UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VENTILAÇÃO NATURAL EM GALPÕES UTILIZANDO LANTERNINS

Ouro Preto, setembro de 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VENTILAÇÃO NATURAL EM GALPÕES UTILIZANDO LANTERNINS

AUTORA: ANA AMÉLIA OLIVEIRA MAZON

ORIENTADOR: Prof. Henor Artur de Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, setembro de 2005.

M476v Mazon, Ana Amélia Oliveira.
Ventilação natural em galpões utilizando lanternins [manuscrito]. / Ana Amélia Oliveira Marzon. - 2005.
xx, 188f. : il., color, graf., tabs.

Orientador: Prof Dr Henor Artur de Souza.
Área de concentração: Construção Metálica.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Ventilação - Teses. 3. Conforto térmico – Teses. 4. Galpões – construções – Teses. 5. Aquecimento

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

Aos meus pais, Jair e Eliana, exemplos de vida, cujo amor e dedicação são um incentivo constante à busca das minhas realizações. Obrigada pela confiança e formação recebida.

AGRADECIMENTOS

Á Deus pela vida, pelas oportunidades e por meus pais que são a razão da minha vida.

À Universidade Federal de Ouro Preto, funcionários e professores do Mestrado em Engenharia Civil, pelo crescimento pessoal e profissional.

À CAPES, pelo apoio via bolsa de estudos.

Ao professor Henor, pelo companheirismo e dedicação durante o desenvolvimento da dissertação.

Aos meus colegas do mestrado em estruturas metálicas e colegas da Sala 26, pela amizade e descontração durante todo o tempo que passamos juntos.

Ao meu primo e aluno bolsista da graduação Rodolfo, que acompanhou o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os meus amigos, em especial, Carol (Ana Carolina Andrade), amiga e irmã, pela convivência em todos os passos da nossa vida acadêmica, do pré-escolar ao mestrado.

À toda minha querida família, pelo apoio e incentivo constantes.

À todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização do meu trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....IX

LISTA DE TABELAS.....XVII

LISTA DE QUADROS.....XVIII

RESUMO.....XIX

ABSTRACT.....XX

CAPÍTULO 1 – Introdução 1

1.1. O conforto térmico.....1

1.2. Ventilação do ambiente e o conforto térmico 2

1.3. Justificativa.....5

1.4. Objetivos 6

1.4.1. Geral 6

1.4.1. Específicos.....6

1.5. Metodologia adotada.....6

1.6. Estrutura do trabalho.....7

CAPÍTULO 2 – Conforto Humano 9

2.1. Interação térmica entre o homem e o meio ambiente 9

2.2. Importância do conforto térmico 18

2.2.1. Satisfação.....18

2.2.2. Conservação de energia.....18

2.2.3. O estabelecimento de padrões.....19

2.3. Conforto térmico e produtividade.....20

CAPÍTULO 3 – Ventilação em Edificações 21

3.1. Considerações gerais 21
3.2. A necessidade da ventilação 26
3.3. Tipos de ventilação natural 30
3.3.1. Ventilação pelo efeito chaminé 31
3.3.2. Ventilação Cruzada 34
3.3.3. Ventilação Unilateral 35
3.4. Modelagem matemática da ventilação natural 40
3.4.1. Vazão de ar através de uma abertura 42
3.4.2. Forças geradoras da ventilação natural 43
3.4.3. Coeficiente de pressão 47
3.4.4. Obtenção da vazão e da área de abertura 48
3.5. Índice de ventilação natural – IVN 53
3.5.1. Cálculo do R_{aa} 55
3.5.2. Valores de R_{da} 55
3.5.3. Valores de R_{md} para os aparatos mais usuais 55
3.6. Relação entre o algoritmo para o cálculo das áreas de aberturas e o IVN 57
3.7. Recomendações de projeto 57
3.8. Equações governantes 59

CAPÍTULO 4 – Galpões 61
4.1. Considerações gerais 61
4.2. O galpão e sua adequação aos diferentes climas do Brasil 61
4.3. Estratégias construtivas para modificar favoravelmente o ambiente das instalações 63
4.3.1 Orientação 63
4.3.2. Disposição das construções 64
4.3.3. Proteção contra a insolação 64
4.3.4. Oitões 64
4.3.5. Coberturas 65
4.3.6. Inclinação do telhado 65
4.3.7. O emprego de lanternins 65
4.3.8. Influência da vizinhança – Paisagismo circundante – Quebra-vento 68

4.4. Conforto térmico 68
4.4.1. Iluminação natural 69
4.4.2. Ventilação natural 70
4.4.2.1. Pé direito 73
4.4.2.2. Aberturas para passagem do ar 75
4.4.2.3. Localização das aberturas 76
4.4.2.4. Área total das aberturas 77
4.4.2.5. Área efetivamente disponível para a passagem do ar 77
4.4.2.6. Distância entre os elementos que formam os canais de passagem do ar e presença de tela protetora 78
4.4.2.7. Direcionamento do fluxo de ar durante sua passagem pelo aparelho 79
4.5. Métodos existentes para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios 80
4.6. Uniformidade da distribuição das saídas de ar quente sobre o telhado 80
4.7. Recomendações e soluções construtivas 88

CAPÍTULO 5 – Estudo de Caso 92
5.1. Aplicação da metodologia de cálculo apresentada 92
5.2. Abordagem numérica 95
5.2.1. Dificuldades na simulação de escoamentos em ambientes internos 96
5.2.2. Programa computacional utilizado 97
5.2.3. Solução numérica 98
5.3. Resultados obtidos 100
5.3.1. Verificação da malha de discretização 101
5.3.2. Casos estudados 104
5.3.2.1. Caso 1 104
5.3.2.2. Caso 2 106
5.3.3. Outras configurações de galpão analisadas 107
5.3.3.1. Configuração A 108
5.3.3.2. Configuração B 110
5.3.3.3. Configuração C 112

5.3.4. Influência da posição de aberturas 115
5.3.5. Diferentes alturas das aberturas do lanternim 117
5.3.6. Influência do pé-direito 121

CAPÍTULO 6 – Conclusões 128
6.1. Sugestões para pesquisas futuras 129

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 130

ANEXO I – Algoritmo de cálculo da área de abertura do lanternim 136

ANEXO II – Definições utilizadas para a definição do conforto térmico 166

ANEXO III – Resultados numéricos 172

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Carta de Olgyay 11
Figura 2.2 – Diagrama de Givoni 12
Figura 2.2 – Relação da percentagem de pessoas insatisfeitas em função do voto médio estimado – PMV 17

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Porcentagem da área de piso ocupada por soluções de ventilação 23
Figura 3.2 – Porcentagem por custo de investimento para a instalação de soluções de ventilação 24
Figura 3.3 – Porcentagem por custo de manutenção e consumo elétrico de soluções de ventilação 24
Figura 3.4 – Posição das aberturas x áreas pouco ou mal ventiladas 29
Figura 3.5 – Obstáculos x mudança de direção do vento 29
Figura 3.6 – O efeito de beirais e venezianas na direção do vento 30
Figura 3.7 – (a) Distribuição da pressão interna e externa para o fluxo devido ao efeito chaminé. (b) fluxo através de duas aberturas: uma superior e uma inferior. (c) fluxo através de uma única abertura 31
Figura 3.8 – Ventilação pelo efeito chaminé numa edificação de um só pavimento 33
Figura 3.9 – Ventilação pelo efeito chaminé numa edificação com mais de um pavimento 33
Figura 3.10 – Ventilação cruzada numa edificação de um só pavimento 34
Figura 3.11 – Esquema de ventilação cruzada global numa edificação com mais de um pavimento 35
Figura 3.12 – Casos típicos de ventilação natural em galpões 36
Figura 3.13 – Ventilação unilateral numa edificação de um só pavimento 36
Figura 3.14 – Esquema de ventilação unilateral numa edificação com mais de um pavimento 37

Figura 3.15 – Esquema de estratégias de ventilação naturais combinadas numa edificação com mais de um pavimento 38
Figura 3.16 – Ventilação combinada através do átrio centralmente colocado numa edificação com mais de um pavimento 38
Figura 3.17 – Ventilação combinada em um átrio numa edificação com mais de um pavimento 39
Figura 3.18 – Vento em oposição ao efeito chaminé 40
Figura 3.19 – Exemplo de ventilação natural de uma edificação térrea..... 40
Figura 3.20 – Diferenciais de pressão causados pela ação do vento e da temperatura ... 42
Figura 3.21 – Distribuição de pressões internas e externas ao longo da altura de um edifício 42
Figura 3.22 – (a) força do vento auxilia o efeito chaminé; (b) força do vento não auxilia o efeito chaminé com fluxo ascendente; e (c) força de vento não auxilia o efeito chaminé com fluxo descendente 46
Figura 3.23 – Definição do coeficiente de pressão 47
Figura 3.24 – Cotas e parâmetros físicos para o ar 49
Figura 3.25 – Valores de R_{md} para os aparelhos tipo lanternim mais encontrados no mercado..... 56
Figura 3.26 – Efeito de aberturas desiguais..... 58

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Esquema para determinação das dimensões do lanternim..... 67
Figura 4.2 – Ventilação do ático 67
Figura 4.3 – Passagem do ar fresco no sistema lanternim..... 68
Figura 4.4 – Disposição de aberturas que permite a iluminação natural e a ventilação natural..... 69
Figura 4.5 – Prédio com 20% de iluminação tipo lanternim 70
Figura 4.6 – Efeito chaminé..... 72
Figura 4.7 – Utilização de forro com a finalidade de bloquear a energia radiante 74
Figura 4.8 – Localização das aberturas 76

Figura 4.9 – Redução da área da abertura destinada à passagem de ar decorrente da utilização de uma veneziana 78
Figura 4.10 – (a) aparelho dotado de aletas que formam canais para passagem do ar tipo veneziana e (b) aparelho que formam os canais de passagem do ar entre o seu próprio corpo e a superfície do telhado 79
Figura 4.11 – Direcionamento do fluxo de ar durante a passagem pelo aparelho 80
Figura 4.12 – Fluxo do ar aquecido sem a presença de obstáculos..... 81
Figura 4.13 – Fluxo do ar aquecido com a presença de um obstáculo horizontal 81
Figura 4.14 – Prédio de IVN alto com telhas planas de concreto dotado de linhas de saída de ar quente, uniformemente distribuídas sobre o telhado 82
Figura 4.15 – Prédio com ventilação natural deficiente pela manhã 83
Figura 4.16 – Prédio com ventilação natural deficiente no meio dia..... 84
Figura 4.17 – Prédio com ventilação natural eficiente o dia inteiro 85
Figura 4.18 – Ventilação natural eficiente no caso de incêndio 87
Figura 4.19 – Tipos de lanternins..... 90

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – (a) Geometria de cada módulo dos galpões analisados; (b) Detalhe do lanternim 92
Figura 5.2 – Relação entre a vazão de entrada de ar e as áreas de saídas de ar..... 94
Figura 5.3 – Relação entre a diferença de temperatura e a área das aberturas de saída 94
Figura 5.4 – Elemento FLUID141 98
Figura 5.5 – Configuração A 99
Figura 5.6 – Configuração B..... 99
Figura 5.7 – Configuração C..... 100
Figura 5.8 – Malha bidimensional triangular no domínio de cálculo 101
Figura 5.9 – Perfil da temperatura do ar interno – Malha A..... 102
Figura 5.10 – Perfil da temperatura do ar interno – Malha B..... 102
Figura 5.11 – Perfil da temperatura do ar interno – Malha C..... 103
Figura 5.12 – Configuração do fluxo do ar interno – Malha B..... 104

Figura 5.13 – Distribuição da temperatura interna – Caso 1 105
Figura 5.14 – Distribuição da velocidade interna – Caso 1 105
Figura 5.15 – Distribuição da temperatura interna – Caso 2 106
Figura 5.16 – Distribuição da velocidade interna – Caso 2 107
Figura 5.17 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s 108
Figura 5.18 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para V_{entr} = 0,3 m/s 109
Figura 5.19 – Variação da velocidade do ar no lanternim para a configuração A 109
Figura 5.20 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s 110
Figura 5.21 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s 111
Figura 5.22 – Variação da velocidade do ar no lado direito do lanternim para a configuração B 111
Figura 5.23 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s 112
Figura 5.24 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s 113
Figura 5.25 – Variação da velocidade do ar no lado esquerdo do lanternim para a configuração C 113
Figura 5.26 – Variação da velocidade do ar no lado direito do lanternim para a configuração C 114
Figura 5.27 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 115
Figura 5.28 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 116
Figura 5.29 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 116
Figura 5.30 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 117

Figura 5.31 – Perfil da temperatura interna, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída de 0,5 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s..... 118
Figura 5.32 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura entrada e uma abertura de saída de 0,5 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s..... 119
Figura 5.33 – Perfil da temperatura interna, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída de 0,7 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s..... 119
Figura 5.34 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura entrada e uma abertura de saída de 0,7 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s..... 120
Figura 5.35 – Perfil da temperatura interna, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída de 0,9 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s..... 120
Figura 5.36 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura entrada e uma abertura de saída de 0,9 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s..... 121
Figura 5.37 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 5 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 122
Figura 5.38 –Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 10 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 122
Figura 5.39 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 15 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 123
Figura 5.40 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 5 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 124
Figura 5.41 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 5 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 124
Figura 5.42 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 10 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 125
Figura 5.43 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 10 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 125

Figura 5.44 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 15 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 126
Figura 5.45 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 15 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 126

ANEXO II

Figura B.1 – Atividades metabólicas e suas taxas expressas em met 168
Figura B.2 – Escala diferencial de percepção térmica 170
Figura B.3 – Escala de preferência térmica 171
Figura B.4 – Escala de preferência térmica 171

ANEXO III

Figura C.1 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s 172
Figura C.2 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s 173
Figura C.3 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 173
Figura C.4 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s 174
Figura C.5 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s 174
Figura C.6 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s 175
Figura C.7 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s 175
Figura C.8 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s 176

Figura C.9 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 176
Figura C.10 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s 177
Figura C.11 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s 177
Figura C.12 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s 178
Figura C.13 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s 178
Figura C.14 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s 179
Figura C.15 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 179
Figura C.16 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s 180
Figura C.17 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s 180
Figura C.18 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s 181
Figura C.19 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s 181
Figura C.20 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 182
Figura C.21 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s 182
Figura C.22 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s 183
Figura C.23 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s 183
Figura C.24 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 184

Figura C.25 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s 184
Figura C.26 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s 185
Figura C.27 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s 185
Figura C.28 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s 186
Figura C.29 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s 186
Figura C.30 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s 187
Figura C.31 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s 187
Figura C.32 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s 188

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Escala de sensação térmica da ASHRAE 16

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Redutor devido ao atrito e a presença de tela protetora - R_{da} 56

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Valores mínimos para o pé direito do edifício..... 74

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Galpões analisados X Resultados obtidos 93

ANEXO II

Tabela B.1 – Taxa metabólica para diferentes atividades 168
Tabela B.2 – Índice de resistência térmica para vestimentas 169
Tabela B.3 – Escalas de percepção existentes 170

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 – Opções de soluções construtivas de acordo com as fontes internas de calor.....89
Quadro 4.2 – Tipos de soluções construtivas destinadas à ventilação natural 90
Quadro 4.3 – Escolha da solução adequada.....91

RESUMO

A ventilação natural no interior das edificações proporciona condições favoráveis de conforto térmico aos ocupantes, além da melhoria da qualidade do ar interno. O projeto arquitetônico, mesmo quando otimizado em relação aos vários níveis de conforto, nem sempre é suficiente para atingir plenamente a satisfação dos usuários de uma edificação. Para se estar satisfeito com a arquitetura, esta precisa ser resultado de um conjunto de elementos que incluem o entorno, o projeto e também o uso racional dos ambientes construídos. Estes elementos devem estar associados ao conforto e satisfação dos usuários e a funcionalidade. No caso da construção de galpões industriais e edificações comerciais, é usual construir aberturas nas coberturas (lanternins) além daquelas aberturas nas fachadas, para se obter iluminação natural e também melhorar a ventilação natural. A eficiência da ventilação natural numa edificação está associada ao número, posição, tipo e tamanho das aberturas existentes para a passagem de ar (entrada e saída) e também à ação combinada das forças do vento e das diferenças de temperatura (efeito chaminé). Este trabalho enfoca a ventilação natural em galpões por meio de lanternins nas coberturas. Apresenta-se uma modelagem matemática, associada com o conceito do índice de ventilação natural, para o cálculo da vazão de ar necessária para uma ventilação natural adequada em edificações e também para o cálculo das áreas das aberturas necessárias para suportar uma dada vazão. Fazem-se estudos de casos envolvendo diferentes configurações de galpões, calculando-se, a partir da metodologia apresentada, a altura das aberturas de saída de ar no lanternim. Ainda por meio de uma abordagem numérica, analisa-se o fluxo de ar no interior do galpão e o perfil da temperatura interna resultantes da simulação. Os resultados obtidos levaram em consideração o grau de conforto térmico necessário no interior do galpão e comprovam a abertura necessária do lanternim calculada para se alcançar as condições internas de conforto. A eficiência do lanternim é função do pé-direito e do tamanho e altura das aberturas. Outro parâmetro importante, na eficiência do lanternim, é a distância da abertura do mesmo até as paredes laterais do galpão, que deve ser no máximo de 5 m.

ABSTRACT

The natural ventilation inside constructions allows both favorable conditions of thermal comfort to the occupants and quality improvement of the internal air. The architectural project, even when optimized in relation to the several comfort levels, is not always enough fully to meet the construction users' satisfaction. Architecture leads to satisfaction when it is the result of a group of elements that include the closing, the project and the rational use of the built places. These elements should be associated to users` comfort and satisfaction and functionality. In the case of building industrial hangars and commercial facilities, it is usual to construct openings in the roofs (skylight with an entrance and an exit), besides those openings in the facades. The objective of the openings is to obtain natural illumination and also to have a better natural ventilation. The efficiency of the natural ventilation in a building is associated to the number, position, type and size of the existing openings for the passage of air. It is also associated to the combined action of the wind forces and of the temperature differences. This dissertation focuses the natural ventilation in hangars through the use of skylights in the coverings. It presents a mathematical modeling, associated to the concept of natural ventilation index. The first part of the modeling is the calculation of both the necessary air flow for an adequate natural ventilation in buildings and the areas of the necessary openings to support a given flow. The dissertation also includes case studies of different configurations of hangars, carried out with the objective testing the modeling. For each one the calculations, the height of the openings is presented. A numerical simulation was used to analyse both the air flow inside the hangar and the internal temperature profile. The air flow and the temperature profile were obtained from the simulation. The obtained results took into account the degree of necessary thermal comfort inside the hangar. The results present the necessary size of the opening to reach the internal adequate conditions of comfort. The skylight`s efficiency is function of the height of the hangar and of the size and height of the openings.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O conforto térmico

A preocupação do homem com relação a seu bem estar e conforto é diretamente proporcional à evolução da humanidade, ou seja, quanto mais evoluídas se tornam as pessoas, mais exigentes ficam com relação a seu conforto e bem estar.

Em sua relação com o ambiente físico, o organismo humano, respondendo a estímulos provenientes do meio, tais como luz, som, calor, ventos, ambiente construído, entre outros, busca adaptar-se ao entorno imediato utilizando o mínimo de energia possível, através de um conjunto de reações de ordem fisiológica e psicológica. Estas reações são, em geral, respostas às condições ambientais que um determinado espaço arquitetônico pode propiciar. Contudo, a sensação de conforto não é dependente apenas dos estímulos provenientes do ambiente construído e/ou utilizado pelo homem, mas também das experiências pessoais anteriores de cada indivíduo, que, espontaneamente orientam as reações em função de suas necessidades, expectativas e aspirações.

Em princípio, os estímulos do meio podem ser mensurados com mais facilidade que as sensações, pois estas correspondem ao sentimento e à avaliação subjetiva sobre o ambiente que as pessoas ocupam. As condições de conforto ambiental e, conseqüentemente, a sensação de conforto, expressadas pela satisfação com o ambiente ocupado pelo homem, envolvem um conjunto significativo de fenômenos inter-relacionados, que podem ser agrupados em um conjunto representativo de exigências mínimas.

Em linhas gerais, estas exigências correspondem às características gerais que um ambiente deve apresentar para o desempenho adequado e confortável de diversas atividades humanas, isto é, exigência de conforto higrotérmico, relativo às condições de temperatura e umidade do ar; exigência de conforto visual, relativo aos aspectos relacionados à iluminação, aparência dos ambientes, envoltória e aberturas para o

exterior; exigência de conforto acústico, relativo aos níveis de ruído, ao isolamento acústico e reflexão das superfícies; exigência de conforto táctil, relativo às condições de eletricidade estática, rugosidade, umidade e temperatura das superfícies e exigências atmosféricas, relativas à qualidade do ar e presença de odores (NETO, 2003).

O conforto térmico tem sido durante as últimas décadas, objeto de muitas pesquisas na tentativa de melhor se compreender como essa situação pode ser atingida, de que maneira ela se processa, quais as variáveis que envolvem, quais são os índices mais relevantes, quais seus efeitos sobre a saúde e produtividade humana e também quais os fatores que a ela podem ser relacionados (FANGER, 1972; GRIEFAHN et al, 2001; RUAS, 2002; RAJA et al., 2001; NICOL & HUMPHREYS, 2002; DEAR & BRAGER, 2002; KAYNAKLI & KILIC, 2004, FERIALDI & WONG, 2004).

Especificamente a pesquisa em conforto ambiental nas edificações tem procurado tomar uma nova atitude frente à arquitetura. Ela procura definir uma abordagem do projeto da construção desde seu início em ligação íntima com o lugar, seu entorno, o clima e os hábitos construtivos locais, preservando a liberdade de escolha, mas associando-a a sua responsabilidade ambiental (EFTEKHARI et al., 2001).

A arquitetura do século XX se caracteriza, talvez, ao menos do ponto de vista histórico, por ter dado exagerada importância à tecnologia. Em função disto está a dependência atual em relação ao controle mecânico do ambiente interior, em detrimento da exploração dos fenômenos climáticos naturais para satisfação das exigências humanas de conforto.

1.2. Ventilação do ambiente e o conforto térmico

Em regiões com clima quente e úmido a ventilação natural deve ser tida como principal objetivo no projeto das edificações. A importância da ventilação natural se acentua nas edificações que não têm a possibilidade de utilizar equipamentos mecânicos de

climatização para a obtenção de conforto térmico, como é o caso das habitações populares, que dependem basicamente de um bom projeto bioclimático.

O movimento do ar num ambiente interfere no conforto térmico das pessoas devido a sua influência nos processos de troca de calor do corpo com o meio. Essa influência pode ser benéfica quando o aumento da velocidade do ar provoca uma desejável aceleração nos processos de perda de calor do corpo, ou prejudicial, quando a perda de calor é indesejável e provoca o resfriamento excessivo do corpo com um todo, ou de uma de suas partes.

O movimento do ar pode também influenciar negativamente na aceitação de um ambiente devido à sensação desagradável provocada pela colisão de ar em alta velocidade contra as pessoas ou por provocar a movimentação indevida de materiais.

A ventilação desempenha uma função fundamental na manutenção da saúde e do bem-estar humano. Na saúde, age mantendo as concentrações de contaminantes nos ambientes em níveis seguros. No bem-estar propicia, em função das necessidades, as condições adequadas às troca de calor do corpo. Na segurança do homem é essencial, quando mantém a concentração de elementos inflamáveis ou explosivos fora da faixa de inflamabilidade ou explosividade.

Assim, ventilar um local adequadamente significa fornecer e/ou retirar ar desse local de forma a satisfazer as exigências humanas quanto à saúde, à segurança e à expectativa de bem-estar, no que se refere ao conforto térmico.

A velocidade aceitável do ar em interiores não climatizados varia de 0,5 m/s a 2,5 m/s. Este limite é baseado em problemas práticos, como desordem de papéis sobre mesas, por exemplo, ao invés de ser baseado em exigências de conforto. Para galpões este limite pode ser ampliado sem a ocorrência de qualquer problema prático, em função do seu perfil de ocupação.

Com o intuito de evitar os efeitos negativos do movimento do ar no conforto térmico das pessoas em ambientes climatizados, a norma americana ASHRAE 55: 2004 estabelece para atividades sedentárias e temperaturas dentro do intervalo de conforto, limite de velocidade média do ar de 0,15 m/s no período de inverno e de 0,25 m/s no verão, sendo que no verão a norma permite estender progressivamente esse limite até 0,8 m/s, quando o intervalo de conforto, da mesma forma, é estendido até a temperatura ambiente de 28 °C.

A norma ISO 7730: 1994 é mais restritiva que a ASHRAE 55: 2004 no que se refere à utilização de maiores velocidades do ar para compensar temperaturas ambientes mais elevadas. Isto é especialmente importante para países de clima quente como o Brasil em que o aumento da velocidade do ar poderia ser uma solução economicamente viável para obtenção do conforto térmico no verão.

O vínculo entre a ventilação natural e os níveis de conforto têm sido estudados por muitos pesquisadores e recentes estudos experimentais demonstraram que o conforto térmico em uma edificação pode ser alcançado sem o emprego da ventilação mecânica na maioria dos dias de verão (EFTEKHARI et al., 2001; ALLARD et al., 2003; PRIYADARSINI et al., 2003).

Alguns resultados especialmente interessantes para o caso de ambientes não condicionados foram os dos trabalhos de Rohles et al. (1983), Tanabe & Kimura (1994) e Scheatzle et al. (1989), que testaram, para atividades sedentárias, temperaturas superiores ao intervalo de conforto de verão e condições de intensidade de turbulência do ar semelhantes às normalmente encontradas nos ambientes ventilados, e concluíram que velocidades da ordem 0,8 m/s ou maiores podem ser adotadas para compensar temperaturas superiores a 26 °C, como adotado pela ASHRAE 55: 2004. No estudo com ventiladores de teto (alto nível de turbulência) e velocidade média de 1 m/s, o limite de conforto pode ser estendido para 29 °C e com ventiladores de teto e alta temperatura é possível obter o mesmo nível de conforto que em temperaturas menores sem ventilação.

Vianna (2001) realizou um levantamento do estado da arte em ensino e pesquisa na área de conforto ambiental no Brasil até 2001, relacionando trabalhos nas sub-áreas de conforto térmico, ventilação natural, iluminação natural e artificial e acústica arquitetônica e urbana. Neste levantamento o autor apresenta os dados referentes à produção acadêmica nacional na área de conforto ambiental, referente a dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos científicos apresentados em eventos da área e artigos em revistas indexadas.

A norma NBR 15520: 2005 trata do desempenho térmico de edificações e apresenta, além do zoneamento bioclimático brasileiro, diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social e os métodos de cálculos dos parâmetros mais relevantes na avaliação do desempenho térmico de um ambiente construído.

1.3. Justificativa

O melhoramento da ventilação de uma edificação pode ser justificado uma vez que a qualidade do ar interno pode afetar a produtividade das pessoas além de causar doenças. A velocidade de circulação do ar, especialmente nas zonas onde se encontram as pessoas no interior da edificação, é uma das variáveis mais importantes do conforto térmico. Uma circulação natural de ar adequada, dentro de um ambiente construído, além de auxiliar na diminuição do gradiente térmico contribui para a renovação do ar interno que, dependendo do perfil de ocupação do ambiente, pode ser prejudicial à saúde. A velocidade de circulação do ar e as temperaturas das superfícies internas são, dentre as variáveis do ambiente que contribuem para o conforto térmico em épocas de calor, aquelas com as quais estratégias arquitetônicas, dentro de certos limites, podem ser modificadas sem o emprego de equipamentos mecânicos. Neste sentido uma ventilação adequada pelas coberturas, através de lanternins, pode ser uma alternativa eficiente. O emprego de laternins pode ser ainda mais importante quando se trata de galpões industriais e edificações comerciais com grandes coberturas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Geral

Estudo da ventilação natural em galpões industriais, estruturados em aço, com o uso de lanternins nas coberturas.

1.4.2. Específicos

As seguintes etapas são realizadas:

- Cálculo das aberturas necessárias em função da vazão de entrada do ar, da configuração de aberturas e do gradiente de temperatura.

- Avaliação da influência da configuração das aberturas utilizadas no fluxo interno de ar e no perfil interno de temperatura.

