbf{H}^c + \mathbf{H}^d \mathbf{T}^T \mathbf{K}^d \mathbf{H}^d) \mathbf{T} \quad (4.46)$$

ou ainda,

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{T} \quad (4.47)$$

onde:

$$\mathbf{K} = \mathbf{H}^a \mathbf{T}^T \mathbf{K}^a \mathbf{H}^a + \mathbf{H}^b \mathbf{T}^T \mathbf{K}^b \mathbf{H}^b + \mathbf{H}^c \mathbf{T}^T \mathbf{K}^c \mathbf{H}^c + \mathbf{H}^d \mathbf{T}^T \mathbf{K}^d \mathbf{H}^d \quad (4.48)$$

é a matriz de condutividade (ou de rigidez) do modelo. Esta equação também pode ser escrita na forma de somatório, seguindo a idéia utilizada na Eq. (4.42). Assim, em geral, pode-se obter a matriz de rigidez do modelo, por meio do seguinte somatório:

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{H}^e \mathbf{T}^T \mathbf{K}^e \mathbf{H}^e \quad (4.49)$$

Por meio da Eq.(4.49), pode-se, portanto, determinar a matriz de condutividade da malha. Embora as Eqs. (4.42) e (4.49) tenham sido deduzidas para o malha mostrada na Figura 4.5, estas equações são completamente genéricas, podendo ser utilizadas para qualquer outra malha de elementos finitos. Para isso, deve-se apenas determinar a matriz de incidência associada a cada elemento para a malha em questão.

Deve-se ressaltar que embora as Eqs. (4.42) e (4.49) representem teoricamente a forma de obtenção do vetor de fontes nodais, e da matriz de condutividade do modelo, na prática, este processo torna-se ineficiente para malhas refinadas (com muitos elementos), em função da grande quantidade de zeros presente nas matrizes de

incidência. Assim, na prática, utiliza-se um algoritmo computacional para montagem do vetor de fontes nodais e matriz de condutividade da malha, o qual evita a multiplicação desnecessária dos números zero presentes nas matrizes de incidência dos elementos.

4.1.3 - Imposição das condições de contorno e solução do sistema de equações

Caso as temperaturas nodais de todos os nós da malha fossem conhecidas, as fontes nodais poderiam ser facilmente determinadas por meio da Eq. (4.47). Entretanto, em situações práticas, se conhece a temperatura nodal de alguns nós, e a fonte nodal dos demais nós. Para a determinação dos valores desconhecidos das fontes e temperaturas nodais, deve-se numerar os graus de liberdade da malha, de tal maneira que os nós com fonte nodal prescrita (conhecida) sejam numerados primeiro, e os nós com temperatura prescrita (conhecida) sejam numerados por último.

Por exemplo, considera-se a malha da Figura 4.6. Neste caso, a Eq. (4.47) pode ser escrita na forma expandida como:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix} \quad (4.50)$$

Considera-se agora, que as fontes nodais sejam prescritas para os nós 1, 2 e 3, e que as temperaturas sejam prescritas para os nós 4 e 5. Com isso, pode-se particionar o sistema acima, da seguinte maneira,

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{14} & K_{15} \\ K_{24} & K_{25} \\ K_{34} & K_{35} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} K_{41} & K_{42} & K_{43} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{44} & K_{45} \\ K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} T_4 \\ T_5 \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \quad (4.51)$$

ou de forma mais compacta

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{00} & \mathbf{K}_{01} \\ \mathbf{K}_{10} & \mathbf{K}_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_0 \\ \mathbf{T}_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{F}_1 \end{Bmatrix} \quad (4.52)$$

onde

$$\mathbf{K}_{00} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_{01} = \begin{bmatrix} K_{14} & K_{15} \\ K_{24} & K_{25} \\ K_{34} & K_{35} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_0 = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F}_0 = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (4.53)$$

$$\mathbf{K}_{10} = \begin{bmatrix} K_{41} & K_{42} & K_{43} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_{11} = \begin{bmatrix} K_{44} & K_{45} \\ K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_1 = \begin{Bmatrix} T_4 \\ T_5 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{Bmatrix} F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix}$$

Desta forma, deve-se notar que os vetores $\mathbf{T}_1$ e $\mathbf{F}_0$ são conhecidos, ao passo que os vetores $\mathbf{T}_0$ e $\mathbf{F}_1$ são desconhecidos. Desenvolvendo a Eq. (4.52), tem-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{00}\mathbf{T}_0 + \mathbf{K}_{01}\mathbf{T}_1 &= \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{K}_{10}\mathbf{T}_0 + \mathbf{K}_{11}\mathbf{T}_1 &= \mathbf{F}_1 \end{aligned} \quad (4.54)$$

Com isso, o vetor de temperaturas nodais $\mathbf{T}_0$ pode ser calculado, a partir da primeira das equações acima,

$$\mathbf{T}_0 = \mathbf{K}_{00}^{-1}(\mathbf{F}_0 - \mathbf{K}_{01}\mathbf{T}_1) \quad (4.55)$$

Após a determinação de $\mathbf{T}_0$, o vetor de fontes nodais $\mathbf{F}_1$, pode ser calculado diretamente utilizando-se a segunda das Eqs. (4.54):

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{K}_{10}\mathbf{T}_0 + \mathbf{K}_{11}\mathbf{T}_1 \quad (4.56)$$

Faz-se então a montagem do vetor de temperaturas nodais do modelo:

$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_0 \\ \mathbf{T}_1 \end{Bmatrix} \quad (4.57)$$

Determinando assim o vetor de temperaturas nodais de cada elemento utilizando-se a matriz de incidência, tem-se:

$$\mathbf{T}^e = \mathbf{H}^e \mathbf{T} \quad (4.58)$$

A determinação do gradiente da temperatura no interior de cada elemento é dado por:

$$\mathbf{T}^e = \mathbf{H}^e \mathbf{T} \quad (4.59)$$

E finalmente a determinação do fluxo de calor no interior de cada elemento:

$$q = -k \nabla T \quad (4.60)$$

Com isto, tem-se a solução do problema de condução de calor por elementos finitos, utilizando-se o elemento triangular linear.

4.1.4 - Campos de aplicação do Método de Elementos Finitos

O número de áreas de aplicação para o MEF tem crescido de forma considerável recentemente. Dentre os inúmeros campos de aplicação possíveis, podem se citar: indústria da construção civil; indústria automobilística, naval, aeronáutica e aeroespacial; metalurgia; mineração; exploração de petróleo; setor energético; telecomunicações; forças Armadas; meio ambiente; recursos hídricos e saúde.

As primeiras aplicações do MEF foram em problemas de engenharia estrutural, mais especificamente, sobre análise de tensões. Neste tipo de problema, busca-se determinar as tensões, deformações e deslocamentos em um corpo sólido sujeito a determinadas ações tais como cargas (forças aplicadas) e recalques (deslocamentos impostos). Exemplos de tais aplicações compreendem o estudo do comportamento de estruturas civis, tais como edifícios, pontes, barragens, e túneis, onde os elementos finitos são utilizados na discretização de vigas, lajes, treliças, paredes, fundações, etc.

O estudo de análise de tensões também é importante em outras áreas da engenharia, tais como engenharia mecânica, naval, aeronáutica, aeroespacial, onde são necessários análises das estruturas e peças mecânicas de máquinas, automóveis,

caminhões, navios, aviões, espaçonaves, etc. Dentro da área de mecânica dos sólidos, podem ser realizadas: análise estática, análise modal (estudo de vibrações e instabilidade estrutural), e análise dinâmica.

Além da aplicação clássica do MEF na solução de problemas da mecânica dos sólidos, várias outras áreas da engenharia empregam atualmente o MEF como uma poderosa ferramenta na análise de diversos fenômenos físicos, e no projeto e análise de diversos equipamentos, dispositivos, processos industriais, etc.

A quantidade de problemas físicos que podem ser analisados com o MEF é bastante grande. A título de ilustração podem-se citar as seguintes áreas de transferência de calor; elastostática; elastodinâmica; eletrostática; eletromagnetismo; acústica; fadiga; mecânica da fratura; hidráulica; termodinâmica; hidrodinâmica; aerodinâmica; biomecânica; lubrificação; problemas de interação fluido-estrutura; problemas de propagação de ondas e dispersão de contaminantes.

4.2 – O FEMM 4.2 NA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A análise de elementos finitos têm sido usada em diversos campos da engenharia. Na presente proposta de trabalho foi realizada a análise térmica para o estudo dos galpões avícolas. A metodologia aplicada envolve a análise no domínio do tempo, que será descrita a seguir. A simulação do comportamento da temperatura em condição estática e em movimento foi realizada no software FEMM (Steady-State Finite Element Heat Conduction Solver).

O programa FEMM utilizado neste trabalho resolve problemas de estado estacionário da condução do calor em domínios plano e assimétricos bidimensionais através de elementos finitos. Na Figura 4.7 está representada a tela principal do programa FEMM e na Figura 4.8 estão representadas as janelas de definição do problema de estado estacionário.

Para se realizar análise de elementos finitos no programa FEMM, é necessário que a solução do problema seja dividida em 3 etapas, o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento.

1 - Pré-processamento → o pré-processamento inclui:

- processamento de dados: esta etapa inclui a coleta dos dados a respeito dos galpões avícolas a serem utilizados para a análise de elementos finitos, bem como o desenho

detalhado em duas dimensões do galpão a ser estudado. Na Tabela 4.2 estão representados os dados do galpão da fazenda do Glória, localizada no município de Uberlândia, MG.

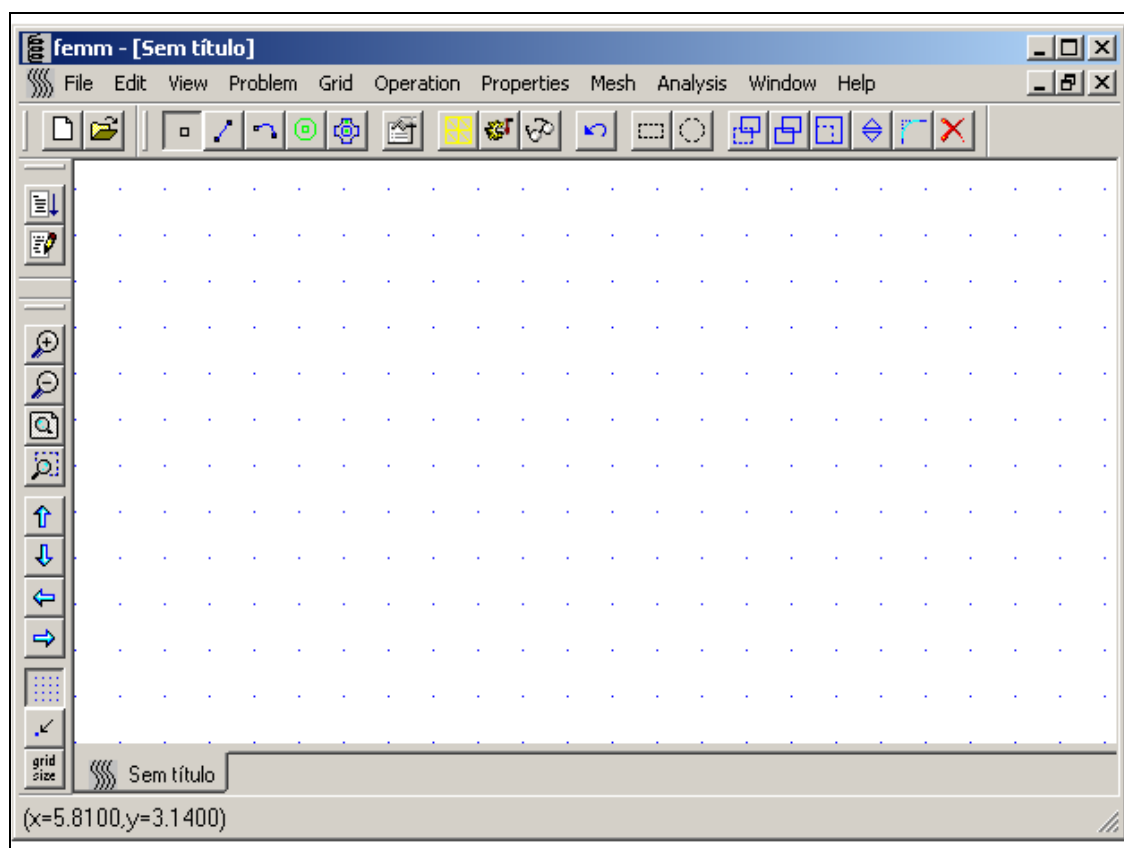


Figura 4.7 – Programa FEMM

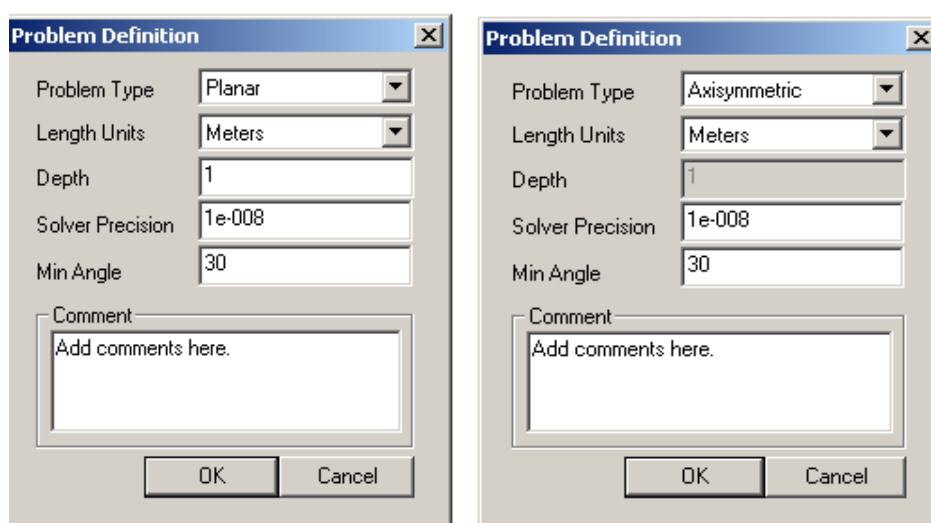


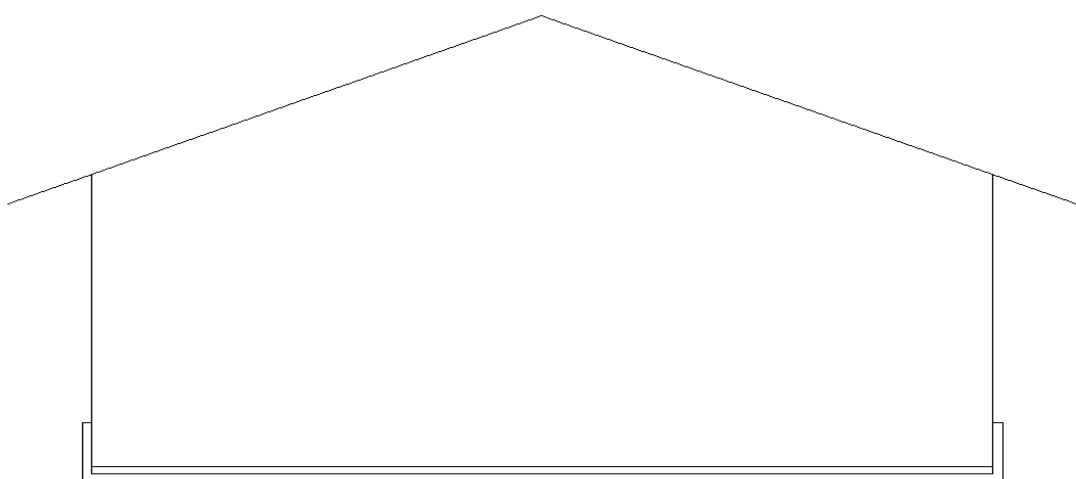
Figura 4.8 – Definição do problema de estado estacionário

Tabela 4.2 – Dados do galpão avícola da Fazenda do Glória

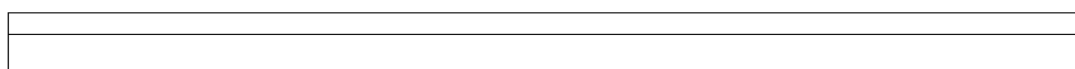
Dados do galpão avícola	Valor em metros
Comprimento	50,4
Largura	10,2
Pé direito	3,0
Altura da mureta	0,5
Altura da cama	0,1

- execução do desenho → após o processamento dos dados, desenha-se o galpão detalhadamente, definindo a forma geométrica do problema a ser resolvido e para estabelecer propriedades e condições de contorno. Serão feitos dois desenhos do galpão, um desenho da vista frontal e outro da vista lateral.

O programa do FEMM é composto de ferramenta gráfica para construção de desenhos, contudo pode-se utilizar outros programas comerciais para fazer os desenhos dos galpões, e em seguida o desenho pode ser exportado para o FEMM. Na Figura (4.9) estão representadas: a vista frontal (4.9.a) e a vista lateral (4.9.b) do galpão da Fazenda do Glória, cujas dimensões constam na Tabela 4.2.



(a)



(b)

Figura 4.9 – Vista frontal (a) e lateral do galpão (b)

- Estruturação geométrica → onde são definidas as propriedades:

- materiais: definição dos materiais que serão utilizados para o modelo do galpão. Na Figura 4.10 está representada a lista de materiais que o programa possui. Caso o programa não possua em sua lista determinado material, esse poderá ser inserido. Para inserir o material, basta definir os parâmetros no bloco de propriedades do material. Na Figura 4.11 está representado o bloco de propriedades dos materiais.

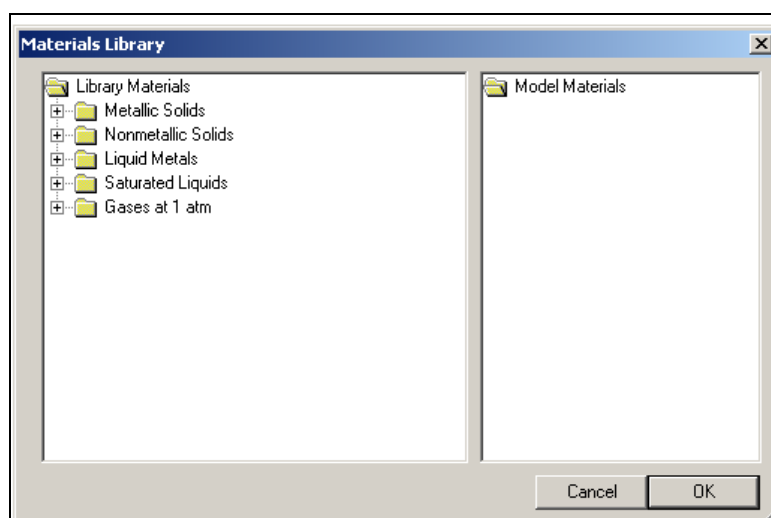


Figura 4.10 – Lista de Materiais

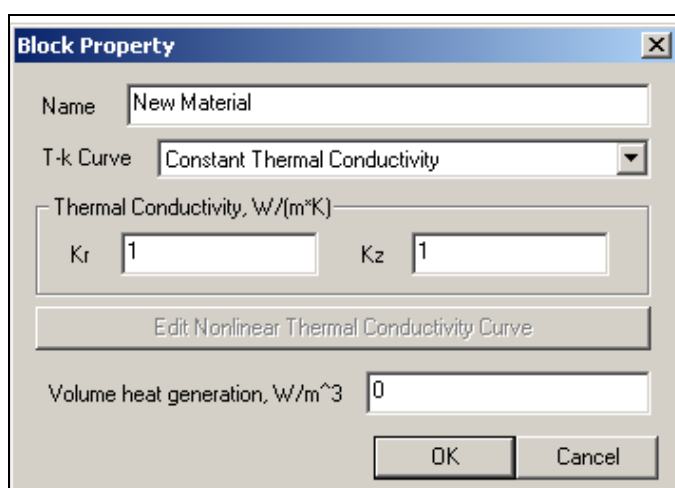


Figura 4.11 - Bloco de propriedades dos materiais.

Os materiais que serão utilizados nos modelos dos galpões para a análise de elementos finitos são: piso de concreto; muretas de tijolos; telhado de barro; material do círculo de proteção variado; material da cama variado; material usado para distribuição da água e ar.

Depois de definido os materiais com suas respectivas propriedades térmicas para análise das variações de temperatura, deve-se localizá-los no desenho do galpão como é mostrado na Figura 4.12. Na Figura 4.12 tem-se a representação da vista lateral com distribuição dos materiais no modelo do galpão.

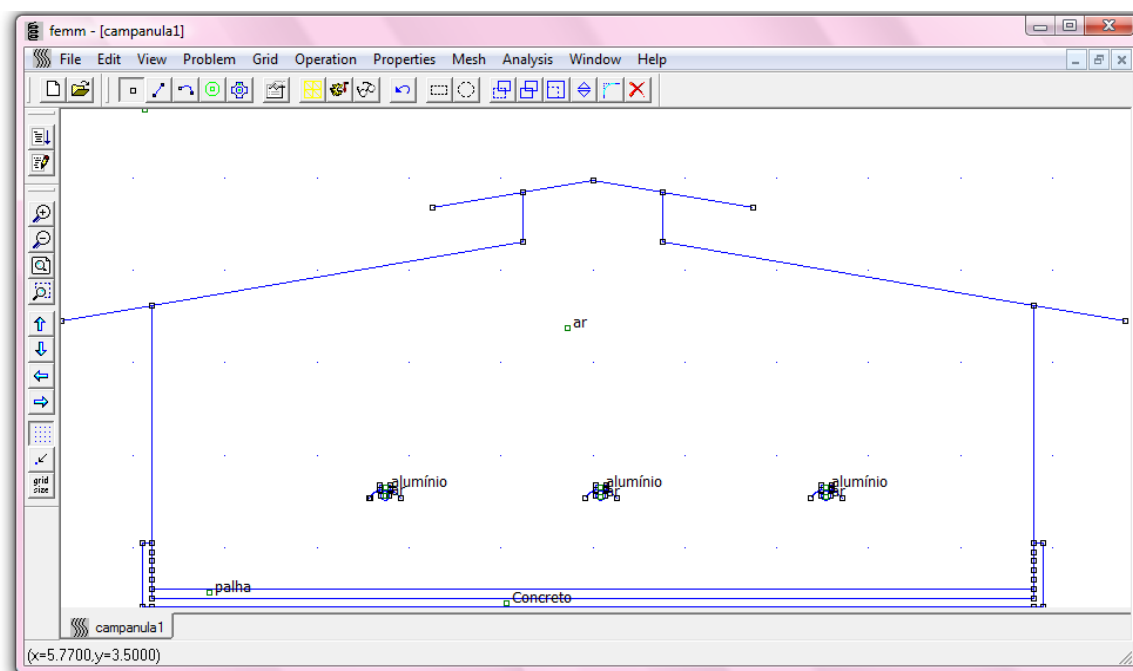


Figura 4.12 – Distribuição dos materiais no modelo do galpão.

- condições de contorno: onde se identifica os fatores que influenciam de maneira relevante no problema, o que implica na escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes resultando num modelo matemático constituído de um conjunto de equações diferenciais. Na Figura 4.13 está representado o bloco de propriedades das condições de contorno.

2 – Processamento: é parte vital da solução do processo de Elementos Finitos que é o processo de triangularização da estrutura geométrica definida no pré-processamento.

Na Figura 4.14 está representado a triangularização da estrutura geométrica do galpão - vista frontal.

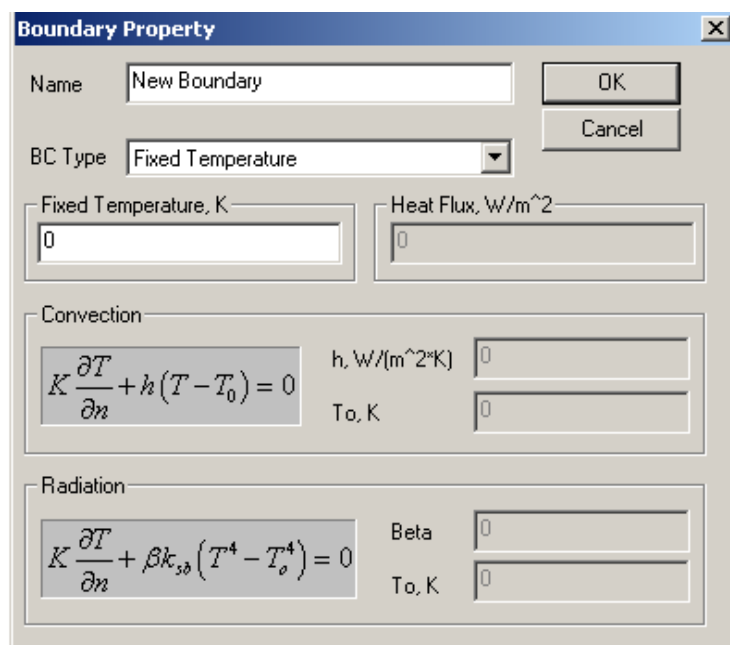


Figura 4.13 - Bloco de propriedades das condições de contorno

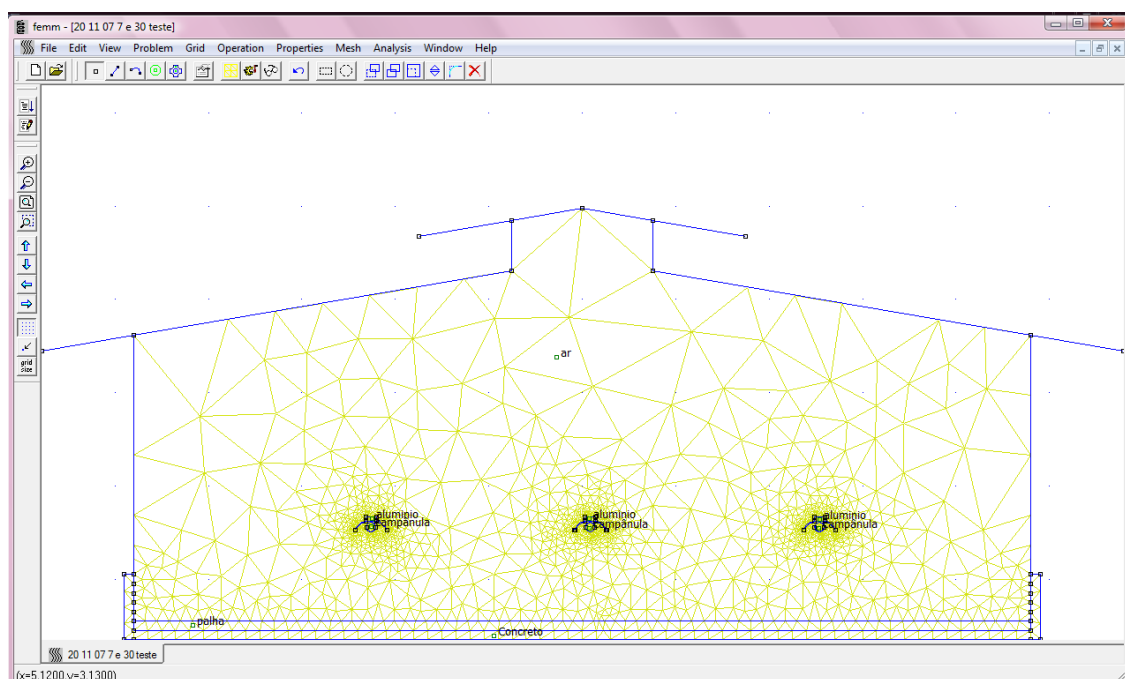


Figura 4.14 – Malha de Triangulação do programa em corte transversal da estrutura geométrica do galpão

3 - Pós processamento, é o processo de análise onde ocorre a resolução das equações diferenciais para se obter os valores da temperatura durante o domínio da solução. Na Figura 4.15 está representada a tela de simulação e na Figura 4.16 a solução do problema. Sendo que o autor do programa Mirage (uma versão anterior do FEMM 4.2)

encontrou diversas referências que provaram útil à compreensão, a derivação e a solução de problemas de estado estacionário de temperatura, MEEKER, 2006.

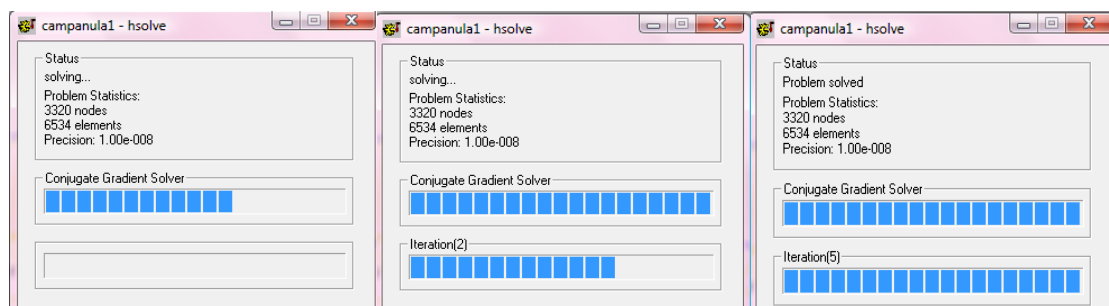


Figura 4.15 – Tela de simulação

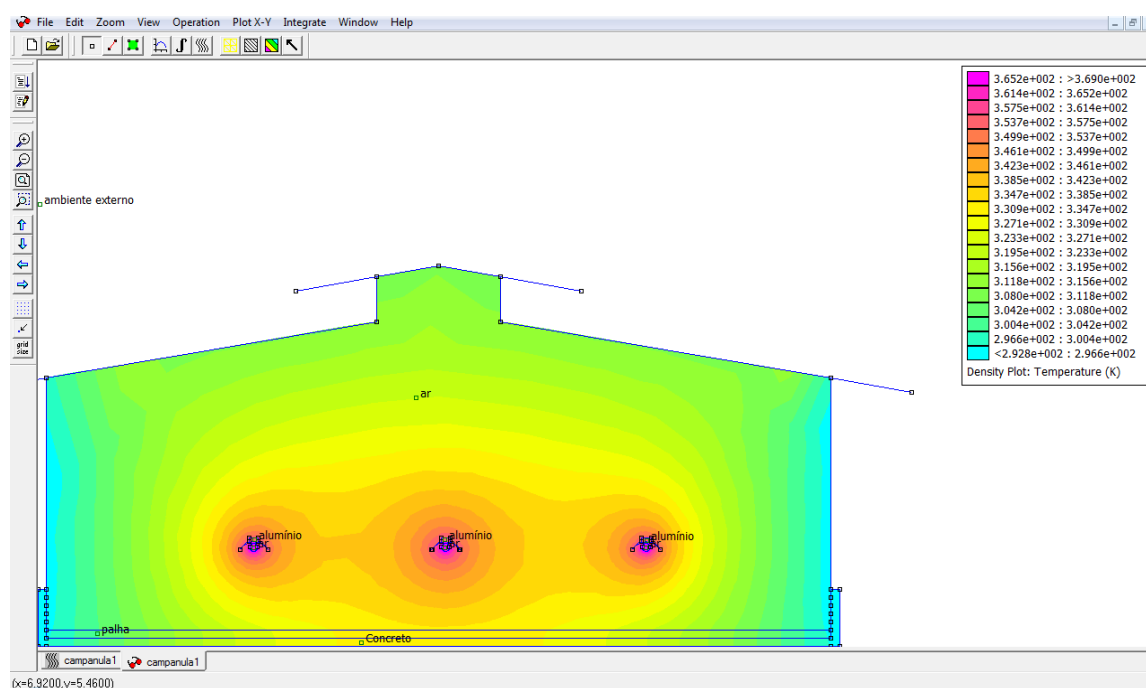


Figura 4.16 – Tela de solução do programa FEMM 4.2

Na solução do problema, o FEMM trabalha com a unidade de temperatura em Kelvin (K), de forma que nas figuras de simulação a solução está em K, porém nos gráficos de análise das respostas é feita a conversão e a unidade usada para a temperatura é em °C. Sendo a relação dada pela equação 4.61.

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (4.61)$$

4.3 – EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARCIAIS RELEVANTES

A solução dos problemas do fluxo de calor pelo FEMM é essencialmente de problemas de estado estacionário da condução do calor. Estes problemas são representados pelo gradiente da temperatura, G ; pela densidade do fluxo do calor, F ; e pela temperatura, T .

A densidade do fluxo do calor deve obedecer à lei do Gauss, que diz que o fluxo do calor fora de algum volume fechado é igual à geração do calor dentro do volume. Análogo ao problema eletrostático, esta lei é representada pela formula diferencial dada pela equação 4.62.

$$\nabla F = q \quad (4.62)$$

Onde:

- ∇ - gradiente;
- q - representa a geração do calor do volume;
- F - densidade do fluxo do calor.

O gradiente da temperatura e a densidade do fluxo do calor são relacionados também através do relacionamento construtivo, como na equação 4.63.

$$F = -k\nabla T = kG \quad (4.63)$$

Onde:

- k - condutividade térmica (W/m.K);
- G - gradiente de temperatura.

A condutividade térmica é frequentemente uma função fraca da temperatura. O FEMM permite a variação da condutividade como uma função arbitrária da temperatura. A temperatura é relacionada ao gradiente da temperatura, G , como na equação 4.64.

$$G = -\nabla T \quad (4.64)$$

Substituindo (4.63) na lei de Gauss e aplicando o relacionamento constitutivo tem-se a equação diferencial parcial, dada pela equação 4.65.

$$-\nabla(k\nabla T) = q \quad (4.65)$$

O FEMM resolve a Equação (4.65) para a temperatura T sobre um determinado domínio com fontes de calor e condições de contorno definidas.

4.4 - CONDIÇÕES DE CONTORNO

A distribuição da temperatura em um meio depende das condições físicas existentes nas fronteiras do meio, e se essas condições mudarem implica na dependência da solução em relação às condições existentes no sistema em um dado instante inicial.

Com relação às condições de contorno, são estas expressas de forma matemática e alguma discussão de condições de contorno é necessária de modo que o usuário defina um número adequado de condições de contorno para garantir uma solução original. As condições de contorno para o FEMM vêm em seis formas:

1 - A temperatura fixa ao longo do contorno é ajustada a um valor inicial.

2 - O fluxo do calor, f , através do contorno é dado. Esta condição de contorno pode ser representada matematicamente como:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + f = 0 \quad (4.66)$$

Onde

- n - representa o sentido da normal ao contorno;
- k - condutividade térmica (W/m.K);
- T - temperatura (K);
- f - fluxo do calor (W/m).

3 - A convecção ocorre se o limite for refrigerado por um fluxo fluido. Esta condição de contorno pode ser representada como:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \quad (4.67)$$

Onde

h - é o coeficiente de transferência calor (W/m.K).

4 - Na radiação o fluxo de calor é descrito na forma matemática como:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + \beta k_{sb}(T^4 - T_0^4) = 0 \quad (4.68)$$

Onde:

β - é a emissividade da superfície (um valor entre 0 e 1);

k_{sb} - é a constante de Stefan-Boltzmann (com valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

5 - As condições de contorno periódicas juntam dois contornos. Neste tipo de condição de contorno, os valores em pontos correspondentes dos dois limites são ajustados iguais a um outro.

6 - A condição de contorno antiperiódico juntam também dois contornos, entretanto, os valores de contorno são feitos para ser de valor igual, mas de sinais opostos.

Se nenhuma condição de contorno for definida explicitamente, cada contorno opta por uma condição isolada (isto é nenhum fluxo do calor através do contorno). Entretanto, uma condição de contorno deve ser definida em algum lugar (ou o potencial deve ser definido em um ponto de referência no domínio) de modo que o problema tenha uma solução original.

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 – INTRODUÇÃO

A coleta de dados e a simulação se deu para as duas primeiras semanas de vida das aves. Lembrando que para se manter a temperatura adequada para a primeira semana de vida do pintinho, essa deve se encontrar no intervalo entre 32 °C (302,15 K) e 35 °C (308,15 K) e para a segunda semana de vida do pintinho deve se encontrar no intervalo entre 29 °C (302,15 K) e 32 °C (305,15 K).

O programa FEMM traz em seus resultados a unidade de temperatura em Kelvin. Já os gráficos comparativos da temperatura em determinadas posições são plotados através do programa MATLAB, sendo efetuada a conversão de kelvin (K) para graus Celsius (°C).

A tese foi desenvolvido em duas propriedades avícolas de pesquisa e educação, ambas as propriedades localizadas na cidade de Uberlândia e equipadas com sistemas de aquecimento a gás (GLP).

Uma das propriedades é pertencente à Universidade Federal de Uberlândia e de nome Fazenda do Glória, que nesse trabalho é chamado de Galpão 1. A outra pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Triângulo Mineiro Campus Uberlândia (antiga Escola Agrotécnica Federal de Uberlândia) mais conhecida como Colégio Agrícola, que nesse trabalho é chamado de Galpão 2.

Esses galpões são de dimensões e forma de cria diferentes, no Galpão 1 são instaladas baias feitas de telas, onde são colocados os pintinhos, enquanto que no Galpão 2 ocorre a cria de forma que todos os pintinhos são colocados em um único espaço físico, com a diferença básica que nesse galpão há a presença de lanternim, e na Fazenda do Glória existe na altura de 2,66 m do piso um forro de lona plástica.

Os dados físicos dos galpões podem ser observados na Tabela 5.1.

O Galpão 1, representado pela Figura 5.1, onde a criação das aves é realizada em caráter experimental, visando pesquisa na área nutricional, de forma que são separadas em 80 baias de alojamento das aves, como observado na Figuras 5.2.

Tabela 5.1. Dados físicos dos galpões

	Fazenda do Glória (Galpão 1)	Escola Agrotécnica (Galpão 2)
Comprimento (m)	50,40	24,00
Largura (m)	10,20	9,60
Pé direito (m)	3,00	3,20
Mureta (m)	0,50	0,60
Uso do lanternim	Não	Sim
Uso do forro	Sim	Não



Figura 5.1 - Vista lateral do galpão 1 de criação de aves (Fazenda do Glória)

Nesse galpão faz-se uso do forro de lona plástica para diminuir o volume de ar a ser aquecido e evitar que o ar quente seja liberado para a parte externa do galpão, visando assim diminuir a troca de calor com o meio ambiente.

O Galpão 2, Figura 5.3, está localizada no município de Uberlândia, região do Triângulo Mineiro, distante 25 km do centro da cidade e próxima aos distritos de Martinésia e Cruzeiro dos Peixotos (Figura 5.4). O acesso à escola se dá pelas Rodovias Municipais Neusa Resende e Joaquim Ferreira, pavimentadas. A sede da Escola se encontra nas coordenadas geográficas 18°, 46" 12' de latitude sul e 48° 17" 17' de longitude oeste.



Figura 5.2 –Vista das baias de alojamento das aves



Figura 5.3 – Vista lateral do galpão de criação de aves (TFTM)

O setor de frangos de corte possui três galpões; um com capacidade para 3000 aves e dois com capacidade para 2500. A produção é em caráter educativo – disciplinas de avicultura; cuja produção é destinada ao consumo interno e ao mercado consumidor. Para os lotes acompanhados foram colocadas um total de 2.000 aves por lote.

Os pintos foram acomodados em um espaço inicial de 15% do galpão e cercado com pequenos semicírculos, como observado na Figura 5.5. Esses semicírculos assim como os tradicionais círculos de proteção são usados como medida de segurança, de forma que os pintinhos não se aglomerem em um canto, pois a aglomeração pode provocar a morte por pisoteamento e sufocamento, além de facilitar o manejo e evitar correntes de ar diretas nas aves.

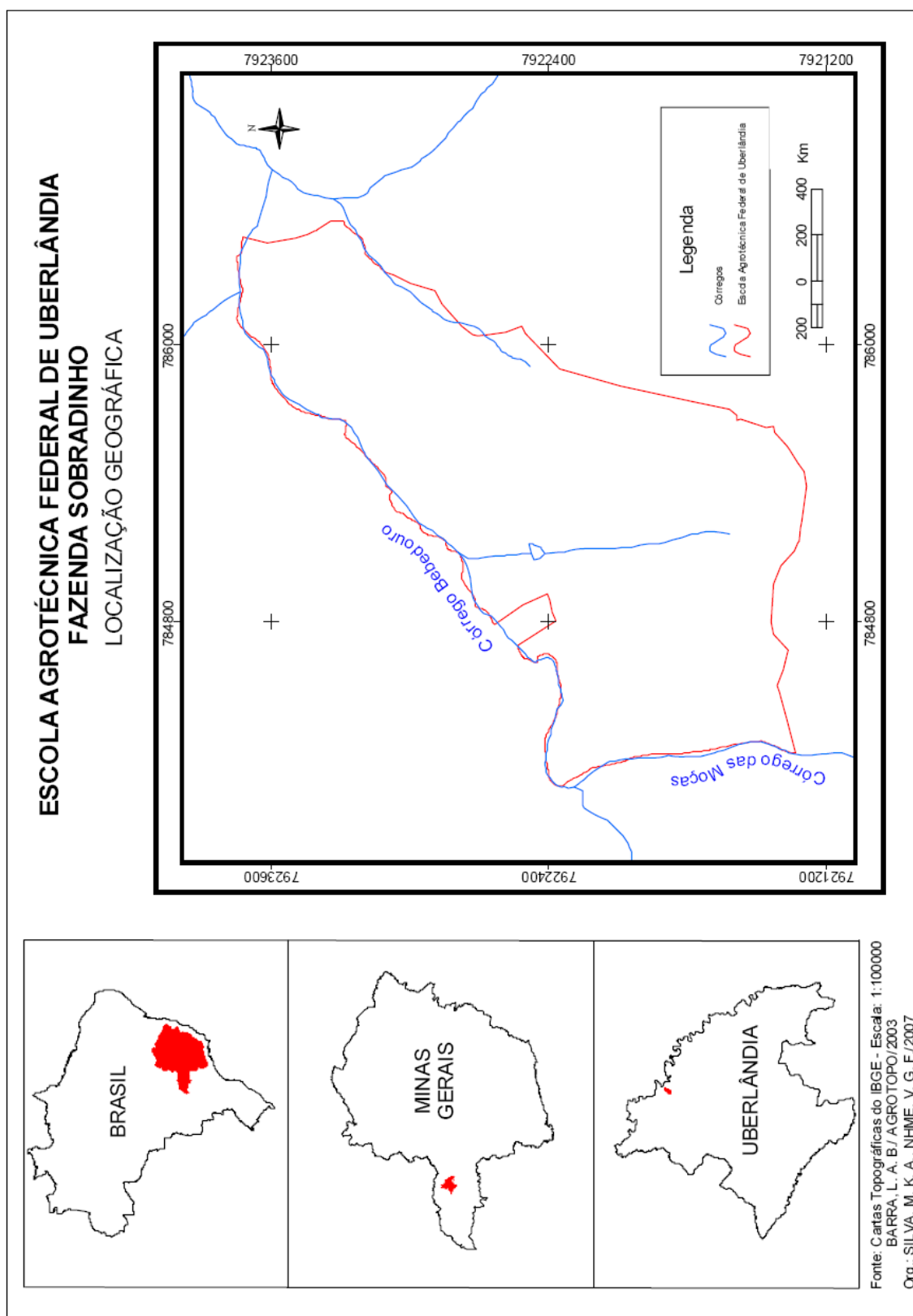


Figura 5.4- Mapa de Localização do Instituto Federal do Triângulo Mineiro - Campus Uberlândia

A cada semana, à medida que as aves foram crescendo foi necessário o aumento da área de cria, de forma que se dobra o espaço físico a cada semana isso se deu até que todo o espaço do galpão fosse ocupado. Para a primeira semana foi cercado no comprimento de 3,6m do galpão e para a segunda semana ocupando 7,2m.



Figura 5.5 - Vista interior do galpão da avicultura com os círculos de contenção de aves

5.2 - FONTES DE AQUECIMENTO

Foi realizada uma análise do comportamento da temperatura de aquecimento artificial dentro de galpões de criação de frango de corte. Foram utilizados os seguintes métodos de aquecimento:

- Campânulas a gás: onde o aquecimento dos frangos é realizado com fluxo de calor descendente, da fonte de calor para as aves;
- Aquecimento de piso, por meio do uso de tubos de água quente, que podem ser enterrados no solo / piso para novos galpões ou ser instalados abaixo da cama no caso de galpões já existentes.

O uso do sistema de aquecimento de piso em galpões avícolas, Figura 5.6, que consiste em usar painel (aquecedores solares) para aquecer a água e armazená-la em um boiler (reservatório de água quente). A água quente circula pela serpentina, a qual pode estar localizada embutida no piso, o que seria ideal para novos galpões e para os já

existentes esta deve estar localizada por sobre o piso, abaixo da cama, formando um sistema de aquecimento de baixo para cima.

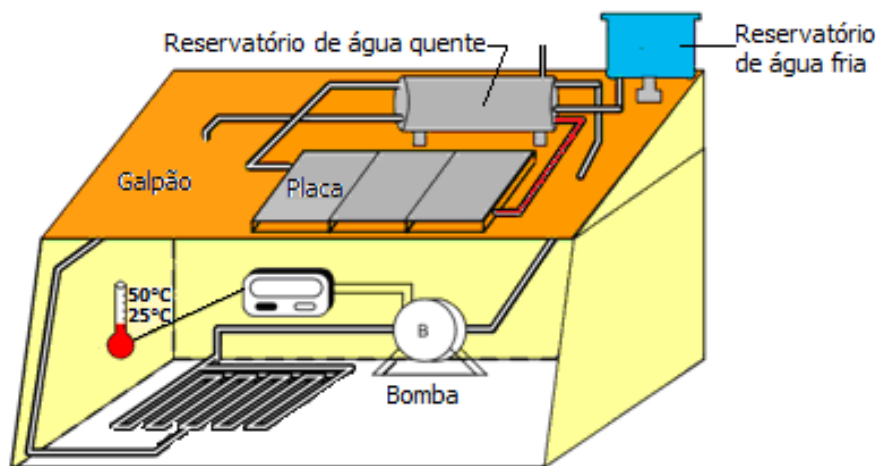


Figura 5.6 – Sugestão de instalação do sistema de aquecimento pelo piso

A idéia principal desta tese é fazer o uso desse tipo de aquecimento dentro dos galpões avícolas. Para isso foi analisado o aquecimento com água quente passando por uma tubulação em forma de serpentina como mostrado na Figura 5.7. Essa serpentina pode ser de material de cobre ou de polietileno reticulado (PEX), cujo diâmetro mais adequado também foi analisado, assim como o espaçamento entre as tubulações.

O polietileno reticulado (PEX) tem se afirmado como o material mais durável para os tubos instalados no contrapiso, por onde a água quente circula. Além do PEX outro material que pode ser utilizado é o cobre.

Este sistema irradiante inclui dois trocadores de calor: entre a fonte de calor e a água, cuja água fica armazenada e entre a água e o ambiente. Parâmetros e projeto importantes são o diâmetro dos tubos, o distanciamento entre esses tubos e a distribuição da tubulação no piso (OLESEN, 2002).

A água quente que circula pela serpentina é proveniente de energia solar, o que consiste em usar aquecedores solares para aquecer a água e armazená-la em um boiler (reservatório de água quente), a qual será usada passando por um sistema de serpentinas, como sugerido na Figura 5.6.

A serpentina deve ser disposta de forma que a água quente vinda do reservatório térmico circule das laterais para o centro da mesma, de onde a água retorna para o reservatório, Figura 5.7.

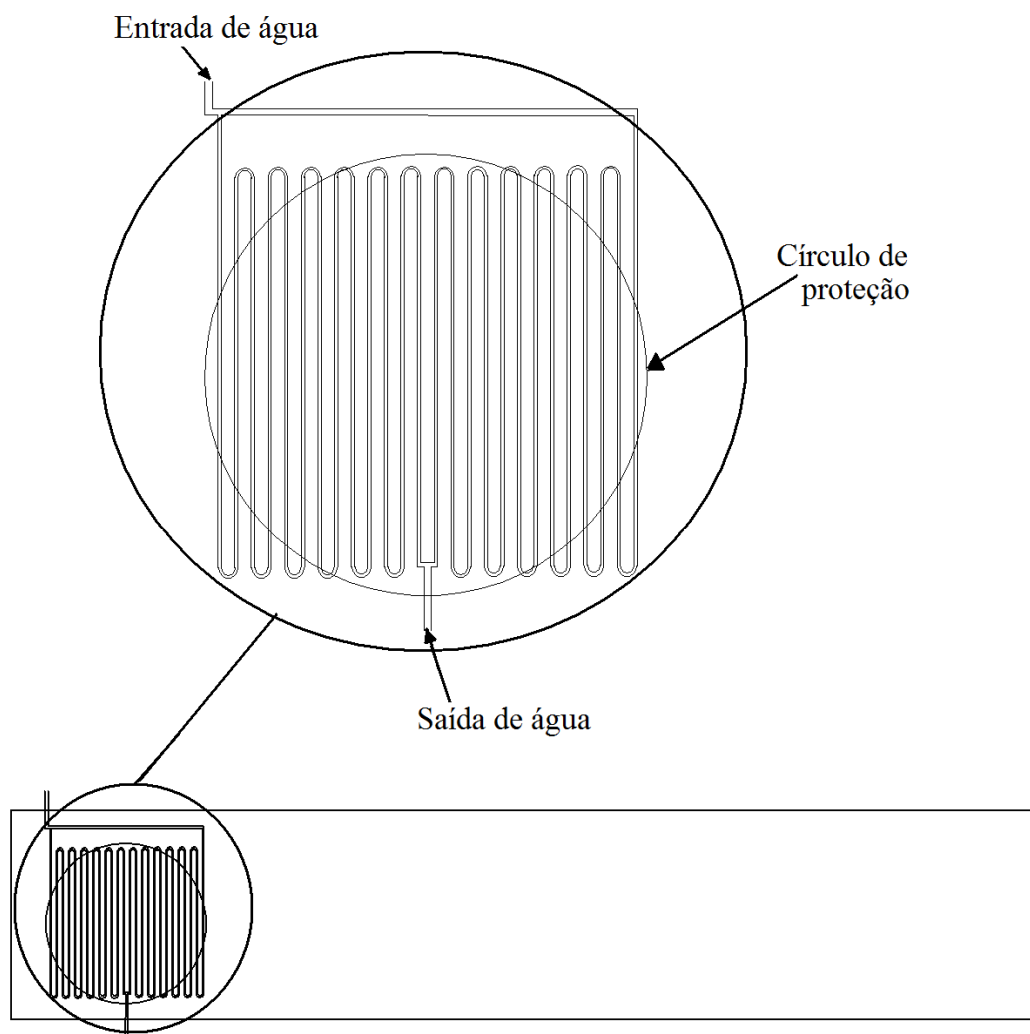


Figura 5.7 – Disposição da serpentina no galpão - vista superior

O galpão possui como piso uma camada de 0,1m de concreto e acima do concreto é colocada a cama de acomodação da ave, é nesse espaço em cima do concreto que é disposta a serpentina, como na Figura 5.8, de forma que esta fica recoberta pela cama.

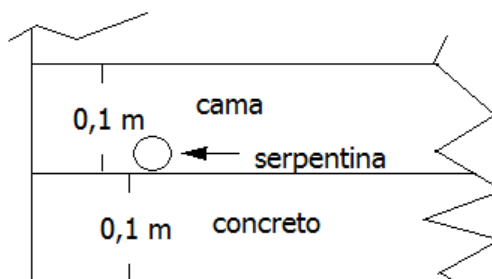


Figura 5.8 – Disposição da serpentina no galpão

A coleta de dados se baseia na verificação do valor da temperatura em vários pontos do galpão e em vários horários do dia. Esses valores são usados no programa FEMM em duas situações específicas, uma considerando a situação local, ou seja, com uso de campânulas a gás (GLP) e outro considerando o tipo de aquecimento proposto, que é o aquecimento pelo piso água quente circulando em serpentinas.

As medições de temperatura foram realizadas com termômetro óptico da marca Minipa, modelo MT 350, foram realizadas medições de temperatura nas campânulas, no ambiente interno, na mureta, no piso, na cama, no teto e no lanternim; na parte externa a temperatura foi medida na calçada, na lona na mureta e no telhado. O intervalo de medição foi de uma hora.

5.3 - SIMULAÇÃO

A análise do comportamento da temperatura dentro dos galpões avícolas foi realizada no software de domínio público FEMM 4.2 (Steady-State Finite Element Heat Conduction Solver), o qual faz análise de elementos finitos. O programa FEMM resolve problemas em domínios plano e assimétricos bidimensionais.

Alguns dados necessitam ser fornecidos ao programa para que se possa fazer a simulação no FEMM 4.2 tais como o desenho do galpão com suas reais dimensões; os coeficientes térmicos dos materiais utilizados na confecção do galpão, sendo alguns já cadastrados no programa e outros foram inseridos como pode ser observado na Tabela 5.2; a temperatura ambiente externa e a temperatura da campânula.

Para os dois Galpões analisados foram feitas simulações considerando dois tipos de aquecimento, usando campânula a gás (GLP) e com uso da serpentina, tendo como fonte energética a energia solar. Na Tabela 5.2 estão descritos valores do coeficiente térmico de alguns materiais, os quais foram usados nas simulações.

A “escolha” das dimensões da serpentina: diâmetro e espaçamento se deram simulando para uma temperatura ambiente e da água de 19 e 50°C, respectivamente, e constam no Anexo A.

A verificação do valor ideal para a temperatura da água se deu simulando algumas situações, considerando o valor da temperatura ambiente e vários valores para a água, como por exemplo, na simulação onde foi considerado 22°C para a temperatura ambiente e água a 22, 38, 46 e 53°C. Vide anexo A.

Tabela 5.2 - Valores de coeficiente de Condutividade térmica (k) para diferentes materiais

Material	k (W/m.K)
Alumínio	236
Alumínio 2024 T6	171
Ar	0,0181
Zinco	122
Cobre	401
Papelão	0,094
Concreto	1,00
Parede de tijolo	0,700
Água	0,564
Palha	0,120
Lã de vidro	0,045
Poliestireno expandido (isopor)	0,023
Espuma de poliuretana	0,023
Telha de barro	0,700
Cortiça granulada	0,040
Madeira	0,140
Pex (Polietileno Reticulado)	0,35

Fonte: Kreith & Kreider, 1978; Rivero, 1986; Baeta & Souza, 1997; Lamberts et al, (1997)

54 - ANÁLISE ECONÔMICA

Outro aspecto abordado nessa tese é a verificação da quantidade de energia que o GLP forneceu para que ocorresse o aquecimento durante as primeiras semanas de vida da ave. Para essa análise estão sendo usados os dados coletados referente aos lotes.

Mediante a necessidade do cálculo da quantidade de energia que se gasta para aquecer o galpão, parte-se do princípio de que 1 kcal é a energia necessária para elevar 1 kg de água, de 14,5°C para 15,5°C, ou seja, para aumentar em 1°C a temperatura da água.

Lembrando que Watt (W) - Unidade de potência - O watt é a potência de um sistema energético no qual é transferida uniformemente uma energia de 1 joule durante

1 segundo, ou seja, $1 \text{ W} = 1 \text{ Js}^{-1}$ e o Watt-hora - (Wh) - energia transferida uniformemente durante uma hora. $1 \text{ Wh} = 1 \times 3600 \text{ s} \times \text{J s}^{-1} = 3600 \times (0,239 \text{ cal}) = 860 \text{ cal}$. Assim, no conceito teórico $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$.