- Avaliação do fluxo de ar no interior do galpão para algumas configurações de aberturas nas fachadas e de lanternins na cobertura.

- Análise do projeto e do dimensionamento corretos dos lanternins.

1.5. Metodologia adotada

Para o estudo da ventilação em galpões divide-se a metodologia adotada em duas etapas seqüenciais: uma primeira, de abordagem analítica simples e uma segunda, de abordagem numérica.

Por meio de uma modelagem matemática evidencia-se um algoritmo de cálculo da vazão de ar necessária e/ou área de abertura de saída do ar, para uma ventilação natural

eficiente levando-se em conta o conceito do índice de ventilação natural. Com a utilização de um código matemático, tipo MAPLE, dimensiona-se o tamanho de laternins, observando-se o grau de conforto proporcionado pelo ambiente ao seu usuário.

Com uma modelagem numérica e com a utilização do programa computacional ANSYS simula-se o fluxo de ar no interior dos galpões e também o perfil de temperatura interna, em função da configuração de aberturas utilizada. Nesta análise são identificadas as variáveis mais relevantes para o dimensionamento dos lanternins.

1.6. Estrutura do trabalho

Tendo em vista os objetivos deste estudo, estudam-se inicialmente os aspectos que influenciam a ventilação natural e que, consequentemente levam a um adequado conforto térmico no interior dos galpões. A partir daí analisa-se diferentes configurações de galpões por meio de análises matemáticas e numéricas. Desta forma, o trabalho está distribuído em 6 capítulos e 3 anexos.

No capítulo 1 apresentam-se de forma sucinta, os principais aspectos que proporcionam a obtenção do conforto térmico nas edificações, a justificativa do trabalho, seus objetivos e a metodologia utilizada na realização do mesmo.

No capítulo 2 faz-se uma abordagem geral sobre o conforto térmico, apresentando a interação térmica do homem com o meio ambiente, a importância do conforto térmico e a influência do conforto na produtividade.

No capítulo 3 é feita uma apresentação sobre a ventilação natural em edificações levando-se em conta a necessidade da ventilação, os tipos de ventilação natural, a modelagem matemática da ventilação natural e a obtenção de uma metodologia para o dimensionamento de lanternins que envolve a relação entre o algoritmo para o cálculo

das áreas de aberturas desenvolvido por Clezar & Nogueira (1999) e o Índice de Ventilação Natural (IVN), desenvolvido por Sclgliano & Hollo (2001).

No capítulo 4 trata-se de informações sobre galpões, englobando estratégias construtivas para modificar favoravelmente o ambiente dos mesmos; os dois fatores que influenciam diretamente a ventilação natural nos galpões, o pé-direito e a as aberturas e algumas recomendações e soluções construtivas.

No capítulo 5 apresentam-se os modelos físicos dos galpões analisados por meio da modelagem matemática e das análises numéricas, bem como os resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões das análises realizadas, e também sugestões para trabalhos futuros.

No Anexo I é apresentado o algoritmo de cálculo no programa MAPLE, para a obtenção da área de abertura do lanternim.

No Anexo II apresentam-se as definições básicas utilizadas no estudo do conforto térmico dentro de um ambiente construído.

No Anexo III apresentam-se os resultados obtidos via simulação numérica, em três configurações diferentes de galpões, em relação às aberturas.

2. CONFORTO HUMANO

2.1. Interação térmica entre o homem e o meio ambiente

O corpo humano é um sistema termodinâmico que produz calor e interage continuamente com o ambiente para conseguir o balanço térmico indispensável para a vida. Existe assim uma constante troca de calor entre o corpo e o meio ambiente que é regida pelas leis da física e influenciada por mecanismos de adaptação fisiológica, por condições ambientais e por fatores individuais. A sensação de conforto térmico está intimamente relacionada com o esforço realizado pelo organismo para manter o balanço térmico entre o corpo humano e o meio ambiente.

O conforto térmico, como uma sensação humana, situa-se no campo do subjetivo e, acredita-se, que a satisfação das pessoas com um dado ambiente dependa de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Os fatores físicos determinam as trocas de calor do corpo com o meio, os fisiológicos referem-se a alterações na resposta fisiológica do organismo, resultantes da exposição à determinada condição térmica e os fatores psicológicos relacionam-se às diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, fruto da experiência passada e da expectativa do indivíduo.

Considerando apenas as inter-relações não subjetivas com o meio físico, os principais mecanismos que interferem na sensação de conforto térmico são decorrentes das trocas térmicas, entre o corpo e o ambiente, que se realizam através dos processos básicos de troca de calor: radiação, condução, convecção e evaporação (NETO, 2003).

A idéia é que a sensação de bem estar térmico está ligada ao trabalho que o sistema termorregulador humano tem que desenvolver para manter o equilíbrio térmico do corpo. Isso significa que, quanto maior for o esforço desse sistema para manter a temperatura interna do corpo, maior será a sensação de desconforto.
Como as condições de conforto térmico são predominantes para a sensação de satisfação com o ambiente construído, torna-se necessário o estabelecimento de critérios

e valores de referência para a correta avaliação do ambiente térmico que a edificação propicia. Com o intuito de quantificar as reações do organismo frente às variações térmicas do ambiente, buscou-se a estruturação de índices e/ou sistemas de avaliação que expressassem esta relação de causa e efeito.

As escalas dos índices e/ou diagramas de conforto térmico desenvolvidos foram estruturados em termos da avaliação de manifestações subjetivas dos usuários, graduadas de acordo com a sensação de conforto ou desconforto térmico manifestada, relacionando-se tais graduações com os parâmetros físicos ambientais.

Olgyay (1963) foi um dos primeiros estudiosos das interações entre o ambiente construído, clima e conforto humano que propôs a definição da chamada zona de conforto como sendo aquela região com as condições climáticas gerais em que o organismo humano consome a menor quantidade de energia para adaptar-se ao seu entorno imediato. Seus estudos conduziram à elaboração de uma carta climática em que são visualizados, para condições externas variáveis, os limites de conforto térmico, informando, conseqüentemente, as medidas necessárias para a correção das inadequações, Figura 2.1.

Givoni (1968) elaborou novos estudos sobre o trabalho de Olgyay (1963), onde se baseou em pesquisas realizadas nos EUA, Europa e Israel. Os limites de conforto foram baseados num índice de conforto térmico, desenvolvido por ele mesmo, denominado Índice de "Stress" Térmico (ITS). Este índice utiliza a temperatura do ar, umidade (pressão de vapor), movimento de ar, radiação solar, taxa metabólica e vestimentas como variáveis incluídas no cálculo.

A carta bioclimática original de Givoni (1968) foi desenhada sobre uma carta psicométrica convencional e utilizou a umidade absoluta como referência, Figura 2.2. A zona de conforto foi adaptada para regiões de clima temperado. Um fator importante a ser destacado em relação ao diagrama de Givoni (1968) é que ele se baseia nas temperaturas internas da edificação tornando-se mais inerte ao clima externo.

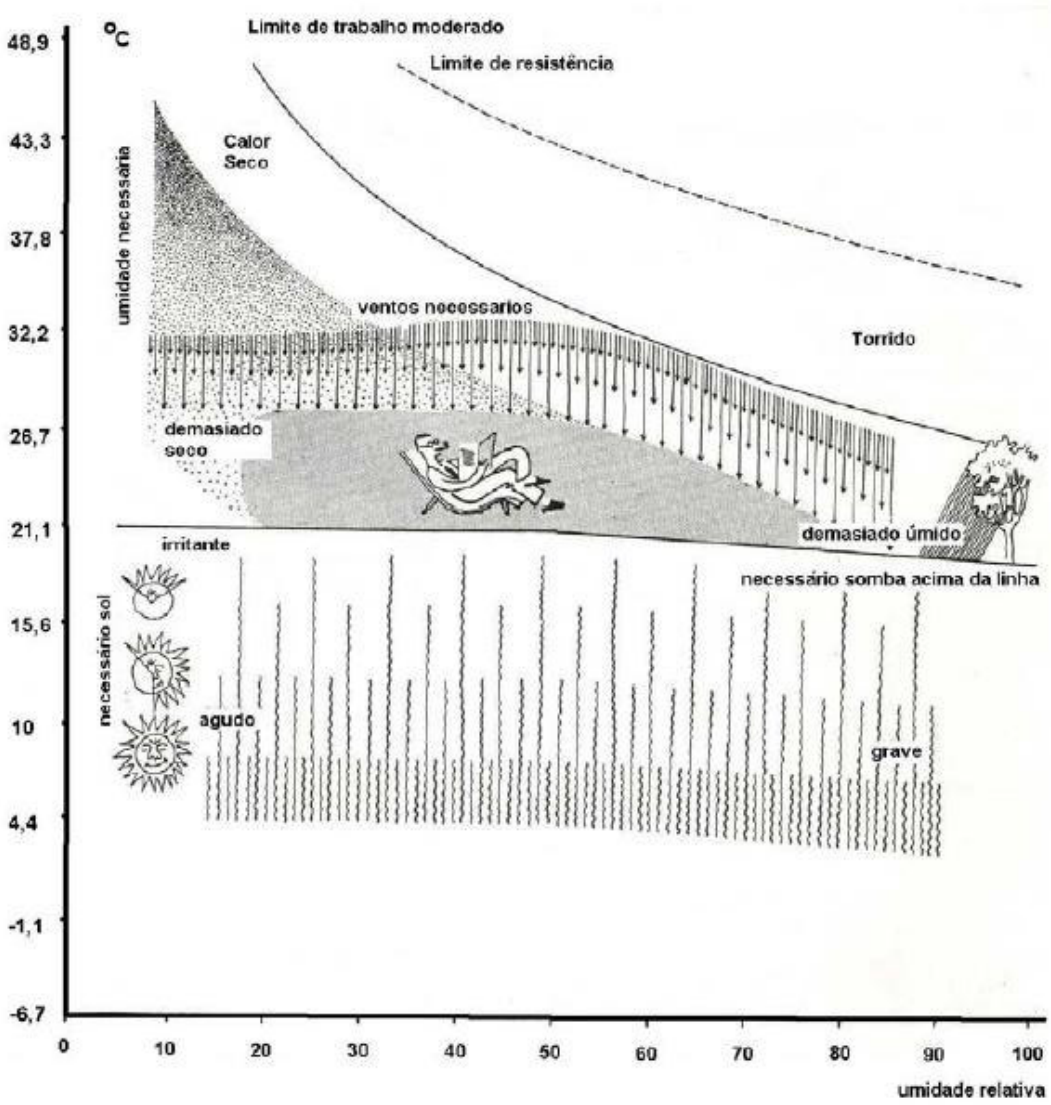

Figura 2.1 – Carta de Olgyay
Fonte: Olgyay, 1998

Na carta de Givoni (1969) as condições climáticas são representadas, mês a mês, por dois pontos, cujas coordenadas são as médias mensais dos valores extremos de temperatura e umidade diária do ar externo, o que não impede que sejam plotadas condições climáticas com a periodicidade que se desejar. A carta serve para se averiguar a exigência humana e o rigor do clima local, bem como a contribuição das soluções arquitetônicas (IZARD e GUYOT, 1983).

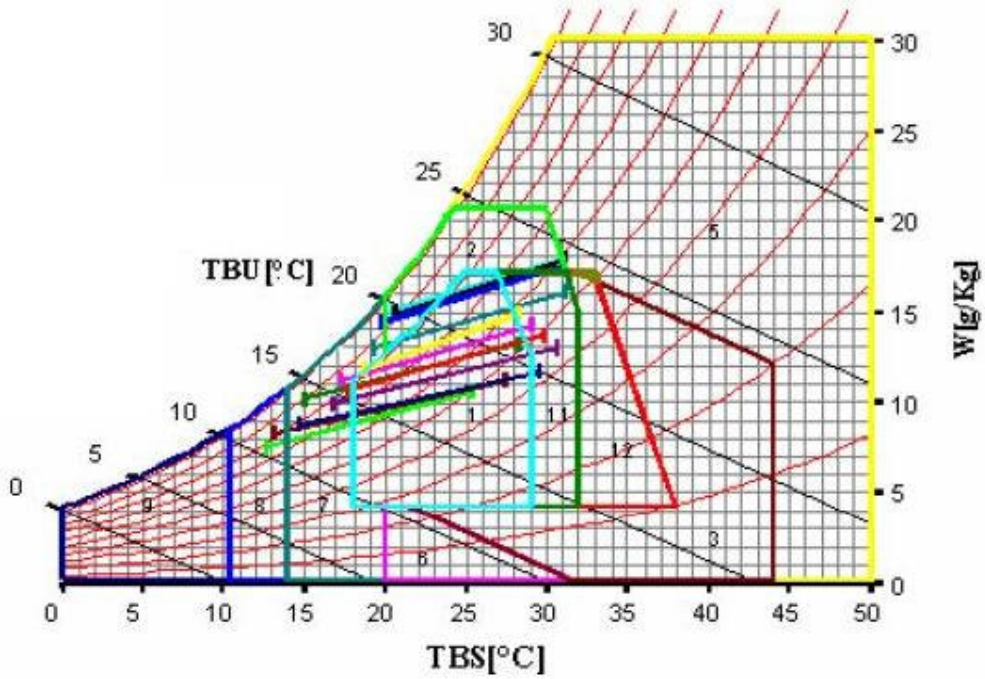

Figura 2.2 – Diagrama de Givoni. Zonas: (1) Conforto. (2) Ventilação. (3) Resfriamento. (5) Ar condicionado. (6) Umidificação. (7) Massa Térmica/Aquecimento Solar. (8) Aquecimento Solar Passivo. (9) Aquecimento Artificial. (11) Ventilação/Massa/Resfriamento evaporativo. (12) Massa/Resfriamento Evaporativo. (Fonte: adaptado do programa ANALYSIS)

Como uma evolução dos estudos desenvolvidos até então, Givoni (1992) propôs uma correção de sua própria carta bioclimática, com o objetivo de adaptá-la às condições usualmente verificadas em países em desenvolvimento e de clima quente e úmido, o que resultou em uma expansão dos limites máximos superiores de temperatura de conforto.

Nessa carta, portanto, estão demarcadas diferentes áreas para climas temperados (países desenvolvidos) e para climas quentes (países em desenvolvimento), indicando limites para as condições climáticas, dentro das quais várias estratégias de projeto de edifícios e sistemas de resfriamento natural podem garantir conforto térmico adequado. As opções gerais apresentadas para as estratégias são ventilação durante o dia, inércia térmica com ou sem ventilação, resfriamento evaporativo direto e resfriamento evaporativo indireto.

As variações de temperatura sugeridas por Givoni (1992), para as condições aceitáveis de pessoas que habitam países desenvolvidos, é 18 ºC a 25 ºC no inverno e de 20 ºC a 27 ºC no verão. Para países em desenvolvimento e de clima quente, Givoni (1992) sugere elevar em 2 ºC a temperatura limite máxima elevando também em 2 g/kg o valor do conteúdo de vapor. Com referência a velocidade do ar, segue-se a determinação da ASHRAE 55 :1994 que especifica um limite máximo de 0,8 m/s no interior de escritórios. Entretanto, em edifícios residenciais, o limite para a velocidade do ar pode estar baseado em sua contribuição para conforto térmico.

As condições internas de temperatura em edifícios não condicionados são largamente dependentes da variação do clima externo. Pode-se citar como exemplo, que uma temperatura interna variando de 20 ºC de manhã até 26 ºC de tarde no verão é comum em edifícios não condicionados e que a velocidade do ar interno em edifícios com ventilação cruzada é próxima de 2 m/s (BUSCH, 1992).

Resumidamente, Givoni (1992) sugere limites para a zona de conforto térmico de países com clima quente e em desenvolvimento, que são expressos de acordo com as estações do ano. No verão, em situação de umidade baixa, as temperaturas diárias devem estar compreendidas na faixa entre 25 ºC e 29 ºC e, em situação de umidade alta, as temperaturas diárias devem estar compreendidas na faixa entre 25 ºC e 26 ºC, podendo chegar a 32 ºC com ventilação de 2,0 m/s. No inverno, a variação de temperatura diária deve situar-se na faixa de 18 ºC a 25 ºC. Com relação à umidade, os limites da zona de conforto são de 4,0 g/kg a 17 g/kg e 80 % de umidade relativa.

Na carta revisada por Givoni (1992), foi considerada a velocidade de até 2 m/s na zona de ventilação. Este novo valor permitiu uma ampliação destas zonas, destinadas a países desenvolvidos (clima temperado) e para países em desenvolvimento (clima quente), onde o fator de aclimatação foi levado em consideração.

Givoni e Milne (1979), quando tratam da estratégia da ventilação, relatam que, obviamente, o limite máximo da velocidade de ar confortável é muito diferente de um escritório para um ambiente industrial, onde os parâmetros do tipo de atividade

desenvolvida levam em consideração o próprio limite estabelecido para utilização da ventilação natural. Esta é uma observação que demonstra que os parâmetros da velocidade do ar estão interligados com outros parâmetros, que são também responsáveis pelo conforto dos ocupantes de um ambiente. E que estes não podem ser desconsiderados no projeto, mesmo não estando aparentemente relacionados com a definição da envoltória da edificação.

A norma ISO 7730 :1994, resultado da investigação desenvolvida na Dinamarca por Fanger (1972) estabelece um critério objetivo de avaliação do conforto térmico. O modelo de Fanger (1972) é baseado no balanço térmico do corpo humano onde a sensação térmica é influenciada por quatro fatores ambientais, ou seja, temperatura, radiação térmica, umidade relativa e velocidade do ar, e dois fatores pessoais, atividade desenvolvida e tipo de roupa. Além do balanço de calor entre o corpo e o ambiente, podem-se enfocar também aspectos relacionados aos parâmetros subjetivos ligados ao conforto térmico, como sensações e preferências térmicas. No Anexo II, apresentam-se as definições mais usuais em conforto térmico.

A taxa de metabolismo, característica da atividade física realizada refere-se à quantidade de calor produzida internamente pelo corpo; o isolamento térmico da vestimenta representa a barreira imposta pela roupa às trocas de calor com o meio e a temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar determinam as transferências de calor por radiação, evaporação, convecção com o meio vizinho e condução. O efeito combinado de todos esses fatores é que determina a sensação de conforto ou desconforto térmico.

Os fatores físicos e psicológicos da pessoa são de grande importância para a expectativa e aceitabilidade de ocupação de uma edificação. Certas medidas como vestir um tipo de roupa coerente com o clima ambiente, ajuste da velocidade do ar e localização adequada de aberturas, podem melhorar as interações das pessoas com o ambiente e alterar a sensação e a satisfação térmicas (DEAR & BRAGER, 2002).

A equação de conforto de Fanger (1972) foi formulada a partir da expressão de equilíbrio térmico ou de balanço térmico do corpo humano em regime permanente, considerando o corpo humano como um compartimento homogêneo, equações 2.1 e 2.2.

$$U = M - W - Q_{pele} - Q_{respiração} \tag{2.1}$$

$$U = M - W - (C + R + E_{es} + E_{dif}) - (E_R + C_R) \tag{2.2}$$

onde, U é a taxa de variação da energia interna (W/m^2), M é o metabolismo (W/m^2), W é o trabalho externo (W/m^2), Q_{pele} é o calor total perdido pela pele (W/m^2), $Q_{respiração}$ é o calor total perdido pela respiração (W/m^2), C é o calor perdido pela pele por convecção (W/m^2), R é o calor perdido pela pele por radiação (W/m^2), E_{es} é o calor perdido pela pele por evaporação de suor (W/m^2), E_{dif} é o calor perdido pela pele por difusão de calor d´água (W/m^2), E_R é o calor evaporativo perdido pela respiração (W/m^2) e C_R é o calor convectivo perdido pela respiração (W/m^2).

O índice proposto por Fanger (1972) determinou três requisitos de conforto. O primeiro requisito é que o corpo humano vive em constante balanço térmico com o ambiente, onde a perda de calor para o ambiente é igual à taxa de calor produzida pelo corpo. O equilíbrio térmico não é uma condição suficiente para o conforto térmico porque o balanço de calor pode ser mantido por mecanismos fisiológicos, tal como a sudação, em condições distantes do conforto.

O segundo requisito é que a temperatura média da pele pode ser um indicativo de conforto. Sensações térmicas estão relacionadas com a temperatura média da pele, e a temperatura requerida para a pele para o conforto é inferior a altas taxas metabólicas para as atividades sedentárias. O terceiro requisito é que existe uma taxa preferencial de sudação para o conforto, que é também função da taxa metabólica.

Na tabela 2.1 é apresentada a escala de sensação térmica definida pela ASHRAE 55 :1994. As pessoas avaliam as condições de conforto que o ambiente térmico proporciona por meio de votos.

Tabela 2.1 - Escala de sensação térmica da ASHRAE.

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutro frio
-1	Ligeiramente Frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Fonte: ASHRAE, 2001

O estudo de Fanger (1972) possibilitou a definição de um índice, denominado Voto Médio Estimado *(PMV – Predicted Mean Vote)*, que analisa a sensação térmica subjetiva dos indivíduos. O índice PMV foi usado, a partir de então, na predição da resposta média de um grupo de pessoas, de acordo com a escala sétima de sensações da ASHRAE, variando de -3 a +3, dado pela equação 2.3.

$$PMV = \left[0{,}303 \cdot e^{-0{,}036 \cdot M} + 0{,}028\right] \cdot L \tag{2.3}$$

Onde, PMV é o voto médio estimado, ou sensação analítica de conforto; M é a taxa metabólica de produção de calor em função da atividade, W/m^2 e L é a carga térmica atuando sobre o corpo, W/m^2.

A equação do voto médio estimado, a exemplo da equação de conforto, é complexa e de difícil manipulação; assim, para aplicação prática, Fanger (1972) e a ISO 7730 :1994 apresentam tabelas que fornecem o voto médio estimado para a combinação de diferentes níveis de atividade, possibilidades de vestimenta, velocidades relativas do ar e temperaturas do ambiente.

Ao índice PMV foi, posteriormente, incorporado o conceito de Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied*) de modo a suplementar a avaliação dos indivíduos acerca do ambiente térmico, que pode ser definido pela equação 2.4.

$$PPD = 100 - \left(95 \cdot e^{\left(-0{,}0335 \cdot PMV^4 + 0{,}2179 \cdot PMV^2 \right)} \right) \tag{2.4}$$

A curva mostrada na Figura 2.3 é utilizada na norma ISO 7730 :1994 na avaliação térmica dos ambientes. Pode-se observar que a referida curva é simétrica e apresenta um mínimo de 5 % de insatisfeitos com relação ao voto médio estimado igual a zero.

Baseado nesta caracterização de conforto térmico a ISO 7730 :1994 admite serem aceitáveis ambientes em que – 0,5 < PMV < 0,5, ou seja, em que não mais de 10 % dos usuários se mostrem desconfortáveis. Além deste critério, a referida norma impõe outras regras relacionadas com os parâmetros de conforto.

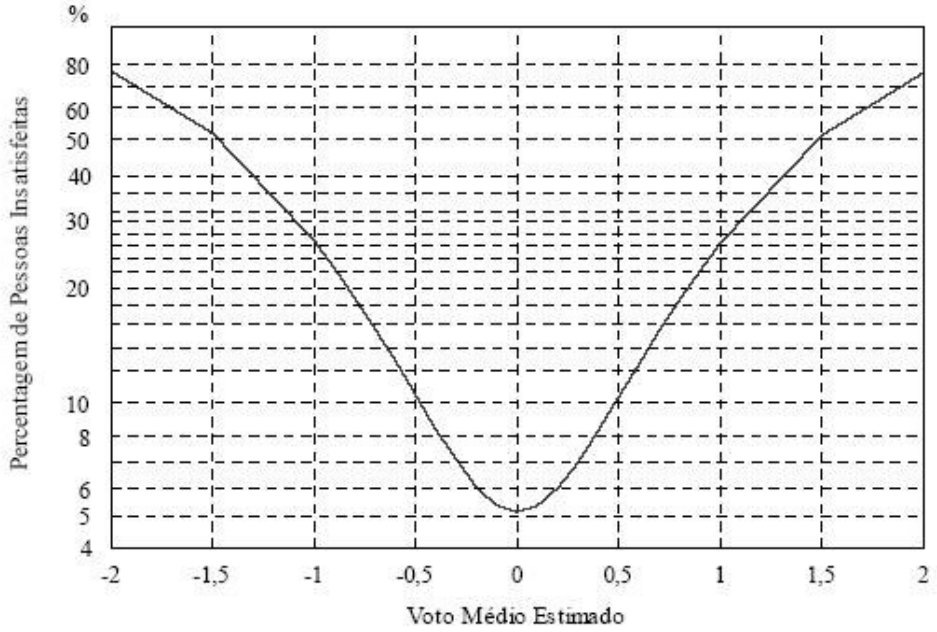

Figura 2.3 – Relação da percentagem de pessoas insatisfeitas em função do voto médio estimado – PMV

2.2. Importância do conforto térmico

De acordo com Fanger (1972), a razão de se criar condições de conforto térmico, reside no desejo do homem de se sentir termicamente confortável. Além disso, o conforto

térmico pode ser justificado do ponto de vista da *performance* humana. Embora a redução do desempenho humano com o calor ou o frio seja ainda uma questão pouco clara ou conclusiva, suspeita-se que as *performances* perceptiva, manual e intelectual são geralmente maiores na presença de conforto térmico.

Segundo Nicol (1993), a importância do conforto térmico pode ser exprimida sobre três pontos fundamentais, quais sejam: satisfação; economia de energia; e estabelecimento de padrões.

2.2.1. Satisfação

A satisfação dos usuários de edificações faz com que as pessoas gostem ou não de freqüentar e permanecer em determinado ambiente. Uma das coisas mais importantes que as pessoas consideram em uma edificação é a temperatura correta e o sentimento do ar fresco. É comum a insatisfação com o ambiente térmico real mesmo em edifícios com sofisticados controles de climatização, pois nesses edifícios é normal se encontrar situações de superaquecimento interno no inverno e super-resfriamento interno no verão.

2.2.2. Conservação de energia

Com relação à conservação de energia, tem-se que o estabelecimento da temperatura interna em estações frias e quentes é o principal fator na decisão do uso da energia na edificação. A diferença entre as temperaturas externa e interna é proporcional à perda ou ganho de calor pelo edifício, sendo que sua diminuição implicará na diminuição também da carga de resfriamento ou aquecimento.

Segundo Woods & Winakor (1981), dois interesses conflitantes tem sido a causa de discussões a respeito do efeito do calor sobre as pessoas no trabalho; um é a prevenção do excessivo estresse térmico dos ocupantes dos ambientes internos; o outro é a redução do consumo de energia que pode resultar ao se deixar o ambiente térmico interno flutuante em direção a um limite de aceitabilidade.

Segundo Xavier (1999) a eficiência energética depende diretamente do projeto da edificação ao apresentar ou não na sua concepção formas passivas de conservação de energia. A ventilação natural é uma destas formas, que sob várias condições pode retratar uma estratégia eficaz, provocando uma grande economia de energia. A condição de ambiente ventilado naturalmente e ambiente termicamente condicionado tem sido tema de muitos estudos, uma vez que o mesmo representa não só a obtenção do conforto pelas pessoas, como a conservação de energia, e também a saúde das pessoas usuárias de um ambiente e suas capacidades em controlar esses mesmos ambientes.

Ainda com relação à conservação de energia, Yang & Su (1997) mostram o potencial de conservação de energia ao se adotarem parâmetros de conforto extraídos de modelos analíticos como o de PMV, desenvolvido por Fanger (1972), para análise de ambientes providos de condicionamento de ar. O autor conclui que o índice do PMV abre uma nova direção para conservação de energia, pela introdução de velocidades do ar interno mais elevadas, a fim de prover conforto térmico.

2.2.3. O estabelecimento de padrões

Segundo Nicol (1993), o estabelecimento de padrões, o conforto térmico e a conservação de energia estão relacionados com a temperatura interna. A ASHRAE 55: 2004 e a ISO 7730: 1994 apresentam uma única temperatura como sendo a correta para uma dada edificação, dependendo de seu perfil de ocupação. Recomendam temperaturas internas estabelecidas que reflitam o ambiente externo ao redor, reduzindo assim a diferença entre as temperaturas externa e interna, pelo que se poderia esperar uma redução no consumo de energia.