Para o cálculo da demanda térmica em watts faz-se uso da Equação 5.1

$$P = \frac{mc(T_2 - T_1)}{860h} \quad [\text{kW}] \quad (5.1)$$

onde:

P = Potência (kW)

m = massa da substância a ser aquecida (kg)

c = calor específico da substância ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

T₁ = temperatura inicial ($^\circ\text{C}$)

T₂ = temperatura final ($^\circ\text{C}$)

h = tempo desejado para aquecimento em horas (h)

860 = constante

Cálculo da quantidade de calor necessária em determinado aquecimento é dado por:

$$Q = mc(T_2 - T_1) \quad (5.2)$$

onde:

Q = quantidade de calor (kcal);

m = massa da substância a ser aquecida (kg);

c = calor específico da substância ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

T₁ = temperatura inicial ($^\circ\text{C}$);

T₂ = temperatura final ($^\circ\text{C}$).

Para o caso do galpão avícola em que se é necessário o aquecimento de um determinado volume de ar para manter a temperatura adequada para a ave, faz-se uso da equação 5.2.

Como o volume é 1 dividido pela massa específica, e essa massa específica do ar vale $m = 1,293V_{ol}$ e o calor específico $c = 0,2412$ tem-se:

$$Q = mc(T_2 - T_1) = 1,293V_{ol} 0,2412(T_2 - T_1) = 0,3119V_{ol}(T_2 - T_1) \quad [\text{kcal}] \quad (5.3)$$

Dessa forma para calcular a potência necessária para aquecer um determinado volume de ar em um tempo desejado de aquecimento de 1 hora.

$$P = \frac{mc(T_2 - T_1)}{860h} = \frac{1,293V_{ol}0,2412(T_2 - T_1)}{860*1} = \frac{0,3119V_{ol}(T_2 - T_1)}{860} \text{ [kW]} \quad (5.4)$$

Para análise de retorno de investimento foi utilizado os valores de implantação de cada sistema, orçamento no Anexo B, sendo considerado o custo de oportunidade, ou valor temporal, tendo como base a Caderneta de Poupança com média anual de 6% para o ano de 2010.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA COM O USO DO FEMM

6.1 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ELEMENTOS FINITOS DOS GALPÕES AVÍCOLAS (VISTA LATERAL)

6.1.1 – FAZENDA DO GLÓRIA

Para a verificação do valor adequado da temperatura da água que circula na serpentina foi obtido valores na altura da cama próximos de 22, 27, 34 e 42°C. Pelo gráfico de simulação para obter a temperatura adequada da água capaz de fornecer conforto térmico para a primeira semana de vida da ave, Figura 6.1, é de 46°C.

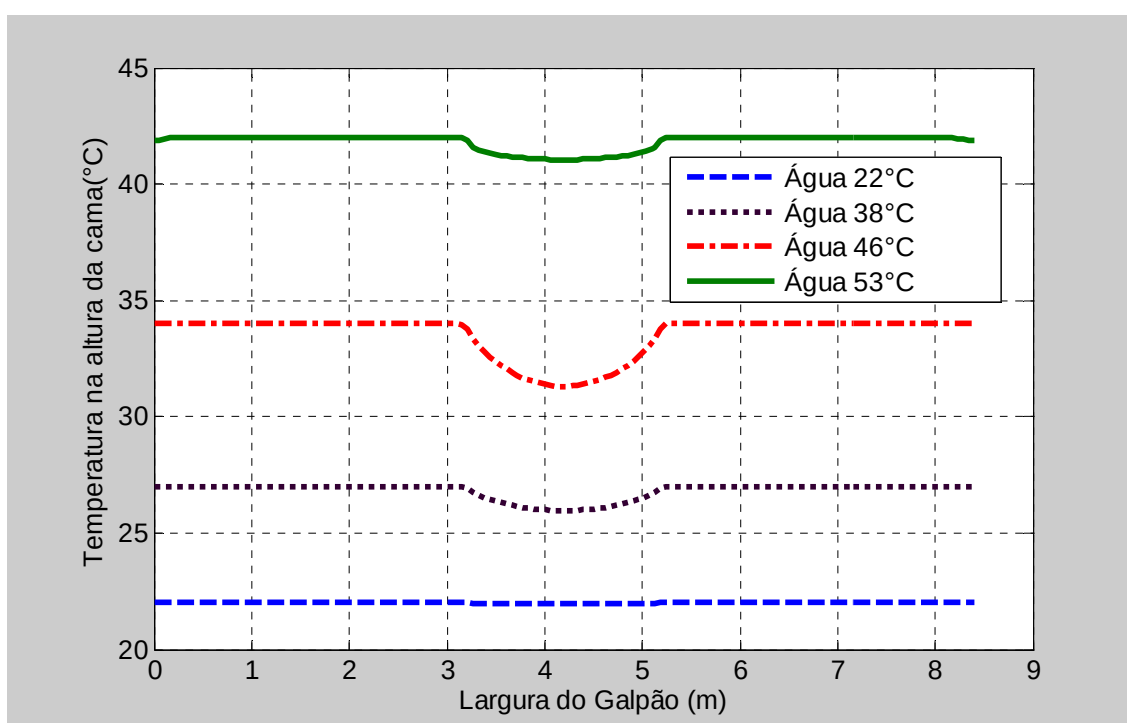


Figura 6.1 – Perfil da temperatura na altura da cama para várias temperaturas da água considerando a temperatura ambiente de 22°C

No caso da Fazenda do Glória foi feita a análise do comportamento da temperatura para o dia 21 de janeiro de 2008, sendo medida a temperatura às 08 h e a temperatura externa ao galpão (ambiente) de 22°C e as campânulas com 93 e 94°C, da esquerda para a direita.

A Figura 6.2 representa o resultado da simulação do comportamento da temperatura em corte transversal da largura do galpão da Fazenda do Glória dia 21/01/08 às 08 h. A Figura 6.3 representa o perfil da temperatura dentro do Galpão 1 com uso de aquecedor por campânula em alturas específicas: no piso, na cama, na mureta e na baia. Onde pode ser observado o valor da temperatura em cada ponto ao longo da largura do galpão com o uso de aquecedores tipo campânula.

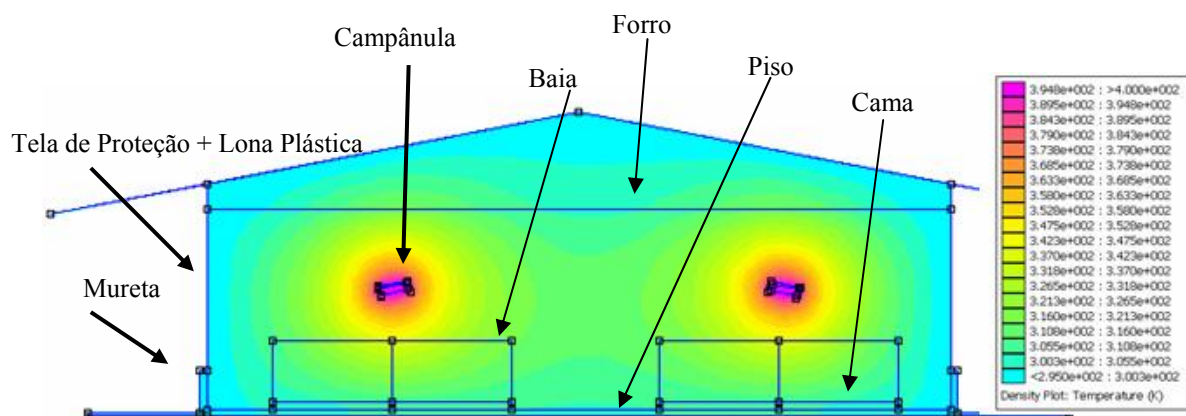


Figura 6.2 – Comportamento da temperatura no Galpão 1 utilizando dados medidos no dia 21/01/08 às 08:00 h, corte transversal

A Figura 6.4 representa os valores da temperatura em alturas específicas: na altura do chão ou piso, da cama, da mureta e do forro para o dia 21/01/2008 às 10 h e cuja temperatura ambiente marcava 24°C e as campânulas com 93 e 94°C, da esquerda para a direita. Observa-se que na altura da mureta a temperatura é maior, pois está mais próxima da campânula e na altura do forro a temperatura também é maior que da cama, pois o ar quente é mais leve e sobe.

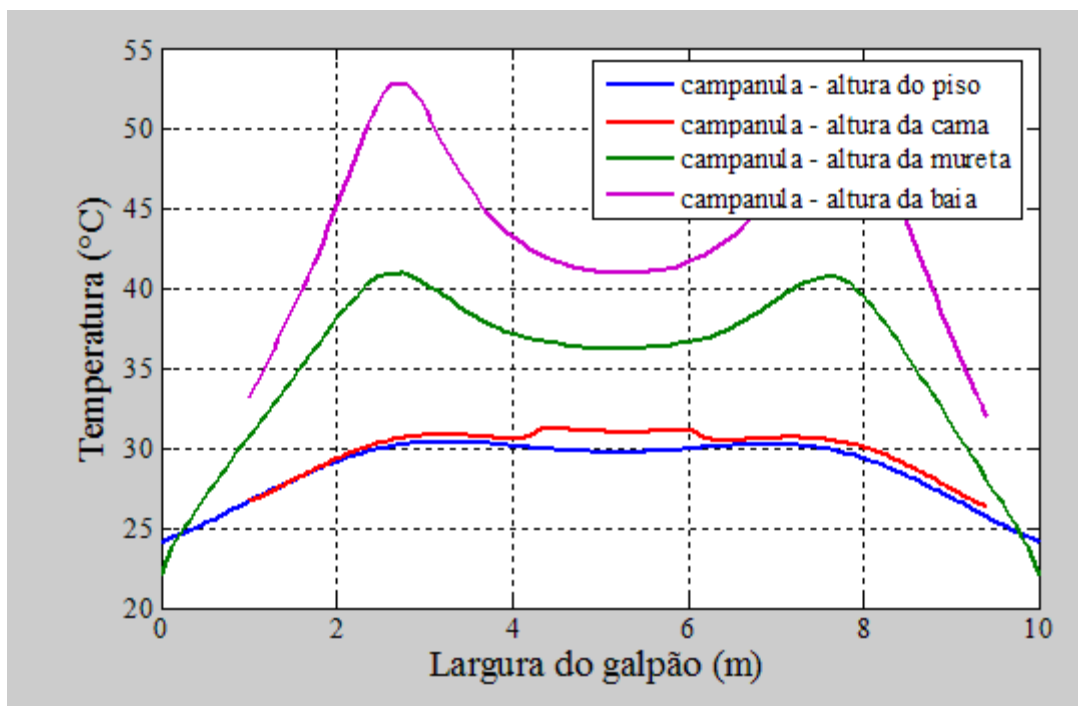


Figura 6.3 – Perfil da temperatura dentro do galpão com aquecimento por campânula em posições específicas, piso, cama, mureta, e baía. No dia 21/01/2008 às 08 h.

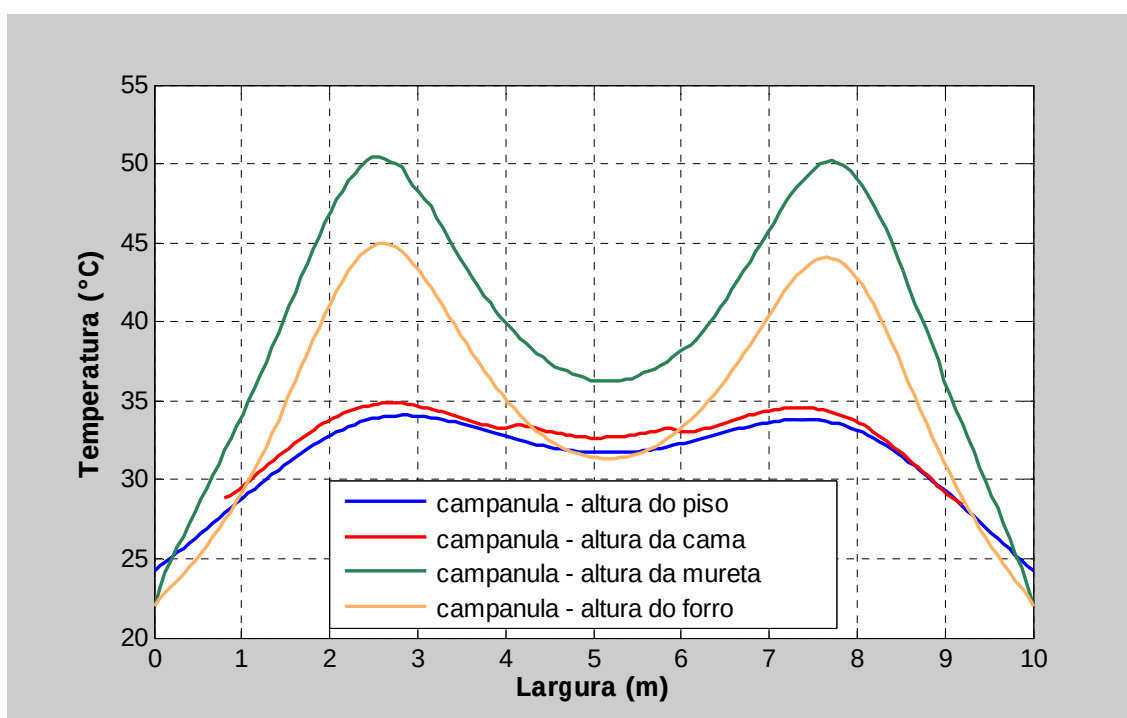


Figura 6.4 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso do aquecimento por campânula em posições específicas, piso, cama, mureta, e forro. No dia 21/01/2008 às 10 h.

A Figura 6.5 representa a simulação do comportamento da temperatura em corte transversal da largura do galpão da Fazenda do Glória fazendo uso de aquecimento tipo serpentina considerando os dados coletados no dia 21/01/08 às 08 h, com temperatura ambiente externa de 22°C e a temperatura da água de 46°C.

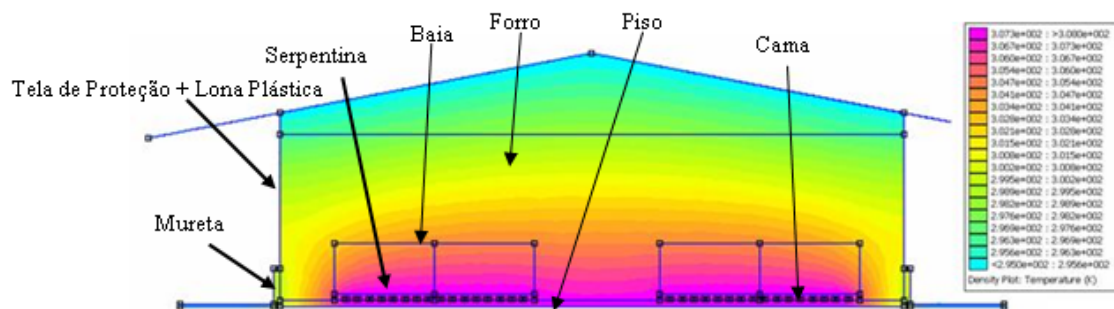


Figura 6.5 – Comportamento da temperatura no galpão da Fazenda do Glória, considerando aquecimento por serpentina e os dados do dia 21/01/08 às 08 h.

Considerando o aquecimento proposto, pelo piso, observa-se pela Figura 6.6 que em uma mesma direção ocorre pouca variação do valor da temperatura, uma vez que a serpentina está distribuída de forma uniforme. É possível verificar também que como a fonte de calor está mais próxima da cama, esta tem uma temperatura maior que a da mureta por exemplo.

Para a Fazenda do Glória foi simulado como seria o comportamento da temperatura se caso não tivesse o forro dentro do galpão. Considerando aquecimento por campânulas e os dados do dia 21/01/08 às 08 h.

Fazendo uma análise na altura do forro percebe-se que quando se utiliza a lona plástica (forro), Figura 6.7, há uma maior concentração de calor em relação a não utilização da lona, Figura 6.8, isso acontece porque o forro diminui a troca de calor para a parte superior do galpão, de forma que se obtém uma maior concentração de calor, pois sem o forro a essa altura a temperatura é de aproximadamente 36°C e com forro 42°C, podendo ser observado na Figura 6.9.

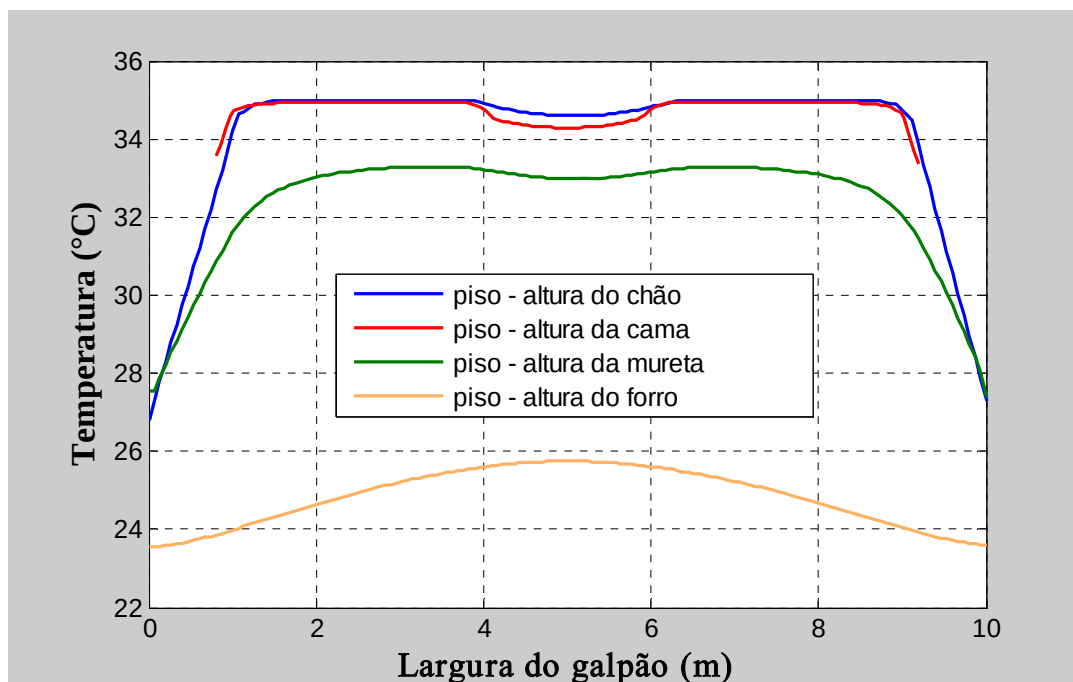


Figura 6.6 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso do aquecimento por serpentina e os dados coletados dia 21/01/08 às 08 h

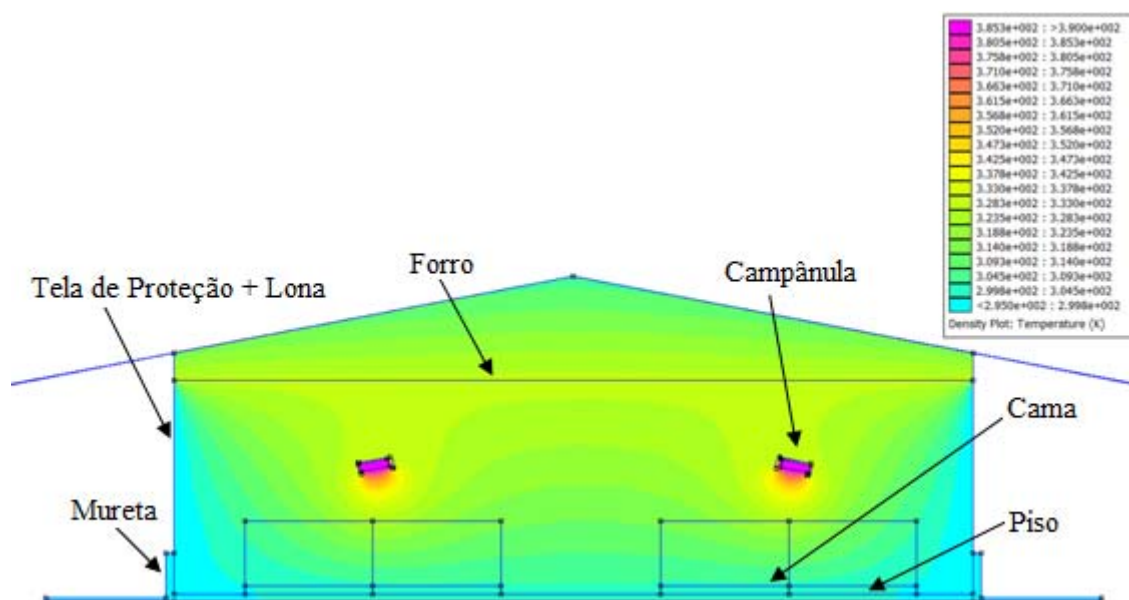


Figura 6.7 - Comportamento da temperatura com o forro – Aquecimento com Campânulas

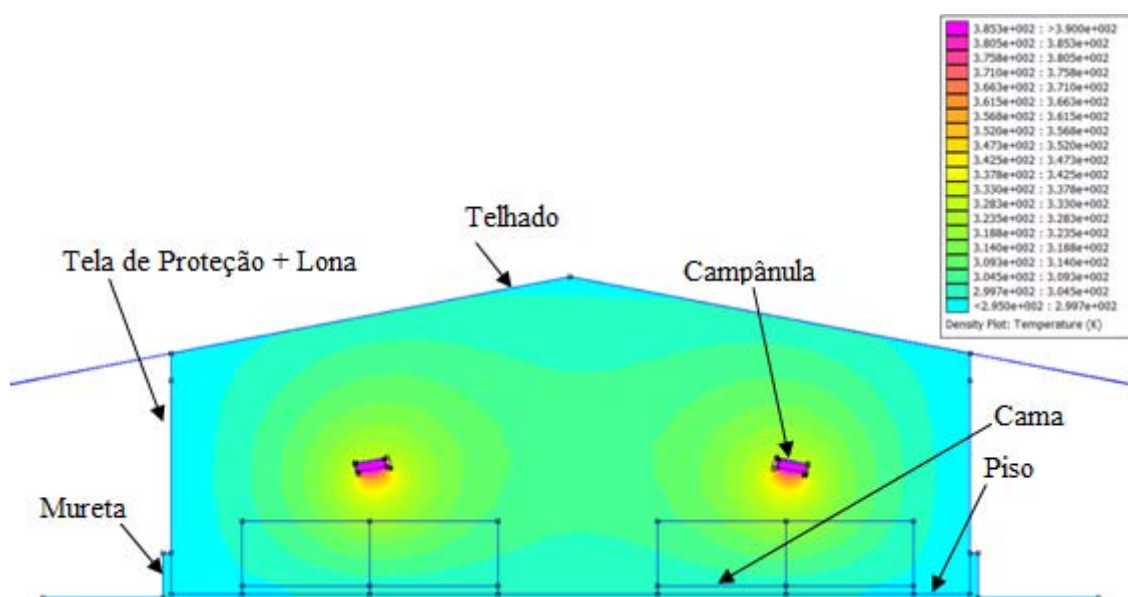


Figura 6.8 - Comportamento da temperatura sem o forro – Aquecimento com Campânulas

A Figura 6.10 representa o perfil da temperatura dentro do galpão comparando aquecimento por campânula e pelo piso, onde pode ser observado que na altura do forro a temperatura é maior com uso da campânula do que com uso de serpentinas, isso porque o forro está mais próximo da fonte de calor e o ar quente tende a subir. O aquecimento pelo piso permitiu a obtenção de temperatura mais alta na cama, quando comparado com o aquecimento por campânula. Essa temperatura permaneceu mais constante ao longo da largura do galpão com valor aproximado de 35°C, recomendada para a primeira semana de vida das aves.

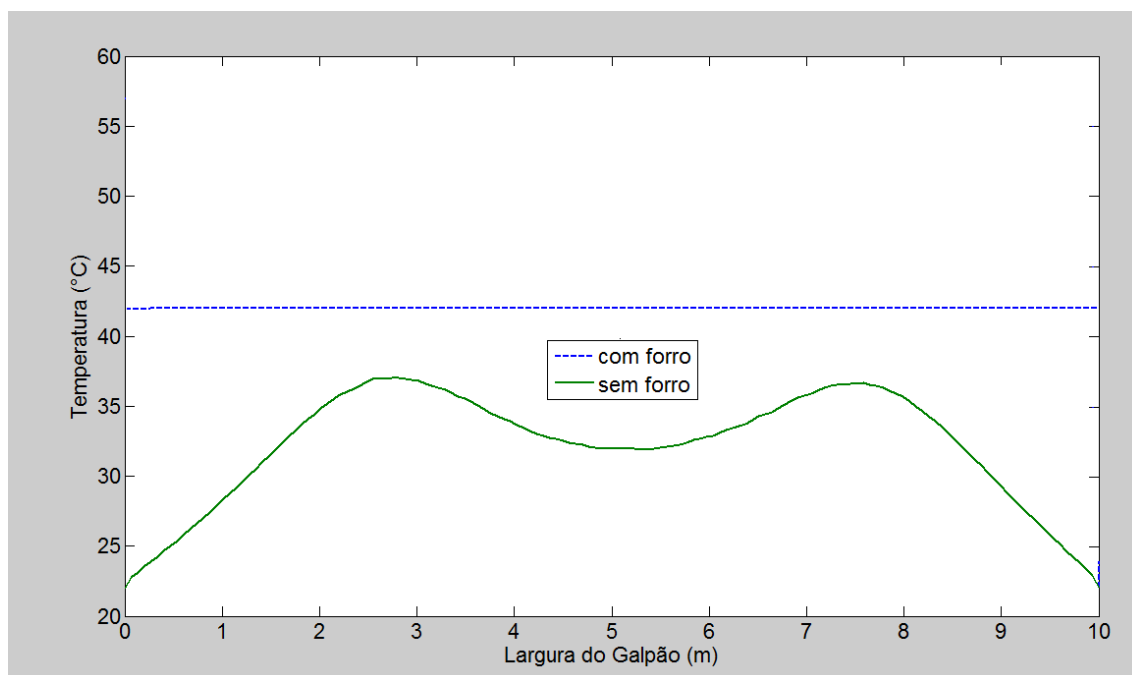


Figura 6.9 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso do aquecimento por campânulas, com e sem uso do forro, e os dados coletados dia 21/01/08 às 07 h e 30 min

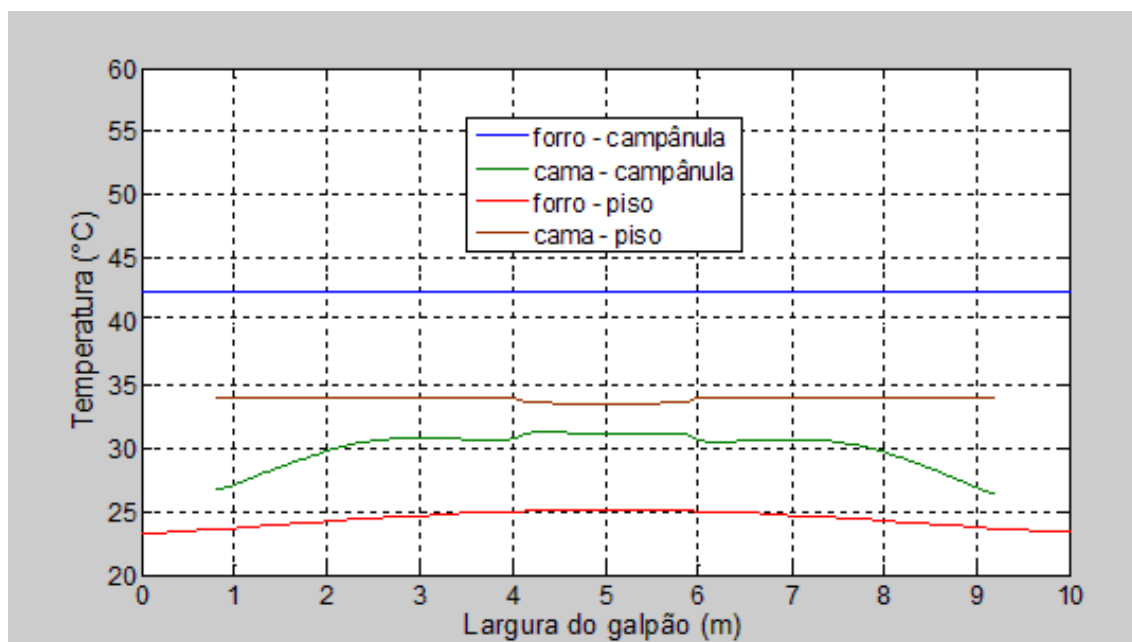
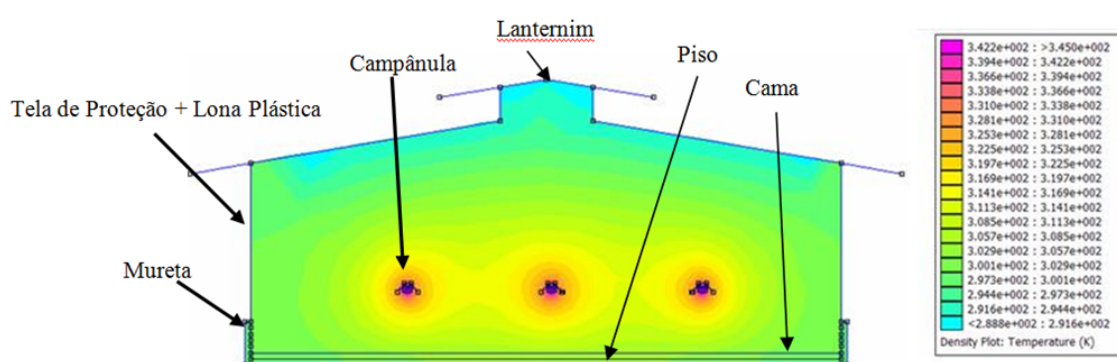


Figura 6.10 – Perfil da temperatura na altura do forro e da cama dentro do galpão, comparando aquecimento por campânula e pelo piso

6.1.2 – PERFIL DA TEMPERATURA NO GALPÃO 2

A Figura 6.11 representa o resultado da simulação do comportamento da temperatura em corte transversal (largura) do galpão do Colégio Agrícola no dia 20 de outubro de 2007, pertencente ao Lote 1, sendo a mesma medida às 07 h e 30 min. A temperatura externa ao galpão (ambiente) era de 19 °C e a temperatura na altura da base da campânula no valor de 101, 108 e 102 °C para as campânulas, referidas da esquerda para a direita.



A Figura 6.12 representa a temperatura em alturas específicas: na altura da cama, a 0,1m da cama, 0,2 m da cama e na altura da mureta, onde pode ser observado que para um mesmo alinhamento, como por exemplo, na altura da cama existe uma variação no valor da temperatura, sendo que à medida que se aproxima da fonte de calor essa variação se torna maior, destacando que existe um raio de ação para a campânula.

Pode-se observar que nas proximidades da campânula, que é a fonte de calor, a temperatura é maior e a distribuição desse calor não é de forma muito homogênea, de forma a criar um “campo de atuação” para cada campânula. Segundo ABREU (2000), a temperatura ideal deve ser contínua em 35°C para a primeira semana de vida da ave. A temperatura externa ao galpão também influencia na temperatura das extremidades do galpão.

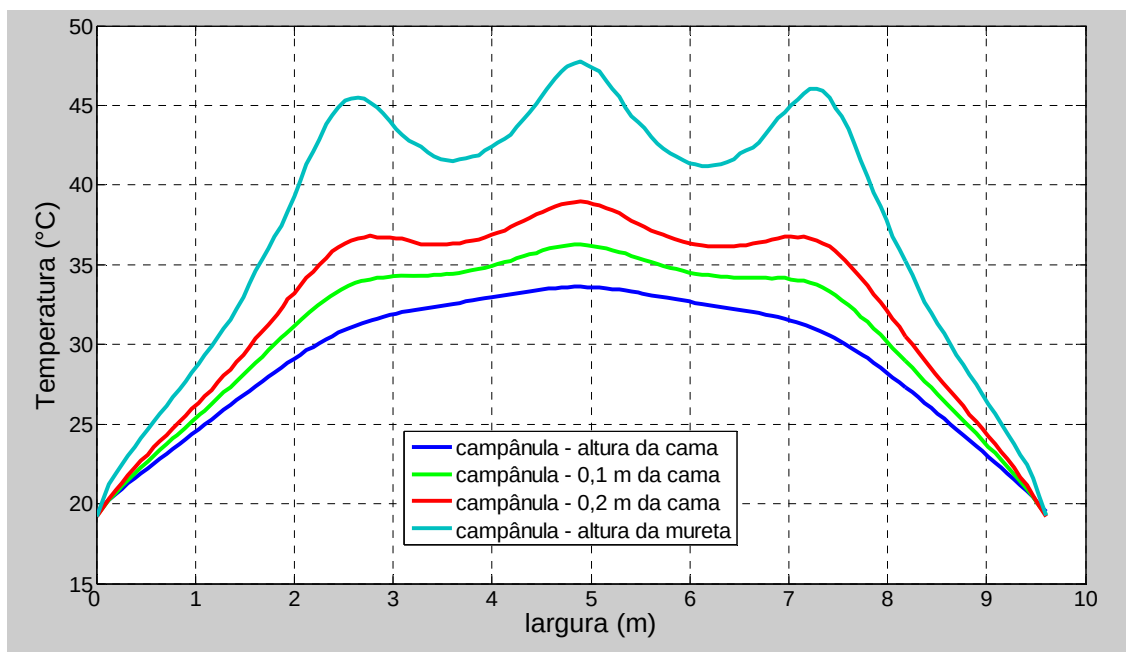


Figura 6.12 - Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor por campânula, valor medido, dia 20 de outubro de 2007 as 7 h e 30 min

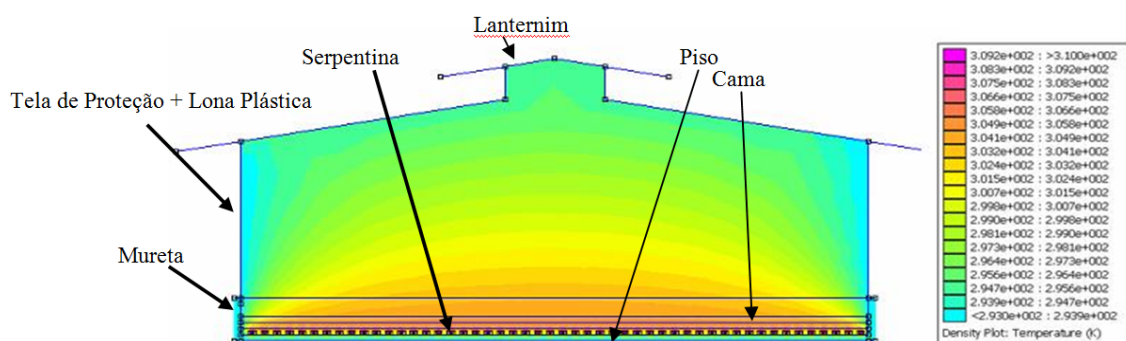


Figura 6.13 – Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 20 de outubro de 2007 as 07 h e 30 min

Observa-se através da Figura 6.13 que nas proximidades da serpentina, que é a fonte de calor, a temperatura é maior e a distribuição desse calor é de forma bem homogênea, a temperatura externa ao galpão tem menos influência na temperatura das extremidades do galpão comparado com o uso de campânulas.

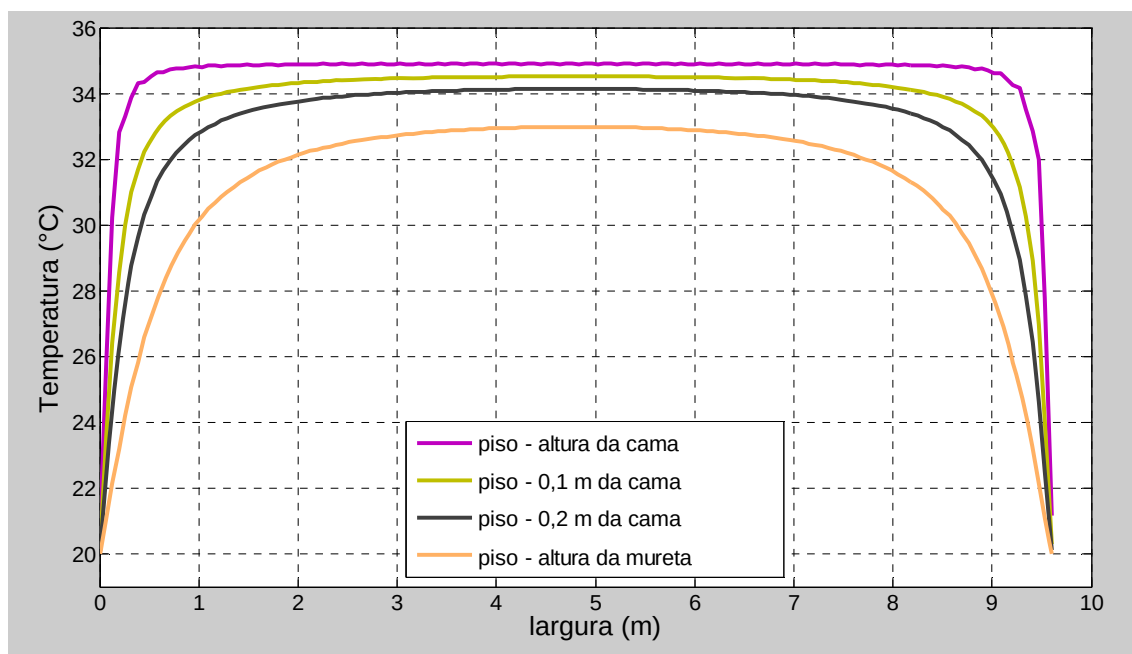


Figura 6.14 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor pelo piso, valor simulado, dia 20 de outubro de 2007 às 07 h e 30 min

A Figura 6.14 representa o perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecimento pelo piso, em alturas específicas: na altura da cama, a 0,1m da cama, 0,2 m da cama e na altura da mureta. Sendo a temperatura ambiente de 19°C e da água de 46°C no dia 20 de outubro de 2007 às 07 h e 30 min.

A Figura 6.15 representa o valor da temperatura em posições específicas: na altura da cama, a 0,1m da cama, 0,2m da cama e na altura da mureta. Onde pode ser observado que para um mesmo alinhamento praticamente não se observa variação do valor da temperatura.

A Figura 6.16 representa o resultado da simulação do comportamento da temperatura em corte transversal (largura) do galpão do Colégio Agrícola no dia 20 de outubro de 2007, sendo medida a temperatura às 11 h e 30 min e a temperatura externa ao galpão (ambiente) de 28 °C e a temperatura na altura da base da campânula no valor de 48, 51 e 45 °C para as campânulas da esquerda para a direita. A temperatura da água que circula pela serpentina foi de 38°C.

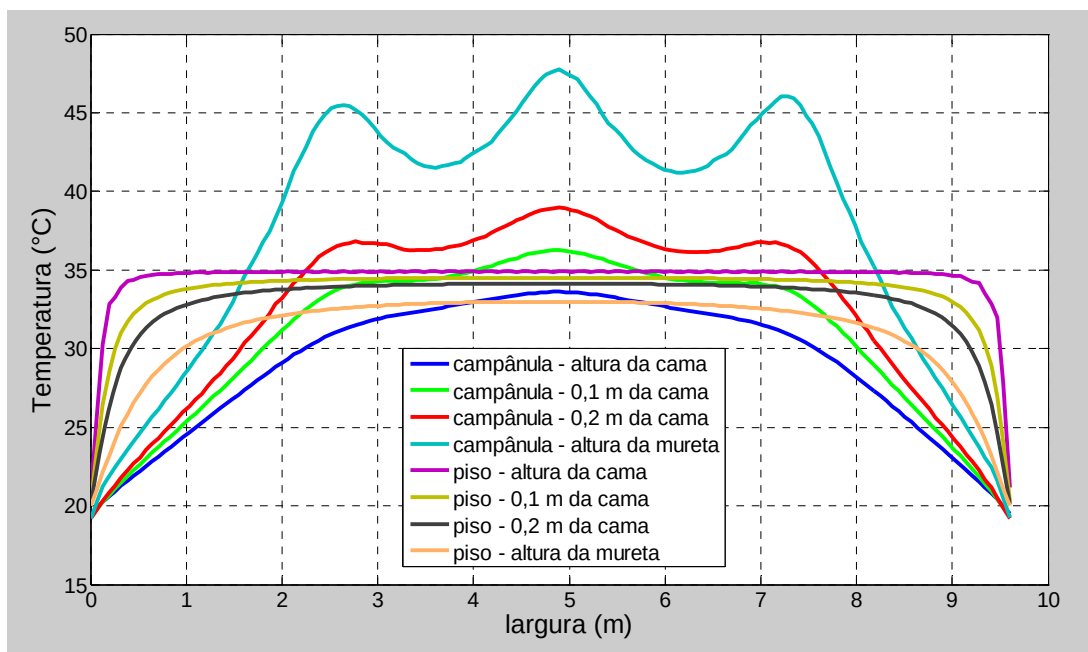


Figura 6.15 – Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min

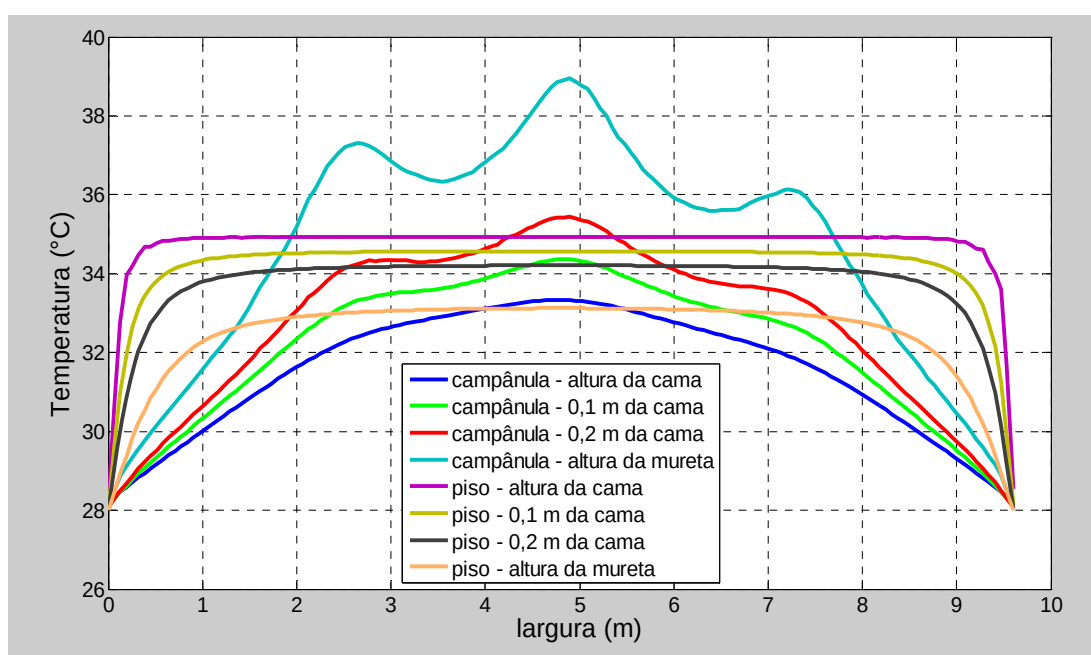


Figura 6.16 – Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 11 h e 30 min

A Figura 6.17 representa o resultado da simulação do comportamento da temperatura em corte transversal (largura) do galpão do Colégio Agrícola no dia 12 de

julho de 2008, pertencente ao Lote 3, sendo medida a temperatura às 08 h e a temperatura externa ao galpão (ambiente) de 16 °C e a temperatura na altura da base da campânula no valor de 108, 106 e 106 °C para as campânulas da esquerda para a direita. A temperatura da água foi de 48°C.

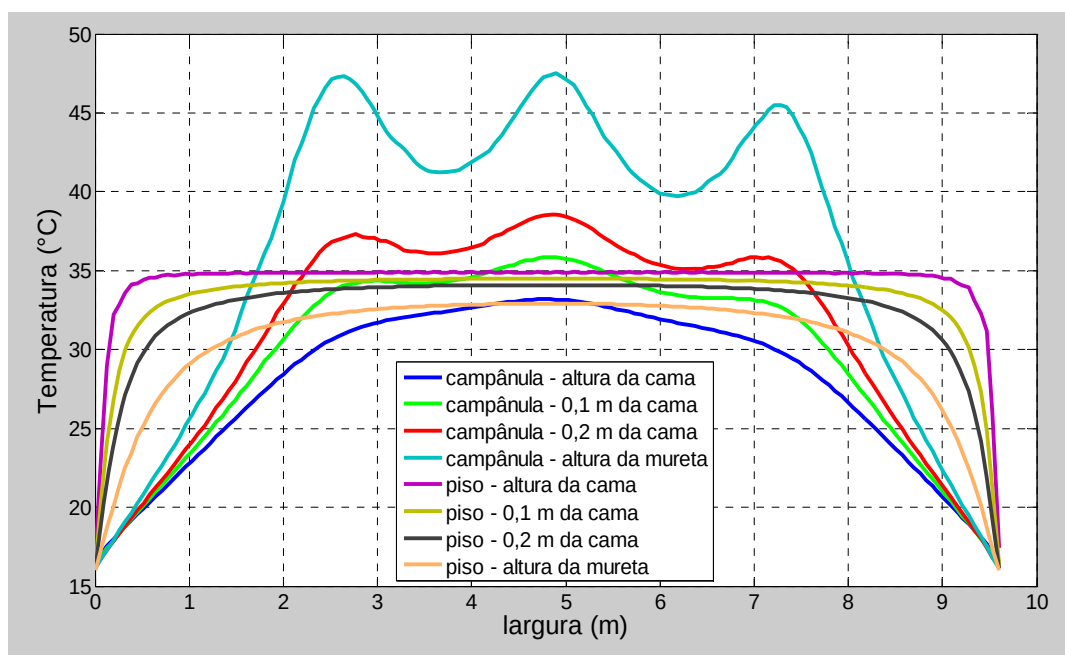


Figura 6.17 – Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 às 8 h

Ainda para o Lote 3 em 12 de julho de 2008 às 11:00, a temperatura externa ao galpão (ambiente) é de 22 °C e a temperatura na altura da base da campânula no valor de 78, 79 e 74°C para as campânulas da esquerda para a direita, Figura 6.18. A temperatura da água foi de 40°C.

Como exemplo, na altura de 0,1 m acima da cama existe uma maior homogeneidade da distribuição do calor, isso acontece porque a fonte de calor não é concentrada como na campânula e sim é distribuída de forma o mais homogêneo possível dentro da área a ser aquecida, essa distribuição auxilia para que a temperatura externa ao galpão não tenha tanta influência nas extremidades do galpão.

Segundo BUSO (2005) o uso de aquecimento radiante fornece uma melhor distribuição da temperatura, o que melhora a sensação de conforto térmico. E de acordo com FRÄNKISCHE (2009) o sistema de piso radiante proporciona uma melhor sensação de conforto e bem-estar, uma vez que a distribuição da temperatura é uniforme por todo o local.

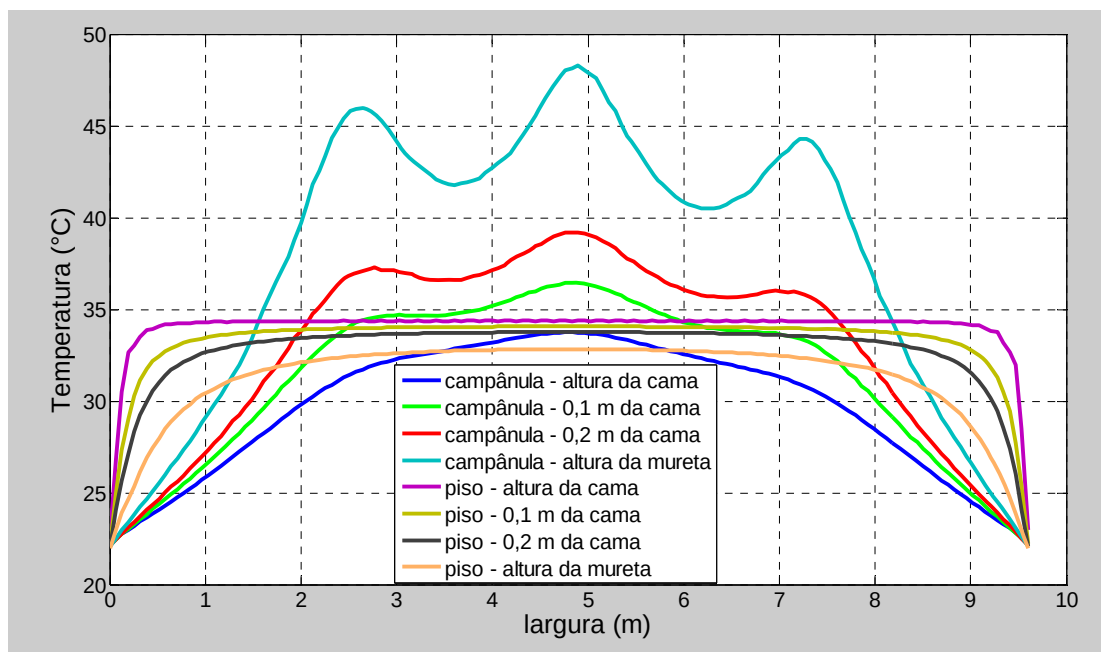


Figura 6.18 – Comparação dos perfis da temperatura com uso de campânulas e aquecedor pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 às 11 h

Na Figura 6.19 observa-se que nas proximidades da campânula, que é a fonte de calor, a temperatura é maior e a distribuição desse calor cria um “campo de atuação” para cada uma das campânulas, a temperatura externa ao galpão também influencia na temperatura das extremidades do galpão.

Fazendo uma comparação entre os valores medidos e os simulados para o Lote 4, na posição da altura da cama e na direção da campânula obteve os valores próximos, na Tabela 6.1 pode se observado esses valores com os respectivos erros.

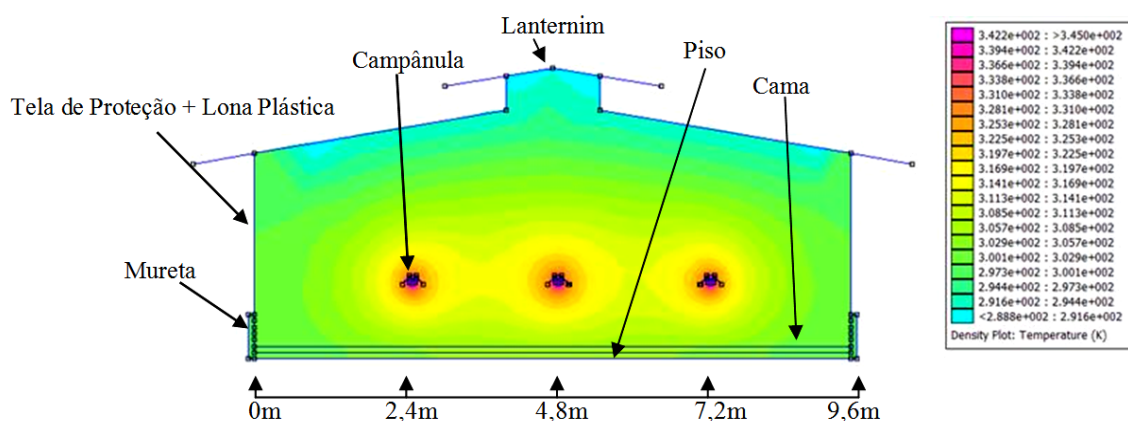


Figura 6.19 – Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 18 de Janeiro de 2009 às 08 h e 30 min

Tabela 6.1 - Valores medidos e simulados para a temperatura na altura da cama. Para dia 18 de Janeiro de 2009 às 08 h e 30 min

Posição da esquerda para direita (m)	Altura da cama		e - erro
	Valor medido	Valor simulado	
0,0 (direção da mureta esquerda)	22,0	22	0,00%
2,4 (direção da campânula)	51,0	54	5,50%
4,8 (direção da campânula)	63,0	65	3,17%
7,2 (direção da campânula)	53,5	55	2,80%
9,6 (direção da mureta esquerda)	23,0	22	4,30%

Fazendo as simulações com o FEMM 4.2 foi possível verificar valores adequados para o diâmetro da serpentina e também valores para a temperatura da água que por ela circula. De forma que se chegou a um valor bastante satisfatório de 32mm para o diâmetro e um espaçamento entre 15 e 18cm entre as tubulações. Esse valor de 32mm é um diâmetro fácil de ser encontrado tanto em material PEX (Polietileno Reticulado) quanto em cobre.

6.1.3 – ANÁLISE DE MATERIAIS

Para verificação do tipo de material a ser usado para o círculo de proteção foram feitas simulações considerando como materiais o papelão e a folha de zinco, que são bastante usadas na região do Triângulo Mineiro.

A Figura 6.20 representa o perfil da temperatura dentro de um galpão com círculo de 5m de diâmetro e com duas Campânulas de aquecimento a gás na altura da cama.

A Figura 6.21 representa o perfil da temperatura dentro de um galpão com círculo de 5m de diâmetro e com aquecimento pelo piso com serpentina na altura da cama.