2.3. Conforto térmico e produtividade

O homem é um sistema termodinâmico aberto que produz calor internamente e interage continuamente com o meio para manter a sua temperatura interna dentro de um restrito

intervalo. É também um ser racional que busca a satisfação das suas necessidades e expectativas. A associação dessas duas idéias permite concluir que as condições ambientais que proporcionam o conforto térmico são também condições que favorecem a obtenção da sua maior produtividade (NASA, 1968; GOLDMAN, 1994; WOODS et al., 1981; SENSHARMA et al.,1998; RAMSEY, 1984).

Estabelecer uma inter-relação entre o conforto térmico e a produtividade é uma tarefa complexa, pois ambos dependem de vários fatores que quando combinados não necessariamente geram o mesmo efeito em pessoas diferentes. Um outro complicador é que para identificar essa relação é preciso controlar esses fatores e definir critérios objetivos de medida do desempenho humano característicos do tipo de atividade desenvolvida.

O estudo da inter-relação entre a produtividade e as condições térmicas do ambiente, tem como problema central o subjetivismo humano que impõe uma relação variável entre as necessidades, as expectativas e as motivações das pessoas. Goldman (1994) cita que um bom salário tem sido considerado como o principal fator motivador da produtividade, mas que existem outros fatores que podem ser mais importantes como condições confortáveis de trabalho, boas relações interpessoais, estabilidade no emprego, prestígio, senso de realização, independência de ação, trabalho desafiador, reconhecimento pessoal e variação no trabalho.

3. VENTILAÇÃO EM EDIFICAÇÕES

3.1. Considerações gerais

A ventilação é um ramo do conhecimento tecnológico com aplicações em, praticamente, todas as atividades humanas. Ela se aplica tanto nos processos produtivos industriais como também nos processos de controle ambiental. No que diz respeito ao controle de ambientes ocupados pelo homem, a ventilação se aplica tanto a questões de conforto quanto de segurança. Por outro lado, não se pode deixar de mencionar a sua aplicação na agricultura, na zootecnia, ou seja, em todas as atividades em que seja necessário certo controle de qualidade do ar.

Ventilar é trocar o ar de um recinto fechado. Esta troca, quando ocorre por meios naturais, é denominada ventilação natural. Por outro lado, quando é induzida por equipamentos mecânicos, é denominada ventilação mecânica. O sistema de ventilação mecânica é baseado em componentes mecânicos (compressores, bombas, sopradores) que consomem energia elétrica. Embora estes sistemas sejam satisfatórios, sua construção e operação é cara. Então, para economia de energia e redução de custos, é conveniente a adoção da ventilação natural como um modo alternativo de ventilação.

O ar, assim como qualquer gás, quando aquecido, mantém a sua massa, mas aumenta seu volume tornando-se menos denso (mais leve). Em compartimentos fechados, o ar quente busca as regiões mais altas, deslocando-se para o exterior pelas passagens da cobertura e o ar frio externo (mais pesado), tem a tendência de se deslocar para o interior do edifício, tomando lugar do ar quente que saiu. Um pequeno diferencial de temperatura no interior das edificações torna perceptível este efeito (CLEZAR & NOGUEIRA, 1999).

Esta movimentação do ar fresco externo para o interior do edifício, entrando por passagens na parte inferior das fachadas, e a movimentação do ar quente interno para o exterior da edificação saindo pelo telhado, geram a ventilação natural que se encontra

nas construções consideradas termicamente confortáveis. A localização adequada das aberturas para a saída do ar aquecido interno fica nos pontos mais altos da cobertura, onde o mesmo se concentra. Já a localização adequada das aberturas para a entrada do ar fresco externo fica na parte inferior das fachadas laterais.

O estabelecimento efetivo da convecção natural com a obtenção de uma boa ventilação natural nas construções ou reformas das já existentes propicia redução dos agentes poluidores, recomposição constante dos níveis adequados de oxigênio, controle da umidade do ar, grau de pureza do ar compatível com as exigências fisiológicas do ser humano em relação à saúde e bem estar reduzindo o número de doenças e absenteísmo, diminuição do número de acidentes devido ao maior nível de atenção, refrescamento do corpo do trabalhador melhorando sua sensação de bem estar e aumentando sua disposição para o trabalho, conforto térmico e maior produtividade (SCIGLIANO & HOLLO, 2001).

O valor exato da taxa de ventilação natural na fase de projeto é muito difícil de se determinar, mas uma forma de se prever esta taxa está na determinação das forças naturais que surgem devido à diferença de temperatura e a ação do vento e de seus efeitos combinados. As normas atuais de projeto em ventilação natural ainda adotam soluções semi-analíticas, isto é, o modelo da coluna de ar quente e da ação do vento como ferramentas de projeto. Esta formulação prevê estimativas razoáveis de taxas de fluxo de ventilação natural em muitas situações. Porém, uma das dificuldades em usá-la está no fato de que a temperatura interna em recinto fechado deve ser conhecida antes do cálculo da taxa de fluxo da ventilação natural (LI & DELSANTE, 1999).

O conhecimento, em bases científicas, do fenômeno da ventilação natural dos edifícios, é relativamente pequeno comparado com o que atualmente existe sobre ventilação com o emprego dos equipamentos mecânicos. Esta disparidade de conhecimentos científicos entre ventilação natural e mecânica pode ser constatada através da comparação dos recursos investidos no estudo e divulgação dos fenômenos em questão. As grandes companhias fabricantes de equipamentos de ventilação, visando incentivar o uso dos

mesmos, mantêm grandes grupos de pesquisadores bem remunerados e financiam pesquisas nas universidades e outros centros de investigação. Os resultados são publicados em revistas especializadas ou em monografias dos institutos.

A investigação sobre o emprego racional dos elementos naturais para a melhoria do conforto no interior dos edifícios tem pouca atenção. Alguns centros de pesquisas governamentais, em poucos países do mundo, mantêm um pequeno número de pesquisadores que estudam as leis que regem os fenômenos da ventilação natural. Os resultados destas pesquisas são publicados em periódicos especializados, em circulação muito limitada. Apesar deste quadro, o número de edifícios em que são utilizados apenas os processos naturais de ventilação é maior do que aqueles em que são empregados equipamentos mecânicos para a renovação do ar nos recintos (HERNANDEZ et al., 1998, TOLEDO, 1999).

Com o emprego da ventilação natural, muito espaço é economizado no edifício. Experiências mostram que uma planta de ventilação mecânica ocupa de 4 % a 7 % da área de piso do edifício, Figura 3.1. O espaço disponível pode ser explorado pelo arquiteto para o benefício do usuário e o dono de edifício.

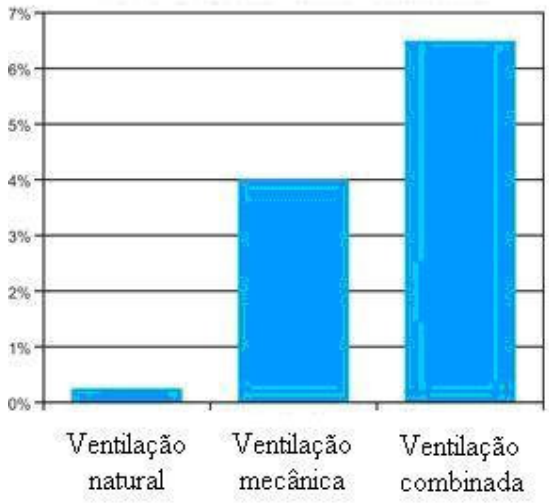

Figura 3.1 – Porcentagem da área de piso ocupada por soluções de ventilação
Fonte: WINDOWMASTER, 2005

A ventilação natural como controle da qualidade do ar, é consideravelmente mais simples que a ventilação mecânica e envolve um menor custo de investimento para a instalação, Figura 3.2.

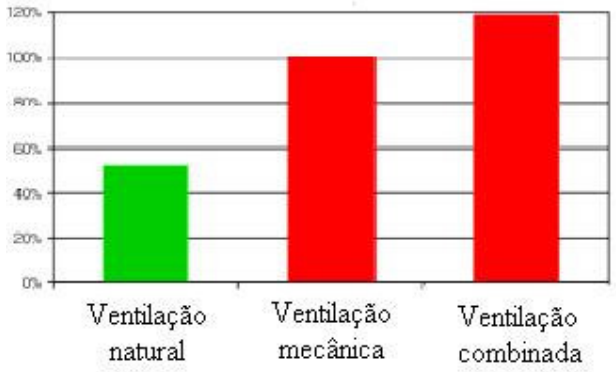

Figura 3.2 – Porcentagem por custo de investimento para a instalação de soluções de ventilação
Fonte: WINDOWMASTER, 2005

A ventilação natural pode minimizar e/ou eliminar a necessidade de ventilação mecânica, que consome muita energia, e ao mesmo tempo economiza na manutenção tecnicamente complexa da mesma, Figura 3.3. A ventilação natural é, em geral, a condição mais econômica de todas as soluções de ventilação.

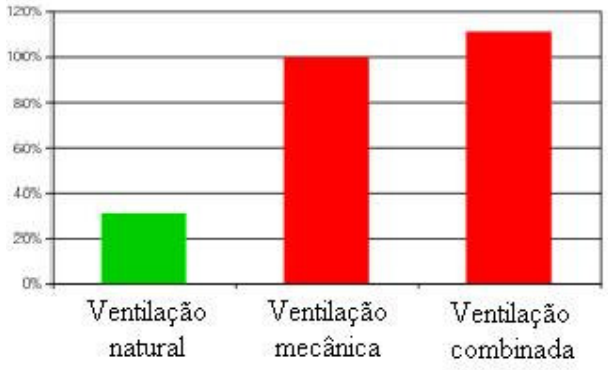

Figura 3.3 – Porcentagem por custo de manutenção e consumo elétrico de soluções de ventilação
Fonte: WINDOWMASTER, 2005

Deve-se ressaltar que a ventilação natural pode somente ser aplicada a determinados climas e tem muitas limitações. Tanto os ruídos quanto os níveis de poluição locais podem limitar as aplicações da ventilação natural. Devem ser considerados alguns obstáculos ao uso da ventilação natural como o controle de fumaça em caso de incêndio é mais difícil sendo necessário a presença de equipamentos especiais e/ou recomendados pelas normas de segurança contra incêndio; o ruído externo é difícil de ser controlado em um edifício que dispõe de aberturas destinadas à ventilação natural; pode ser difícil conseguir a separação acústica entre espaços; quando as diferenças de pressão são baixas são necessárias grandes aberturas para obtenção das taxas de fluxo de ar desejadas; o ar externo deve estar limpo o bastante para ser introduzido diretamente no espaço interno ocupado.

Se for requerida uma filtração, é necessária a ventilação mecânica; se tratar de uma área com problemas de insetos, devem ser adicionadas telas a todas as aberturas. Ultrapassando os obstáculos mencionados acima, a ventilação natural pode ser apropriada para a edificação (SPRATT, 2002; ALLOCCA et al., 2002).

A ventilação mecânica e o condicionamento de ar nos edifícios consomem grande parte da energia consumida no mundo, especialmente nos países desenvolvidos, onde os edifícios são responsáveis por um terço de todo o consumo de energia. Este uso de energia conduz à poluição atmosférica e ao aquecimento global. A ventilação natural é uma alternativa eficiente no que diz respeito à redução do gasto de energia nos edifícios, obtenção do conforto térmico e manutenção um ambiente interno.

Tipicamente, o custo de energia de um edifício naturalmente ventilado é 40 % menor do que um edifício dotado de ventilação mecânica. Conseqüentemente, a ventilação natural contribui para um ambiente interno agradável reduzindo o consumo da energia nos edifícios. A ventilação natural transformou-se numa nova tendência nos projetos de edifícios (ALLOCCA et al., 2002).

> O Brasil é um grande produtor e consumidor de energia e a construção de novas usinas para suprir essa demanda pode causar impactos econômicos e ambientais, como alterações no clima, na fauna e flora local e poluição e migrações populacionais. Assim o alerta para a necessidade do uso racional de energia deve ser frisado uma vez que o crescimento da oferta depende de largos investimentos.

Há algumas décadas a arquitetura priorizava as condições climáticas e ambientais ao seu redor. As edificações conseguiam suavizar os excessos das condições ambientais exteriores. A iluminação utilizada era principalmente a luz natural e havia um controle das dimensões e posições das aberturas. O conforto térmico no verão era controlado por sombreamento, proteções e inércia térmica e, no inverno, favoreciam os ganhos pelos envidraçados e por técnicas de isolamento térmico.

> Atualmente, nota-se uma desvinculação entre a arquitetura e o clima. O projeto de arquitetura tem sido o principal responsável pela ineficiência no consumo de energia em edifícios. Com o desenvolvimento da estrutura metálica e do concreto de alto desempenho, acompanhados de iluminação artificial, do ar condicionado e dos elevadores, a arquitetura se viu livre da responsabilidade de responder ao contexto climático, deixando esta função inteiramente nas mãos da tecnologia (GUGLIELMETTI, 2002).

Geralmente, os indivíduos gastam aproximadamente 90 % do seu tempo em lugar fechado e usam aproximadamente um terço da energia do mundo para tornar isto possível. Assim, é interessante saber que condições resultam num clima interno agradável e como se pode criá-lo de modo eficiente (KAYNAKLI & KILIC, 2004).

3.2. A necessidade da ventilação

A ventilação natural regula o clima interno do edifício por meio de uma troca de ar controlada pelas aberturas. As forças motrizes naturais são criadas por meio das diferenças de temperatura entre o ar interno e o ar externo como também pelo vento ao redor do edifício. O ar no interior do edifício é mantido fresco pela ventilação através das aberturas das fachadas e do telhado. A ventilação é alcançada por meio do controle de aberturas que depende do clima externo e interno e da necessidade de ar fresco.

A ventilação natural é um benefício para arquitetos, porque permite projetos espaçosos e iluminados; para a economia, pois reduz significativamente o custo energético da edificação; para os usuários, pois a ventilação natural provê um clima interno agradável; e para o ambiente, pois a ventilação natural é ocasionada por forças naturais (WINDOWMASTER, 2005).

A ventilação natural provê um agradável clima interno que é uma condição prévia para um bom rendimento do trabalho executado pelas pessoas no interior da edificação. O ar fresco ajuda a manter a disposição e permite um trabalho mais eficaz. O ar que flui através das aberturas propicia a ventilação natural e segue as mudanças sazonais que também são benefícios ao funcionamento do ambiente.

Embora a ventilação natural não seja automaticamente controlada, o usuário sempre tem a possibilidade de participar no ajuste das condições de conforto para se atingir a satisfação e requisitos como, por exemplo, o enquadramento do empreendimento nos critérios de uma obra com sustentabilidade e uso eficiente de energia. A satisfação aumenta proporcionalmente com a possibilidade de ajustes individuais de conforto e a sustentabilidade pode ser atingida com a participação dos usuários na percepção das necessidades mínimas para o desempenho das atividades. Assim, desperdícios podem ser evitados sem prejuízo no conforto. A configuração arquitetônica e a participação do

usuário no controle do ambiente interno ocupado proporcionam uma satisfação psicológica com o ambiente físico (NEWMAN, 1972).

Se a ventilação não é suficiente, pode causar síndrome de edifício doente e incômodo aos usuários. Um ambiente interno ruim pode resultar em doenças que levam a uma redução na produtividade.
Para melhorar a produtividade e o bem estar dos usuários de uma edificação nos serviços domésticos e/ou de escritórios e fábricas, uma quantidade grande de trabalhos científicos tem sido realizados com o objetivo de desenvolver modelos relatando percepções do conforto térmico e dos fenômenos físicos para uma melhor compreensão dos processos de transferência de energia que ocorrem numa edificação e como manter a qualidade do ar interno e um ambiente agradável (NICOL & HUMPHREYS, 2002; DEAR & BRAGER, 2002; RAJA et al., 2001; KAYNAKLI & KILIC, 2004; FERIADI & WONG, 2004).

Há uma perda de eficiência humana de 1,8 % para cada grau que a temperatura ambiente subir acima de 27 ºC, comprometendo a produtividade (FANGER, 1989; ASHRAE, 2001). Vale lembrar que as estatísticas indicam que em indústrias os acidentes de trabalho aumentam na proporção que o conforto térmico diminui, podendo crescer até 40 % quando a temperatura subir 10 ºC acima do nível de conforto.

Quando a ventilação natural pode ser uma estratégia suficiente para a obtenção de um ambiente interno confortável, recursos de projeto devem ser utilizados. As previsões de ventilação variam com o tipo de ambiente e com as condições climáticas. Podem-se destacar os seguintes recursos de projeto: cuidados na forma e orientação da edificação, projetar espaços fluidos, facilitar a ventilação vertical (lanternins), utilizar elementos para direcionar o fluxo de ar para o interior.

O planejamento da ventilação de uma edificação deve aproveitar ao máximo os ventos dominantes no local. Além dos recursos acima citados, devem-se também avaliar algumas modificações no projeto da habitação, visando primeiramente verificar as

influências das posições, tamanhos e tipos de aberturas nas fachadas, e posteriormente o efeito da posição relativa destas edificações no terreno, e nas condições de conforto e salubridade de seus ocupantes.

Deve-se levar em conta também a presença de obstáculos e alguns fatores variáveis, como direção, velocidade e freqüência dos ventos e diferenças de temperatura do ar interior e exterior. Nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 mostram-se alguns esquemas de ventilação observados.

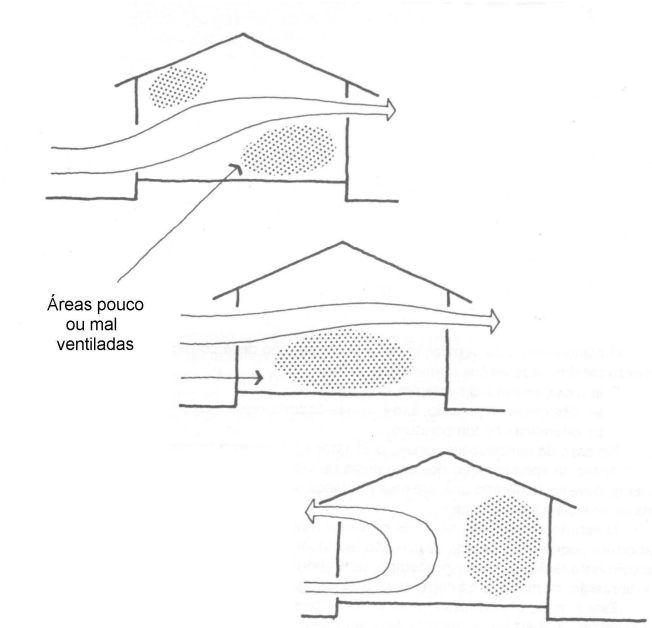

Figura 3.4 – Posição das aberturas x áreas pouco ou mal ventiladas
Fonte: MONTENEGRO, 1984

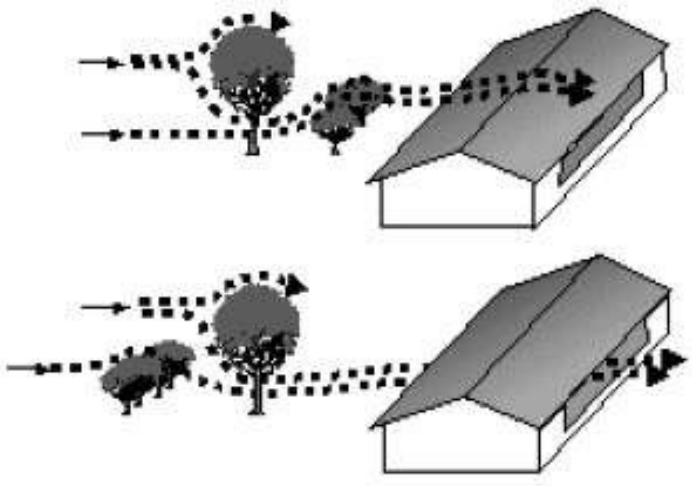

Figura 3.5 – Obstáculos x mudança de direção do vento
Fonte: NORDESTERURAL, 2005

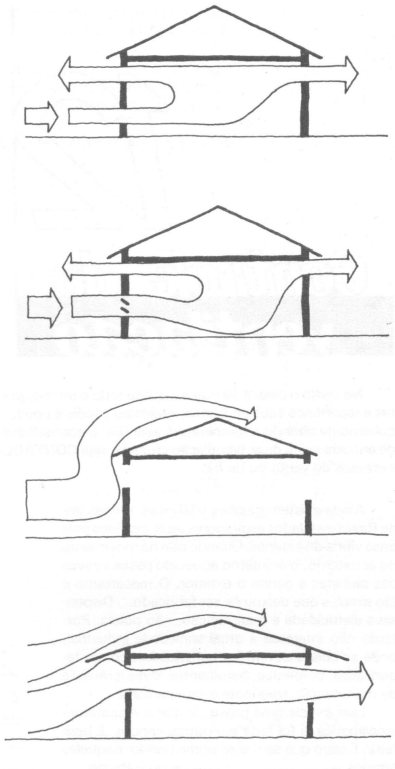

Figura 3.6 – O efeito de beirais e venezianas na direção do vento
Fonte: MONTENEGRO, 1984

A consciência cada vez maior de que a ventilação natural é uma das melhores opções para se obter um ambiente confortável com vantagens na economia, qualidade do ar interno, conforto e proteção ao usuário, leva alguns pesquisadores a desenvolver trabalhos que proporcionam uma melhor compreensão sobre o assunto (HUNT & LINDEN, 1999; MARTIN & FITZSIMMONS, 2000; LI et al., 1999; EMMERICH, 2001; LI & DELSANTE, 1999; HEISELBERG et al., 2001; ETHERIDGE, 2001; ALLARD et al., 2003).

3.3. Tipos de ventilação natural

A ventilação natural em um edifício pode estar baseada em diferentes princípios do escoamento do ar. São mais comuns três tipos de ventilação natural: ventilação pelo efeito chaminé, ventilação unilateral e ventilação cruzada. Na prática, estes tipos de ventilação podem ser combinados de diferentes modos na construção de uma edificação.

3.3.1. Ventilação pelo efeito chaminé

O processo de ventilação natural pelo efeito chaminé tem sua origem na diferença de temperatura entre o ar externo e o ar no interior do ambiente construído. A diferença de pressão que provoca a circulação do ar através das aberturas existentes na edificação, do exterior para o interior da edificação e vice-versa, provém da diferença de peso entre colunas de ar de mesma altura, mas com temperaturas diferentes. A diferença de pressão que ocorre entre o ar interno e externo é mostrada na Figura 3.7 (a).

A pressão interna mais elevada na abertura superior dirige o fluxo para o exterior e a pressão interna mais baixa na abertura inferior dirige a entrada do ar exterior que substitui o ar quente que saiu. Esse fluxo dirigido pelo empuxo térmico é o conhecido efeito chaminé. Quando as temperaturas interna e externa se igualam, a pressão devido à diferença de temperatura se aproxima de zero e não há nenhuma força dirigindo a ventilação.

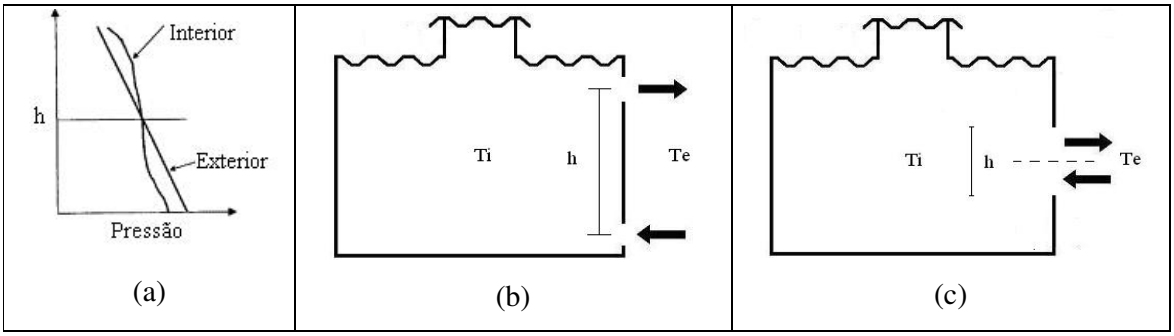

Figura 3.7 – (a) Distribuição da pressão interna e externa para o fluxo devido ao efeito chaminé. (b) fluxo através de duas aberturas: uma superior e uma inferior. (c) fluxo através de uma única abertura
Fonte: Adaptada de ALLOCCA et al., 2002

A temperatura do ar interno tende a ser, na maior parte do tempo, mais elevada do que a do ar externo devido ao calor transmitido pelo corpo humano, máquinas, radiação solar, etc. Mesmo na época de inverno, em função do perfil de ocupação da edificação, o ar pode ser aquecido pelas fontes internas de calor existentes, além do calor liberado pelas pessoas. Isto é mais acentuado em ambientes industriais.

A posição das aberturas da ventilação natural determina a distribuição da temperatura no ambiente interno. Se as duas aberturas estiverem abertas, uma localizada na parte mais alta da edificação e a outra na parte mais baixa, o ar fresco fluirá para o interior do edifício através da abertura inferior, e o ar quente fluirá para o exterior da edificação através da abertura superior, como mostrado na Figura 3.7 (b). Este tipo de ventilação, que cria uma estratificação da temperatura dentro do ambiente, é chamado às vezes de ventilação de deslocamento.

Embora tenha um efeito muito mais forte para edificações com duas aberturas, uma superior e outra inferior, a ventilação de deslocamento pode também ocorrer em edifícios com uma única abertura, como mostrado na Figura 3.7 (c). Neste caso, a abertura serve tanto como uma entrada quanto uma saída de ar. Comparada com a configuração de duas aberturas, uma única abertura gera taxas de ventilação mais baixas e o ar ventilado não penetra a uma grande profundidade no espaço interno. Um fluxo de ar mais intenso será induzido quando houver uma grande separação vertical entre as

aberturas de entrada e saída de ar, e quando há uma grande diferença entre temperaturas internas e externas (ALLOCCA et al., 2002).

Na Figura 3.8 mostra-se a ventilação natural pelo efeito chaminé numa edificação de um só pavimento. Na Figura 3.9 representa-se um sistema de ventilação pelo efeito chaminé para um prédio com vários pavimentos. É freqüentemente utilizado átrio ou chaminé com a finalidade de se gerar uma força de empuxo suficiente para alcançar o fluxo de ar necessário. Porém, até mesmo uma pequena parcela de vento induzirá distribuições de pressão na envoltória do edifício que também irá dirigir a corrente de ar. Estudos sobre a ventilação natural proveniente do efeito chaminé são constantemente publicados, fato que ajuda no conhecimento sobre os fenômenos que envolvem a ventilação natural (HUNT & LINDEN, 1999; LI, 1999; CHEN & LI, 2001; ANDERSEN, 2003; PRIYADARSINI et al., 2003; WONG, 2003; CHENVIDYAKARN & WOODS, 2004).

A ventilação natural pode também ser originada pelas diferenças de pressão através das aberturas de uma edificação que são ocasionadas pela ação do vento. Os processos físicos relacionados são complexos devido à variabilidade nas condições do vento. A ventilação natural é influenciada por alguns fatores que são decorrentes da ação do vento, tais como, a velocidade média do vento, que diz respeito à intensidade média do vento dominante no local; a direção dominante do vento, que diz respeito ao ângulo de incidência do vento em relação às paredes do edifício e a interferência local no vento devido à proximidade de edifícios, colinas e outras obstruções de natureza similar que diz respeito tanto à intensidade quanto ao ângulo de incidência do vento em relação às paredes da edificação (CLEZAR & NOGUEIRA, 1999).

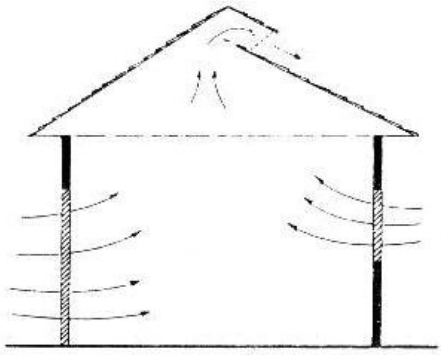

Figura 3.8 – Ventilação pelo efeito chaminé numa edificação de um só pavimento

Fonte: SUSTAINABLESCHOOLS, 2005

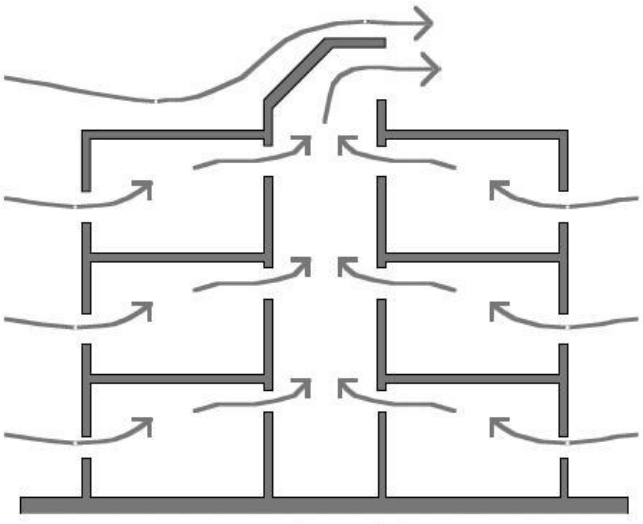

Figura 3.9 – Ventilação pelo efeito chaminé numa edificação com mais de um pavimento
Fonte: EMMERICH et al., 2001

As aberturas de entrada do vento devem ser projetadas para o lado dos ventos predominantes onde se obtém zona de pressão positiva. As saídas de ar devem ser colocadas em regiões de baixa pressão exterior como nas paredes laterais à fachada que recebe a ação dos ventos predominantes ou na parede oposta àquela que recebe a ação dos ventos predominantes.

As saídas podem consistir em lanternins e clarabóias ventiladas, colocadas no telhado e nas coberturas onde a pressão é mais baixa, por ser maior aí a velocidade do vento. As chaminés representam a solução para a saída de gases ou ar em temperatura tal que sua densidade menor permita sua elevação até a atmosfera exterior (MACINTYRE, 1990).

3.3.2. Ventilação Cruzada

A ventilação cruzada é caracterizada pela localização das aberturas de entrada e de saída do ar que estão situadas em planos (paredes) opostos ou adjacentes, facilitando a circulação do ar, com as aberturas de entrada situadas em zonas de altas pressões e as de saída, em zonas de baixas pressões, Figura 3.10. Schmidt et al. (1999) e Jiang & Chen, (2001) apresentam trabalhos que envolvem este tipo de ventilação.

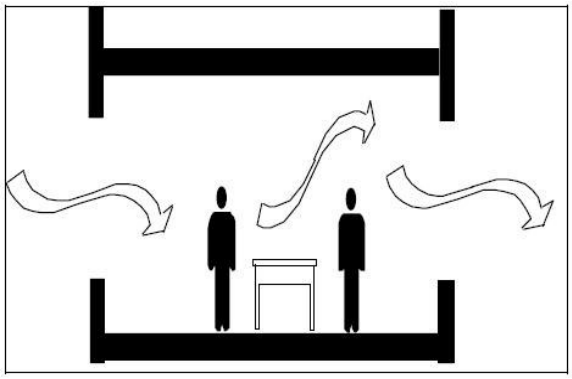

Figura 3.10 – Ventilação cruzada numa edificação de um só pavimento
Fonte: MARTIN & FITZSIMMONS, 2000

Na Figura 3.11 mostra-se um esquema de ventilação cruzada que ocorre em vários cômodos de uma edificação, referindo-se, assim, à ventilação cruzada global. A profundidade alcançada pelo fluxo de ar na direção do fluxo de ventilação deve ser limitada para remover efetivamente calor e contaminantes do espaço através das forças motrizes típicas. Uma diferença significante de pressão do vento nas aberturas e uma resistência mínima interna são necessárias para assegurar um fluxo de ventilação eficiente. As aberturas de ventilação são tipicamente janelas.

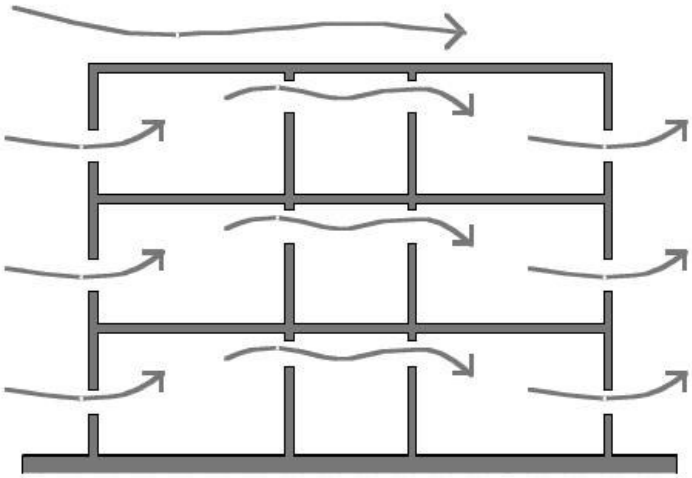

Figura 3.11 – Esquema de ventilação cruzada global numa edificação com mais de um pavimento
Fonte: EMMERICH et al., 2001

Na Figura 3.12 apresentam-se alguns casos típicos de ventilação natural em galpões.

3.3.3. Ventilação Unilateral

A ventilação unilateral é caracterizada por uma única abertura ou mais de uma, situada (s) em um mesmo plano do edifício (parede), em zona de igual ou de pequena diferença de pressão, dificultando ou servindo de obstáculo à circulação de ar, Figura 3.13. Recentes estudos foram realizados com a finalidade de se avaliar a ventilação natural unilateral (GAN, 1999; PAPAKONSTANTINOU et al., 2000; EFTEKHARI et al., 2001; ALLOCCA et al., 2002; FAVAROLO & MANZ, 2005).

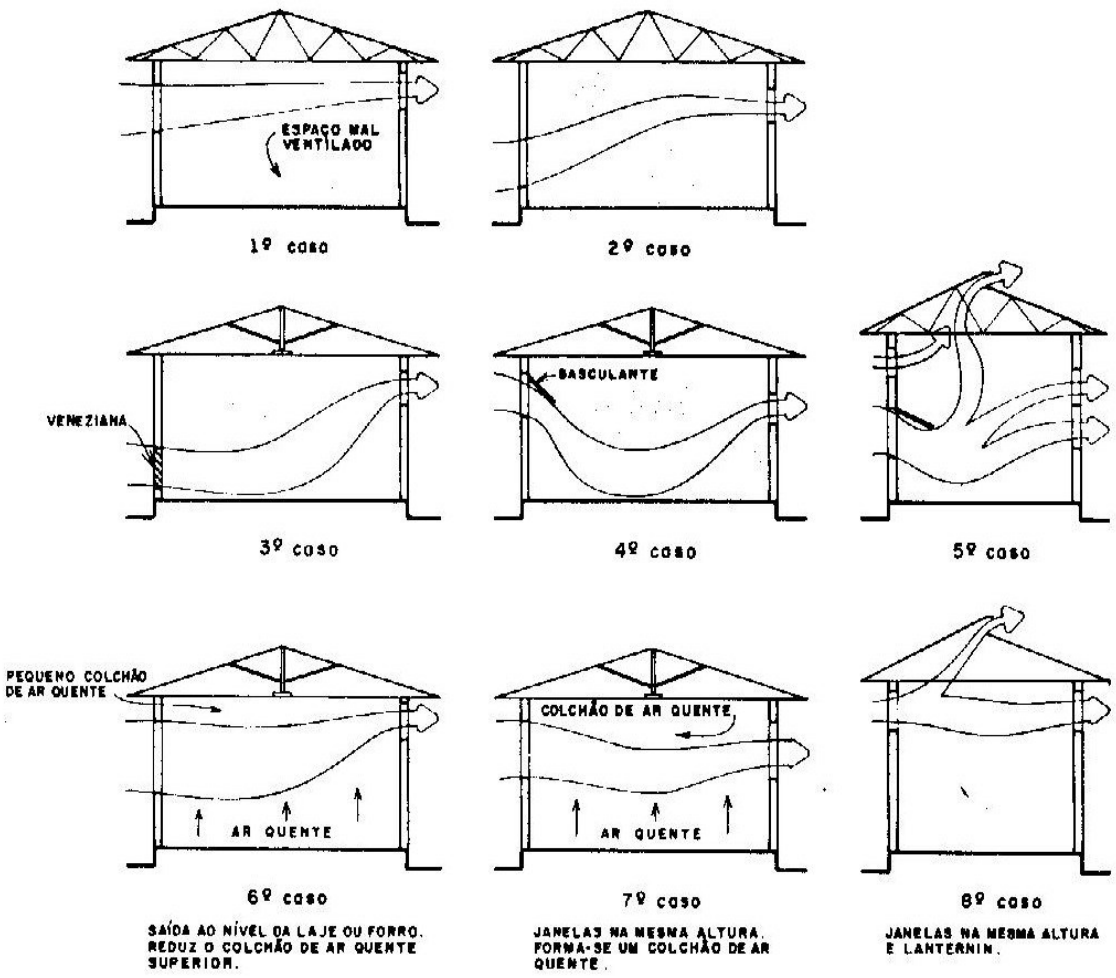

Figura 3.12 – Casos típicos de ventilação natural em galpões

Fonte: MACINTYRE, 1990

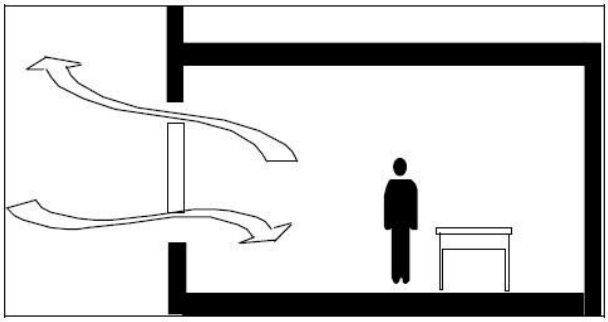

Figura 3.13 – Ventilação unilateral numa edificação de um só pavimento
Fonte: MARTIN & FITZSIMMONS, 2000

A ventilação unilateral só é eficiente para um cômodo simples, sendo assim uma solução de ventilação local. Na Figura 3.14 mostra-se um esquema de ventilação unilateral para cômodos em um edifício com vários pavimentos. A corrente de ar da ventilação é dirigida através do empuxo térmico no cômodo, de pequenas diferenças de pressões do vento na envoltória e/ou da turbulência. Por conseguinte, as forças motrizes para ventilação unilateral tendem a ser relativamente pequenas e altamente variáveis. Comparada às outras alternativas, a ventilação unilateral é a solução de ventilação natural menos atraente mas, não obstante, uma solução que pode servir escritórios

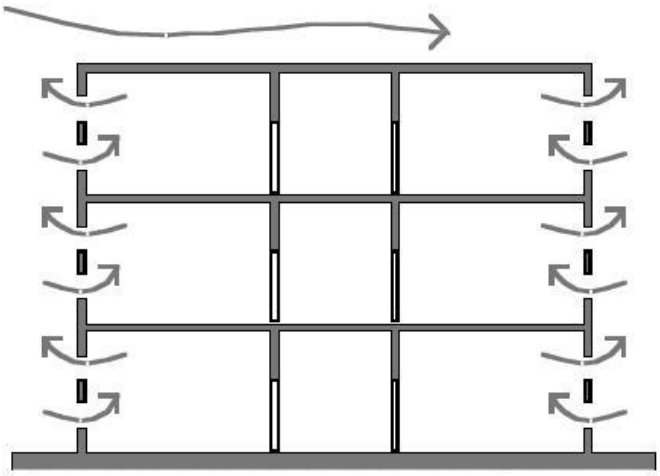

Figura 3.14 – Esquema de ventilação unilateral numa edificação com mais de um pavimento
Fonte: EMMERICH et al., 2001

Nos EUA, as normas de incêndio, as exigências de segurança e os interesses de privacidade dos indivíduos impedem frequentemente o projeto da ventilação cruzada. A ventilação unilateral é mais aceitável do que a ventilação cruzada, apesar de sua eficiência ser mais baixa (ALLOCCA et al., 2002).

Todos os tipos de ventilação natural são utilizados para assegurar um clima interno fresco e confortável. Este objetivo é alcançado com um mínimo consumo de energia e baixo custo. Estes três esquemas de ventilação são também utilizados de maneira

conjugada em edifícios para se conseguir uma variedade de necessidades de ventilação. Nas Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 são mostradas algumas estratégias de ventilação que ocorrem devido ao empuxo térmico e vento e uma mistura de ventilação local e global.

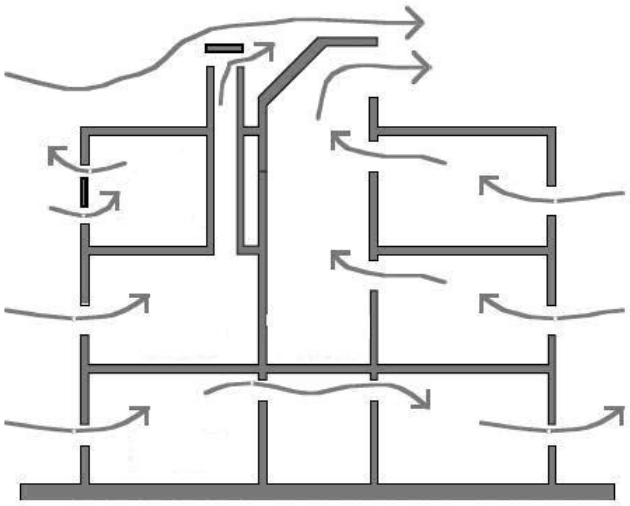

Figura 3.15 – Esquema de estratégias de ventilação natural combinadas numa edificação com mais de um pavimento
Fonte: EMMERICH et al., 2001

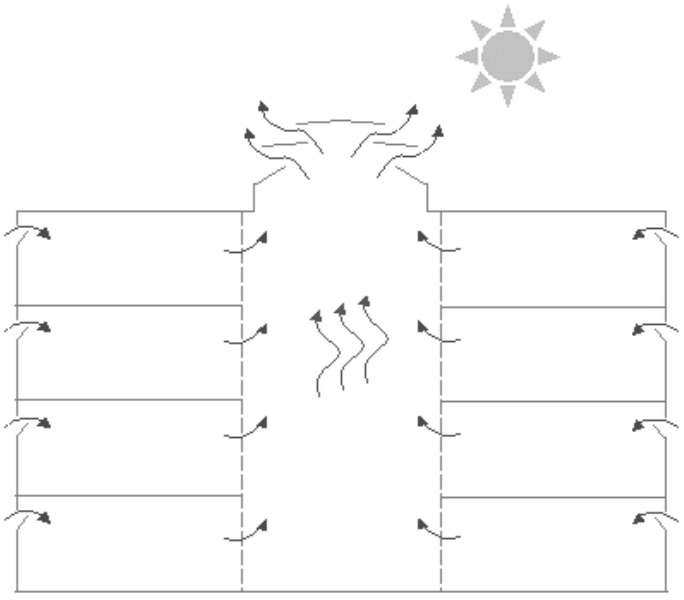

Figura 3.16 – Ventilação natural combinada através do átrio centralmente colocado numa edificação com mais de um pavimento

Fonte: WINDOWMASTER, 2005

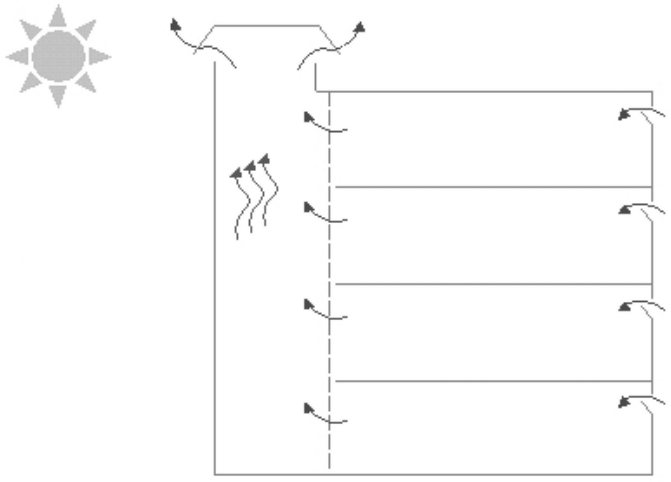

Figura 3.17 – Ventilação combinada em um átrio numa edificação com mais de um pavimento

Fonte: WINDOWMASTER, 2005

Uma ventilação natural mais eficiente está associada a uma conjugação da ação do vento e do efeito chaminé para garantir condições internas de conforto. Para que isto ocorra, é fundamental que a configuração do fluxo de ar no interior da edificação, originária da ação do vento, isoladamente, e o sentido do fluxo proveniente das diferenças de temperatura, possam se compor dando uma resultante mais favorável. Quando não há a conjugação destes dois fenômenos a oposição dos mesmos pode acarretar alguns inconvenientes, como pressões maiores nas aberturas superiores em relação àquelas provenientes do efeito chaminé, impedindo o escape de fumaça e poeiras geradas internamente, como mostrado na Figura 3.18. Neste exemplo, a pressão do vento provoca a saída do ar poluído pelas aberturas inferiores, o que é inconveniente (TOLEDO, 1999).

Em regiões de clima quente e úmido, é vantajoso aproveitar a diferença, em altura, entre as entradas e saídas do ar. Um esquema de ventilação natural que conjuga a ação do

vento com o efeito chaminé é mostrado na Figura 3.19. O ar sai por um lanternim situado na cumeeira da cobertura, protegido, no sentido longitudinal, por duas abas verticais, que servem para a criação de um estado de subpressão quando o vento incide sobre as mesmas e evitar o efeito nocivo de turbilhonamento no espaço entre a cobertura e o forro.

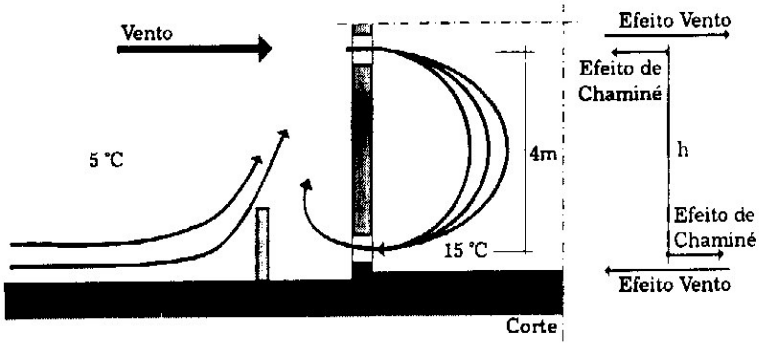

Figura 3.18 – Vento em oposição ao efeito chaminé
Fonte: TOLEDO, 1999

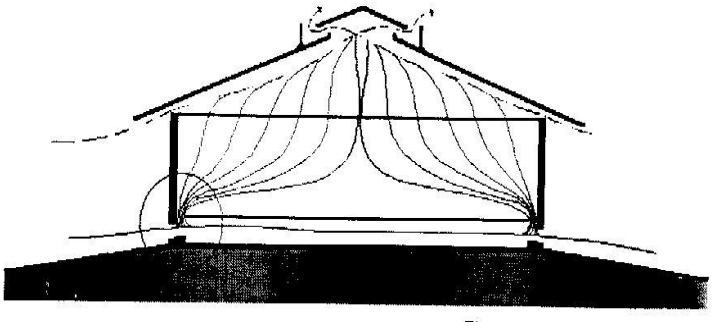

Figura 3.19 – Exemplo de ventilação natural de uma edificação térrea
Fonte: TOLEDO, 1999

3.4. Modelagem matemática da ventilação natural

A ventilação natural consiste na passagem do ar através do edifício, entrando por alguns ambientes e saindo por outros. O ar que penetra não se mistura, necessariamente, com todo o ar dos ambientes por onde circula, podendo haver zonas de ar estagnado em um recinto com elevada taxa de renovação de ar. Admite-se que a ventilação de um ambiente só ocorre quando há orifício para entrada e saída do ar e que, nestes orifícios, haja diferença de pressão do ar nas duas faces dos mesmos.

Quando, ao longo de uma parede ou teto, há um conjunto de aberturas em que o sentido do deslocamento do ar é o mesmo, diz-se que estas aberturas estão em paralelo. Uma seqüência de aberturas que é atravessada pelo mesmo filete de ar, em seu trajeto através do edifício, diz-se em série. Na modelagem matemática, obtém-se:

$$\Delta p = RQ^2 \tag{3.1}$$

onde, Δp é a diferença de pressão nas faces da abertura, R é a resistência à passagem do ar e Q é a vazão do ar. Havendo muitas aberturas, em série ou em paralelo, o uso da analogia facilita a solução do cálculo de vazão de ar, com o emprego de fórmulas adotadas em circuitos elétricos.

A resistência à passagem do ar, R, depende da área de abertura, do coeficiente de descarga e da massa específica do ar. A diferença de pressão, força motriz que provoca o deslocamento do ar, pode ser originada em um edifício não dotado de ventilação forçada, pela diferença de temperatura entre o ar externo e o ar no interior do edifício (efeito chaminé) e pelas pressões externas e internas, positivas ou negativas, oriundas do impacto do vento no edifício (TOLEDO, 1999). Estes dois mecanismos podem agir de maneira separada ou de forma combinada, dependendo das condições atmosféricas, do projeto e da localização do edifício, para produzir diferenciais de pressão através das aberturas de entrada, ΔP_e e de saída ΔP_s, Figura 3.20.

Os resultados obtidos com a ventilação natural poderão variar consideravelmente, devido a alterações na intensidade e direção do vento, bem como à mudança de temperatura. No projeto de um sistema de ventilação natural, o arranjo, a localização e o controle das aberturas de ventilação devem ser tais que os dois diferenciais de pressão atuem de forma interativa. Tendo-se em mente a ação das diferenças de temperatura, as aberturas de entrada de ar deverão estar situadas em nível inferior às da saída. Na figura 3.21 apresenta-se uma situação em que os dois diferenciais atuam de forma interativa (CLEZAR & NOGUEIRA, 1999).

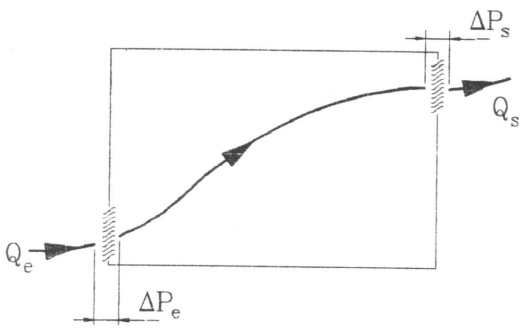

Figura 3.20 – Diferenciais de pressão causados pela ação do vento e da temperatura
Fonte: CLEZAR & NOGUEIRA, 1999

Figura 3.21 – Distribuição de pressões internas e externas ao longo da altura de um edifício
Fonte: CLEZAR & NOGUEIRA, 1999

3.4.1. Vazão de ar através de uma abertura

A vazão de ar através de uma abertura devido ao vento pode ser determinada quando se conhece o diferencial de pressão, ΔP, pela equação

$$Q = c_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{3.2}$$

onde c_d é o coeficiente de descarga, A é a área da abertura, ρ é a massa específica e Δp é a diferença de pressão, que é dada por

$$\Delta p = 0{,}5 \cdot \rho \cdot v_r \cdot c_p \tag{3.3}$$

onde, v_r é a velocidade do vento referencial e c_p é o coeficiente de pressão na abertura.

Para um determinado número de aberturas dispostas em paralelo, tem-se que

$$c_d A = \sum (c_d A)_i \tag{3.4}$$

Para um determinado número de aberturas dispostas em série, tem-se que

$$\frac{1}{(c_d A)^2} = \sum \frac{1}{(c_d A)_i^2} \tag{3.5}$$

A vazão de ar através de uma abertura devido à diferença de temperatura pode ser determinada por

$$Q = \frac{c_d}{3}\sqrt{\frac{gh\Delta T}{\overline{T}}} \tag{3.6}$$

onde, ΔT é a diferença de temperatura através da abertura, $\overline{T}$ é a temperatura média e h é a cota entre as aberturas.

3.4.2. Forças geradoras da ventilação natural

As forças geradoras da ventilação natural são originadas pela ação do vento e pela diferença de temperatura. A diferença de pressão originada pelo vento ao longo da fachada e a diferença entre as temperaturas interna e externa, criam uma troca de ar natural entre o ar interno e o ar externo. A taxa de ventilação depende da intensidade e do sentido destas forças e da resistência ao trajeto do fluxo. Estes processos físicos são complexos e a predição da taxa da ventilação é difícil, mas é importante controlar a ventilação natural a fim de se obter as condições internas de conforto.

Há uma grande lacuna de informações nos efeitos combinados do vento e do empuxo térmico em ventilação. É importante compreender e analisar inteiramente a ventilação natural sob os efeitos combinados do vento e do empuxo térmico a fim se realizar um projeto mais eficaz. Alguns estudos foram realizados com a finalidade de se obter um melhor conhecimento sobre a ventilação natural que ocorre devido à ação combinada do vento e do empuxo térmico (HUNT & LINDEN, 1999; LI & DELSANTE, 1999; HEISELBERG, et al., 2001).

Quando não há vento, o efeito chaminé torna-se o único responsável pela renovação do ar nas edificações sem sistemas mecânicos de ventilação. Este tipo de ventilação representa a situação mais simples da ventilação natural. Conhecida a temperatura interna do ar, o fluxo do ar é dado por

$$Q = c_d \cdot A^* \cdot \sqrt{2gh \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e}} \tag{3.7}$$

com

$$A^* = \frac{A_s \cdot A_i}{\sqrt{A_s^2 + A_i^2}} \tag{3.8}$$

onde c_d é o coeficiente de descarga, A^* é a área de abertura efetiva de um edifício, g é a aceleração da gravidade, h é a altura entre duas aberturas verticais, T_e é a temperatura externa, T_i é a temperatura interna, A_s é a área da abertura superior e A_i é a área da abertura inferior (LI & DELSANTE, 1999).

Durante o período de inverno a circulação natural de ar deve assegurar uma taxa mínima de renovação do ar dentro da edificação auxiliando na dissipação de fumaças e poeiras e do excesso de calor gerado internamente. No período de verão, o processo de ventilação natural pode melhorar as condições internas de conforto térmico, especialmente nas regiões de clima quente e úmido. Se há incidência de vento, esta ação deve ser conjugada ao efeito chaminé, e neste caso a posição e tamanho das aberturas são importantes para que não haja excesso de ventilação, que pode, dependendo da atividade exercida pela pessoa provocar desconforto.

Embora a ventilação natural pela ação do vento não oferece garantia de uniformidade, sua adoção não é inválida desde que o ar interno não contenha poluentes. Como medida de segurança, utiliza-se uma velocidade igual a 50 % do valor da velocidade média do vento dominante. A vazão de ar que entra em um recinto através de aberturas pode ser dada pela equação

$$Q = \varphi \cdot A_T \cdot v \tag{3.9}$$

onde Q é a vazão de ar, A_T é a área total de aberturas, v é a velocidade do vento.

A grandeza φ é um fator que depende das características das aberturas. Pode-se adotar 0,5 a 0,6 considerando-se ventos perpendiculares à parede onde estão as aberturas e 0,25 a 0,35 quando os ventos forem diagonais em relação à fachada (MACINTYRE, 1990). Alguns trabalhos encontrados na literatura mostram a influência do vento na ventilação natural (HUNT & LINDEN, 1999; JIANG & CHEN, 2001; CHEN, 2003; CAPELUTO, 2004).

Dependendo do arranjo das aberturas de ventilação, o vento pode auxiliar ou não na ventilação natural do ambiente (efeito chaminé). Ocorrem duas situações extremas quando há somente duas aberturas de ventilação, ou a ação do vento age completamente a favor ou completamente contra o efeito chaminé. Quando a ação do vento não auxilia a ventilação natural, o fluxo do ar pode ser ascendente ou descendente, como é mostrado na Figura 3.22.