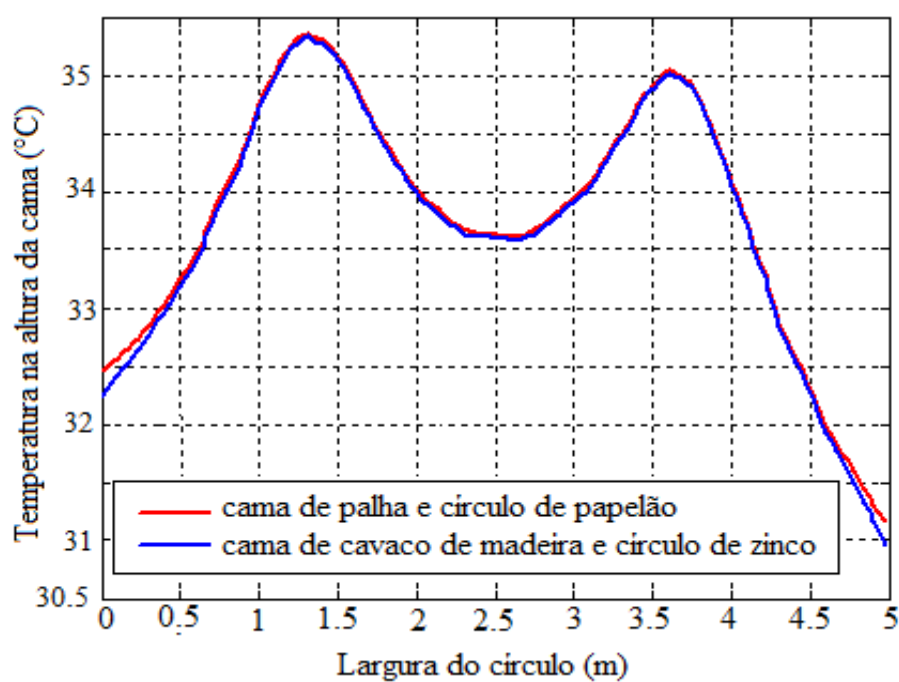


Figura 6.20 – Comparação do dos perfis da temperatura na altura da cama com uso de aquecimento a gás

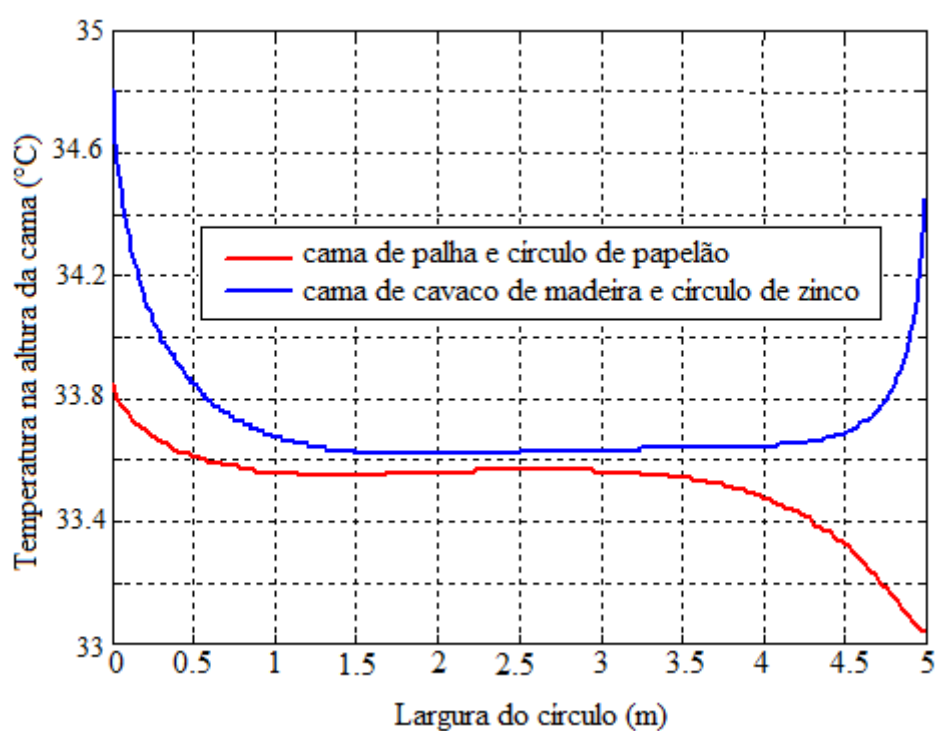


Figura 6.21– Comparação do dos perfis da temperatura na altura da cama com uso de aquecimento pelo piso

Utilizando materiais diferentes para o círculo de proteção, verificou-se uma diferença praticamente inexistente no comportamento da temperatura. No caso em que se utiliza a campânula praticamente não se tem influencia o tipo de material usado para o círculo. Em se tratando do aquecimento no piso, já se observa uma pequena diferença no comportamento da temperatura com o uso de materiais diferentes, constatando-se que o uso do zinco é mais eficaz que o do papelão.

6.1.4 - ANÁLISE ECONÔMICA DOS AQUECEDORES

Segundo BUENO (2004) há necessidade de estudos que comprovem a viabilidade econômica de novas tecnologias que poderão influenciar tanto na produção física quanto na redução de custos e ou de consumos energéticos. Ressalta-se que a redução do consumo sem prejudicar a produção é um dos grandes desafios atuais da avicultura brasileira.

Para 4 lotes no período de outubro de 2007 a fevereiro de 2009 foram pesados todos os botijões de GLP utilizados, sendo que a pesagem ocorreu ao serem conectados às campânulas e ao serem retirados das mesmas, possibilitando definir o consumo desse combustível. As datas e horários de liga e desliga das campânulas também foram anotados para contagem do tempo de aquecimento, esses dados estão contidos nas Tabelas 6.2 à 6.5.

De acordo com os dados coletados foi possível fazer análise econômica do consumo de GLP e também o consumo energético para cada lote, de forma a possibilitar a conversão para watts, permitindo assim o cálculo do consumo de energia elétrica, com seus respectivos valores em reais.

Essas análises são descritas a seguir, sendo separadas por lotes.

a) Lote 1

O lote deu entrada em 19 de outubro de 2007 e retirado em 05 de dezembro de 2007.

Tabela 6.2 – Aquecimento Lote 1

Colégio Agrícola aquecimento de 19 de outubro até 04 de novembro de 2007				
DATA		HORA		
Ligar Campânula	Desligar Campânula	Ligar Campânula	Desligar Campânula	n° de horas
1º dia	4º dia	10:30	10:00	71:30 (sem interrupção)
4º dia	6º dia	16:00	10:00	42:00 (sem interrupção)
6º dia	12º dia	16:00	9:30	105:00 (dia-a-dia)
12º dia	15º dia	18:30	9:00	43:30 (dia-a-dia)
Total de horas				262:00
Total de kg de GLP gasto				120 kg

Fazendo-se a análise econômica do aquecimento para o Lote 1, de acordo com a Tabela 6.2, foram consumidos 120 kg de GLP em um total de 262 h, com uso da campânulas para o aquecimento dos 2.000 pintos, de forma que o consumo foi de 9,23 botijões de 13 kg. Verificando um gasto equivalente em termos de potência dá um total de 1639,53kWh correspondendo a R\$ 396,93 (custo do botijão de GLP em dezembro de 2009 no valor de R\$ 43,00).

O gasto equivalente em termos de potência em kW, para esse primeiro lote seriam necessários 6,26kW por um total de 262h de consumo o que equivale a 1639,53 kWh, como o valor cobrado pela CEMIG em dezembro de 2009 foi de 0,29036637, o que corresponde a R\$ 476,06, supondo a mesma eficiência energética.

b) Lote 2

O lote deu entrada em 18 de janeiro de 2008 e retirado em 05 de março de 2008.

Para aquecimento do Lote 2, de acordo com a Tabela 6.3, foram necessários 128 kg de GLP em um total de 275h e 30 min, dando um gasto equivalente em termos de potência dá um total de 1748,48kWh. O consumo médio de gás (GLP) usado em campânulas para o aquecimento dos 2.000 pintos no terceiro lote em análise foi de 9,85 botijões de 13 kg, o que corresponde a R\$ 423,38 (custo do botijão de GLP em Dezembro de 2009 no valor de R\$ 43,00).

O gasto equivalente em termos de potência em kW, para esse outro lote seriam necessários 6,35kW por um total de 312h 30' de consumo o que equivale a 1748,48kWh, o que corres

ponde a R\$ 507,50, supondo a mesma eficiência energética.

Tabela 6.3 – Aquecimento Lote 2

Colégio Agrícola aquecimento de 18 de janeiro até 02 de fevereiro de 2008				
DATA		HORA		
Ligar Campânula	Desligar Campânula	Ligar Campânula	Desligar Campânula	nº de horas
1º dia	5º dia	10:30	11:00	96:30 (sem interrupção)
5º dia	7º dia	16:00	11:00	38:00 (dia-a-dia)
7º dia	9º dia	16:00	10:00	36:00 (dia-a-dia)
9º dia	15º dia	16:00	9:30	105:00 (dia-a-dia)
Total de horas				275:30
Total de kg de GLP gasto				128 kg

c) Lote 3

O lote deu entrada em 11 de julho retirado em 20 de agosto de 2008.

Tabela 6.4 – Aquecimento Lote 3

Colégio Agrícola aquecimento de 11 até 28 de julho de 2008				
DATA		HORA		
Ligar Campânula	Desligar Campânula	Ligar Campânula	Desligar Campânula	nº de horas
1º dia	6º dia	9:30	11:00	121:30 (sem interrupção)
6º dia	7º dia	16:00	11:00	19:00 (dia-a-dia)
7º dia	9º dia	16:00	10:00	36:00 (dia-a-dia)
9º dia	17º dia	16:00	9:00	136:00 (dia-a-dia)
Total de horas				312:30
Total de kg de GLP gasto				151 kg

Para aquecimento do Lote 3, de acordo com a Tabela 6.4, foram necessários 151 kg de GLP em um total de 312h e 30 min, dando um gasto equivalente em termos de

potência dá um total de 2062,66kWh. O consumo médio de gás (GLP) usado em campânulas para o aquecimento dos 2.000 pintos no terceiro lote em análise foi de 11,62 botijões de 13 kg, o que corresponde a R\$ 499,66 (custo do botijão de GLP em Dezembro de 2009 no valor de R\$ 43,00).

O gasto equivalente em termos de potência em kW, para esse outro lote seriam necessários 6,60kW por um total de 312h 30' de consumo o que equivale a 2062,66kWh, o que corresponde a R\$ 599,04, supondo a mesma eficiência energética.

d) Lote 4

O lote deu entrada em 16 de janeiro e retirado em 28 de fevereiro de 2009.

Para aquecimento do Lote 4, de acordo com a Tabela 6.5, foram necessários 116 kg de GLP em um total de 258h, dando um gasto equivalente em termos de potência dá um total de 1584,56kWh. O consumo médio de gás (GLP) usado em campânulas para o aquecimento dos 2.000 pintos no terceiro lote em análise foi de 8,92 botijões de 13 kg, o que corresponde a R\$ 383,70(custo do botijão de GLP em Dezembro de 2009 no valor de R\$ 43,00).

Tabela 6.5– Aquecimento Lote 4

Colégio Agrícola aquecimento de 16 a 31 de janeiro de 2009				
DATA		HORA		
Ligar Campânula	Desligar Campânula	Ligar Campânula	Desligar Campânula	nº de horas
1º dia	3º dia	9:30	11:00	49:30 (sem interrupção)
3º dia	6º dia	16:00	10:00	54 (dia-a-dia)
6º dia	9º dia	16:00	9:30	52:30 (dia-a-dia)
9º dia	15º dia	16:00	9:00	102 (dia-a-dia)
Total de horas				258:00
Total de kg de GLP gasto				116 kg

O gasto equivalente em termos de potência em kW, para esse outro lote seriam necessários 6,14kW por um total de 258h de consumo o que equivale a 1584,56kWh, o que corresponde a R\$ 460,20, supondo a mesma eficiência energética.

Estes sistemas de aquecimento constituídos por campânulas a gás (GLP), elétricas e lâmpadas infravermelhas ou incandescentes durante os primeiros 21 dias eleva e muito o custo de produção da ave.

6.2 – CÁLCULO DE RETORNO DE INVESTIMENTO

Para análise de investimento o cálculo foi feito com base anual, de forma que considerando que de dois em dois meses entra um novo lote no galpão, têm-se cinco lotes por ano.

Com base na análise econômica, item 6.1.4, obteve-se a média de consumo de gás e da energia elétrica para os quatro lotes, cujos dados constam na Tabela 6.6 e com orçamento constante na Tabela 6.7 foi possível fazer o cálculo de em quantos anos o sistema proposto se pagaria.

Tabela 6.6 – Média de consumo de gás GLP e de energia elétrica.

	Consumo de GLP	Consumo de Energia Elétrica
Lote 1	R\$ 396,93	R\$ 476,06
Lote 2	R\$ 423,38	R\$ 507,50
Lote 3	R\$ 499,66	R\$ 599,04
Lote 4	R\$ 383,70	R\$ 460,20
Total	R\$ 1703,67	R\$ 2042,80
Média	R\$ 425,91	R\$ 510,70
Valor anual = 6		
lotes por anos	R\$ 2555,46	R\$ 3064,20

Os cálculos e o gráfico foram realizados com uso do programa Mathcad, constante no Anexo B e representado pela Figura 6.22.

Tabela 6.7 – Preço obtido via orçamento pela Empresa: ALUZIN Calhas Ltda

Produto / equipamento	Tamanho	Quantidade	Valor unitário	Valor total	Vida útil estimada
Placa de aquecimento	2x1	4	R\$ 544,00	R\$ 2176,00	20anos
Boiler	500 litros	0	R\$ 1.434,00	-----	
	1000 litros	1	R\$ 2.368,00	R\$ 2368,00	20anos
Tubulação de cobre	O metro, com 32 mm de diâmetro	400	R\$ 15,00 metro	R\$ 6000,00	20anos
Tubulação de PEX	O metro, com 32 mm de diâmetro	400	R\$ 9,18 metro	R\$ 3672,00	50anos
Mão de obra		Instalação	R\$ 3.000,00	R\$ 3000,00	
Manutenção anual		Anual	R\$ 300,00	R\$ 300,00	
Caixa d'água	1000 litros	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00	20anos
Bomba de circulação pressurizadora de Água Quente		1	R\$ 470,00	R\$ 470,00	15anos
Campânula a Gás		3	R\$ 180,00	R\$ 540,00	10 anos
Botijão de Gás - vazio		3	R\$ 50,00	R\$ 150,00	retornável
Campânula Elétrica		3	R\$ 210,00	R\$ 470,00	10anos

Obs: a mão de obra inclui: montagem e algumas peças como: curva, luva, T, Registro duplo, Conector, Espuma isolante – Eluma, Manta asfáltica e Estanho + pasta.

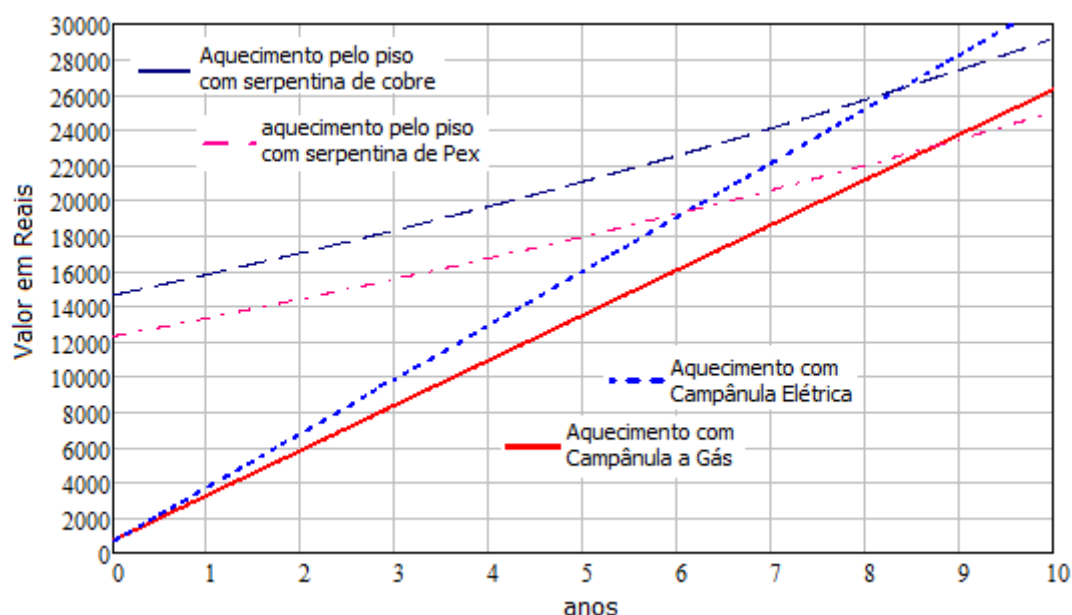


Figura 6.22 – Retorno de investimento ao trocar aquecimento com campânula a gás e Elétrica pelo aquecimento tipo piso

De acordo com a Figura 6.22 nota-se que no prazo de pouco mais que seis anos o sistema de aquecimento via piso com serpentina de PEX já supera seu investimento, quando comparado com aquecimento tipo campânula elétrica. Comparando o uso do sistema com o PEX em relação ao uso de aquecimento com a campânula a gás observa-se que com aproximadamente oito anos e meio esse sistema já se paga.

6.3 - OUTRAS ANÁLISES IMPORTANTES

O aumento da umidade do ar decorrente de uma estação chuvosa, além do acúmulo de umidade na cama, proporcionada pelas excretas das aves, aumentando a quantidade de gases, como a amônia, que no período de inverno pode propiciar o desenvolvimento de agentes patogênicos (NÃÃS et al., 2007), o que pode ser amenizado com uso do aquecimento no piso, pois o mesmo faz com que a cama permaneça mais seca (ABREU, 2002).

RONCHI (2004) comenta que alguns sistemas de aquecimento consomem o O_2 no interior das instalações aumentando a concentração de gás CO_2 em especial em ambientes mal ventilados. Como o CO_2 é mais denso que o ar e é oriundo

principalmente da respiração dos animais e de aquecedores, sua tendência é permanecer no nível das aves, dificultando a atividade respiratória e causando abatimento, isso pode ser evitado com a utilização do aquecimento pelo piso proposto.

Outro aspecto importante é que esse aquecimento se destaca pelo benefício que traz ao meio ambiente, proporcionado pelo uso de aquecedores solares, pois a energia renovável agrega valor ao produto final, que é hoje uma realidade e uma busca mundial, tornando o sistema de aquecimento menos dependente dos combustíveis derivados de petróleo.

O sistema de aquecimento radiante por circulação de água quente sobre o piso tem como principal vantagem a possibilidade de ser mantido por diversas fontes de energia, como gás, eletricidade e energia solar. Assim, pode-se utilizar para aquecer a água a o resíduo da própria cama dos galpões para produção de gás (biogás) através de biodigestores e que poderá ser usado posteriormente, para aquecer essa água.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 – CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos com o uso do método de Elementos Finitos para análise térmica nota-se que o aquecimento através de serpentina no piso, método proposto, proporciona uma maior homogeneidade na distribuição do calor, quando comparado com o uso das campânulas. Em um mesmo alinhamento praticamente não se observa variação do valor da temperatura.

Como o aquecedor pelo piso fica abaixo da cama, isto faz com que ela permaneça mais seca, amenizando o índice de amônia que é liberado pelos excrementos das aves.

Para as 2000 aves em estudo, no Lote 1, por exemplo, foram necessário 120 kg de GLP por um período de 262 h, sendo gasto nesse período um total de R\$ 396,93 com o aquecimento, caso fosse usado energia elétrica para esse mesmo lote seria gasto R\$ 476,06.

O aquecimento pelo piso ainda se destaca pelo benefício que traz ao meio ambiente, proporcionado pelo uso de aquecedores solares, pois a energia renovável agrega valor ao produto final, pois é menos dependente dos combustíveis derivados de petróleo. A utilização da energia solar e aquecimento pelo piso pode sim permitir uma economia financeira razoável por galpão além de um método mais eficiente para a manutenção adequada de temperatura para as aves.

No caso em que se utiliza a campânula praticamente não se tem influência pelo tipo de material usado para o círculo. Em se tratando do aquecimento no piso, já se observa uma pequena diferença no comportamento da temperatura com o uso de materiais diferentes, constatando-se que o uso do zinco é mais eficaz que o do papelão.

O uso do método de Elementos Finitos para análise térmica é de grande auxílio na determinação do comportamento da temperatura. Pelos resultados até então obtidos nota-se que a energia solar através de coletores solares podem sim ser de grande utilidade no aquecimento de galpões, proporcionando um melhor conforto térmico.

O calor não fica concentrado como em outros sistemas. A distribuição do calor é uniforme em todo o ambiente a partir do piso. Todo o calor fornecido fica na área de maior aproveitamento melhorando o uso da energia em relação a outros sistemas de aquecimento.

As campânulas a gás consomem oxigênio do ar, já com o aquecimento pelo piso não há queima de oxigênio, por isso esse sistema produz uma excelente climatização e manutenção da qualidade do ar.

Pelas simulações o aquecedor pelo piso, de baixo para cima, demonstra ser mais eficaz que o tipo campânula, de cima para baixo.

Considerando a análise de retorno de investimento onde foi considerado o uso de campânula a gás e elétrica comparadas com o sistema de circulação de água quente passando em serpentinas de material PEX obteve-se que em 8 anos e meio o custo da implantação desse sistema comparado com o aquecimento a gás.

7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com a evolução deste trabalho, alguns aspectos foram analisados, tanto no meio acadêmico/científico quanto comercial, possibilitando este estudo ser referência para trabalhos futuros, destacando algumas sugestões para novos trabalhos:

- simular o comportamento da temperatura dentro do galpão em 3D;
- construir um protótipo com o aquecimento proposto;
- implementar em um galpão já existente esse tipo de aquecimento para verificar o comportamento da ave perante o sistema proposto;
- verificar a quantidade de placas e do tamanho do reservatório térmico;
- elaborar um sistema de controle tipo sensor/atuador para automatizar o controle da temperatura dentro do galpão;
- verificar a possibilidade do uso de óleos no lugar da água como fluido térmico, com análise de rendimento térmico;
- verificar a viabilidade do uso da energia solar para resfriar o galpão em dias/horários quentes;
- verificar a viabilidade do uso do biogás para aquecer/resfriar o galpão em dias/horários frios/quentes.

- Fazer uso da câmera termográfica para análise da temperatura dentro do galpão;
- Fazer análise em regime transiente dos perfis da temperatura dentro do galpão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P. G. **Sistemas de aquecimento em piso, com resistência elétrica, para criação de aves.** Viçosa, MG: UFV, 1994. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.

ABREU, V.M.N. **Manejo inicial e seus reflexos no desempenho do frango.** Avicultura Industrial, Gessulli, p.25-38, 1999.

ABREU, P. G.; ABREU, V. M. N. **Caracterização dos sistemas de aquecimento para aves.** Concórdia: Embrapa – CNPSA, 2002. 10p.

ABREU, P. G, **Sistema de Produção de Frangos de Corte.** Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, 2003a.

ABREU, P. G. **Modelos de aquecimento.** In: IV SIMPÓSIO BRASIL SUL DE AVICULTURA. Anais... Chapecó-SC, 2003b.

ABREU, P. G.; ABREU, V. M. N.; PERDOMO, C. C.; BAETA, F. C. **Sistemas de aquecimento para criação de aves.** Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1998. 35p. (EMBRAPA-CNPSA. Circular Técnica, 20).

ABREU, V.M.N., ABREU, P.G. **Diagnóstico Bioclimático: qual sua importância na produção de aves.** Avicultura Industrial, no 1093, p. 16-20, 2001.

AERTS, J.-M. e BERCKMANS, D. **A virtual chicken for climate control design: static and dynamic simulations of heat losses.** Transactions of the ASAE, v.47, n.5, 2004. p.1765-1772.

AFONSO, Carlos Leonardo Kurdian Castanho, **Avaliação e Otimização de Biodigestor,** Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2006.

ALENCAR, M.C.B.; NÂÃS, I. de A.; GONTIJO, L. A. **Respiratory risks in broiler production workers.** Revista Brasileira de Ciência Avícola, v.6, n.1, p.23-29, 2004.

ARRIELI, A., MELTZER, A., BERMAN, A. **The environmental temperature zone and seasonal acclimatization in the hen.** British Poultry Science, v.10, n.21, p.471, 1980.

AZEVEDO, M.A.; NASCIMENTO, J.W.B. **Estrutura de madeira para cobertura de aviários no Estado da Paraíba.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.3, p.358-90, 1999.

BAÊTA, F. C, SOUZA, C.F. **Ambiência em edificações rurais - conforto térmico animal.** Viçosa: UFV, 1997. 246p.

BAIÃO, N. C. **Efeitos da alta densidade populacional sobre o ambiente das instalações avícolas** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE AMBIÊNCIA E I

NSTALAÇÕES NA AVICULTURA INDÚSTRIAL, 1995, São Paulo. **Anais...** Campinas, SP; FACTA, 1995. p.67-75.

BAKKEN, G. S. A **two-dimensional operative-temperature model for thermal energy management by animals**. Journal of Thermal Biology, v.6, 1981. p.23-20.

BOUCHILLON, C. W.; REECE, F. N.; DEATON, J. W. **Mathematical modeling of thermal homeostasis**. Transactions of the ASAE, v.13, n.5, 1970. p.648-652.

BREBBIA, C. A., TELLES, J. C. F. and WROBEL, L.C., **Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering**, Berlin, Springer – Verlag, 1984.

BOZKIR, O., CANBAZOGLU, S.. **Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow**. Energy and Buildings, Elsevier, v. 36, p. 579-586. (2004)

BUENO, L.G. F., **Avaliação da Eficiência Energética e do Conforto Térmico em Instalações de Frango de Corte**. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 2004.

BUSO, P. C. **Manual de Condicionamento de Ar utilizando o Piso Elevado Monolítico** Werden, 16p, 2005. Disponível em: <<http://www.werden.com.br/index.asp>>. Acesso em 21 de Jun de 2010.

CEMIG/PROCEL **Estudo de otimização energética: Setor avícola**, Belo Horizonte, 21p, 1996.

CLARK, J. A. **Environment aspects of housing for animal production**. Nothingam, England: University of Nothingam, 1981. 510p.

CLOUGH, R.W. **The finite finite element method in plane stress analysis**. *Proceedings*, 2nd Conference on Eletronic Computation, ASCE, Pittsburg, PA, 1960.

CODI – Comitê de Distribuição de Energia Elétrica. Mapeamento e Cadastramento. CODI.3.2.20.01.1. Processo de Aquisição de Dados para Mapeamento e Cadastramento. Rio de Janeiro. p. 65. 1994.

CURTIS, S. E. **Environmental management in animal agriculture**. Ames: The Iowa State University Press, 1983. 409p.

DONALD, J. **Environmental Control options under different climate conditions**. World Poultry. Elsevier, v.14, n. 11, p. 22-27, 1998.

ENGLERT, S. **Avicultura: tudo sobre raças, manejo, alimentação e sanidade**. 6.ed. Porto Alegre: Agropecuária, 1987. 288 p.

ESMAY, M. L. **Principles of animal environment**. Environmental Engineering in Agriculture and Food Series. The AVI Publishing Company, Inc. 1969. 325 p.

FANGER, P.O. **Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering**, Robert Krieger Publishing , Malabar, Florida. (1982).

FRÄNKISCHE, **Manual de Técnica para instalações domésticas**, 12p. (FRÄNKISCHE IBÉRICA – Especialistas em conforto térmico), 2009.

FREEMAN, B. J. **The domestic fowl in biomedical research: physiological effects of the environment.** World's Poultry Science Journal, v. 44, p. 44-60, 1988.

FURLAN, R. L.; MALHEIROS, R. D.; MORAES, V. M. B. **Efeito da densidade de alojamento e da temperatura ambiente sobre a temperatura corporal de frangos.** Revista Brasileira de Ciência Avícola, 2000.

GARCÍA, J.L.V. Influencia del manejo en la crianza y en el matadero sobre la calidad de la carne de pollo. *Selecciones Avícolas*. v.39, n.8, p.475-487, 1997

GATES, R. S.; OVERHULTS, D. G.; BOTTCHEER, R. W.; ZHANG, S. H. **Field calibration of a transient model for broilermisting.** Transactions of the ASAE, v.35, n.5, 1992. p.1623-1631.

GATES, R. S.; USRY, J. L.; NIENABER, J. A.; TURNER, L. W.; BRIDGES, T. C. **Optimal misting method for cooling livestock housing.** Transactions of the ASAE, v. 34, n. 5, 1991b. p.2199-2206.

GEBREMEDHIN, K. G. **A model of sensible heat transfer across the boundary layer of animal hair coat.** Journal of Thermal Biology, v.12, n.1, 1987. p.5-10.

GEBREMEDHIN, K. G. e WU, B. **A model of evaporative cooling of wet skin surface and fur layer.** ASAE Paper No. 004114, ASAE, St. Joseph, Mi. 2000.

GONZÁLES, E.; SALDANHA, E.S.P.B. **Os primeiros dias de vida do frango e a produtividade futura.** In: Congresso Brasileiro de Zootecnia, 11., 2001, Goiânia. *Anais...* Goiânia: AZEG/ABZ, 2001. p.312-313

HAFEZ, E. S. E. **Adaptación de los animales domésticos.** Barcelona, Espanha: Labor, 1973. 563p.

HARDON, P.C. **Planejamento e benfeitorias rurais.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TÉCNICOS, PESQUISADORES E EDUCADORES DE CONSTRUÇÕES RURAIS, 2., 1996, Campinas. *Anais...* p.19-36.

HICKS, F. W. **Influência do ambiente no desempenho das aves.** Avicultura Brasileira, v.30, n.7, p.75-76, 1973.

INCROPERA, F. P.; de WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 3. ed. Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1992.

KELLY, C.F., BOND, T.E., ITTNER, N.R. **Effectiveness of artificial shade materials.** Agricultural Engineering, 1958; 39(12): 758-764.