Quando o vento auxilia o efeito chaminé, o fluxo de ar pode ser calculado pela equação

$$Q = c_d \cdot A^* \cdot \sqrt{2gh \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e} + 2\Delta P_w} \tag{3.10}$$

com

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} c_{p1} v_1^2 - \frac{1}{2} c_{p2} v_2^2 \tag{3.11}$$

Quando o vento se opõe ao efeito chaminé, o fluxo de ar é dado por

$$Q = c_d \cdot A^* \cdot \sqrt{\left| 2gh \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e} - 2\Delta P_w \right|} \tag{3.12}$$

onde c_d é o coeficiente de descarga, A^* é a área de abertura efetiva de um edifício, g é a aceleração da gravidade, h é a altura entre duas aberturas verticais, T_e é a temperatura externa, T_i é a temperatura interna, ΔP_W é o gradiente de pressão do vento entre as duas aberturas e não assume valor negativo, c_p é o coeficiente de pressão, *v* é a velocidade do vento e as subscrições 1 e 2 se referem a aberturas de ventilação.

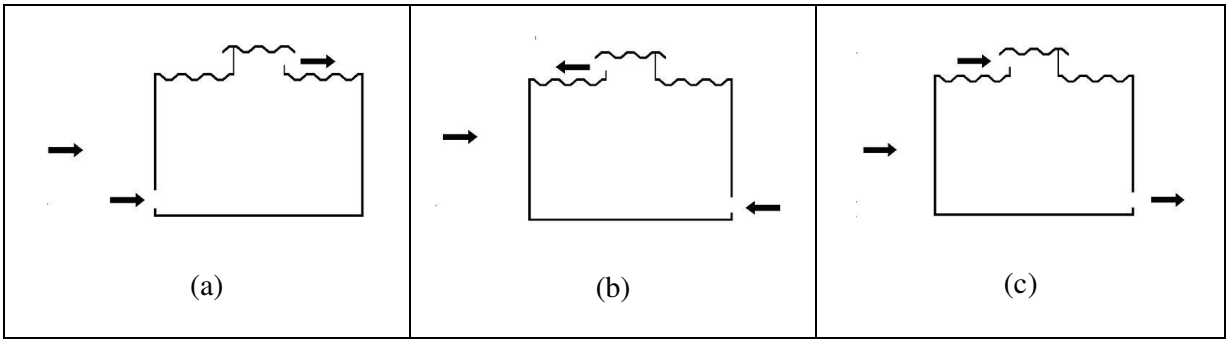

Figura 3.22 – (a) força do vento auxilia o efeito chaminé; (b) força do vento não auxilia o efeito chaminé com fluxo ascendente; e (c) força de vento não auxilia o efeito chaminé com fluxo descendente

Fonte: Adaptada de LI & DELSANTE, 1999

3.4.3. Coeficiente de pressão

O coeficiente de pressão está relacionado com a orientação do vento em relação à superfície sobre a qual ele está incidindo. Quando se aplica a equação de Bernoulli para um escoamento não perturbado em um ponto sobre a superfície na qual se deseja conhecer o coeficiente de pressão, correspondente a *j*-ésima linha de corrente, Figura 3.23, obtém-se:

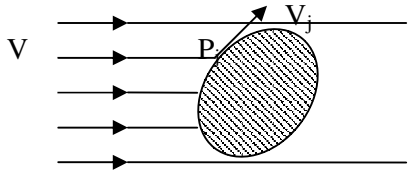

Figura 3.23 – Definição do coeficiente de pressão
Fonte: CLEZAR & NOGUEIRA, 1999

$$\frac{1}{2} \cdot V_{\infty}^2 \cdot \rho_{ar} = \frac{1}{2} \cdot V_j^2 \cdot \rho_{ar} + P_j \tag{3.13}$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar dada em Kg/m^3, V_∞ é a velocidade do vento longe da superfície dada em m/s, V_j é a velocidade do vento tangente à superfície na posição da *j*-ésima linha de corrente dado em m/s e P_j é a pressão efetiva sobre a superfície na *j*-ésima linha de corrente, dada em Pa.

Portanto, a pressão efetiva P_j pode ser calculada através das expressões (3.14) e (3.15).

$$P_j = \left[1 - \left(\frac{V_j}{V_\infty} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot V_\infty^2 \cdot \rho_{ar} \tag{3.14}$$

$$P_j = C_{P,j} (Pv)_\infty \tag{3.15}$$

onde $C_{P,j}$ é o coeficiente de pressão na posição j e $(P_v)_\infty$ é a pressão de velocidade do vento distante da superfície.
Os valores do coeficiente de pressão e da pressão de velocidade do vento distante da superfície, são dados por

$$C_{P,j} = 1 - \left(\frac{V_j}{V_\infty} \right)^2 \tag{3.16}$$

$$(P_v)_\infty = \frac{1}{2} \cdot V_\infty^2 \cdot \rho_{ar} \tag{3.17}$$

Analisando-se a equação (3.2) determina-se que

$$\begin{aligned} &V_j = 0 \rightarrow C_{P,j} = 1 \\ &V_j = V_j \rightarrow C_{P,j} = 0 \\ &V_j > 0 \rightarrow C_{P,j} < 1 \end{aligned} \tag{3.18}$$

3.4.4. Obtenção da vazão e da área de abertura

Os algoritmos de cálculo apresentam uma seqüência de cálculos para se determinar a vazão obtida em função de aberturas existentes ou as áreas de aberturas necessárias, para resultar em uma dada vazão de ventilação natural (Clezar & Nogueira, 1999).

O passo inicial consiste em se estabelecer hipóteses simplificativas, demarcar as cotas das aberturas, bem como caracterizar os parâmetros físicos para o ar. Isto é apresentado na Figura 3.24, para uma situação simples, envolvendo quatro aberturas. Todavia o algoritmo apresentado aplica-se a qualquer número e distribuição de aberturas.

No esquema mostrado na Figura 3.24, ρ_e e ρ_i representam as massas específicas do ar, correspondentes às temperaturas médias externas e internas, respectivamente, a pressão P_0 representa a pressão efetiva do ar interno no nível estabelecido como sendo o nível de referência e as pressões $P_{e,j}$ e $P_{i,j}$ são as pressões efetivas junto à abertura "j", na cota Z_j, correspondentes aos lados externo e interno, respectivamente.

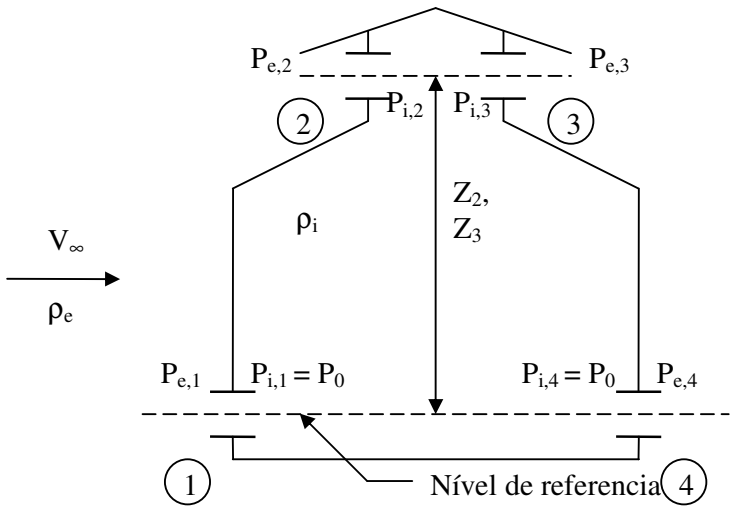

Figura 3.24 – Cotas e parâmetros físicos para o ar
Fonte: Adaptada de CLEZAR & NOGUEIRA, 1999

No esquema mostrado na Figura 3.24, ρ_e e ρ_i representam as massas específicas do ar, correspondentes às temperaturas médias externas e internas, respectivamente, a pressão P_0 representa a pressão efetiva do ar interno no nível estabelecido como sendo o nível de referência e as pressões $P_{e,j}$ e $P_{i,j}$ são as pressões efetivas junto à abertura "j", na cota Z_j, correspondentes aos lados externo e interno, respectivamente.

Adotam-se como hipóteses simplificativas regime permanente, onde é ignorada qualquer flutuação na intensidade e na direção do vento, desconsiderando-se qualquer oscilação de temperatura externa e interna e não se leva em conta, também, possíveis alterações decorrentes do fechamento de algumas aberturas e, também, perda de carga no escoamento interno desprezível, hipótese que é bastante razoável, tendo-se em vista a magnitude bastante grande da seção transversal implicando uma baixa velocidade do escoamento nestes ambientes.

Para o cálculo da vazão, admitem-se conhecidas a intensidade e a direção do vento, a temperatura e a pressão externa do ar, e conseqüentemente sua massa específica, os coeficientes de pressão, as áreas e as cotas de cada abertura. Considera-se também

conhecida, a temperatura média do ar interno ou a carga térmica sensível do ambiente. Segundo Clezar & Nogueira (1999), deve-se estabelecer a seguinte seqüência de cálculos:

(1) No caso de não ser conhecida a temperatura média interna, calcular a massa específica ρ_i a partir de um valor estimado desta temperatura.

(2) Calcular pressões externas, (vento + desnível), junto a cada abertura, considerando os desníveis em relação a um nível de referência, onde a pressão efetiva externa da atmosfera será nula. Assim, as pressões externas em cada abertura serão obtidas pela expressão

$$P_{e,j} = C_{P,j} \cdot \frac{1}{2} \rho_e \cdot V_\infty^2 - \rho_e \cdot g \cdot Z_j \tag{3.19}$$

(3) Expressar as pressões internas junto a cada abertura, em função da pressão interna no nível de referência, P_0.

$$P_{i,j} = P_0 - \rho_i \cdot g \cdot Z_j \tag{3.20}$$

(4) Estabelecer o gradiente de pressão para cada abertura.

$$\Delta P_j = (P_{e,j} - P_{i,j}) \tag{3.21}$$

(5) Determinar P_0 pela aplicação da equação da continuidade.

$$\sum_{j=1}^{n} \dot{m}_j = 0 \tag{3.22}$$

onde, n representa o número total de aberturas.

Introduzindo-se a equação 3.2, obtém-se

$$\sum_{j=1}^{n} K_j \cdot A_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot \left|\Delta P_j\right|} \cdot \frac{\Delta P_j}{\left|\Delta P_j\right|} = 0 \tag{3.23}$$

Na equação 3.23, o ΔP_j foi considerado em módulo para se evitar o surgimento de um sinal negativo no radicando. Além disto, nesta equação,

$$\rho_{ar} = \begin{cases} \rho_e \cdot se \cdot \Delta P_j > 0 \\ \rho_i \cdot se \cdot \Delta P_j < 0 \end{cases} \tag{3.24}$$

e o quociente $\frac{\Delta P_j}{\left|\Delta P_j\right|}$ foi introduzido para se levar em conta os sinais das parcelas do balanço de massa.

(6) Calcular as vazões por

$$Q_j = K_j \cdot A_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \left|\Delta P_j\right|}{\rho_{ar}}} \cdot \frac{\Delta P_j}{\left|\Delta P_j\right|} \tag{3.25}$$

Para o cálculo das áreas das aberturas, admitem-se conhecidos a intensidade e a direção do vento, a temperatura e a pressão externa do ar, e conseqüentemente sua massa

específica, os coeficientes de pressão, a vazão requerida para ventilação, a qual iguala o somatório das vazões de entrada, bem como as cotas de cada abertura, estipulando-se, para cada posição, a fração, λ_j, da área total requerida. Considera-se também conhecida a temperatura média do ar interno, e conseqüentemente, sua massa específica. Segundo Clezar & Nogueira (1999), deve-se estabelecer a seguinte seqüência de cálculos:

(1) Calcular pressões externas, (vento + desnível), junto a cada abertura, considerando os desníveis em relação a um nível de referência, onde a pressão efetiva externa da atmosfera será nula. Assim, as pressões externas em cada abertura serão obtidas pela expressão

$$P_{e,j} = C_{P,j} \cdot \frac{1}{2} \rho_e \cdot V_\infty^2 - \rho_e \cdot g \cdot Z_j \qquad (3.19)$$

Expressar as pressões internas junto a cada abertura, em função da pressão interna no nível de referência, P_0.

$$P_{i,j} = P_0 - \rho_i \cdot g \cdot Z_j \qquad (3.20)$$

(2) Estabelecer o gradiente de pressão para cada abertura.

$$\Delta P_j = (P_{e,j} - P_{i,j}) \qquad (3.21)$$

(3) Determinar P_0 pela aplicação da equação da continuidade.

$$\sum_{j=1}^{n} \dot{m}_j = 0 \qquad (3.22)$$

onde, n representa o número total de aberturas. Introduzindo-se a equação 32.2, e a fração de área das aberturas, λ_j, e colocando-se a constante A_T em evidência, obtém-se

$$A_T \cdot \sum_{j=1}^{n} K_j \cdot \lambda_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot \left|\Delta P_j\right|} \cdot \frac{\Delta P_j}{\left|\Delta P_j\right|} = 0 \tag{3.26}$$

Como A_T é diferente de zero, resulta

$$\sum_{j=1}^{n} K_j \cdot \lambda_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot \left|\Delta P_j\right|} \cdot \frac{\Delta P_j}{\left|\Delta P_j\right|} = 0 \tag{3.27}$$

Sendo

$$\lambda_j = \frac{A_j}{A_T} \tag{3.28}$$

e

$$A_T = \sum_{j=1}^{n} A_j \tag{3.29}$$

$$\rho_{ar} = \begin{cases} \rho_e \cdot se \cdot \Delta P_j > 0 \\ \rho_i \cdot se \cdot \Delta P_j < 0 \end{cases} \tag{3.30}$$

(4) Atentando-se para o fato de que o lado esquerdo da equação 3.23, sem a razão $\frac{\Delta P_j}{\left|\Delta P_j\right|}$, representa o dobro da vazão mássica de ventilação, $\rho_e.Q_e$, pode-se escrever

$$\sum_{j=1}^{n} K_j \cdot \lambda_j \cdot A_T \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot \left|\Delta P_j\right|} = \left|\dot{m}_e\right| + \left|\dot{m}_s\right| = 2 \cdot Q_{e\cdot} \cdot \rho_e \tag{3.31}$$

Mas a área total pode ser representada em função das áreas individuais de cada abertura pela equação,

$$A_T = \frac{A_k}{\lambda_k} \tag{3.32}$$

a qual, quando substituída na equação 3.31 acima, permite isolar A_k, para se determinar as áreas individuais de cada abertura.

$$A_k = \frac{2 \cdot Q_e \cdot \rho_e \cdot \lambda_k}{\sum_{j=1}^{n} K_j \cdot \lambda_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot |\Delta P_j|}} \tag{3.33}$$

3.5. Índice de ventilação natural – IVN

O IVN é o quociente da área total das aberturas disponíveis para a saída do ar aquecido pela área do piso interno da construção, multiplicado por 100. É influenciado pelos seguintes coeficientes relacionados com a forma do aparato instalado nas aberturas de passagem de ar para permitir entrada de luz e protegê-las contra a entrada de chuva: R_{aa} (Redutor de Área de Abertura) que determina a área efetivamente disponível para passagem do ar através do aparato utilizado para permitir entrada de luz e proteção contra chuva, instalado na abertura; R_{da} (Redutor Devido ao Atrito) que representa o grau de dificuldade, devido ao atrito, que o ar enfrenta para atravessar o aparato utilizado para permitir entrada de luz e proteger contra chuva em função da distância entre as aletas do mesmo e devido à presença ou não dos vários tipos de telas protetoras contra entrada de animais e R_{md} (Redutor de Mudança de Direção) que representa a perda de eficiência decorrente da necessidade do ar quente ser obrigado a descer antes de sair do edifício através do aparato utilizado para permitir a entrada de luz e proteção

contra chuva, contrariando sua tendência natural que é de sempre subir. O IVN é calculado por

$$IVN = \frac{A_a}{A_p} \times R_{aa} \times R_{da} \times R_{md} \times 100 \quad (3.34)$$

Segundo Scigliano & Hollo (2001), o Índice de Ventilação Natural (IVN) possibilita a aferição do grau de conforto térmico dos edifícios, com exceção daqueles que possuem alta intensidade de fonte interna de calor.

O valor do IVN é diretamente proporcional ao grau de conforto térmico do edifício, sendo facilmente calculado a partir da área do piso e da área e do formato das aberturas de ventilação de um edifício, respeitando-se os valores mínimos para pé direito, bem como a posição e a uniformidade da distribuição de aberturas.

Constata-se nos estudos realizados por Scigliano & Hollo (2001), que as construções com baixa e média intensidade de geração interna de calor atingem níveis plenamente satisfatórios de conforto térmico quando seu IVN se aproxima do índice 4, podendo ser considerado aceitável já a partir do índice 3.

Para se determinar o IVN de uma construção é necessário primeiro calcular os índices de ventilação natural correspondentes às aberturas de saída de ar quente e as aberturas de entrada de ar frio. Será considerado como IVN da construção o menor IVN encontrado, por ser ele o limitante, seja ele o IVN correspondente às aberturas de saída de ar quente ou o IVN correspondente às aberturas de entrada de ar frio.

3.5.1. Cálculo do R_{aa}

O Redutor de Área de Abertura, R_{aa}, é definido por

$$R_{aa} = \frac{A_{efet}}{A_{abert}} = \frac{\left(N \cdot L_m \cdot C_{passag}\right)}{\left(V \cdot C_{abert}\right)} \tag{3.35}$$

onde A_{efet} é a área efetivamente disponível para passagem de ar no aparato utilizado para permitir a entrada de luz e proteção contra chuva; A_{abert} é a área da abertura onde se instalou o aparato; N é a quantidade de passagens; L_m é a largura da passagem de ar; V é o vão de entrada de luz da abertura; C_{passag} é o comprimento da passagem; C_{abert} é o comprimento da abertura.

3.5.2. Valores de R_{da}

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores de R_{da}, para os aparato mais usuais, levando-se em conta também a presença ou não dos quatro tipos de telas mais utilizadas nos aparelhos para proteção contra entrada de animais. Devem-se adotar os valores da coluna "sem tela" quando a largura da tela passarinheira for pelo menos 5 % superior a largura de passagem mais estreita no percurso do ar quente.

3.5.3. Valores de R_{md} para os aparatos mais usuais

Apresentam-se na Figura 3.25, algumas das geometrias de lanternins mais usuais e seus respectivos valores do coeficiente Redutor de Mudança de Direção, R_{md}.

Tabela 3.1 – Redutor devido ao atrito e a presença de tela protetora - R_{da}

Distância entre aletas ou larguras dos canais para passagem	R_{da} - Redutor devido ao atrito e a presença de tela protetora				
	sem tela	tela metálica passarinheira com fios de 0,71mm de diâmetro e malha de 12,7mm	tela plástica com fios de 2,2mm de diâmetro e malha de 9,1mm X 10,3mm	tela plástica mosquiteira com fios de 0,5mm de diâmetro e malha de 1,0mm	tela plástica anti-afídeos com fios de 0,22mm de diâmetro e malha de 0,27mm X 0,78mm
de 3,0 a 4,9 cm	0,66	0,63	0,50	0,40	0,26
de 5,0 a 8,9 cm	0,70	0,67	0,53	0,42	0,28
de 9,0 a 15,9 cm	0,76	0,72	0,57	0,46	0,30
de 16,0 a 23,9 cm	0,84	0,80	0,63	0,50	0,34
maior que 24,0 cm	1,00	0,95	0,75	0,60	0,40

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

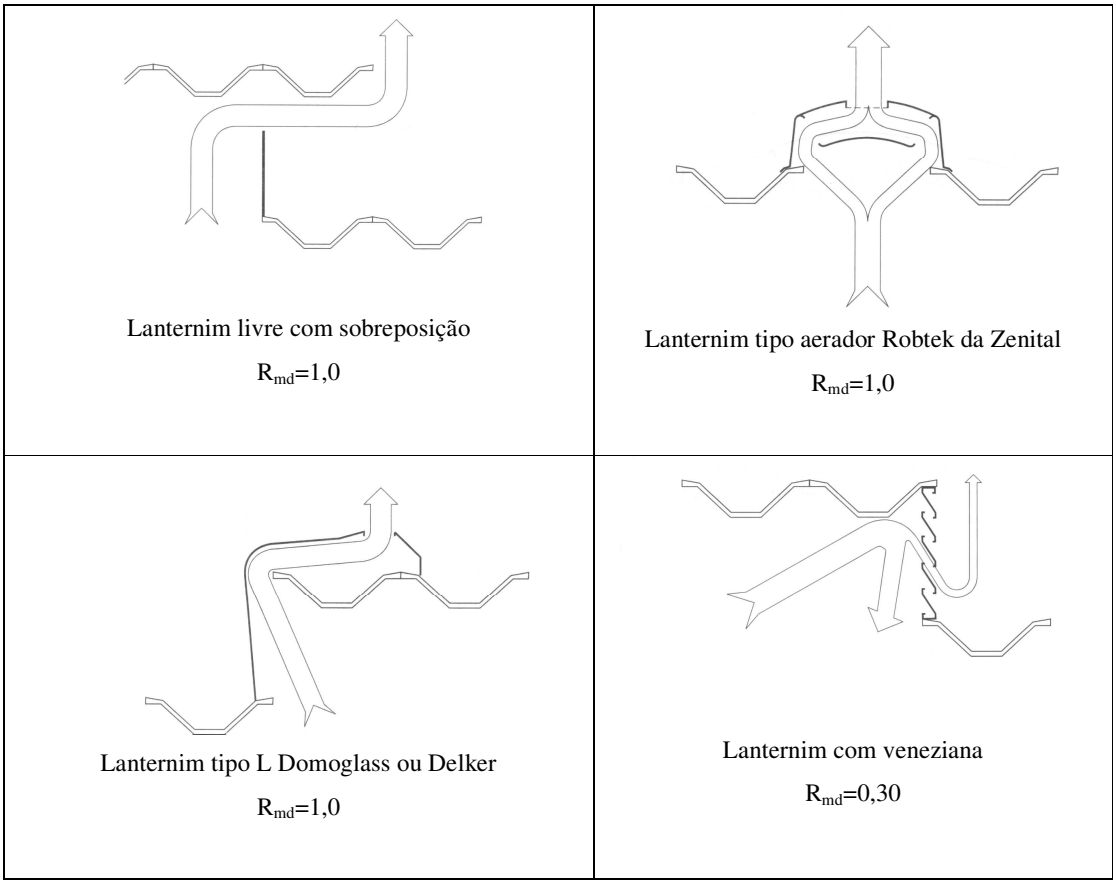

Figura 3.25 – Valores de R_{md} para os aparelhos tipo lanternim mais encontrados no mercado
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

3.6. Relação entre o algoritmo para o cálculo das áreas de aberturas e o IVN

Uma maneira prática de se obter o dimensionamento do lanternim é utilizando a relação entre o algoritmo para o cálculo das áreas de aberturas sugerido por Clezar & Nogueira (1999) e o cálculo do Índice de Ventilação Natural (IVN), sugerido por Scigliano & Hollo (2001). A correlação entre o algoritmo para o cálculo das áreas das aberturas e o cálculo do Índice de Ventilação Natural está no fato de que a área total das aberturas disponíveis para a passagem de ar, A_a, antes da instalação dos aparatos utilizados para permitir a entrada de luz e proteção contra chuva, é igual à área total para a passagem de saída do ar, A_s.

A área total para a passagem de saída do ar é dada por

$$A_S = \sum_{X=1}^{n} A_K \tag{3.36}$$

onde, A_k representa a área individual das aberturas de saída para a passagem de ar e A_s a área total para a passagem de saída do ar. O valor de A_k é obtido utilizando-se a equação 3.33, ou seja, por meio da resolução do algoritmo descrito no item 3.4.4.

A correlação existente entre os dois estudos possibilita o desenvolvimento de um algoritmo que permite a obtenção da altura da abertura de passagem do ar no lanternim. Para a execução deste algoritmo, utiliza-se o programa computacional MAPLE (Anexo I).

3.7. Recomendações de projeto

A seguir são apresentadas algumas recomendações para se obter uma ventilação natural com o máximo de eficiência:

- Evitar projetos de pavilhões com grandes vãos entre as paredes contendo as aberturas de entrada de ar, pois, no caso de grandes vãos, a ventilação da região central poderá ficar prejudicada por curto-circuitos entre as entradas e saídas de ar.
- Maximizar as distâncias verticais entre as aberturas de ventilação, para tirar maior proveito da ação da diferença de temperatura.
- Orientar a edificação de maneira conveniente, para otimizar a ação dos ventos predominantes.
- Proteger da ação contrária dos ventos, por meio de anteparos, as aberturas de saída do ar.
- Recomenda-se que a área de entrada, A_e, seja aproximadamente o dobro da área de saída, A_s, pois nessas condições a vazão será aumentada em cerca de 25 % em relação ao valor obtido para $A_e \cong A_s$, como mostrado na figura 3.26. Este procedimento garante a manutenção da vazão desejada, mesmo nos dias mais desfavoráveis, quando parte das aberturas de entrada poderão estar em depressão, devido à ação do vento diferente daquela adotada no projeto.

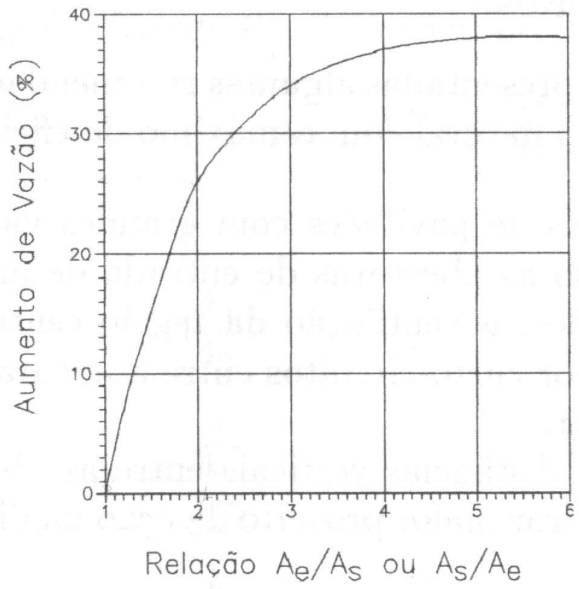

Figura 3.26 – Efeito de aberturas desiguais
Fonte: CLEZAR & NOGUEIRA, 1999

3.8. Equações governantes

Com o objetivo de analisar a distribuição da temperatura interna e o fluxo de ar no interior de um galpão, devem-se observar os princípios da conservação de massa, quantidade de movimento e energia no domínio, ou seja, no ambiente a ser estudado (XUE & SHU, 1999).

Considerando-se o fluxo de ar transiente, turbulento e a transferência de calor dentro do ambiente num modelo bidimensional. As equações da continuidade, da quantidade de movimento e da energia podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{3.37}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{3.39}$$

$$c_p \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + S_T \tag{3.40}$$

onde u e v são as velocidades nas direções x e y, respectivamente; ρ é a massa específica do ar; μ é a viscosidade dinâmica; T é a temperatura do ar no domínio e S_T é o termo fonte.

Uma forma básica, é a equação de transporte escalar para ϕ_i

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}\right) + S_\phi \tag{3.41}$$

Independentemente do tipo de método numérico adotado, as equações diferenciais são resolvidas, substituindo-se as derivadas existentes nas equações, por meio de uma

discretização no domínio do problema, por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. A maneira de se obter essas equações algébricas é que caracteriza o tipo de método numérico. Dentre estes métodos podem ser citados o Método das Diferenças Finitas, o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos.

4. GALPÕES

4.1. Considerações gerais

Para a construção de um galpão, deve-se abordar o planejamento, a concepção arquitetônica e os diferentes materiais e técnicas construtivas disponíveis no mercado, visando propiciar melhor desempenho térmico do ambiente, compatível com as diferentes regiões climáticas brasileiras.

Verifica-se especialmente no Brasil, que pouca observância se tem dado à fase de planejamento e concepção arquitetônica, compatível com a realidade climática de cada região.Não tem sido dada nenhuma atenção ao condicionamento térmico natural, que é a técnica que baliza os procedimentos construtivos para que os espaços habitados apresentem as condições térmicas exigidas pelo indivíduo, utilizando ao máximo os recursos da própria natureza, como a ventilação natural e o paisagismo circundante e os recursos dos materiais de construção e da concepção arquitetônica.