KREITH & KREIDER, 1978. F Kreith and J.A. Kreider, Principles of Solar Engineering. In: , Hemisphere, New York (1978), p. 232.

LAMBERTS, R., PEREIRA, F. O. R., DUTRA, L. **Eficiência Energética em Edificações.** São Paulo: PW, 1997. 188 p.

LLOBET, J. A. C., GONDOLBEU, V. S. **Manual prático de avicultura.** Lisboa: Livraria Popular Francisco Franco, 1980. 214p.

LOTT, B.; DONALD, J. **Amônia: Grandes perdas mesmo quando você não percebe.** 2005. Disponível em: http://www.aviculturaindustrial.com.br/site/dinamica.asp?id=5098&tipo_tabela=cet&categoria=manejo Acesso em 12 fev. 2007.

LUCAS JUNIOR., J.; SANTOS, T.M.B. **Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para produção de biogás.** In: SIMPÓSIO RESÍDUOS DA PRODUÇÃO AVÍCOLA, 2000, Concórdia. Anais... Concórdia: CNPSA, 2000. p. 27-43.

MACARI, M., CAMPOS, S. S. **Respostas fisiológicas de frangos de corte criados em alta densidade** In: SIMPÓSIO SOBRE AMBIÊNCIA, SANIDADE E QUALIDADE DA CARCAÇA DE FRANGOS DE CORTE, 1997, Concórdia. **Anais...**, Concórdia: FACTA, p.1-18, 1997.

MAGALHÃES E.A.; et al. **Análise da viabilidade na utilização do biogás numa agroindústria.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu/PR. Anais...Foz do Iguaçu/PR: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

MAHONEY, S. A.; KING, J. R. **The use of the equivalent black-body temperature in the thermal energetics of small birds.** Journal of Thermal Biology, v.2, n.3, 1977. p.115-120.

MARTINS, P. C. **O controle do ambiente avícola.** In: Simpósio Internacional Sobre Ambiente e Instalação na Avicultura Industrial. Campinas. Livro texto... São Paulo. 1995. p. 183-200.

McARTHUR, A.J. **Metabolism of homeotherms in the cold and estimation of thermal insulation.** Journal of Thermal Biology, Oxford, v.16, n.3, p.149-55, 1991

MEDEIROS, C. M. **Ajuste de modelos e determinação de índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte.** Viçosa, MG: UFV, 1997. 115p. Tese (Mestrado em Eng. Agrícola - Construções Rurais e Ambiente) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.

MEDEIROS, C. M. **Ajuste de modelos e determinação de índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte.** 2001. 115 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiente) – Universidade de Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MEEKER, D. **FEMM Finite Element Method Magnetics User's Manual**, version 4.2, Available: <http://femm.foster-miller.net/wiki/Download> acesso em Março de 2006.

MENEGALI, I.; TINOCO, I. F. F.; BAÊTA, F. C.; CECON P. R.; GUIMARÃES, M. C. C.; Cordeiro M. B. **Ambiente térmico e concentração de gases em instalações para frangos de corte no período de aquecimento.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.13, n.2, p.984-990, 2009.

MITCHELL, J. W. **Heat transfer from spheres and other animal forms.** Biophysical Journal, v.16, n.6,: 1976. p.561-569.

MORAES, S. R. P. **Conforto térmico e módulos reduzidos de galpões avícolas para diferentes coberturas durante o verão.** Dissertação - Universidade Federal de Viçosa. 1998. 73p.

MORAES, S. R. P.; TINÔCO, I.F.F.; BAÊTA, F.C.; CECOM, P. C. **Conforto térmico em galpões avícolas, sob coberturas de cimento-amianto e suas diferentes associações.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.1, p.89-92, 1999.

MOURA, D. J. **Ambiência na avicultura de corte.** In: SILVA, I. J. O. *Ambiência na produção de aves em clima tropical.* Jaboticabal: SBEA, 2001. p.75-149.

MÜLLER, P.B. **Bioclimatologia aplicada aos animais domésticos.** Porto Alegre: Sulina, 1982. 158p.

NÄÄS, I.A.; SEVEGNANI, K.B.; MARCHETO, F.G.; ESPELHO, J.C.C.; MENEGASSI, V.; SILVA, I.J.O. **Avaliação térmica de telhas de composição de celulose e betume, pintadas de branco, em modelos de aviários com escala reduzida.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.21, n.2, p.121-6, 2001.

NÄÄS, I. A.; SOBESTIANSKY, J.; JÚNIOR, P. B. **Manual de rastreabilidade na produção animal intensiva.** Pfizer, Goiânia, 76 p., 2004.

NÄÄS, I. de A.; MIRAGLIOTTA, M. Y.; BARACHO, M. dos S.; MOURA, D. J. de. **Ambiência aérea em alojamento de frangos de corte: poeira e gases.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.2, p.326-335, 2007.

NEUBAUER, L. W. **Orientation and insulation: model versus prototype.** Transactions of the ASAE, 15(4): 707-709, 1972.

NIMER, E., **Climatologia do Brasil.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ; 421 p. 1989.

NOGUEIRA, C. E. C.; ZÜRN, H.H. **Modelo otimizado para sistemas energéticos renováveis em ambientes rurais.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.341-348, 2005.

OLESEN, B. W. **Radiant floor heating: in theory and practice.** ASHRAE Journal, p. 19-26. (2002)

OLIVEIRA, L. R. P. **Biodigestor**, VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura – Avesui Centro-Oeste, Seminários Técnicos de Suinocultura - 13, 14 e 15 de setembro de 2005 – Goiânia – GO

OWADA, A. N.; NÄÄS, I. A.; MOURA, D. J.; BARACHO, M. S. **Estimativa de bem-estar de frango de corte em função da concentração de amônia e grau de luminosidade no galpão de produção.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.3, p.611-618, 2007.

POGI, R.C.& PIEDADE JUNIOR, C. **Energia elétrica em atividades ligadas à avicultura;** Energia na Agricultura, Botucatu; v. 6, n. 2, 1991.

POOLE,AL. and H. GELLER. 1997. **The Emerging ESCO Industry in Brazil.** American Council for an Energy Efficient Economy, Washington, DC.

PRESTES, J.A. **Bem-estar animal: o que as empresas estão fazendo para atender as demandas internacionais.** Conferência Apinco de Ciência e Tecnologia Avícola, 2005. Anais ... Santos, 2005. pp. 67-78.

REECE, F.N., LOTT, B. D. **Heat and moisture production of broiler chickens.** Livestock environment II. Ames Iowa State University, 1982, p. 330-337.

RIVERO, R. **Condicionamento Térmico Natural: Arquitetura e Clima.** Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986. 240p.

RONCHI, C. **Principais Práticas de Manejo Para Aves Recém Nascidas.** In: Aveworld Dez/Jan de 2004.

ROSSI, L.A.; CARDOSO, E.R.; BERALDO, A.L. **Desenvolvimento e construção de placas de argamassa de cimento e casca de arroz aquecidas por resistência elétrica.** Revista de Ciências Exatas e Tecnologia. v. 11, n. 1, 2002.

SANTOS, T. M. B. **Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frangos de corte.** Universidade Estadual paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2001. 167p. Tese (Doutor).

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JÚNIOR, J.; **Balanço energético em galpão de frangos de corte.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.1, p.25-36, jan./abr. 2004

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JÚNIOR, J.; SAKOMURA, N. K. **Efeitos de densidade populacional e da reutilização da cama sobre o desempenho de frangos de corte e produção de cama.** Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias, p.p 45-52, 2005.

SARTORI, J. R.; GONZALES, E.; DAL PAI, V. **Effect of Environmental Temperature and Feed Restriction on the Performance and Composition of the Skeletal Muscle Fibers in Broilers.** Revista Brasileira de Zootecnia, v. 30, n. 6, p. 1779-1790, 2001a.

SIMMONS, J. D. e LOTT, B. D. **Evaporative cooling performance resulting from changes in water temperature.** Applied Engineering in Agriculture v.12, n.4, 1996. p.497-500.

SINGLETERY, I. B.; BOTTCHEER, R. W.; BAUGHMAN, G. R. **Characterizing effects of temperature and humidity on misting evaporative efficiency.** Transactions of the ASAE, v.39, n.5, 1996. p.1801-809.

TEETER, R. G. **Estresse calórico em frangos de corte.** In: CONFERÊNCIA APINCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AVÍCOLAS, Campinas, 1990. Anais..., Campinas: FACTA, 1990. p.33-44.

TEIXEIRA, V. H. **Construções e Ambiência - instalações para aves e suínos.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 181 p.

TEIXEIRA, C.A.; OLIVEIRA FILHO, D.; LACERDA FILHO, A.F. **Racionalização do uso de força motriz em fábrica de ração da Universidade Federal de Viçosa - Estudo de caso.** In: SEMINÁRIO ENERGIA NA AGRICULTURA - INDICANDO NOVOS CAMINHOS PARA A PRODUTIVIDADE NO CAMPO, Uberaba. Anais... Uberaba: Fazenda Energética - Companhia Energética de Minas Gerais, 2001. p.64-74

TINÔCO, I. F. F. **Efeito de diferentes sistemas de acondicionamento de ambiente e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, em condições de verão e outono.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

TINÔCO, I. F. F. **Ambiência e instalações para a avicultura industrial.** In: TEIXEIRA, V.H.; FERREIRA, L. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p.1-86.

TINÔCO, I. F. F. **Avicultura Industrial: novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas Brasileiros.** Revista Brasileira de Avicultura, v. 3, n. 1, p. 01-26, jan./ 2001.

TURNPENNY, J. R., A. J. MCARTHUR, J. A. CLARK, and C. M. WATHES. 2000. **Thermal balance of livestock: 1. A parsimonious model.** Agricultural Forest Meteorology, v.101, n.1, 2000. p.15-27.

UBA - União Brasileira de Avicultura: **Relatório anual 2009/2010.** Brasília, DF. p.37. 2010.

VAQUERO, E. G. **Projeto e construção de alojamentos para animais.** 7. ed., Lisboa: Biblioteca técnica Litexa, 1981. 237p.

VAN WICKLEN G.L.; CZARICK M. **Design of a PVC pipe system for brooding chickens.** Transaction of the ASAE 1988; 31: 552-557.

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

YANAGI JUNIOR, T.; DAMASCENO, G. S.; TEIXEIRA, V. H.; XIN, H. **Prediction of black globe humidity index in poultry buildings.** In: VI Livestock Environment – International Symposium: ASAE, Louisville, KY, 2001b. p. 482-489.

YANAGI JUNIOR, T.; Damasceno, G. S.; TINÔCO, I. F. F.; BAÊTA. F. C.; MORAES, S. R. P. 2000. **Comportamento da temperatura e umidade ao longo de galpões avícolas climatizados.** In.: VI Congresso Argentino de Ingeniería Rural/CADIR 2000 – II Congresso Americano de Educación en Ingeniería Agrícola, Anais..., 2000, Buenos Aires, Argentina. 6p.

YANAGI JUNIOR., T.; XIN, H.; GATES, R.S. **Modeling partial surface evaporative cooling of chickens.** ASAE Paper. No. 01-3011. St Joseph, MI: ASAE. 2001a.

YOUSEF, M. K. **Stress Physiology in Livestock.** Las Vegas, Nevada: CRC Press, 1985. 159p. (Basic Principle, 3).

WATHEN, P.; MITCHELL, J. W.; PORTER, W. P. **Theoretical and experimental studies of energy exchange from Jackrabbit ears and cylindrical shaped appendages.** Biophysical Journal, v.2, n.12, 1971. p.1030-1047.

WATHES, C. M. e J. A. CLARK. **Sensible heat transfer from the fowl: Thermal resistance of the pelt.** British Poultry Science, v.22, n.2, 1981b. p.175-183.

WATHES, G. M.; CLARK, J. A. **Sensible heat transfer from the fowl: boundary-layer resistance of a model fowl.** British Poultry Science, v.22, n.2, 1981a. p.161-173.

WEBB, D. R. e KING, J. R. **Heat-transfer relations of avian nestlings.** Journal of Thermal Biology, v.8, n.4, 1983. p.301-310.

WIRSBO . **Manual técnico.** Disponível em: <<http://www.wiesbo.es>> Acesso em 11/2006.

ZANATTA, R. A. **Análise do Controle de Amônia em Aviários.** Monografia - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, 2007.

ZANOLLA, N. **Sistema de ventilação em túnel e sistema de ventilação lateral na criação de frangos de corte em alta densidade.** 1998. 81 p. Dissertação (Mestrado em construções Rurais e Ambiente) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

ANEXOS

ANEXO A

PERFÍS DE TEMPERATURA

Diâmetro da serpentina

A escolha do diâmetro da serpentina, considerando a temperatura da água de 43°C e ambiente de 20°C representada na Figura A.1, onde se observa que foi simulado valores de 28, 32 e 40mm para o diâmetro da serpentina.

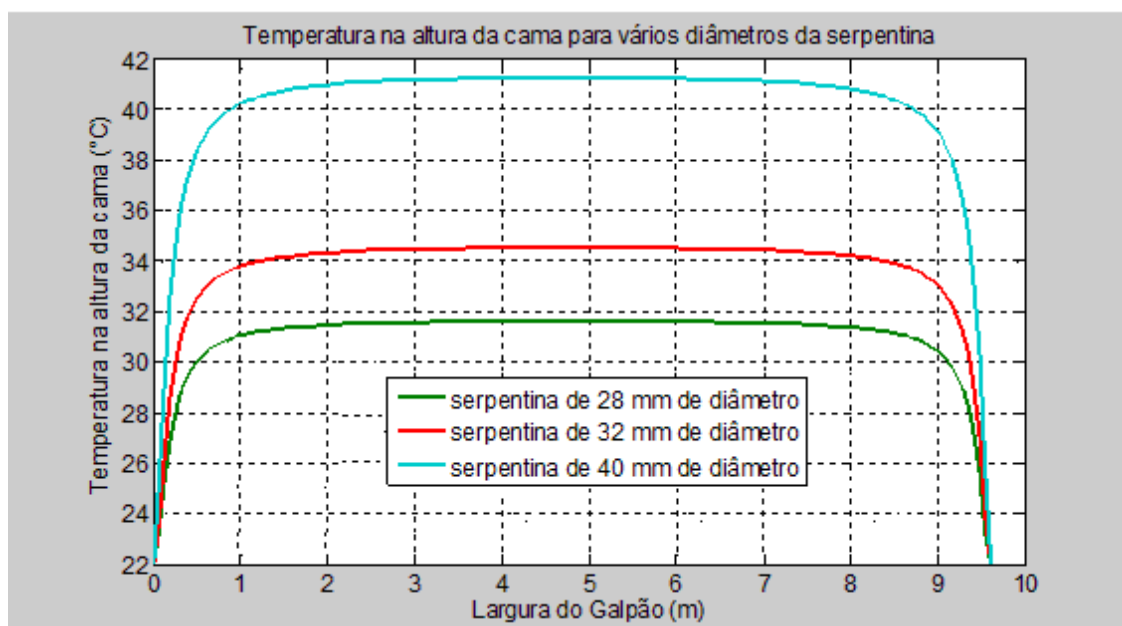


Figura A.1 – Perfil da temperatura dentro do galpão para vários diâmetros de serpentina

Colégio Agrícola Lote 1

A.1 - Dia 20 de outubro de 2007

A.1.1 – Simulação considerando horário das 7:30

a) Campânula

- Campânula 1 - 101°C
- Campânula 2 - 108°C
- Campânula 3 - 102°C

- T ambiente de 19°C

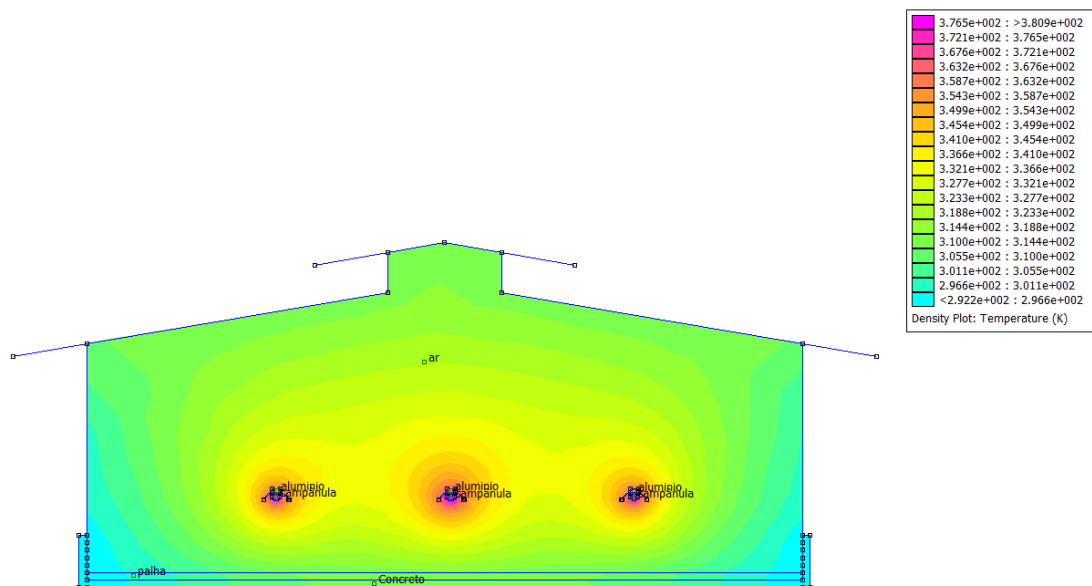


Figura A.2 – Comportamento da temperatura no galpão utilizando dados medidos no dia 20 de outubro de 2007 considerando horário das 7:30

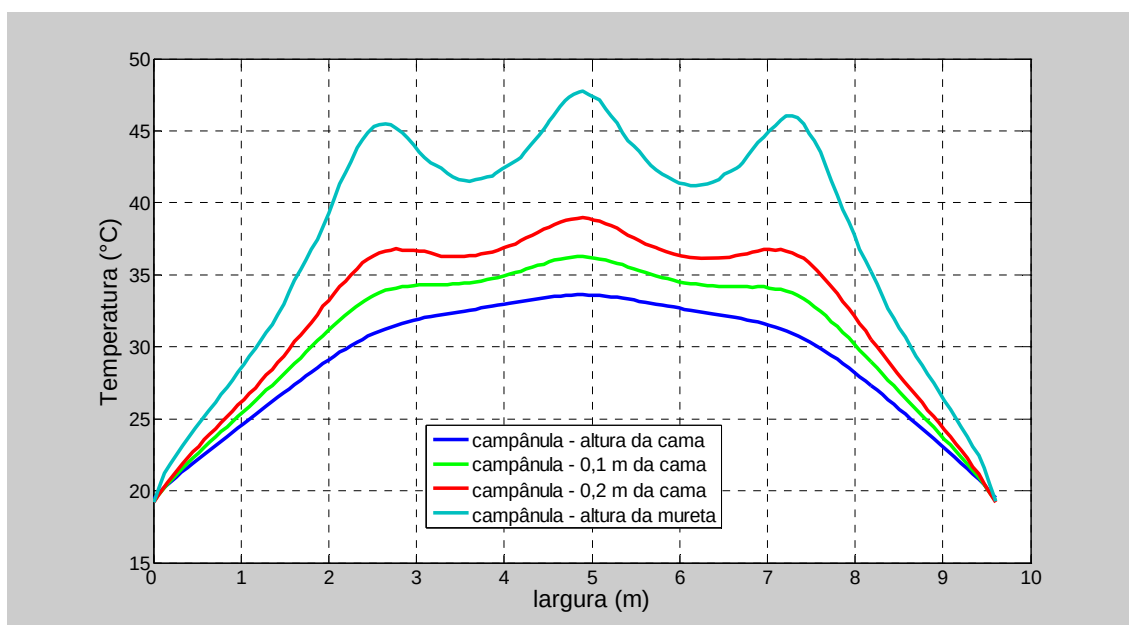


Figura A.3 - Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor por campânula, valor medido, dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min

b) Piso

- T água de
- T ambiente de 19°C

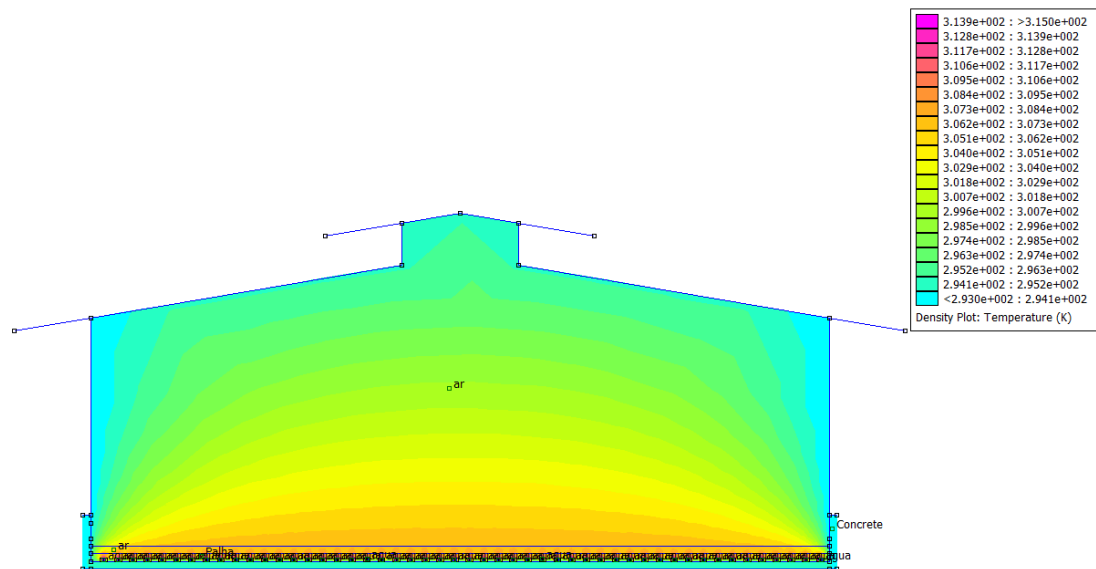


Figura A.4 – Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 20 de outubro de 2007 considerando horário das 7:30

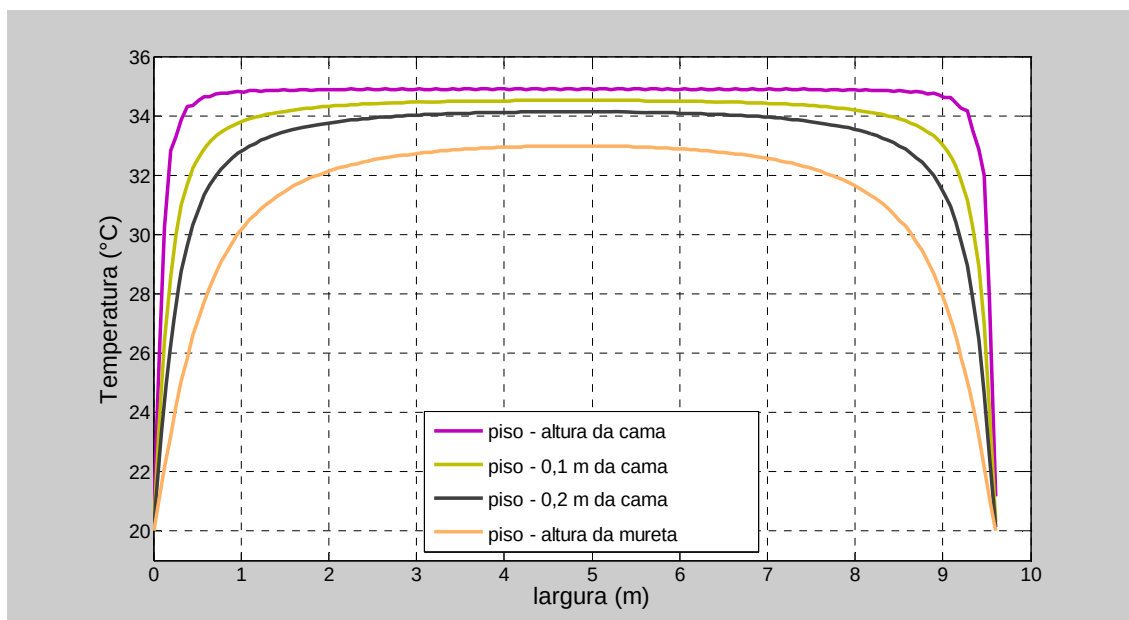


Figura A.5 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor pelo piso, valor simulado, dia 20 de outubro de 2007 às 07 h e 30 min

c) Comparação entre campânula e piso

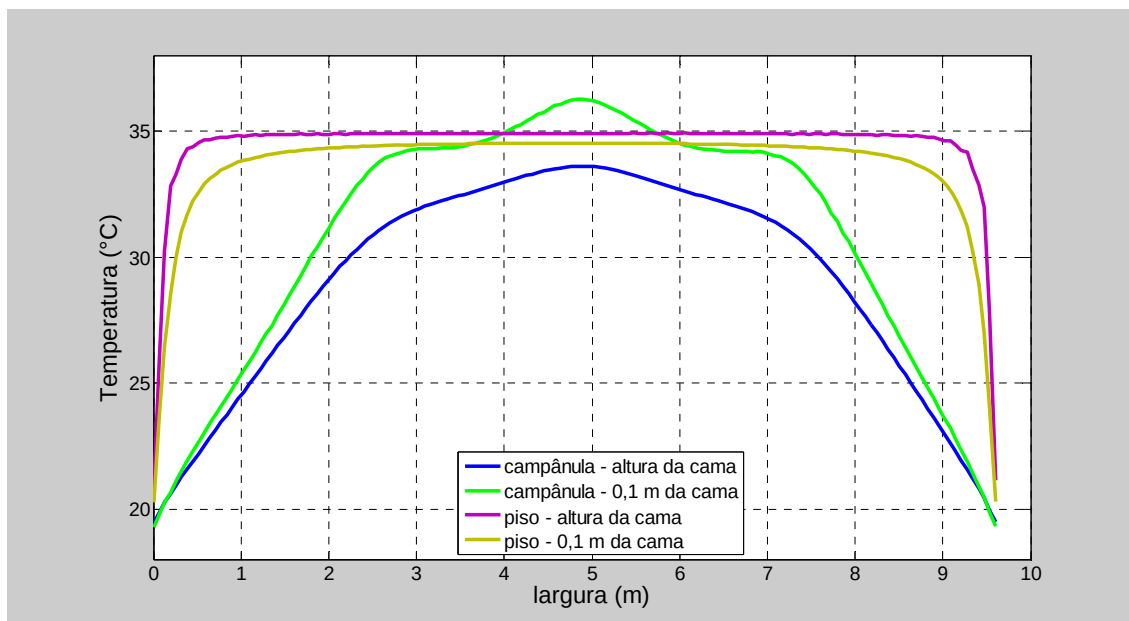


Figura A.6 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min na altura da cama e a 10cm desta