O principal componente que separa o indivíduo do ambiente externo é a cobertura. Assim, é importante a adequada escolha dos materiais de cobertura e suas associações, bem como a concepção arquitetônica e o paisagismo circundante, os quais têm a finalidade de, em conjunto, amenizar as adversidades climáticas, tanto para os períodos de frio, quanto de calor.

Constata-se que a freqüente situação de temperaturas elevadas dentro dos galpões brasileiros, que geram desconforto térmico quase permanente aos indivíduos, é devida mais à má concepção, adequação e escolha dos materiais e técnicas de construção, do que propriamente ao clima (TINÔCO, 2001).

4.2. O galpão e sua adequação aos diferentes climas do Brasil

Adequar a edificação 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 nos quais altos índices de produtividade sejam atingidos.

Ao se projetar um galpão para uma determinada região climática, o primeiro cuidado que se deve ter é a atenta observância ao condicionamento térmico natural, baseado no conhecimento das possibilidades de intervir sobre as variáveis do meio para melhorar a habitabilidade térmica dos espaços por meios puramente naturais: a localização, a forma e a orientação das edificações, juntamente com os dispositivos que controlam a radiação solar; a seleção adequada dos materiais e procedimentos construtivos; a previsão de uma ventilação perfeitamente controlada e a exploração do paisagismo são todos elementos que muitas vezes definem a composição e também a arquitetura de uma região.

Para regiões de clima muito quente no verão e expostas a grandes variações de temperatura durante todo o ano, como é o caso do sul do país, a arquitetura deverá cuidar especialmente da eliminação da radiação solar no período quente. Os materiais de construção do galpão deverão ter um bom poder de amortecimento e a ventilação deverá contar com dispositivos que permitam um regime de ventilação diferente de dia e de noite, no verão e no inverno.

Nas regiões com clima quente e úmido durante o ano inteiro e sem muitas amplitudes térmicas, como é o caso do norte brasileiro, as respostas arquitetônicas englobando as modificações ou sistemas auxiliares devem procurar a eliminação permanente da radiação solar e uma ventilação contínua e abundante. A exploração do paisagismo circundante e da ventilação natural, juntamente com a adequada concepção arquitetônica e escolha do material de melhor comportamento térmico para a cobertura constituem a solução ideal para os galpões dessas regiões.

No que diz respeito ao condicionamento artificial, a ventilação forçada constitui a decisão mais acertada, sendo que os processos adicionais de resfriamento do ar por via evaporativa devem ser estudados com cautela nessas regiões, devido a problemas com umidade do ar excessiva, como é o caso do estado do Pará.

Para a grande maioria do Nordeste e Centro Oeste brasileiro, contudo, regiões caracterizadas por climas quentes e secos e maior amplitude térmica, os processos de arrefecimento da temperatura do ar por evaporação, se adequadamente dimensionados, podem ser adotados sem inconvenientes. Da mesma forma, a utilização de materiais de construção com maior amortecimento, especialmente na cobertura, é fundamental (TINÔCO, 2001).

4.3. Estratégias construtivas para modificar favoravelmente o ambiente das instalações

Deve-se utilizar o sistema artificial para o condicionamento térmico do ambiente somente quando os recursos naturais estiverem esgotados ou quando a introdução de sistemas artificiais passar a ser econômica e/ou tecnicamente mais viável que o completo esgotamento dos recursos naturais.

Assim, considerando-se que o Brasil localiza-se na faixa mais quente do globo terrestre, onde as médias de temperaturas ao longo do ano geralmente são muito superiores ao desejável para o conforto térmico, especialmente no verão, entende-se que se deve atentar prioritariamente para os problemas relativos ao estresse por calor. Contudo, se deve também contemplar as prerrogativas necessárias ao conforto térmico no inverno de certas regiões mais frias do país, ou com noites e dias diferenciados. Sendo assim, ao se planejar e projetar um galpão deve-se atentar para algumas estratégias construtivas com o objetivo de modificar favoravelmente o ambiente construído às condições adequadas de conforto (TINÔCO, 2001).

4.3.1. Orientação

Para o clima tropical e subtropical, o eixo longitudinal dos galpões deve estar orientado no sentido leste-oeste, com o que se conseguirá que a superfície exposta a oeste seja a menor possível, evitando-se um sobreaquecimento pela forte insolação nas longas tardes de verão; que ao dispor de uma fachada orientada totalmente a norte, o sol de inverno, que sobe pouco no horizonte, penetre até o interior do edifício em decorrência do

deslocamento paralelo do plano da trajetória aparente do sol para o norte, o que é desejável, enquanto no verão o próprio beiral atuará como guarda-sol (no caso do hemisfério sul); que tendo duas fachadas, uma permanentemente quente e a outra permanentemente fria, favorece-se, também, a ventilação natural naqueles edifícios que não dispõem de outro meio de ativá-la. Além disso, o vento dominante no caso do Brasil é predominantemente o sul, contribuindo ainda mais nesse sentido.

4.3.2. Disposição das construções

O afastamento entre galpões e construções vizinhas deve ser suficiente para que as mesmas não atuem como barreira à ventilação natural nos galpões.

4.3.3. Proteção contra a insolação

A principal causa do desconforto térmico dos galpões no verão é a insolação, a qual, durante o dia, contribui com a parcela mais substancial de calor que penetra na construção, especialmente no caso de galpões abertos. Para atenuar o efeito da insolação, o primeiro artifício objetivando o conforto térmico em climas quentes é o sombreamento natural ou artificial. Vale a ressalva, contudo, de que mesmo à sombra, o indivíduo está sujeito à radiação indireta, oriunda do céu distante, do solo sombreado, do solo aquecido e das estruturas que estejam próximas ao local (TINÔCO, 2001).

4.3.4. Oitões

Nas paredes laterais (oitões) que recebem frontalmente o sol de nascente e poente, a proteção pode ser feita pintando-as com cores claras, sombreando-as por meio de vegetação ou beirais, adotando paredes de grande capacidade calórica, como as dos tijolos maciços de barro ou blocos furados com no mínimo 15 cm de espessura, aproveitando o fato de que a insolação é um fenômeno transitório e provocando o desejável amortecimento das variações da temperatura externa (TINÔCO, 2001).

4.3.5. Coberturas

A cobertura reduz a carga térmica de radiação proveniente do sol e do céu e substitui uma área de solo aquecido por uma área de solo sombreado, mas adiciona uma nova fonte de energia, ou seja, o material de cobertura.

Assim, é no telhado que a radiação solar atua com maior intensidade, sendo que o fluxo de calor que atravessa o mesmo no pico de calor, é da ordem de cinco vezes maior que aquele disperso no ambiente interno. Esse calor pode ser controlado pela ventilação adequada e o efeito da radiação pelo isolamento térmico (NAAS, 1989).

Para melhorar o comportamento térmico das coberturas, pode-se lançar mão de alguns artifícios como uso de forros sob a cobertura, pinturas com cores claras e escuras, pintura reflexiva, uso de materiais isolantes, materiais de grande inércia térmica e aspersão de água sobre o telhado (TINÔCO, 2001).

4.3.6. Inclinação do telhado

A inclinação do telhado afeta o condicionamento térmico ambiental no interior dos galpões em dois pontos básicos: mudando o coeficiente de forma correspondente às trocas de calor por radiação entre o indivíduo e o telhado e modificando a altura entre as aberturas de entrada e saída de ar (lanternim), que quanto maior a inclinação, maior será a ventilação natural devido ao termossifão. Inclinações entre 20 º e 30 º têm sido consideradas adequadas, atendendo condicionantes estruturais e térmicos ambientais.

A distribuição de pressões decorrentes da ação do vento em um telhado depende da inclinação do mesmo. Telhados com inclinação menor que 30 º tem as duas águas sob sucção fazendo com que a ventilação pelo efeito do vento seja aumentada. Telhados mais inclinados têm pressão positiva na água de barlavento e sucção na de sotavento.

4.3.7. O emprego de lanternins

Um telhado dotado de grande inclinação motiva maior velocidade do ar sobre a cumeeira e, como conseqüência, ocorre uma pressão negativa mais acentuada, sendo o

ar mais rapidamente succionado para fora da dependência, o que é desejável. Uma forma de direcionar o fluxo de ar é localizar a abertura de saída de ar (lanternim) na cumeeira do telhado, pois, nessa região há sempre alguma pressão negativa.

Recomenda-se que o lanternim seja construído em duas águas, disposto longitudinalmente em toda a extensão do telhado, ser equipado com sistema que permita fácil fechamento e com tela de arame nas aberturas para evitar a entrada de pássaros. Para galpões com larguras iguais ou superiores a 8,0 m o uso de lanternim é imprescindível. Deve permitir abertura mínima de 10 % da largura da edificação, com sobreposição de telhados com afastamento de 5 % da largura da edificação ou 40 cm no mínimo, Figura 4.1. As extremidades do lanternim devem estar no máximo a 5 cm acima da abertura do telhado para evitar entrada de chuva. Outro modo eficiente de reduzir a carga térmica em épocas quentes é a ventilação do ático, colchão de ar que se forma entre a cobertura e o forro, Figura 4.2. Essa técnica consiste em direcionar o fluxo de ar para o lanternim, por meio de aberturas feitas ao longo do beiral da construção. A técnica de acrescentar aberturas na cobertura é indicada mesmo que exista forro. Nesse caso, é necessário distribuir, de forma adequada, algumas aberturas no forro.

O lanternim tem a função de permitir a saída de ar quente, principalmente durante o período de calor. Resultados experimentais têm demonstrado que o fluxo de ar através do lanternim é diretamente proporcional a sua área de abertura, à diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída de ar, à área das aberturas de entrada de ar e à diferença entre as temperaturas internas e externas. Para que o lanternim desempenhe sua função no condicionamento térmico natural, torna-se necessário que a área de abertura horizontal seja igual à área de abertura vertical e que possua um dispositivo para fechamento em condições de frio (EMBRAPA, 2005).

Nas regiões expostas a chuvas de vento ou com grandes amplitudes térmicas (noites e dias ou invernos e verões termicamente muito diferenciados), os lanternins deverão ser equipados com sistema que permita fácil fechamento das aberturas, pois podem ocorrer

a entrada de folhas, papéis, gravetos, poeira e água, além de ocorrer a visita indesejada de pequenos animais.

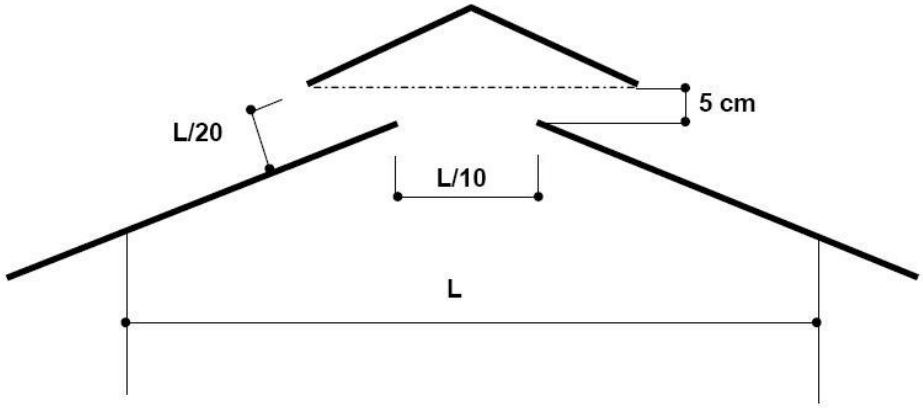

Figura 4.1 - Esquema para determinação das dimensões do lanternim

Fonte: EMBRAPA, 2005

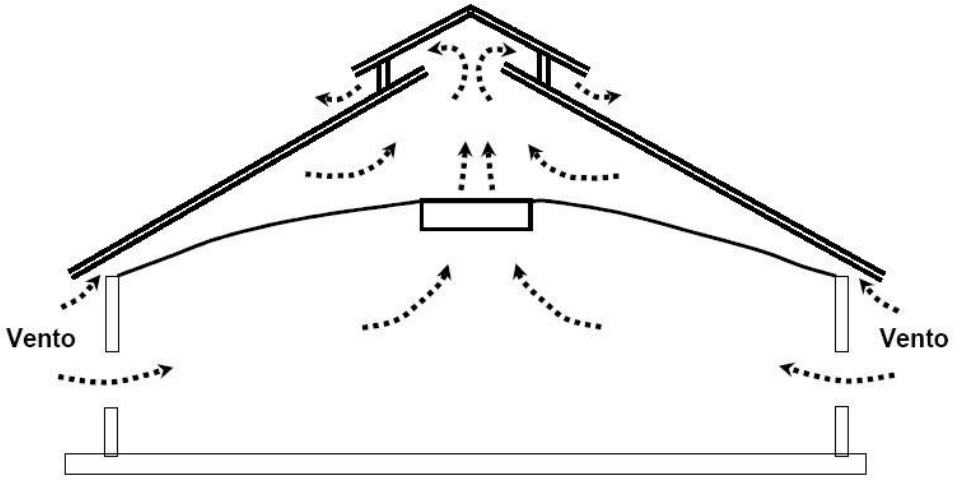

Figura 4.2 - Ventilação do ático

Fonte: EMBRAPA, 2005

Uma situação não favorável no uso do lanternim está no fato de que, quando a corrente de ar é favorável, a maior parte do vento passa direto pela abertura impedindo que o ar quente continue sua ascensão natural, o pouco vento que consegue entrar apenas

empurra o ar quente para baixo agravando o problema, no caso de fumaça ou gazes ele apenas os espalha ainda mais pelo prédio, Figura 4.3 (COOPERIN, 2005).

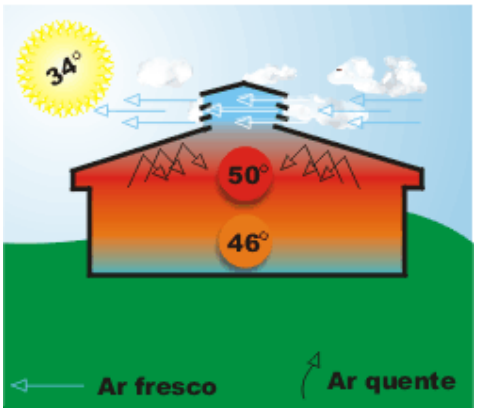

Figura 4.3 – Passagem do ar fresco no sistema lanternim
Fonte: COOPERIN, 2005

4.3.8. Influência da vizinhança – Paisagismo circundante e Quebra-ventos

A existência de vegetação ao redor de construções é muito desejável para evitar a incidência da irradiância solar direta dentro das áreas das coberturas. A vegetação em geral, seja promovendo sombra natural sobre as coberturas, seja criando regiões com microclima ameno, pode reverter completamente uma situação de desconforto térmico.

Os quebra-ventos são artifícios naturais ou artificiais destinados a deter ou reduzir a ação de ventos fortes ou muito frios sobre as construções. Em sua maioria são naturais, sendo constituídos por renques de vegetação como pinus, casuarina (zonas costeiras), eucalipto, milho, acácia etc., dispostos perpendicularmente à direção dos ventos dominantes (TINÔCO, 2001).

4.4. Conforto térmico

Na construção de galpões industriais, armazéns e outros, é usual deixar-se aberturas nos telhados para permitir a entrada de luz natural (iluminação natural). É usual também se

deixar aberturas nas fachadas que, em conjunto com as aberturas do telhado, permitem a saída do ar quente e poluído de dentro das edificações, bem como a entrada do ar frio externo (ventilação natural). Esta disposição de aberturas é mostrada na Figura 4.4.

Constata-se que todas as construções que apresentam bom conforto térmico são dotadas de iluminação natural limitada, ventilação natural eficiente e temperatura interna levemente superior à temperatura externa. Nestas construções a cobertura é do tipo lanternim e os índices de iluminação não ultrapassam 20 %.

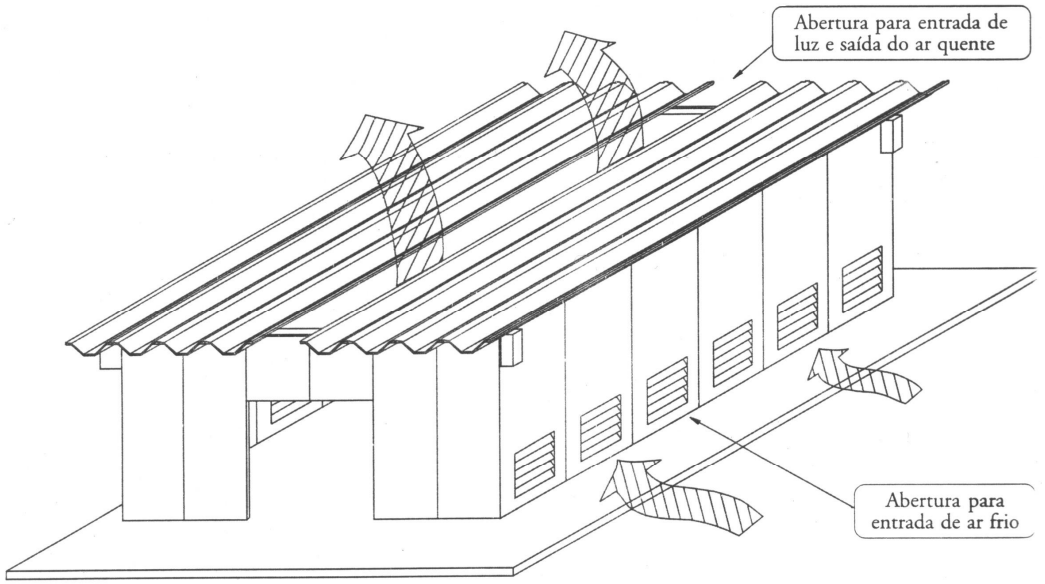

Figura 4.4 – Disposição de aberturas que permite a iluminação natural e a ventilação natural

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.4.1. Iluminação natural

Tendo em vista que a entrada de luz solar no edifício gera um aquecimento interno, constata-se que é preciso limitar a entrada deste tipo de luz ao mínimo necessário para

se obter um aclaramento satisfatório. Constata-se que a iluminação tipo lanternim apresenta desempenho ideal quando aplicada em área equivalente a 20 % da área de piso. Na Figura 4.5 apresenta-se um módulo de um prédio com iluminação tipo lanternim com 20 % iluminação (SCIGLIANO & HOLLO, 2001).

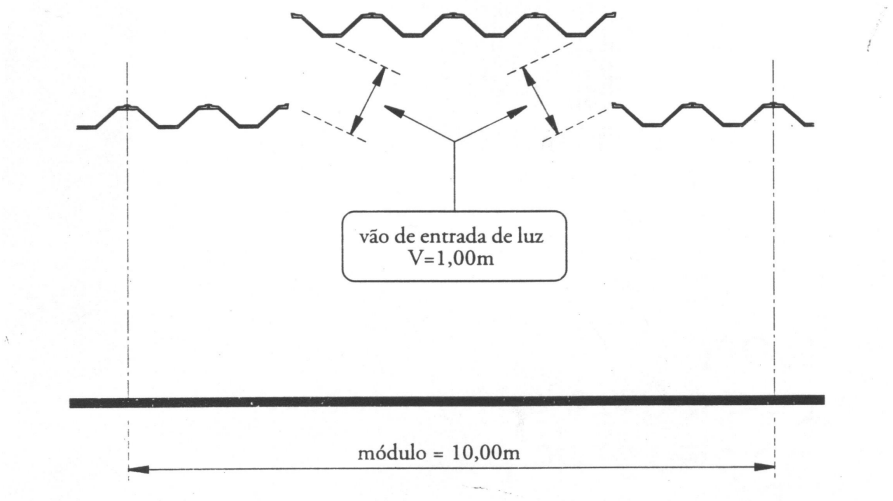

Figura 4.5 – Prédio com 20% de iluminação tipo lanternim

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.4.2. Ventilação natural

A ventilação obedece a exigências térmicas e higiênicas diferentes. Nas regiões nas qual a temperatura se mantém quase sempre acima da requerida pelo conforto, deve prevalecer uma ventilação baseada em razão térmica, e o projeto deverá estar orientado para essa necessidade. Nas regiões frias, com baixas temperaturas, a ventilação se deve a razões higiênicas (ligadas à renovação e qualidade do ar interior), exclusivamente. Para regiões temperadas, no entanto, que possuem um período frio e outro quente muito bem definidos e discrepantes, a arquitetura do projeto deve adaptar-se a diferentes necessidades, originando o que se chama ventilação de inverno, na qual a principal

preocupação é a exigência higiênica e a ventilação de verão, que deverá satisfazer tanto razões higiênicas quanto térmicas.

A dupla condição da ventilação vai se refletir na localização da construção, área e forma de abrir dos dispositivos (janelas ou aberturas e posição das cortinas protetoras dos galpões e lanternins), de maneira que, nas regiões com invernos rigorosos, o fluxo se desloque naturalmente pela zona superior da construção, para evitar o efeito direto sobre os ocupantes, enquanto que no verão a massa de ar se movimentará por todo o espaço inferior e superior, exercendo uma influência direta sobre o conforto e simultaneamente eliminando parte do calor acumulado em paredes laterais, piso, teto e equipamentos. A quantidade de ar a renovar no inverno por razão higiênica é pequena, sendo necessárias apenas aberturas reduzidas de entrada e saída.

A ventilação natural pode e deve ser amplamente aproveitada nos climas quentes, o que se consegue com um criterioso estudo sobre as possibilidades propiciadas pelo clima, pela topografia do terreno e da localização do galpão, pela organização espacial dos galpões, pelo paisagismo natural e pela própria construção (dimensões, desenho e localização das aberturas de entrada e de saída). Muitas vezes, torna-se adequado prever a utilização da vegetação, com finalidade de canalizar o fluxo do vento para determinados pontos das construções, visando aumento ou redução de sua velocidade, conforme o caso. No entanto, como a ventilação natural depende de forças naturais muito variáveis, apesar dos esforços em empregar todo o potencial da ventilação natural, algumas vezes torna-se adequado lançar mão da ventilação artificial.

O fluxo de ar que entra ou sai de uma construção depende da diferença de pressão entre os ambientes interno e externo, da resistência ao fluxo de ar oferecida pelas aberturas, das obstruções internas e de uma série de implicações relativas à forma do prédio. O dimensionamento de um sistema de ventilação natural é complexo, especialmente porque as quantidades, intensidade e direção dos ventos modificam-se continuamente.

Os efeitos da incidência de ventos ficam muito reduzidos quando o pavilhão situa-se longitudinalmente em relação à principal direção do vento. Por exemplo, no caso do Brasil, em que predomina na maior parte das regiões o vento vindo de sul, o eixo da

instalação (tomado na cumeeira) deverá ter direção do oeste para leste, para que os benefícios do vento sejam os maiores possíveis.

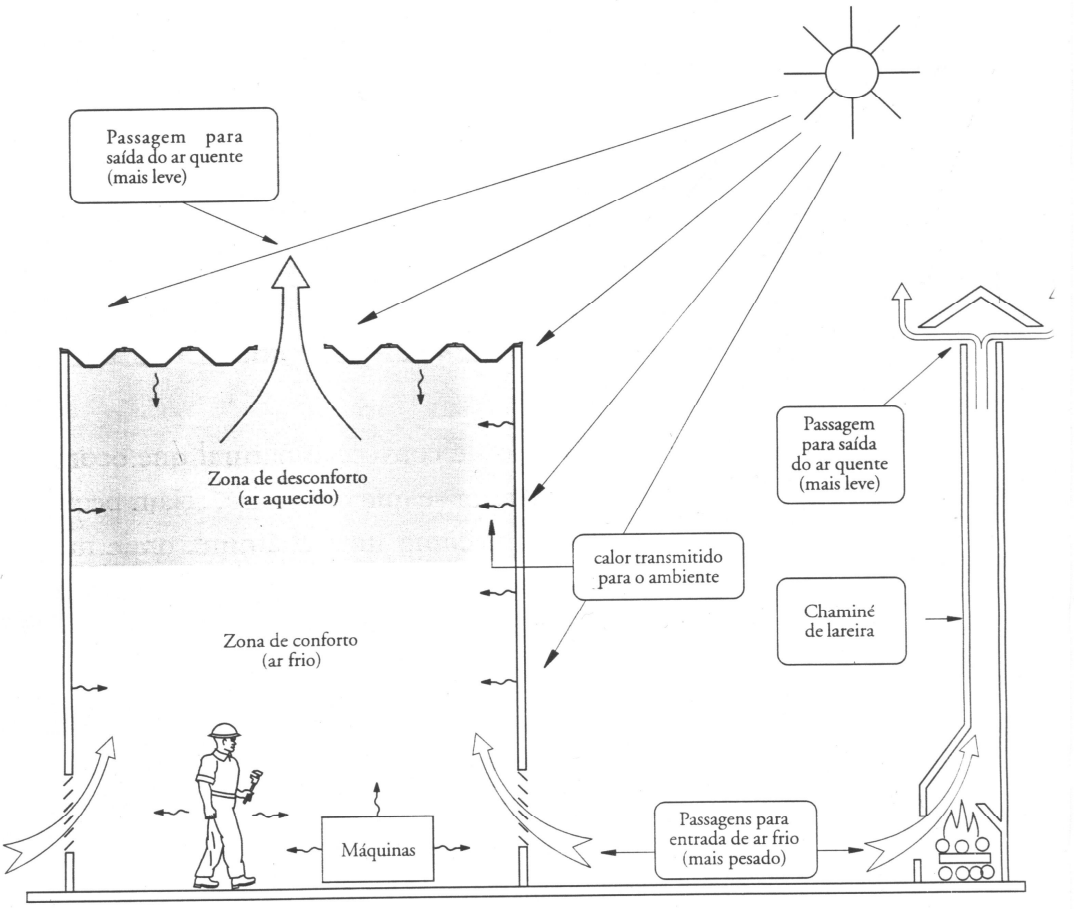

Figura 4.6 – Efeito chaminé

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Na análise do processo de convecção natural que ocorre no interior das construções, nota-se que todas elas, sejam pequenas ou grandes, se comportam como uma chaminé, onde mesmo com um pequeno diferencial de temperatura o efeito chaminé se torna perceptível. No caso de um galpão, devido a sua grande área, o efeito chaminé, mesmo sendo muito tênue neste caso, provoca uma grande exaustão do ar quente, pois ele está

presente em toda a sua extensão. Neste aspecto, tudo que ocorre no interior de uma chaminé ocorre de modo análogo no interior do galpão, que pode ser considerado como uma chaminé muito larga, Figura 4.6.

A movimentação do ar fresco externo para o interior do galpão, entrando por passagens na parte inferior das fachadas, e a movimentação do ar quente interno para fora do galpão saindo pelo telhado, gera a ventilação natural que se encontra nas construções consideradas termicamente confortáveis. A ventilação natural eficiente depende da livre passagem do ar pelo interior do edifício propiciada por aberturas de entrada e saída de ar que não criem dificuldades a este fluxo. As construções com ventilação natural eficiente possuem em comum as seguintes características: pé direito alto e aberturas eficientes para entrada e saída do ar.

4.4.2.1. Pé direito

O benefício que a altura da construção traz para o conforto térmico é um conceito antigo que foi muito utilizado pelos projetistas no passado. O pé direito do edifício influi fortemente no conforto, pois o efeito chaminé que gera a ventilação natural varia proporcionalmente à variação da altura do prédio. Ao aumentar o pé direito de um prédio, mantendo-se as demais características do mesmo, provoca-se um aumento substancial na sua ventilação natural. Quanto maiores forem as dimensões da construção, maior será a dificuldade do ar frio atingir o centro do mesmo, sendo, portanto, necessário aumentar o efeito chaminé através do aumento do pé direito para obter boa ventilação nas regiões centrais. Scigliano & Hollo (2001) por meio de trabalho de campo obtiveram dados que indicam o pé direito mínimo recomendável em função da largura e do comprimento do prédio, Tabela 4.1.

Quando a cobertura está abaixo de 6 m, inclusive nos prédios dotados de excelente ventilação natural, a radiação infravermelha atinge o usuário do prédio com intensidade

que o incomoda. Observa-se que este efeito pode ser praticamente eliminado com a utilização de forro sempre que o pé direito for menor que 6 m, como mostrado na Figura 4.7.

Tabela 4.1 – Valores mínimos para o pé direito do edifício

Largura do Edifício (m)	Comprimento do Edifício (m)												
	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210
30	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
45	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
60	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
75	7	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
90	7	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
105	7	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
120	7	7	8	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11
135	7	7	8	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11
150	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	12	12	12
165	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	12	12	12
180	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	13
195	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	13
210	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

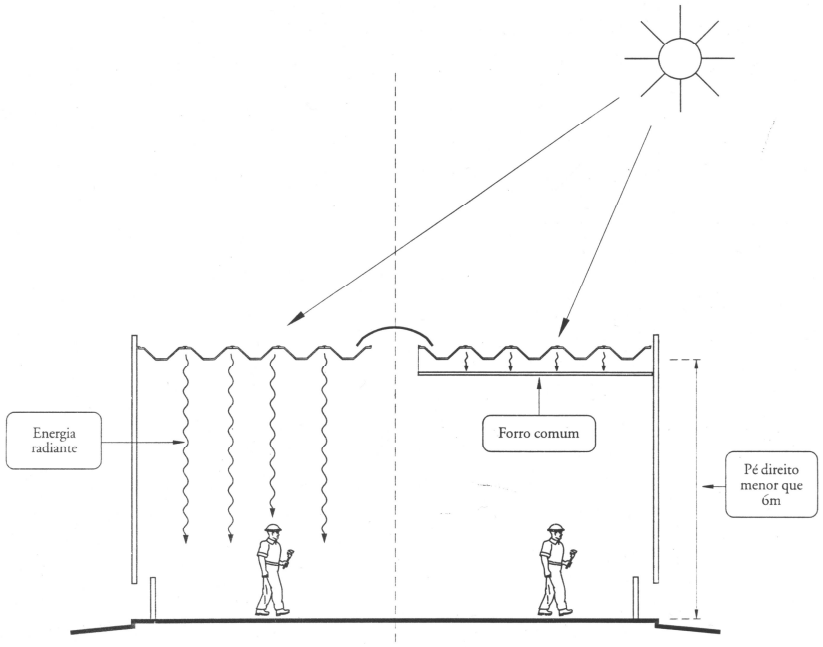

Figura 4.7 – Utilização de forro com a finalidade de bloquear a energia radiante

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.4.2.2. Aberturas para passagem do ar

As aberturas eficientes para entrada e saída do ar são fundamentais nas construções dotadas de sistema de ventilação natural. Estas aberturas dependem de vários fatores para se alcançar a ventilação natural eficiente. Heiselberg et al. (2001) estudou as características do fluxo de ar através de aberturas.

Para se alcançar o conforto térmico, é de fundamental importância, a posição em que foram colocadas as aberturas para a passagem de ar nas construções, a área total delas, a uniformidade da sua distribuição e, principalmente, os tipos de aparelhos utilizados para permitir a entrada de luz e proteger contra a entrada de chuva.

Os aparelhos mais comumente utilizados nos edifícios para permitir entrada de luz e proteger as aberturas de passagem de ar contra a entrada de chuva, devido a sua forma e a sua função de bloqueio de chuva, apresentam graus variados de resistência à passagem de ar e seus desempenhos devem ser quantificados e considerados no estudo da ventilação.

As aberturas que permitem a passagem de ar através do edifício e os aparelhos nelas instalados para permitir entrada de luz e proteção à entrada de chuva possuem cinco características que são determinantes de sua eficiência, as quais são divididas em dois grupos para melhor entendimento, como segue (SCIGLIANO & HOLLO, 2001):

a) Características relacionadas à abertura propriamente dita: localização e uniformidade de distribuição das aberturas de entrada e saída de ar e área total das aberturas.

b) Características relacionadas aos aparelhos utilizados nas aberturas para permitir entrada de luz e impedir entrada de chuva: área efetivamente disponível para passagem de ar através do aparelho; distância entre os elementos que formam os canais de passagem do ar no aparelho bem como a presença ou não de tela protetora e direcionamento do fluxo de ar durante sua passagem pelo aparelho.

4.4.2.3. Localização das aberturas

A localização adequada das aberturas para a saída do ar aquecido interno fica nos pontos mais altos da cobertura, onde se concentra o ar aquecido interno, que é menos denso (mais leve). A localização adequada das aberturas para a entrada do ar fresco externo fica na parte inferior das fachadas laterais, onde se concentra o ar fresco externo (mais pesado).

Na Figura 4.8 apresentam-se desenhos esquemáticos das localizações adequadas e não adequadas das aberturas, lembrando, porém que a eficiência das aberturas depende também da uniformidade de sua distribuição sobre o telhado. Para que as aberturas sejam eficientes é necessário também que estejam uniformemente distribuídas sobre o telhado.

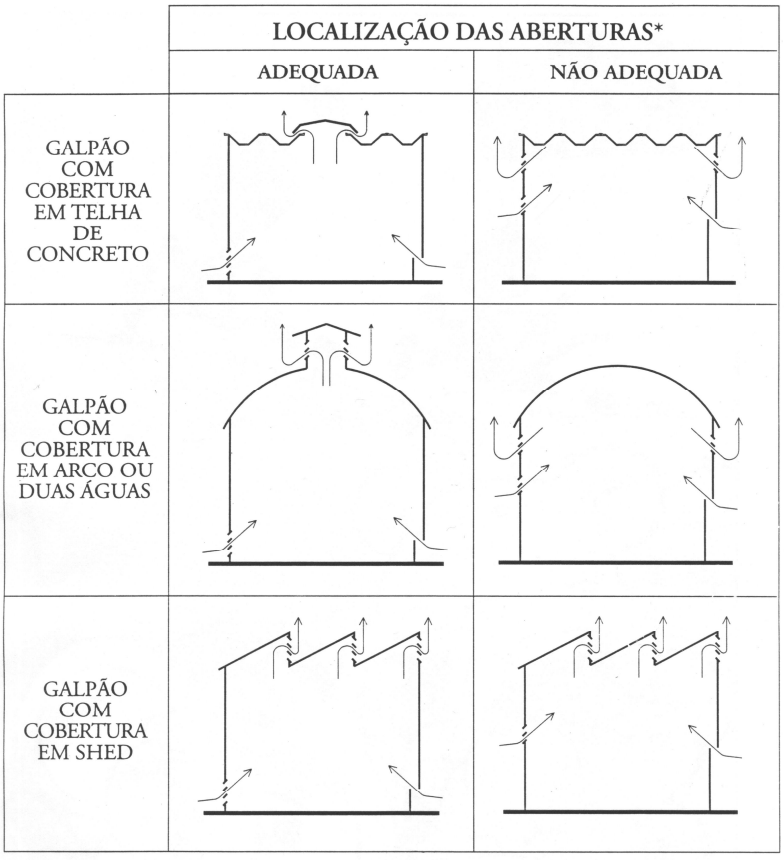

Figura 4.8 – Localização das aberturas
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.4.2.4. Área total das aberturas

A área total adequada para as aberturas de saída ou entrada do ar é proporcional à dimensão da obra. Todas as formas de aberturas para passagem do ar e seus aparelhos utilizados para permitir a entrada de luz e protegê-las contra a entrada de chuva podem ser utilizados com bons resultados, desde que, ao se empregar aparelhos que apresentem maior resistência à passagem de ar se faça uma compensação, aumentando-se a área total das aberturas de passagem de ar.

4.4.2.5. Área efetivamente disponível para a passagem do ar

Os aparelhos instalados nas aberturas dos edifícios para protegê-las contra a entrada de chuva e permitir a entrada de luz reduzem parcialmente, com maior ou menor intensidade, a área disponível para a passagem do ar através das mesmas. Esta redução ocorre porque a forma e dimensão das aletas, defletores, etc. usados nestes aparelhos, ocupam espaços que diminuem a área da abertura, resultando em uma área efetivamente disponível para a passagem do ar, bem menor que a área original da abertura, antes de nela se colocar o aparelho utilizado para permitir entrada de luz e protegê-la contra a entrada de chuva.

Na Figura 4.9 mostra-se um exemplo de redução da área da abertura destinada à passagem de ar, decorrente da utilização de uma veneziana, como aparelho de proteção contra a entrada de chuva.

A dimensão útil da abertura destinada à passagem de ar antes de se colocar a veneziana é de 1,061 mm. Após a colocação da veneziana, a dimensão útil da abertura destinada à passagem de ar é de 320 mm (80 mm x 4).

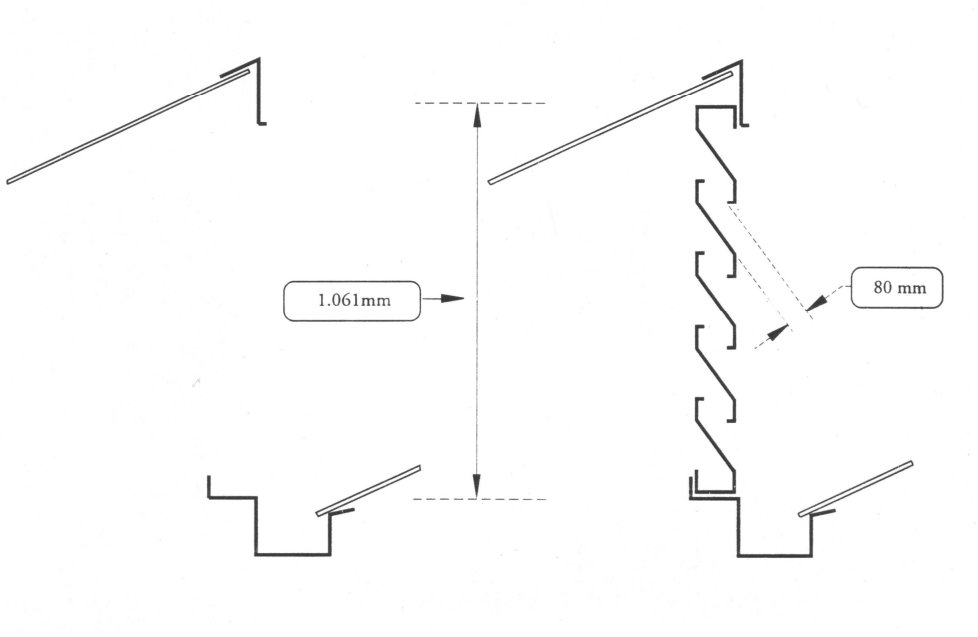

Figura 4.9 – Redução da área da abertura destinada à passagem de ar decorrente da utilização de uma veneziana
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.4.2.6. Distância entre os elementos que formam os canais de passagem do ar e presença de tela protetora

As aberturas executadas nas construções para a passagem de ar são protegidas por aparelhos destinados a permitir a entrada de luz e proteger contra a entrada de chuva no interior das construções. Esses aparelhos possuem canais através dos quais passa o ar, sendo classificados em dois tipos, aparelhos dotados de aletas que formam canais para passagem do ar tipo veneziana e aparelhos que formam os canais de passagem do ar entre o seu próprio corpo e a superfície do telhado, Figura 4.10.

A eficiência da passagem do ar através do aparelho utilizado depende da distância entre os elementos que formam os canais. Quanto menor for esta distância, maior será a perda de eficiência decorrente do atrito do ar na superfície das fachadas formadoras dos canais. Se for utilizada tela de proteção contra entrada de animais sobre as passagens de ar, a eficiência delas será alterada, variando de acordo com o tipo de tela utilizada.

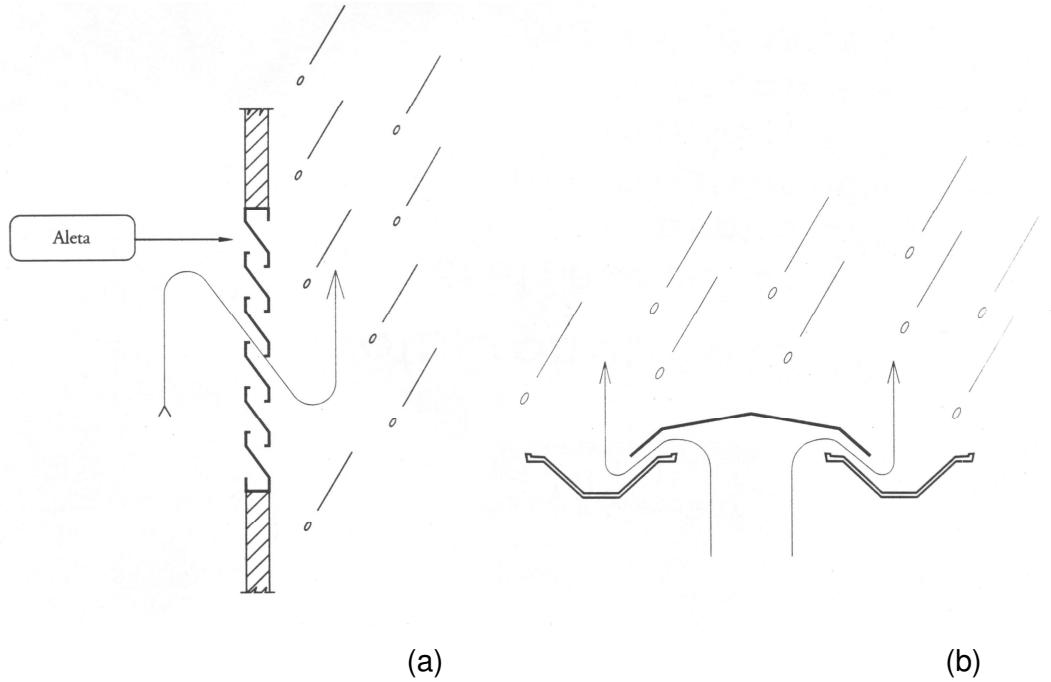

Figura 4.10 – (a) aparelho dotado de aletas que formam canais para passagem do ar tipo veneziana e (b) aparelho que formam os canais de passagem do ar entre o seu próprio corpo e a superfície do telhado
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.4.2.7. Direcionamento do fluxo de ar durante sua passagem pelo aparelho

Os aparelhos utilizados para permitir a entrada de luz e proteger contra a entrada de chuva as aberturas deixadas na cobertura das edificações para a passagem do ar, possuem elementos que direcionam o ar que os atravessa. Este direcionamento influi na eficiência da passagem do ar através do aparelho. Dividem-se os aparelhos mais comumente utilizados em três grupos, aparelhos com percurso de ar ascendente, aparelhos com percurso de ar descendente e aparelhos com percurso de ar misto. Estes três tipos de direcionamento do fluxo de ar durante a passagem pelo aparelho são exemplificados nas Figuras 4.11.

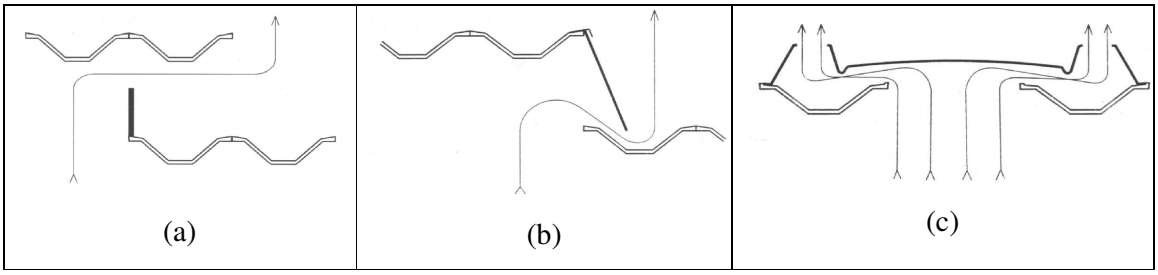

Figura 4.11 – Direcionamento do fluxo de ar durante a passagem pelo aparelho. (a) Percurso ascendente. Lanternim livre com sobreposição de telhas. (b) Percurso descendente. Lanternim com saída única. (c) Percurso de ar misto. Domo tipo L duplo requinte.

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.5. Métodos existentes para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios

Toledo (2001) apresenta uma revisão bibliográfica dos principais métodos e metodologias, conhecidos no Brasil, utilizadas como critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural em edificações. Na norma NBR 15220: 2005 apresentam-se estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social e estratégias para as aberturas de ventilação.

4.6. Uniformidade da distribuição das saídas de ar quente sobre o telhado

Para que se obtenha ventilação natural efetiva em um prédio, é essencial que as saídas do ar quente estejam posicionadas na parte mais alta do edifício e que possuam a área mínima total necessária ao perfeito funcionamento das mesmas. Além destas duas características é também essencial nos prédios com coberturas planas, ou quase planas, que as saídas de ar quente sejam distribuídas o mais uniformemente possível por toda a superfície do prédio para minimizar o comprimento dos trechos de deslocamento horizontal que o ar aquecido precisa percorrer sob o telhado até atingir uma saída.

Ao se aquecer, o ar imediatamente se desloca para cima e atinge velocidades expressivas em sua ascensão quando não encontra obstáculos, conforme indicado na Figura 4.12. Quando o ar aquecido em deslocamento vertical ascendente encontra em seu percurso uma superfície horizontal extensa a ser contornada, conforme indicado na Figura 4.13, ele perde grande parte de sua velocidade porque é obrigado a se deslocar na horizontal, contrariando a sua tendência natural que é de sempre subir na vertical.

Por não dispor de um impulsionador natural forte, o ar quente que se desloca sob o telhado no sentido horizontal em busca de uma saída tem um potencial de deslocamento muito tênue. Devido a esta condição, a perda de velocidade decorrente do atrito ou de obstáculos a serem transpostos é muito expressiva. Para que esta perda de velocidade seja minimizada é essencial que a distância a ser percorrida pelo ar aquecido sob o telhado até atingir uma saída seja pequena, assegurando-se uma ventilação natural eficiente.

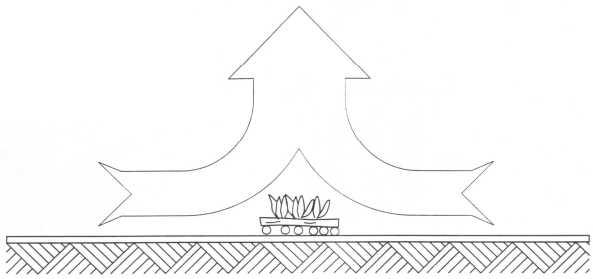

Figura 4.12 – Fluxo do ar aquecido sem a presença de obstáculos

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

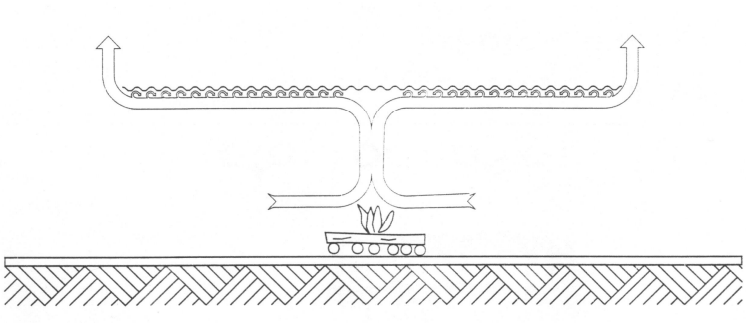

Figura 4.13 – Fluxo do ar aquecido com a presença de um obstáculo horizontal

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Em prédios com índices de ventilação natural altos com cobertura horizontal, ou quase horizontal, dotadas de pequenas saídas uniformemente distribuídas sobre todo telhado, o ar que se aquece, sobe e rapidamente encontra uma saída, percorrendo apenas um pequeno trecho horizontal, ou quase horizontal, sob as telhas, garantindo assim uma eficiente ventilação natural conforme indicado na Figura 4.14.

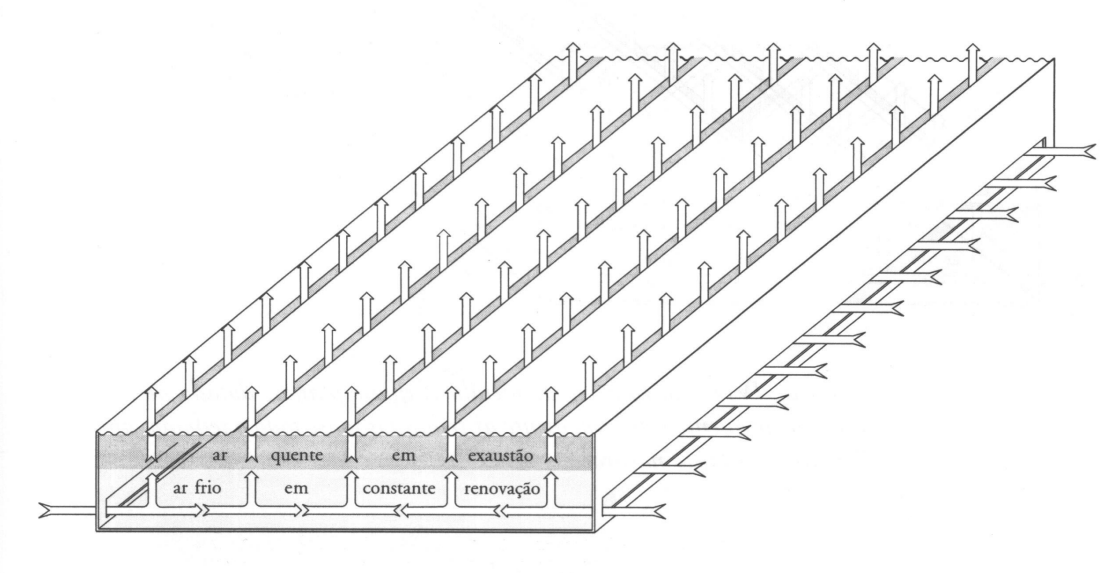

Figura 4.14 – Prédio de IVN alto com telhas planas de concreto dotado de linhas de saída de ar quente, uniformemente distribuídas sobre o telhado

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Scigliano & Hollo (2001), recomendam um percurso máximo de 5m para o deslocamento do ar aquecido sob telhados horizontais, ou quase horizontais, que possibilita uma ventilação natural eficiente.

Na Figura 4.15 apresenta-se um prédio com ventilação natural deficiente pela manhã. No início do dia, a parcela do ar interno que foi aquecida pelas pessoas, máquinas e pelo calor que penetra nas fachadas e pelo telhado sobe e concentra-se na parte superior do prédio, não incomodando os usuários.

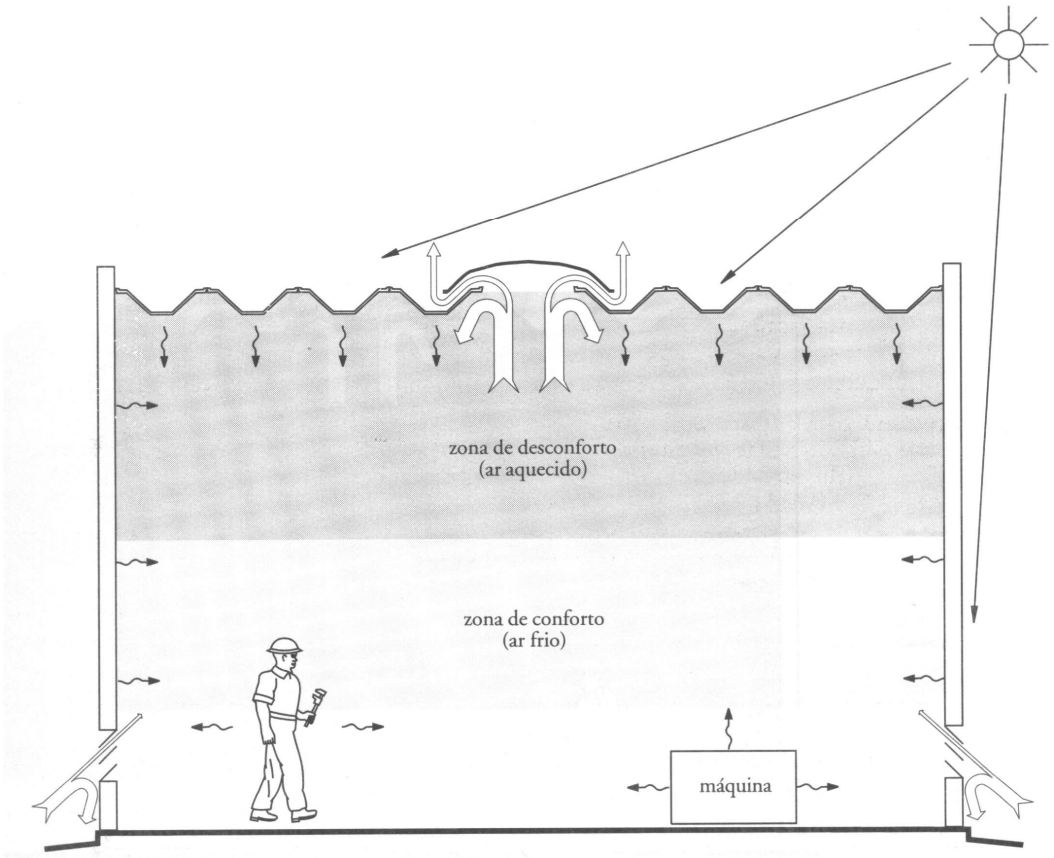

Figura 4.15 – Prédio com ventilação natural deficiente pela manhã
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Na Figura 4.16 apresenta-se um prédio com ventilação natural deficiente no meio dia. No decorre do dia, a parcela do ar interno aquecido pelas pessoas, máquinas e pelo calor que penetra pelas fachadas e telhado atinge uma grande proporção, alcançando o nível de trabalho.

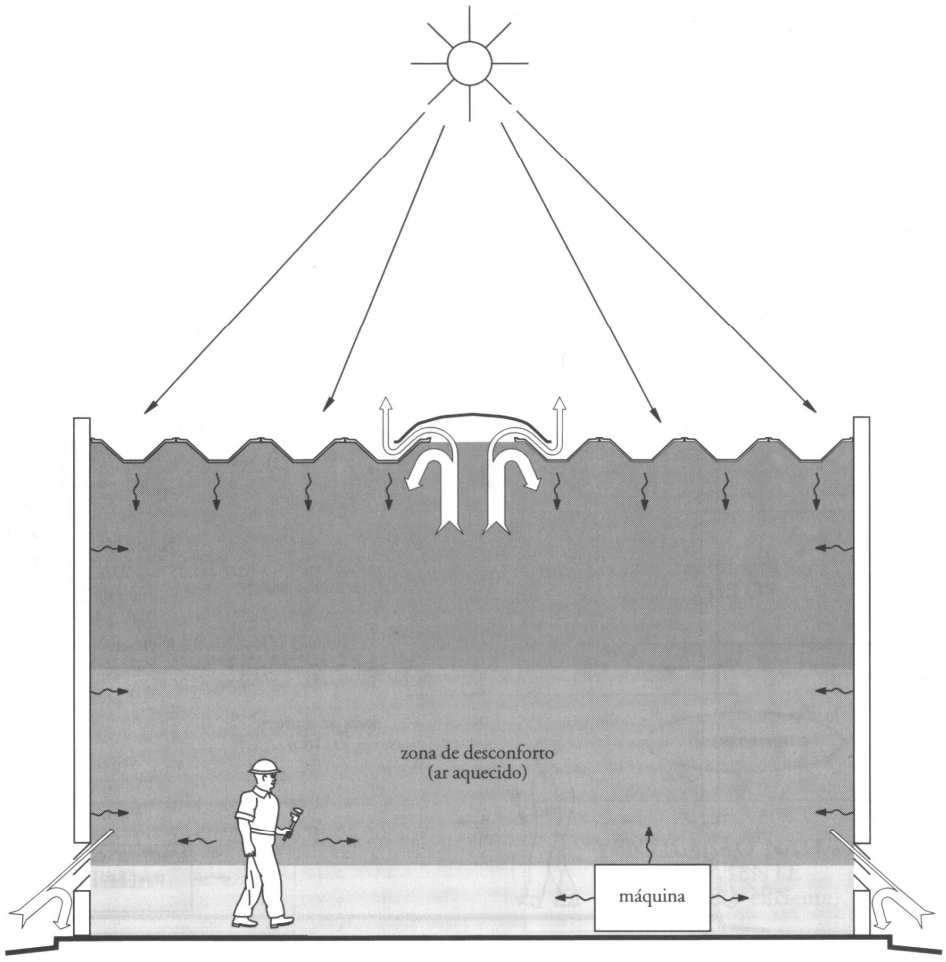

Figura 4.16 – Prédio com ventilação natural deficiente no meio dia

Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Na Figura 4.17 apresenta um prédio com ventilação natural eficiente o dia inteiro. Com passagens eficientes para entrada do ar frio e para saída do ar aquecido iniciando-se o processo de ventilação natural assegura-se o bom conforto térmico ao limitar a zona de desconforto, que contém o ar aquecido, na parte superior do prédio.