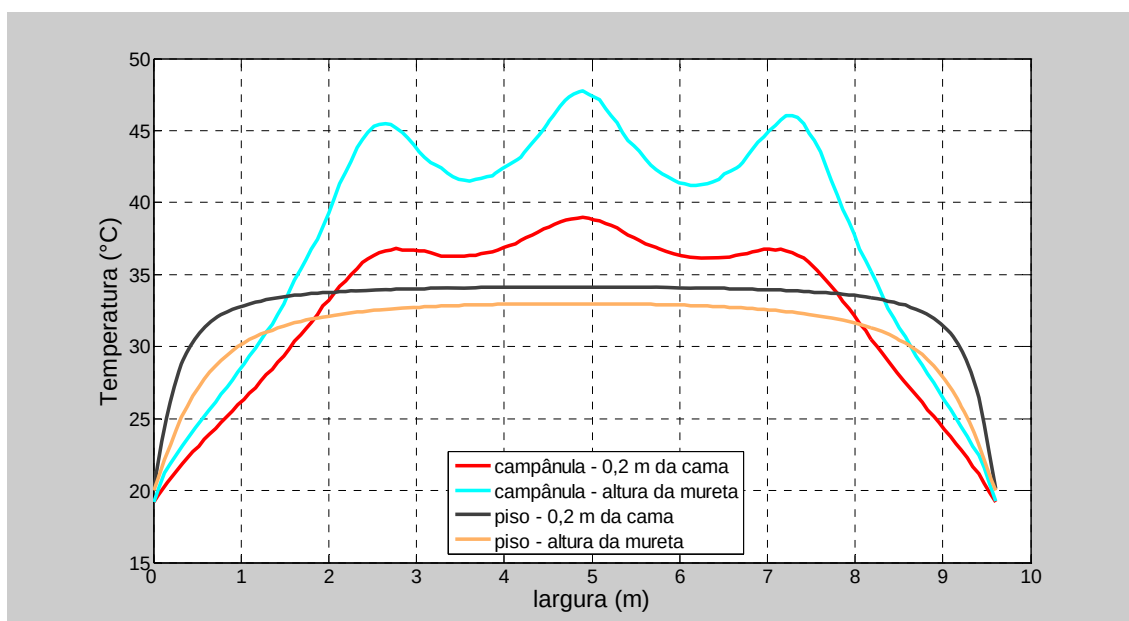


Figura A.7 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min na altura da cama e da mureta

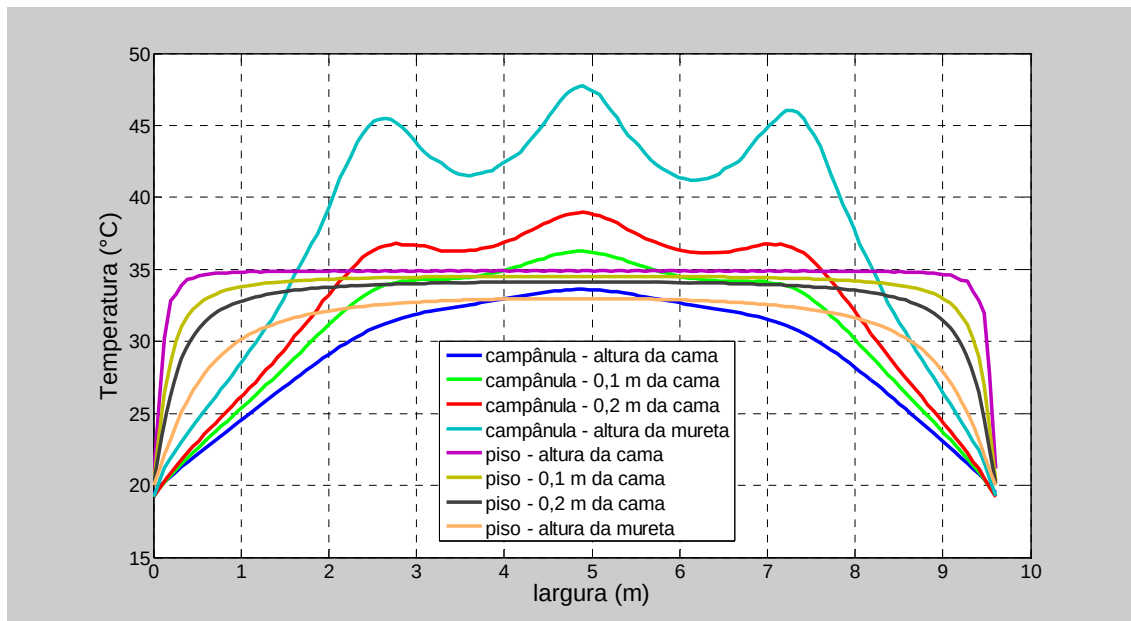


Figura A.8 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 às 7 h e 30 min

A.1.2 – Simulação considerando horário das 11:30

a) Campânula

- Campânula 1 - 48°C
- Campânula 2 - 51°C
- Campânula 3 - 45°C
- T ambiente de 28°C

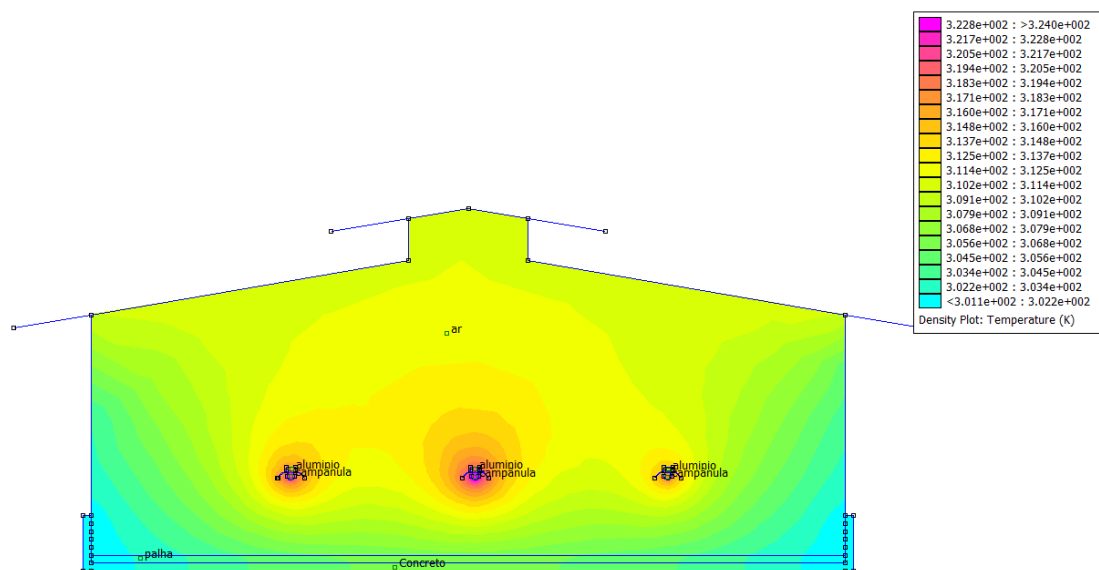


Figura A.9 – Comportamento da temperatura no galpão utilizando dados medidos no dia 20 de outubro de 2007 considerando horário das 11:30

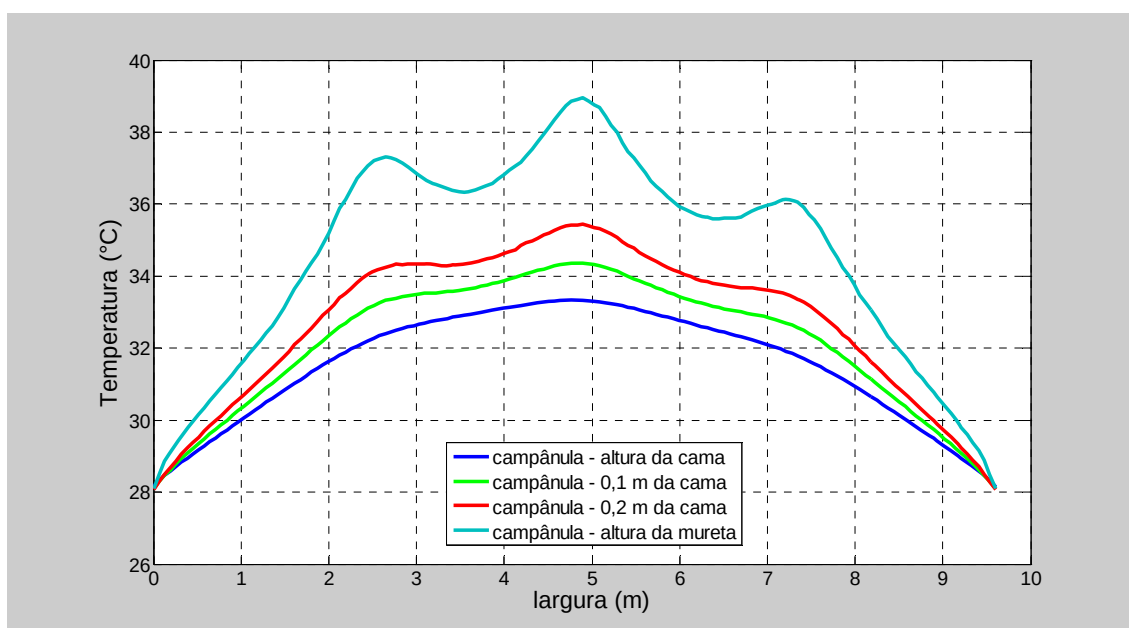


Figura A.10 - Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor por campânula, valor medido, dia 20 de outubro de 2007 as 11 h e 30 min

b) Piso

- T água de 40°C

- T ambiente de 28°C

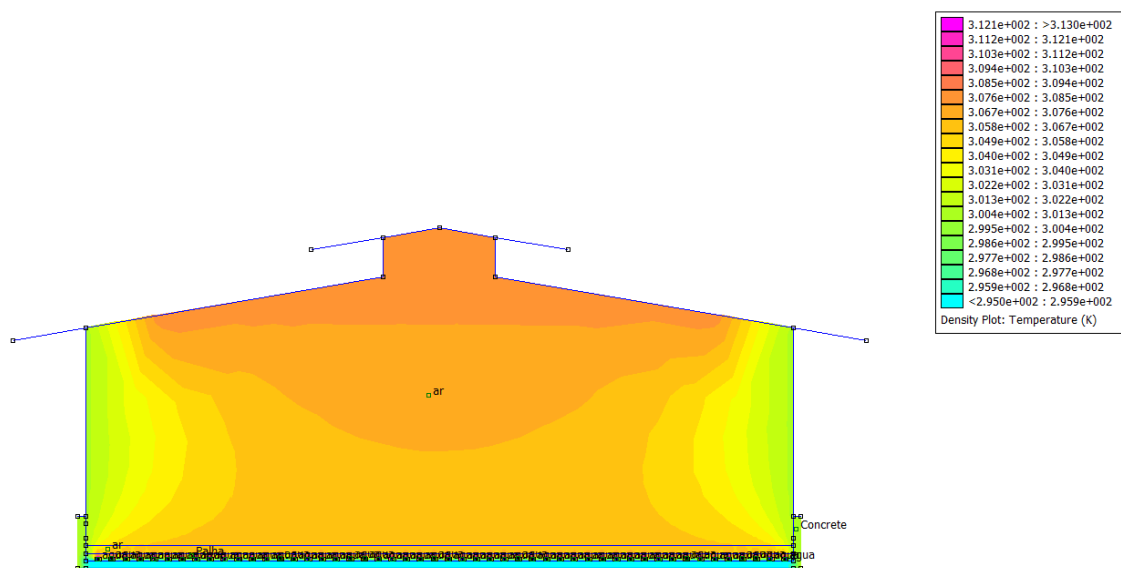


Figura A.11 – Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 20 de outubro de 2007 considerando horário das 11h30min

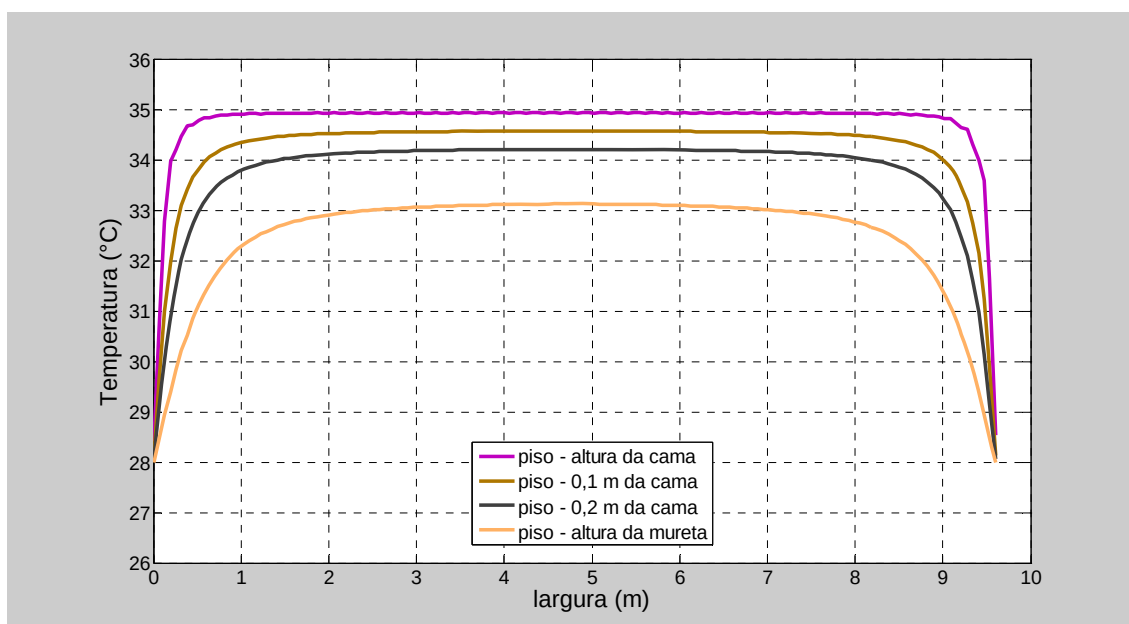


Figura A.12 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor pelo piso, valor simulado, dia 20 de outubro de 2007 as 11 h e 30 min

c) Comparação entre campânula e piso

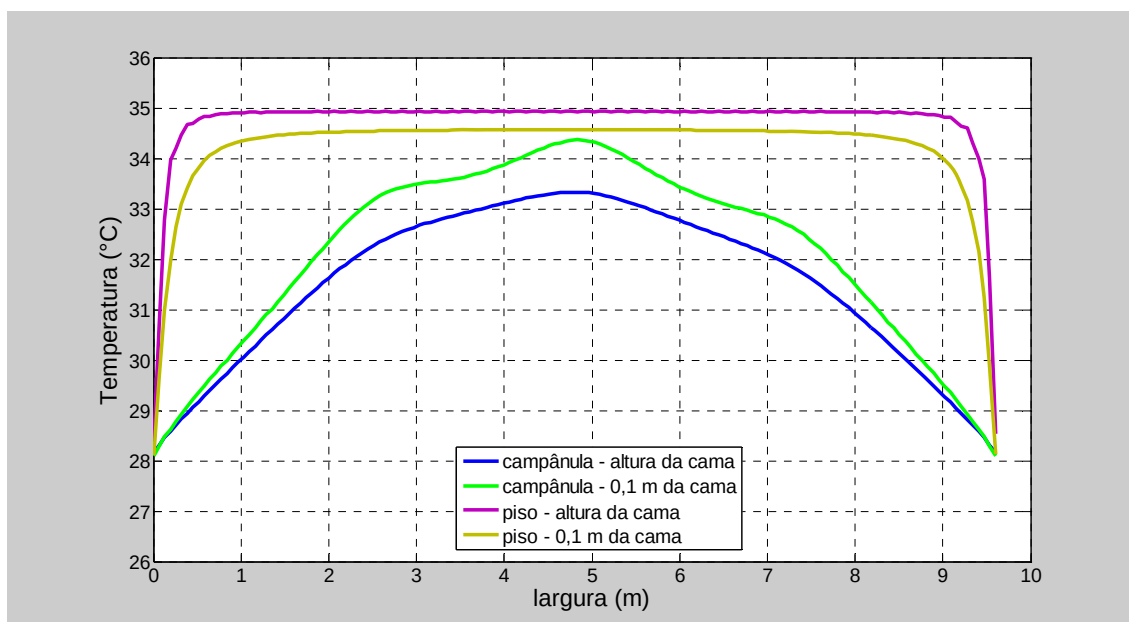


Figura A.13 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 as 11 h e 30 min

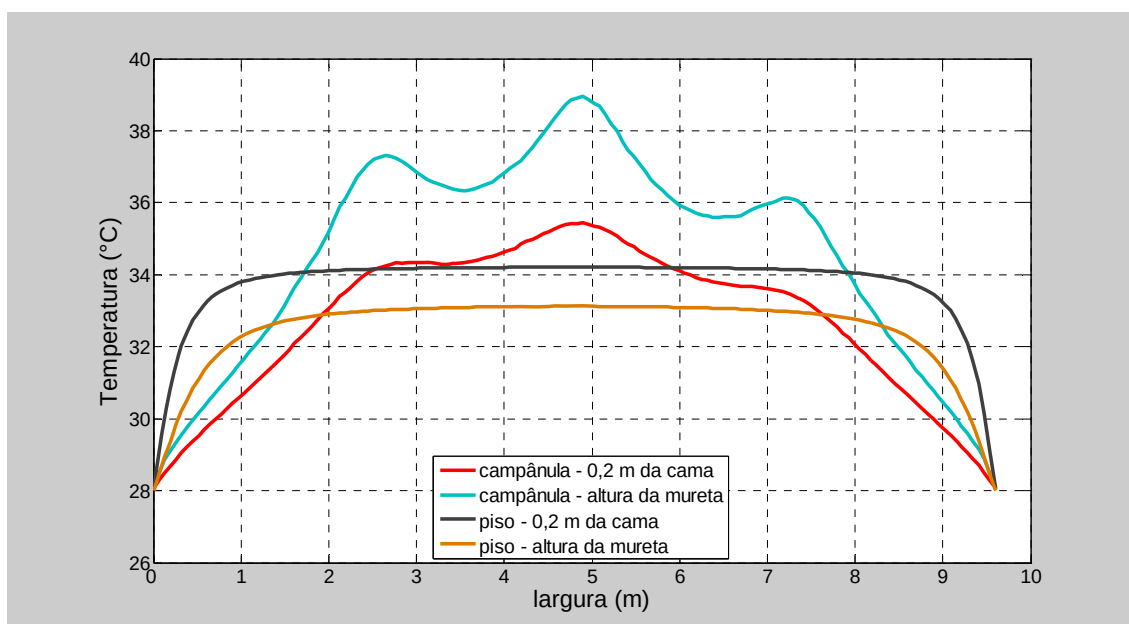


Figura A.14 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 as 11 h e 30 min

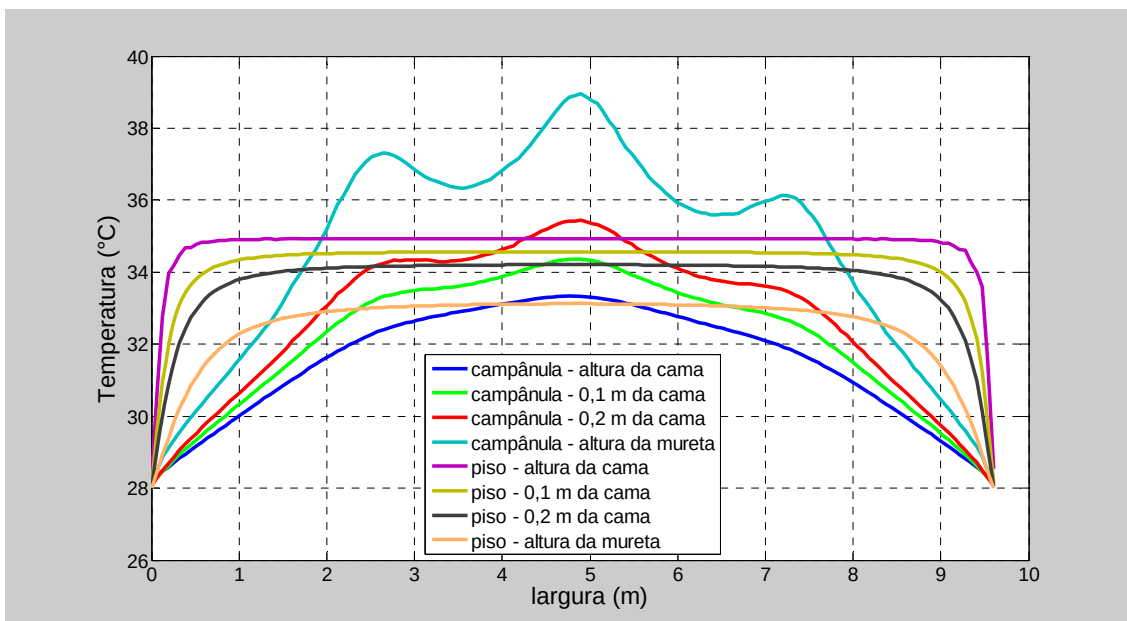


Figura A.15 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 20 de outubro de 2007 as 11 h e 30 min

Lote 3

A.2 – Dia 12 de julho de 2008

A.2.1 – Simulação considerando horário das 8:00

a) Campânula

- Campânula 1 - 108°C
- Campânula 2 - 106°C
- Campânula 3 - 106°C
- T ambiente de 16°C

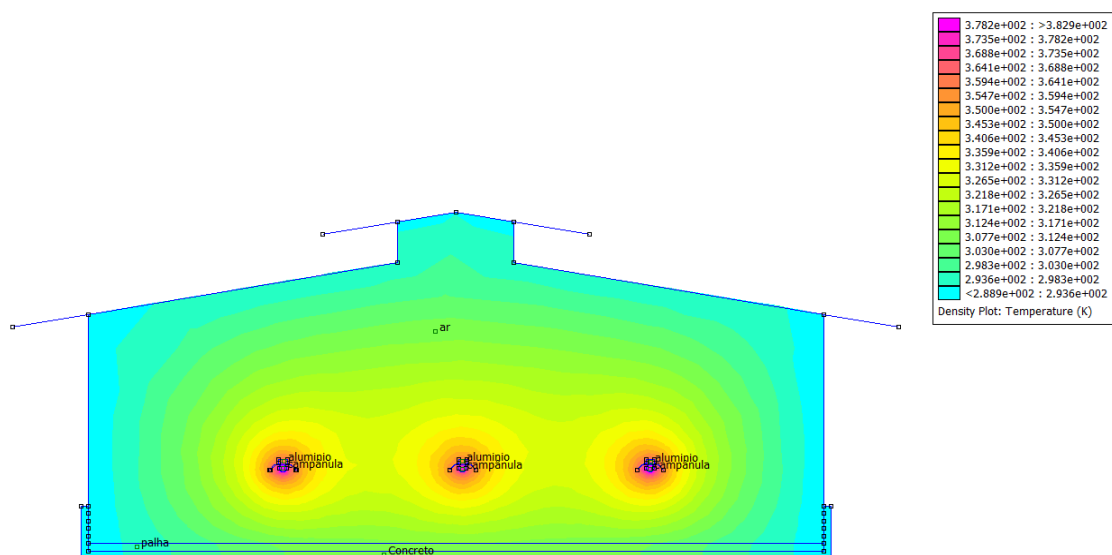


Figura A.16 – Comportamento da temperatura no galpão utilizando dados medidos no dia 12 de julho de 2008 considerando horário das 8:00

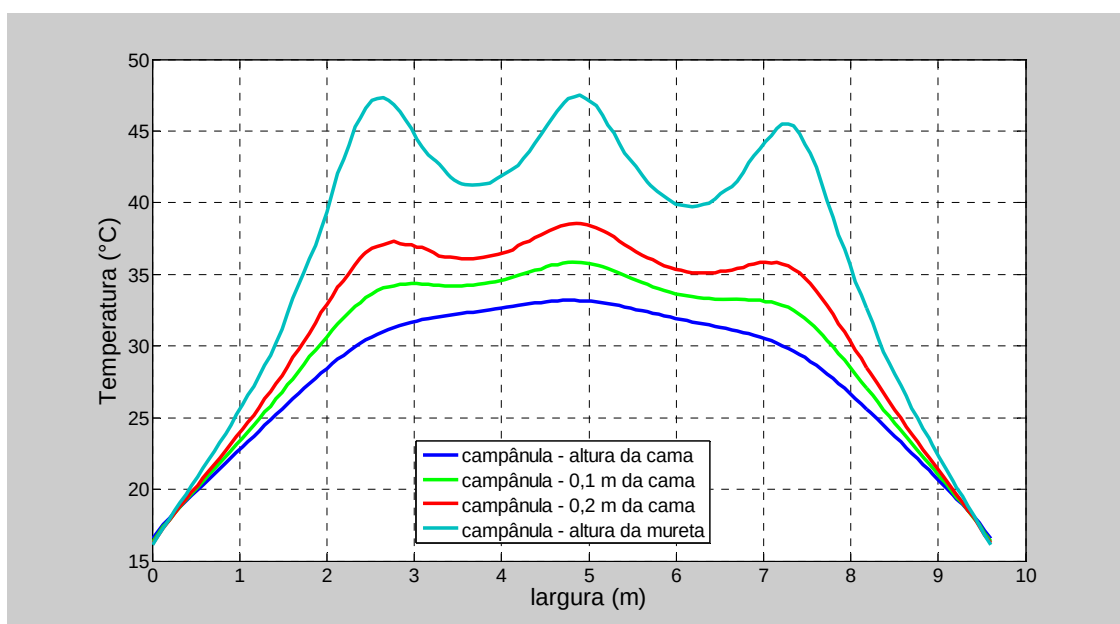


Figura A.17 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor por campânula, valor medido, dia 12 de julho de 2008 as 08 h

b) Piso

- T água de 45°C

- T ambiente de 16°C

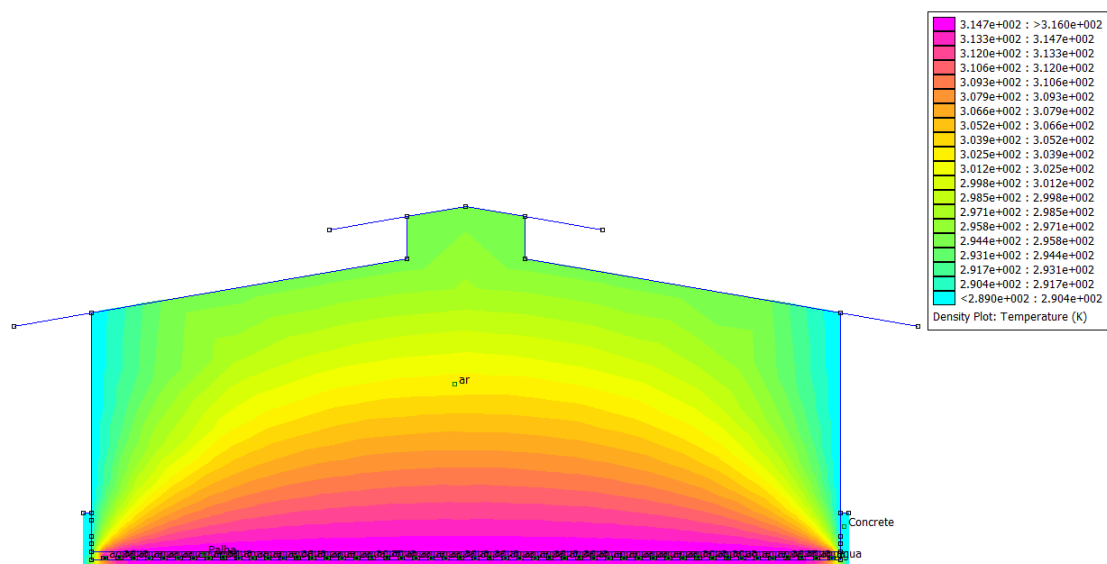


Figura A.18 – Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 12 de julho de 2008 considerando horário das 8:00

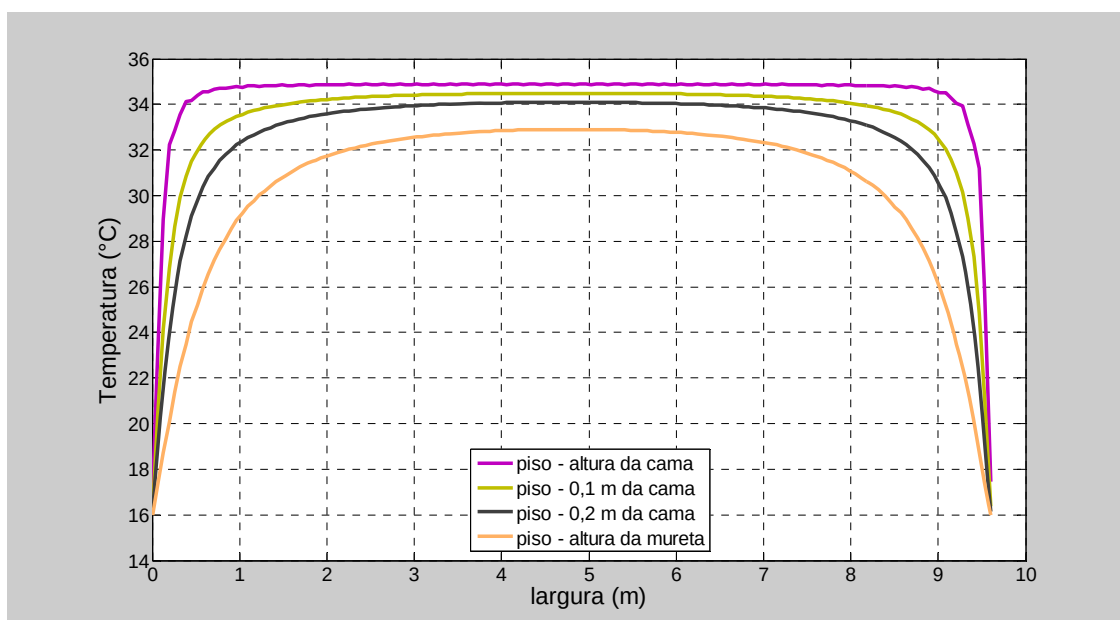


Figura A.19 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor pelo piso, valor simulado, dia 12 de julho de 2008 as 08 h

c) Comparação entre campânula e piso

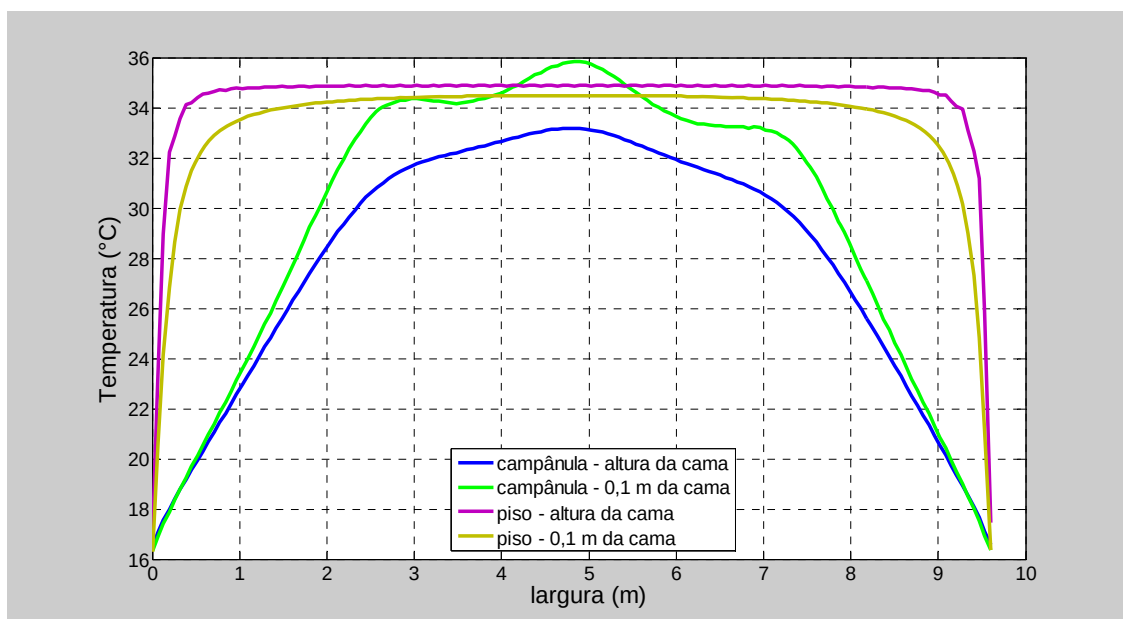


Figura A.20 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 as 8 h

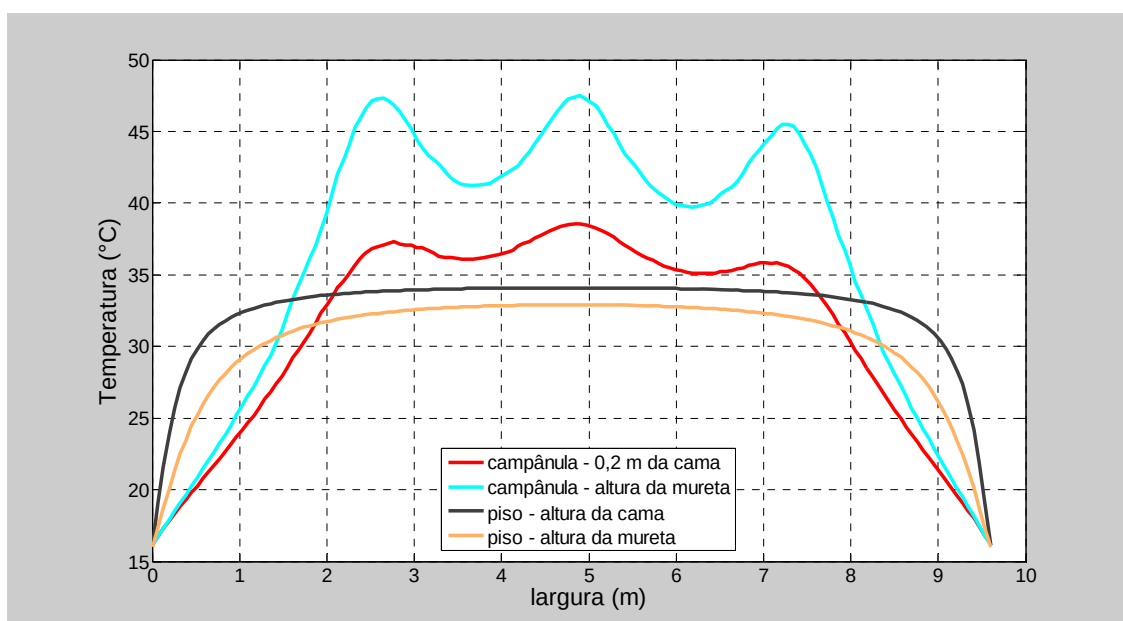


Figura A.21 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 as 8 h

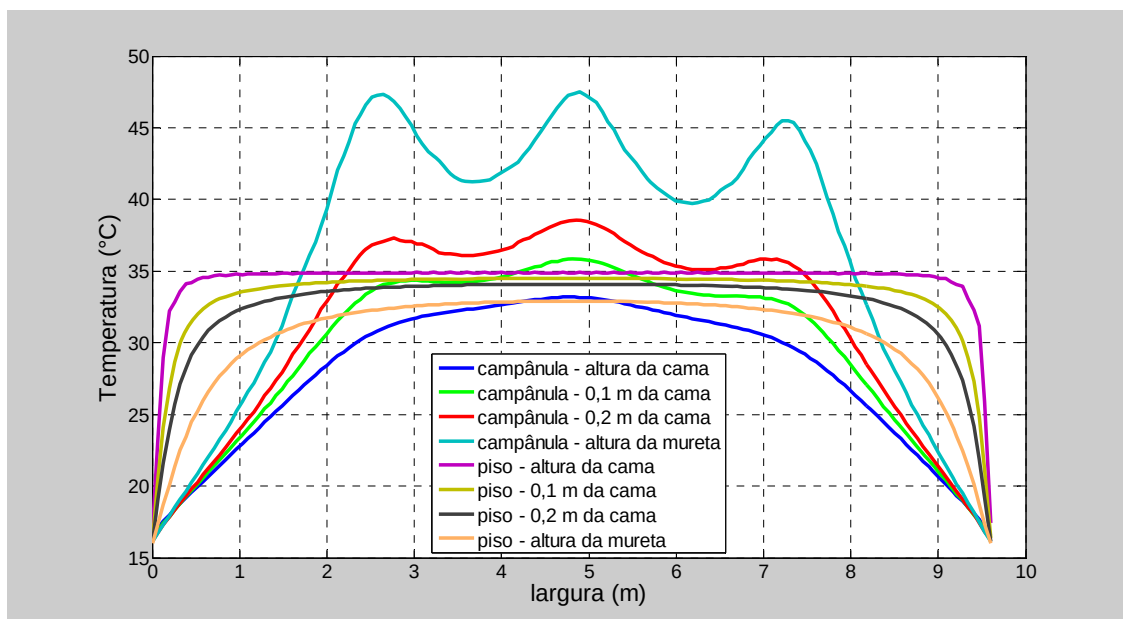


Figura A.22 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 as 8 h

1.2.2 - Simulação considerando horário das 11:00

a) Campânula

- Campânula 1 - 78°C
- Campânula 2 - 79°C
- Campânula 3 - 74°C
- T ambiente de 22°C

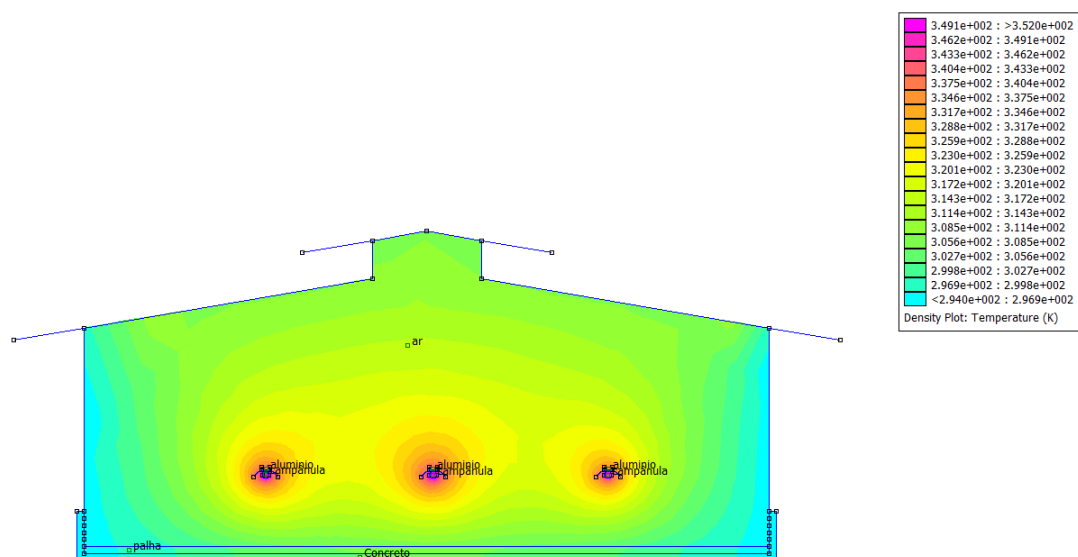


Figura A.23 – Comportamento da temperatura no galpão utilizando dados medidos no dia 12 de julho de 2008 considerando horário das 11:00

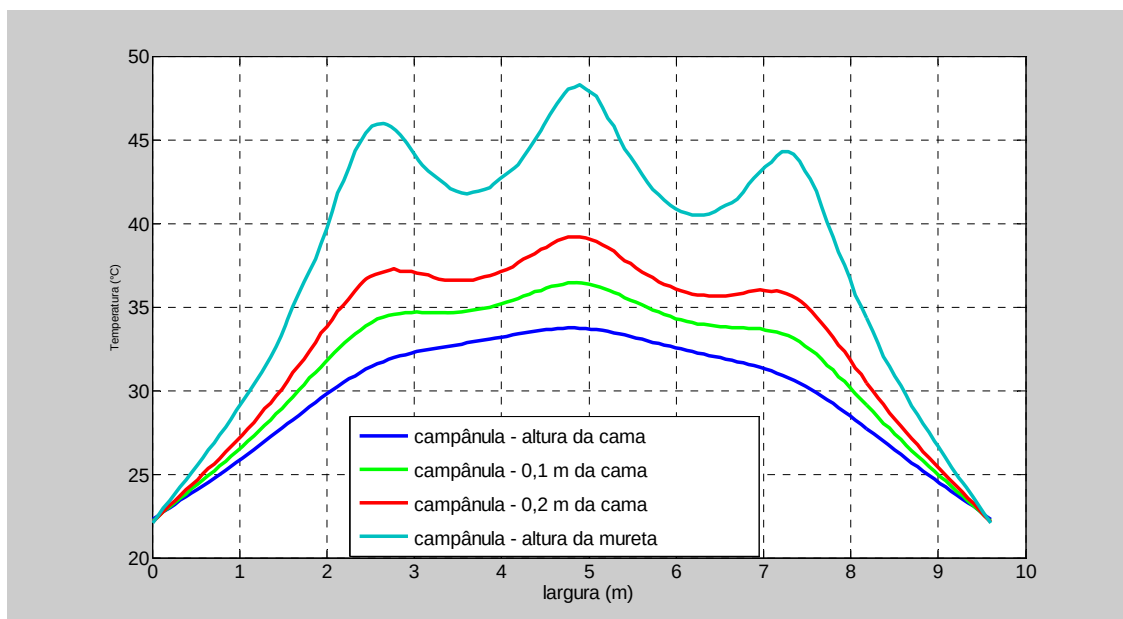


Figura A.24 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor por campânula, valor medido, dia 12 de julho de 2008 as 11 h

b) Piso

- T água 40°C

- T ambiente de 22°C

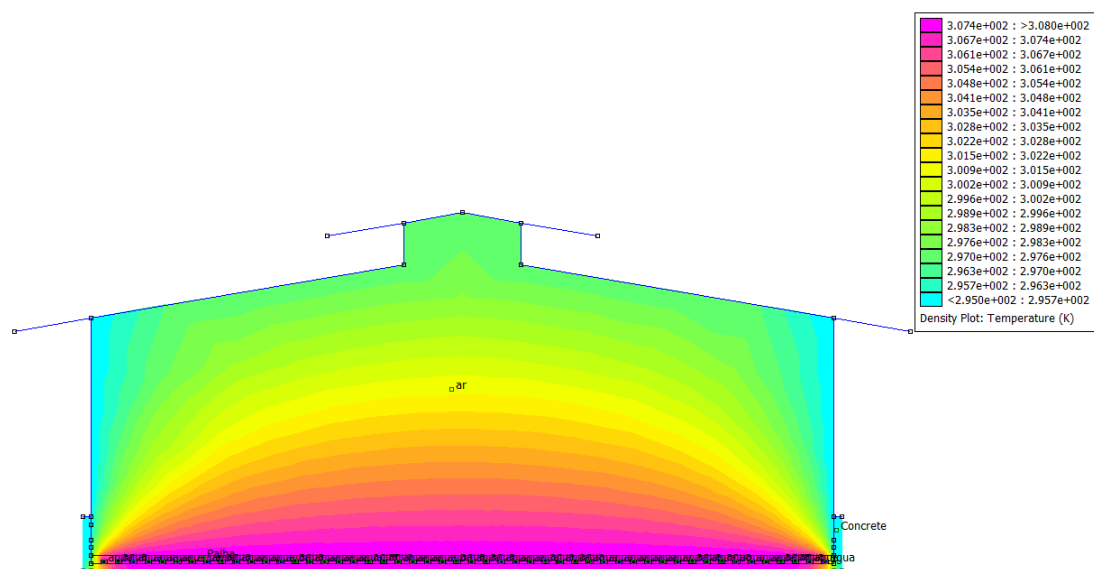


Figura A.25 – Comportamento da temperatura considerando aquecimento por serpentina baseado nos dados coletados dia 12 de julho de 2008 considerando horário das 8:00

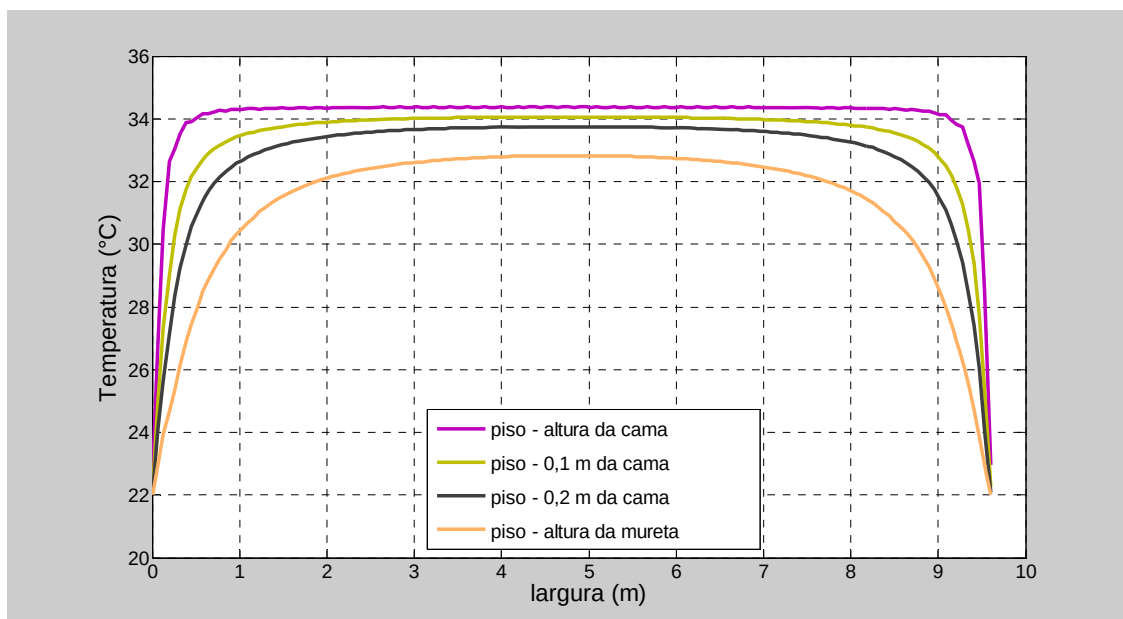


Figura A.26 – Perfil da temperatura dentro do galpão com uso de aquecedor pelo piso, valor simulado, dia 12 de julho de 2008 as 11 h

c) Comparação entre campânula e piso

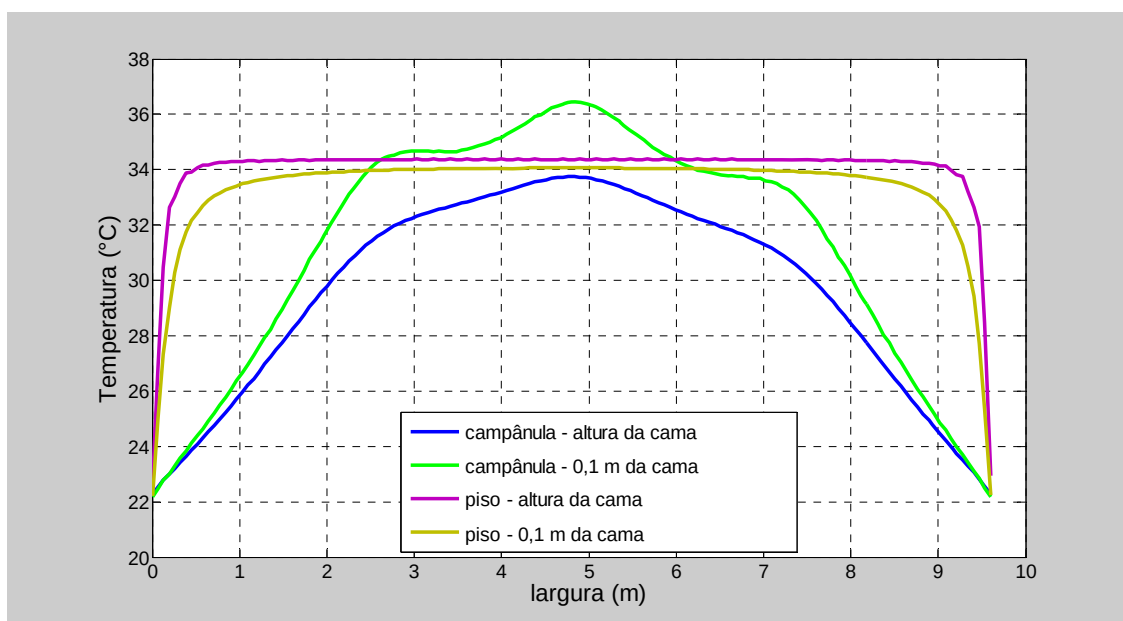


Figura A.27 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 as 11 h

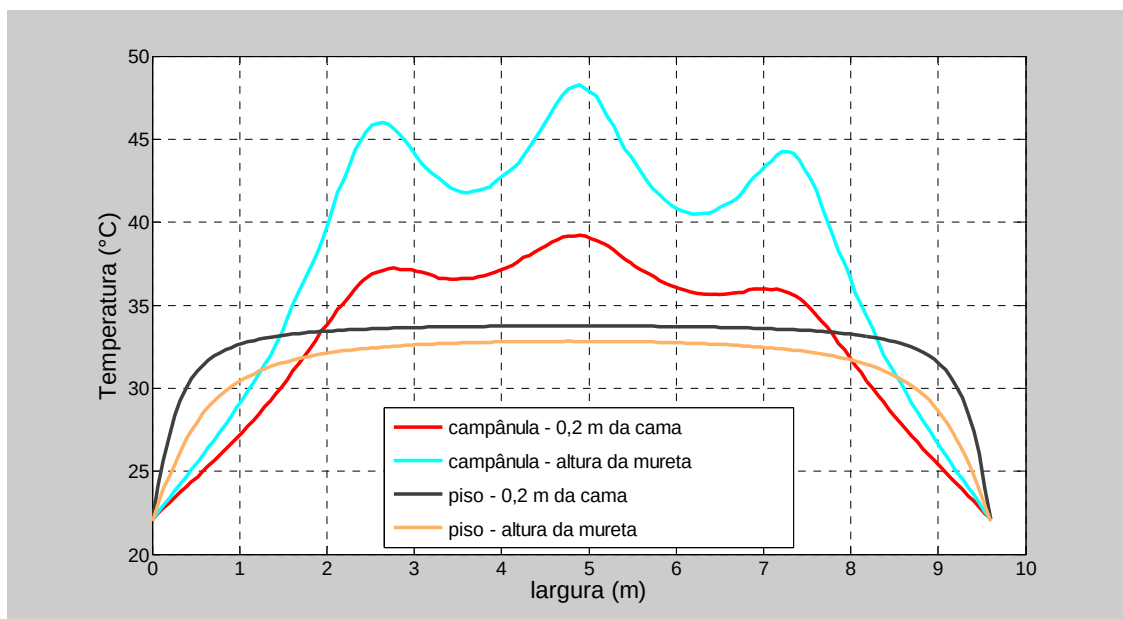


Figura A.28 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 as 11 h

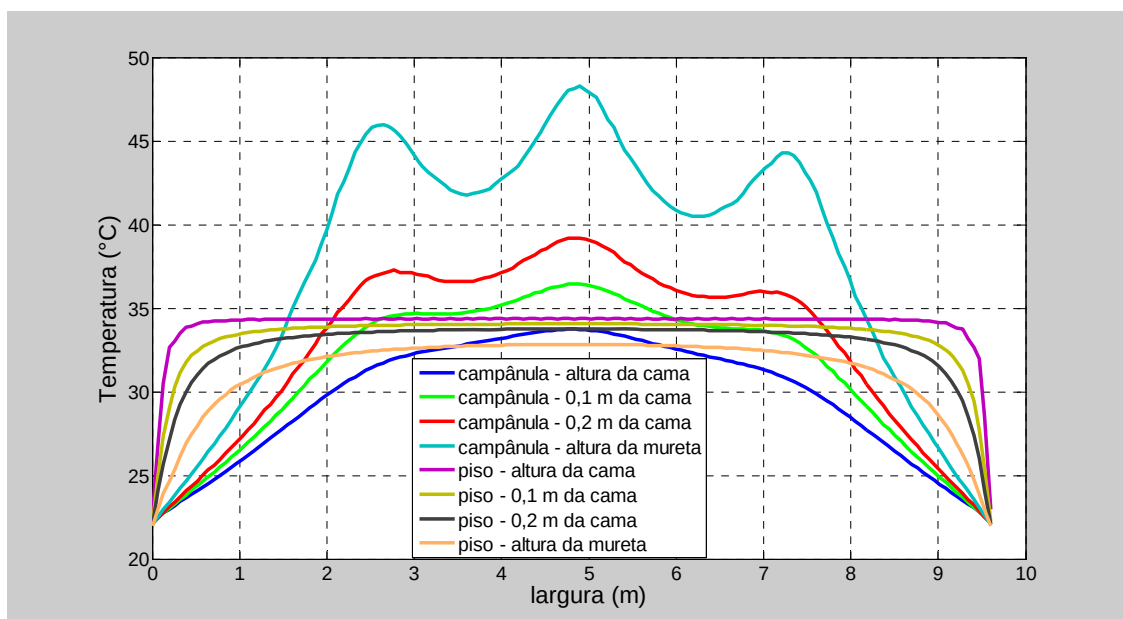


Figura A.29 – Comparação do perfil da temperatura com uso de campânulas e pelo piso dentro do galpão dia 12 de julho de 2008 as 11 h

ANEXO B

ORÇAMENTOS

Orçamento 1 - Empresa Empresa: ALUZIN Calhas Ltda - aluzincalhas@hotmail.com

- Placas de aquecimento	2x1	R\$ 544,00 un.
- Boiler de 500 litros		R\$ 1434,00 un.
- 1000 litros		R\$ 2368,00 un.
-Tubulação de cobre 32mm de diâmetro		R\$ 15,00 metro.
- Curva de 45°		R\$ 5,50 un.
- 90°		R\$ 5,20 un.
-Luva		R\$ 2,90 un.
-T		R\$ 7,60 un.
-Registro duplo		R\$ 18,00 un.
-Conector macho		R\$ 8,00 un. (2 por registro)
-Espuma isolante – Eluma - (32 cm de largura e 28mm de espessura)	3,00 metro. (só exterior)	
-Manta asfáltica 15 cm de largura		R\$ 5,00 metro (caso queira)
-Estanho + pasta		R\$ 31,00 + R\$ 6,00

Garantia de 10 anos e vida útil indeterminada. (+- 50 anos)

Orçamento 2 - <http://www.agroads.com.ar/detalle.asp?clasi=68770> acesso em 08/01/2010

-Polietileno reticulado	PEX $\Phi=32\text{mm}$	R\$ 9,18 metro
Obs: não necessita de curva		
-Luva		R\$ 2,80 un.
-T		R\$ 7,90 un.
-Registro duplo		R\$ 18,00 un.
-Conector macho		R\$ 7,70 un.

-Espuma isolante – Eluma - (32 cm de largura e 28mm de espessura) R\$ 3,00 metro.
(só exterior)

Obs: o tempo de vida útil do PEX é estimado em 50anos

Empresa em BH PEX Mais www.pexmaisbh.com.br

Orçamento 3 -Empresa: NUTRICIL - Av. Monsenhor Eduardo, 1474

Campânula a gás	R\$180,00
Campânula elétrica	R\$210,00
Botijão de Gás – vazio	R\$50,00

Investimento inicial:

Uso do cobre = Placa de aquecimento + Boiler + Tubulação de cobre + Mão de obra + Manutenção anual + Caixa d'água + Bomba de circulação pressurizadora de Água Quente = $2176 + 2368 + 6000 + 3000 + 300 + 300 + 470 = 14614$

Aquecimento com tubulação de cobre = R\$ 14614,00

Uso do PEX = Placa de aquecimento + Boiler + Tubulação de PEX + Mão de obra + Manutenção anual + Caixa d'água + Bomba de circulação pressurizadora de Água Quente = $2176 + 2368 + 3672 + 3000 + 300 + 300 + 470 = 12286$

Aquecimento com tubulação de PEX = R\$ 12286,00

Uso da Campânula a Gás = Campânula a Gás + Botijão de Gás – vazio = $540 + 150 = 690$

Aquecimento com Campânula a Gás = R\$ 690,00

Uso da Campânula Elétrica = Campânula Elétrica = 470

Aquecimento com Campânula Elétrica = R\$ 470,00