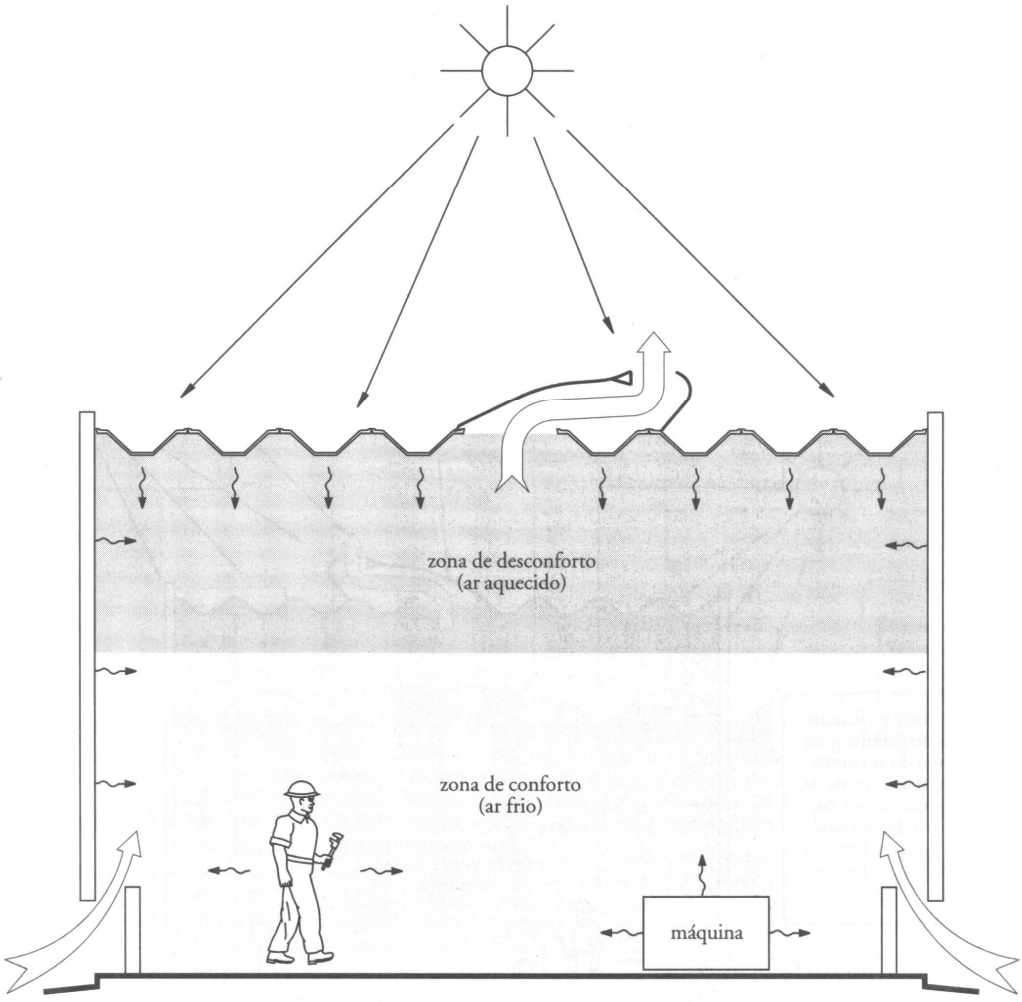

Figura 4.17 – Prédio com ventilação natural eficiente o dia inteiro
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Segundo Scigliano e Hollo (2001), as principais características positivas determinantes do bom conforto térmico e suas conseqüências são:

- A disposição do trabalhador aumenta devido a maior sensação de bem estar obtida pelo refrescamento do seu corpo. O processo de retirada de calor do corpo do trabalhador através da evaporação do suor é aumentado com o aumento da ventilação;

- A área de entrada de energia solar deve ser adequadamente limitada a 12,5 % da área do piso;
- As passagens com dimensões adequadas e corretamente posicionadas na parte alta do prédio permitem a saída eficiente do ar quente;
- Pé-direito alto, de acordo com os valores recomendados na Tabela 4.1;
- Passagens com dimensões adequadas e corretamente posicionadas na parte mais baixa do prédio permitem a entrada eficiente do ar frio;
- Maior produtividade do trabalhador;
- A constante e eficiente renovação garante grau de pureza do ar compatível com as exigências fisiológicas do ser humano em relação a saúde e o bem estar, reduzindo o número de doenças e absenteísmo;
- Com um ambiente agradável, o equilíbrio térmico do trabalhador é alcançado sem esforço. A maior parte de sua energia é canalizada para aumentar sua capacidade de trabalho;
- Recomposição constante dos níveis adequados de concentração do oxigênio no ar. Desta forma são mantidos elevados níveis de concentração, destreza e de alerta mental do trabalhador, diminuindo o número de acidentes, devido ao maior nível de atenção.

As principais características negativas, determinantes do nível inadequado de conforto térmico dos edifícios e suas conseqüências são:

- Possibilidade de gotejamento decorrente da condensação do ar interno quando excessivamente úmido;
- Passagens sub-dimensionadas não são suficientes para a saída adequada do ar quente;
- Área de entrada de energia solar excessiva;
- Entrada de ar frio localizada na parte superior da edificação prejudica a eficiência do efeito chaminé;
- Pé-direito baixo, menor do que o recomendado na Tabela 4.1;

- Passagens sub-dimensionadas não são suficientes para a entrada adequada do ar frio;
- Elevado número de doenças e absenteísmos decorrentes da elevada concentração dos agentes poluidores no ar;
- Queda da produtividade do trabalhador;
- Grande parte da energia consumida no processo biológico de restabelecimento do seu equilíbrio térmico e o *stress* assim gerado, diminui sua capacidade de trabalho;
- O excesso de calor provoca sensação de mal-estar diminuindo a disposição do trabalhador;
- Elevado número de acidentes decorrentes do baixo nível de concentração, destreza e de alerta mental do trabalhador devido ao baixo nível de oxigênio no ar.

A ventilação natural eficiente permite, na maioria dos casos, que parte da fumaça inicial saia do prédio e que o restante se concentre na região alta, permitindo assim que as pessoas evacuem o prédio sem pânico e que a brigada de incêndio da própria indústria penetre no prédio e extinga o incêndio ainda em seu foco inicial, como mostrado na Figura 4.18.

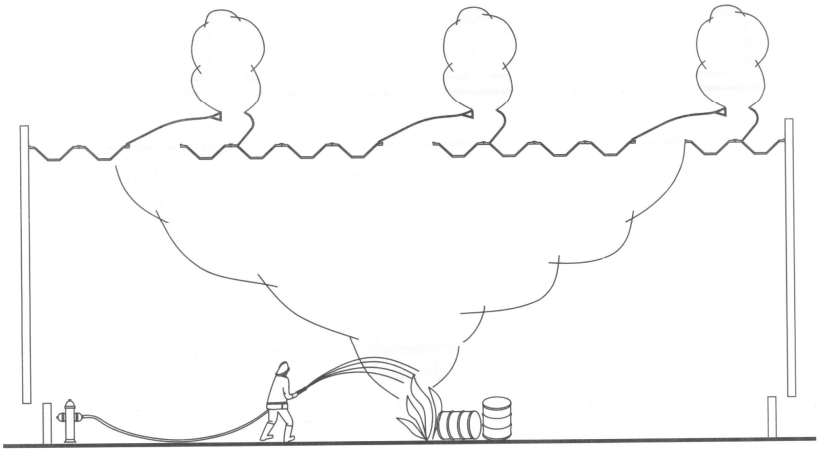

Figura 4.18 – Ventilação natural eficiente no caso de incêndio
Fonte: SCIGLIANO & HOLLO, 2001

4.7. Recomendações e soluções construtivas

Algumas recomendações de projeto são importantes para que se obtenha um bom funcionamento da ventilação. As aberturas para a entrada de ar frio devem estar posicionadas o mais baixo possível nas fachadas da construção. O ideal é posicionar a face inferior das aberturas a aproximadamente 30 cm do piso acabado. Devem ser urilizados grades e/ou telas de alambrado para a proteção destas aberturas. Normalmente os proprietários são contra as aberturas para a entrada de ar muito baixas, por motivos de segurança.

Visando assegurar um conforto térmico ainda maior é conveniente circundar as entradas de ar com bosques, jardins ou gramados, com a finalidade de se garantir a entrada do ar mais fresco possível. Deve ser evitada a utilização de pisos asfálticos ou cimentados junto a estas entradas, a fim de não se pré-aquecer o ar que entra no prédio.

Em galpões, as fontes de calor são provenientes da radiação solar, do calor interno gerado por máquinas e equipamentos e do calor humano.

Como soluções construtivas, devem-se utilizar material de cobertura e fechamento adequados para alcançar conforto térmico; entradas e saídas de ar dimensionadas e posicionadas adequadamente, reduzir a entrada de calor devido à radiação solar; reduzir no possível a utilização de telhas, domus e clarabóias plásticas na cobertura e avaliar as soluções levando em consideração o pé direito e dimensões do edifício.

No Quadro 4.1 apresentam-se algumas opções de soluções construtivas de acordo com as fontes internas de calor.

Os princípios de funcionamento de lanternins, coifas e aberturas no telhado (ventilação natural), implicam nos diferenciais de temperaturas entre o interior e exterior do prédio; diferencial de alturas entre as entradas de ar (nível médio) e saída de ar (nível da garganta lanternim); velocidade externa do vento; áreas de entrada e saída de ar; a efetividade das entradas de ar deve ser considerada de 65 % da área (50 % em casos

extremos); a efetividade das saídas de ar depende das características do sistema adotado; obstruções a considerar nas entradas de ar como árvores, edifícios, taludes, etc.; obstruções ao fluxo de ar de máquinas e instalações no interior dos edifícios e posições relativas entre as entradas e saídas de ar.

Quadro 4.1 – Opções de soluções construtivas de acordo com as fontes internas de calor

Fontes de calor	**Soluções construtivas**
Radiação solar	Lanternim de ventilação simples + Telha com baixa absortividade e alta refletividade
	Lanternim de ventilação simples + Telha termoacústica na cobertura
	Telha termoacústica na cobertura
Radiação solar + pouco calor gerado internamente	Lanternim de ventilação simples + Telha com baixa absortividade e alta refletividade
	Lanternim de ventilação simples + Telha termoacústica na cobertura
	Lanternim de gravidade (alta vazão) + Telha com baixa absortividade e alta refletividade
	Lanternim de gravidade (alta vazão) + Telha termoacústica na cobertura
Radiação solar + elevado calor gerado internamente	Lanternim de gravidade (alta vazão) + Telha com baixa absortividade e alta refletividade
	Lanternim de gravidade (alta vazão) + Telha termoacústica na cobertura

A quantidade de calor que atravessa a cobertura, ou seja, fluxo de calor por metro quadrado de cobertura procedente da radiação solar, é função da condutibilidade térmica, específica de cada material; da espessura do material (condutância térmica

parcial); das trocas térmicas por radiação e convecção (condutância térmica global) e dos coeficientes de absorção à radiação solar.

A ventilação em um galpão tem como objetivos dar vazão a fumos e vapores do processo produtivo; reduzir a temperatura do galpão aquecido por radiação solar e calor do processo produtivo e dar vazão a odores corporais e calor humano (METALFER, 2005).

No Quadro 4.2 apresentam-se alguns tipos de soluções construtivas destinadas à ventilação natural.

Quadro 4.2 – Tipos de soluções construtivas destinadas à ventilação natural

Tipos de soluções construtivas destinadas à ventilação natural	Lanternim de ventilação por gravidade, de alta vazão
	Lanternim de iluminação e ventilação
	Lanternim de ventilação simples
	Aberturas laterais (se outras necessidades industriais desaconselhar o uso de lanternins)
	Ventiladores rotativos naturais
	Insufladores e exaustores mecânicos

Na Figura 4.19 mostram-se alguns tipos de lanternins utilizados nas construções das edificações que objetivam a ventilação natural.

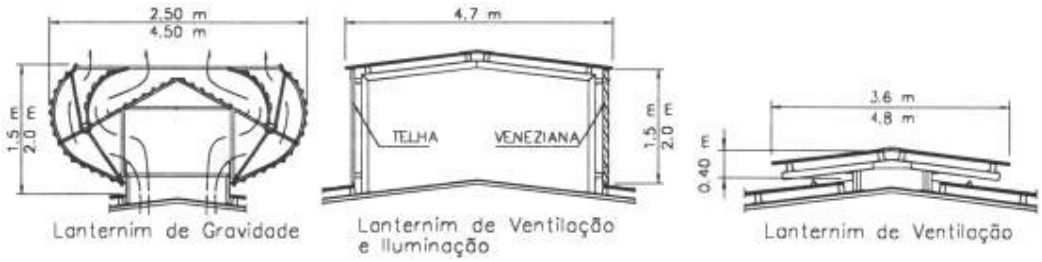

Figura 4.19 – Tipos de lanternins

Fonte: METALFER, 2005

No Quadro 4.3 apresentam-se algumas escolhas de soluções adequadas para determinados tipos de situações.

Quadro 4.3 – Escolha da solução adequada

Situação	**Escolha da solução adequada**
Empresas que geram quantidade razoável de calor e/ou vapor nas suas atividades	Lanternim de gravidade
Empresas que geram baixa quantidade de calor, sem vapor, nas suas atividades	Lanternim de ventilação, ou lanternim de iluminação e ventilação
Empresas em que o produto ou processo produtivo é sensível a entrada de poeira	Aberturas laterais
Instalações existentes com problemas sérios de calor/ vapor/ fumaça	Lanternim de gravidade. Se este não for possível, insufladores/ exaustores mecânicos (custo permanente de energia elétrica e manutenção)
Instalações existentes com problemas leves de calor/ vapor/ fumaça	Ventiladores rotativos naturais (manutenção permanente, baixa durabilidade). Coifas com chapéu de proteção

5. ESTUDO DE CASO

5.1. Aplicação da metodologia de cálculo apresentada

Analisam-se galpões com diferentes dimensões para se obter o dimensionamento do lanternim, ou seja, a altura da abertura de saída de ar no lanternim, Figura 5.1. Utiliza-se um lanternim em cada módulo de 10 m, sendo este localizado no centro da cobertura com largura de 25 % do vão do módulo, com a finalidade de se obter uma melhor eficiência da ventilação natural.

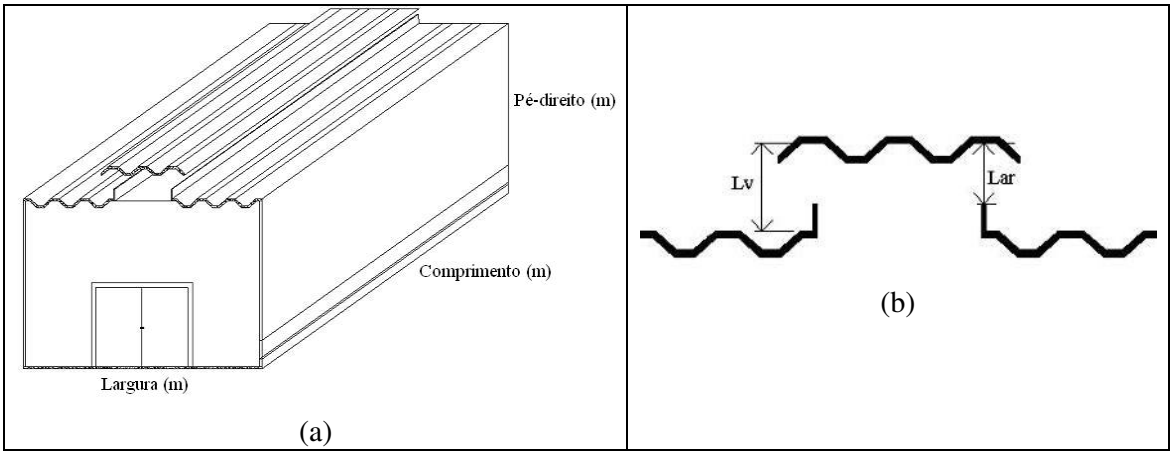

Figura 5.1 – (a) Geometria de cada módulo dos galpões analisados; (b) Detalhe do lanternim

Fonte: Adaptada de SCIGLIANO & HOLLO, 2001

Na Tabela 5.1 apresentam-se as geometrias dos galpões calculados, com as condições de entrada pré-estabelecidas e a altura da abertura da saída de ar no lanternim obtida na resolução do algoritmo, L_{ar}. Para a obtenção dos resultados, utiliza-se a metodologia apresentada no Capítulo 3 que inclui o índice de ventilação natural, cujo cálculo é mostrado no Anexo I. Para se obter um bom conforto térmico no interior do galpão, considera-se um índice de ventilação natural (IVN) igual a quatro.

Tabela 5.1 – Galpões analisados X Resultados obtidos

Casos	Geometria do galpão (Largura X Comprimento X Pé-direito) (m)	Velocidade do ar (m/s)	Temperatura externa (ºC)	Temperatura interna (ºC)	Lar (m)
1	50 X 20 X 7	0,3	25	30	0,8
2	50 X 20 X 7	0,3	25	33	1,0
3	50 X 20 X 7	1,0	25	33	1,2
4	30 X 30 X 7	1,0	25	33	1,0
5	30 X 45 X 7	1,0	25	30	1,4

Em todos os casos, a largura do vão do lanternim, L_v, foi determinada considerando-se 20 % de iluminação. No entanto, pode-se utilizar uma altura menor do que a obtida desde que seja adicionada uma iluminação em algum ponto do galpão para se compensar a iluminação perdida. Vale a ressalva de que essa diminuição da altura do vão do lanternim, L_v deva ser tal que seja superior à altura da abertura livre para a passagem do ar, L_{ar}.

Na Figura 5.2 mostra-se a variação da abertura de saída do ar em função da vazão do ar de entrada, mantendo-se constante a diferença entre as temperaturas externa e interna. Observa-se, que o aumento da vazão de entrada de ar implica num aumento das áreas de abertura de saída de ar para se manter constante a diferença de temperaturas externas e internas.

Na Figura 5.3, mostra-se a variação da abertura de saída em função da variação da temperatura interna e da vazão de entrada, mantendo-se constante a temperatura externa. Para uma dada vazão de entrada de ar constante, quanto menor as áreas de saída do ar, maior a temperatura interna no galpão.

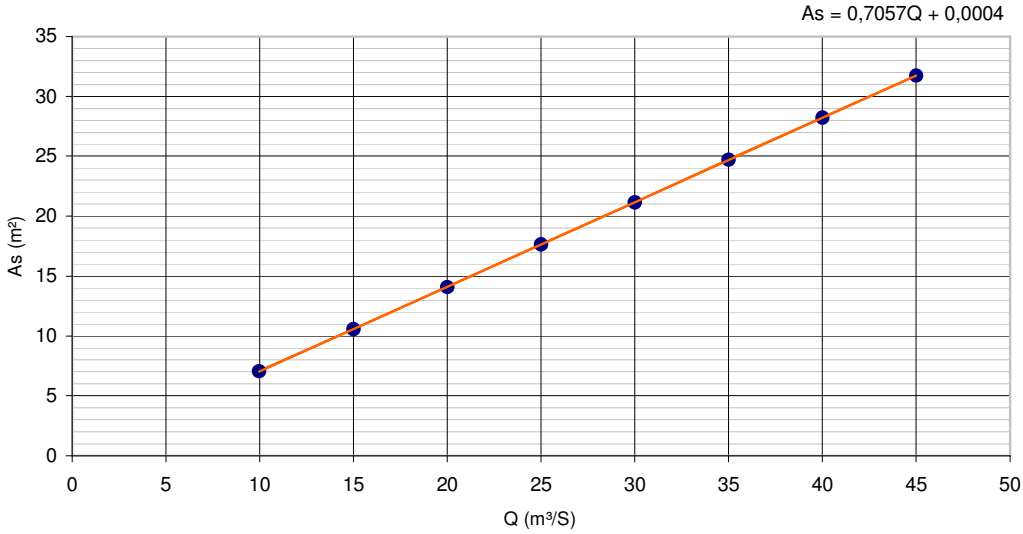

Figura 5.2 – Relação entre a vazão de entrada de ar e as áreas de saídas de ar

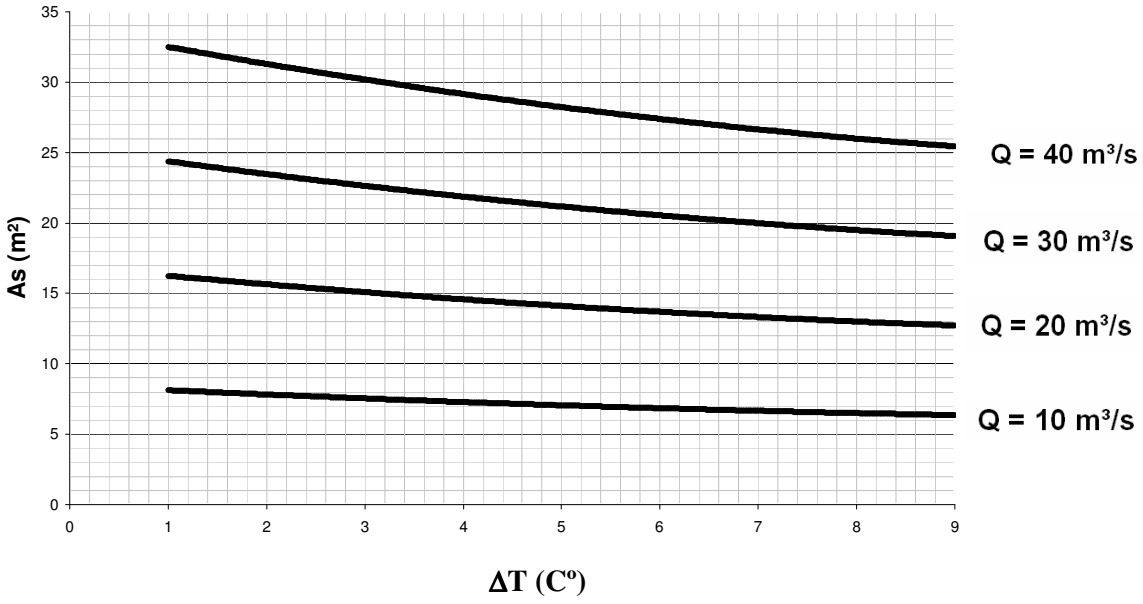

Figura 5.3 – Relação entre a diferença de temperatura e a área das aberturas de saída

5.2. Abordagem numérica

As complexas análises que envolvem o fluxo da ventilação natural podem ser realizadas por meio de estudos analíticos, experimentais e numéricos. A aplicabilidade dos métodos analíticos é ainda limitada. O custo de materiais e laboratórios são excessivos, o que limita a análise experimental. Em função da complexidade de solução das equações governantes, a solução numérica tem mostrado seu grande potencial e já pode ser utilizada na fase de projeto. Com os resultados numéricos, os projetistas podem decidir as melhores opções de projeto que resultam numa ventilação natural mais eficiente. Além do mais, o custo para uma análise numérica é bem menor do que para uma análise experimental.

A avaliação do conforto térmico é uma ferramenta importante a ser usada em conjunto com programas de simulação de desempenho térmico para melhor adequar os projetos das edificações ao clima e ao perfil de ocupação das mesmas, bem como para, na fase de pós-ocupação, identificar e equacionar problemas oriundos do projeto, da construção ou da manutenção da edificação. Uma outra aplicação é como ferramenta para a estimativa instantânea da sensação térmica em pesquisas sobre conforto térmico, contribuindo para a criação de ambientes que harmonizem as aspirações humanas, o clima e as atividades desenvolvidas.

A simulação numérica é uma ferramenta que pode ser utilizada como auxílio na determinação da distribuição de ar nos ambientes, independentemente da configuração da edificação e das condições de contorno pré-estabelecidas. Contudo, a sua utilização atualmente é ainda muito restrita, devido às dificuldades relacionadas com a modelagem matemática deste tipo de problema. O prognóstico da distribuição do ar no interior do ambiente construído feito por meios da simulação numérica teve início em 1970. Com o rápido crescimento tecnológico, principalmente na área computacional, o assunto passou a ter mais atenção.

5.2.1. Dificuldades na simulação de escoamentos em ambientes internos

O fluxo de ar em um ambiente interno é extremamente complicado, dependendo das condições de contorno e configuração interna do ambiente. Como conseqüências das condições de contorno e das geometrias envolvidas, podem ser encontrados simultaneamente, escoamentos laminares, escoamentos em processo de transição, escoamentos completamente turbulentos e regiões de recirculação.

Outro aspecto que torna complicado esse tipo de escoamento é o fato de ele ser governado tanto por forças oriundas do vento, como por forças de empuxo, função do gradiente de temperatura. O balanço entre as forças que surgem devido ao vento e ao empuxo térmico pode variar significativamente de acordo com a intensidade e direção de cada uma.Devido a este fenômeno, o escoamento em um ambiente interno pode ser completamente instável, dificultando a simulação.

Para escoamentos laminares, os resultados oriundos da simulação numérica são confiáveis. Entretanto, existem ainda incertezas na solução de escoamentos turbulentos devido à complexidade da turbulência. Apesar dos escoamentos em ambientes internos serem na grande maioria turbulentos, o principal interesse na simulação deste tipo de escoamento é obter os valores médios aproximados dos campos de velocidade e temperatura, ficando os detalhes da turbulência em segundo plano.

As condições de contorno que devem ser empregadas nas entradas de ar em uma simulação numérica são de difícil determinação. Elas devem ser escolhidas de forma a representar adequadamente os perfis de velocidade e temperatura produzidos pela entrada de ar através das aberturas. Esta escolha é de fundamental importância, pois é um dos fatores que mais influencia a qualidade do ar e o conforto térmico no ambiente. Na maioria das vezes as entradas de ar são simuladas computacionalmente como simples fendas abertas. Contudo, este tipo de entrada raramente pode ser encontrado na prática.

Outras condições de contorno de difícil determinação são as relacionadas com a envoltória da edificação. As trocas de calor entre as paredes/aberturas da edificação e o ambiente interno ocorrem por convecção, condução e radiação. Uma usual simplificação utilizada em simulações é admitir que os contornos da edificação (paredes/aberturas) tenham uma temperatura prescrita ou um fluxo de calor prescrito. Esta explicação se deve ao entendimento de que o processo de transporte convectivo interno tem o papel mais importante na troca de calor, em função das pequenas diferenças de temperatura envolvidas.

A obtenção de dados experimentais com o propósito de validação apresenta certas dificuldades. Além dos custos e do tempo envolvidos, há dificuldades em se manter constantes as condições de contorno durante os experimentos.

5.2.2. Programa computacional utilizado

Atualmente, existem muitos programas computacionais voltados para a análise do escoamento interno em um ambiente. A simulação computacional representa, dentro da evolução tecnológica, a melhor solução para se prognosticar o comportamento térmico e o perfil do fluxo do ar no interior das edificações.

No presente trabalho utilizou-se o programa computacional ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001), que permite a construção da geometria do problema e geração de malhas, de acordo com a configuração do ambiente. As funções necessárias para se obter uma solução e mostrar os resultados são acessíveis através de uma interface interativa. Este programa fornece certa flexibilidade com relação às malhas empregadas, podendo os problemas de escoamento ser resolvidos com vários tipos de malhas. Com esta capacidade de alterar a malha com base na solução do escoamento, torna-se mais fácil determinar a malha ideal para o problema em estudo.

As análises foram realizadas utilizando-se o FLOTRAN CDF (*Computational Fluid Dynamics*) com o elemento FLUID141, Figura 5.4. O elemento FLUID141 é utilizado

para modelagem dos sistemas fluidos ou térmicos nos regimes permanentes ou transientes que envolvem regiões fluidas e/ou não fluidas. Esse elemento é utilizado para a obtenção das distribuições de fluxo de ar e temperatura em um determinado volume de controle. Nos elementos da análise FLOTRAN CFD, as velocidades são obtidas através do princípio de conservação do momento, a pressão é obtida através do princípio de conservação da massa e a temperatura é obtida pela lei de conservação da energia.

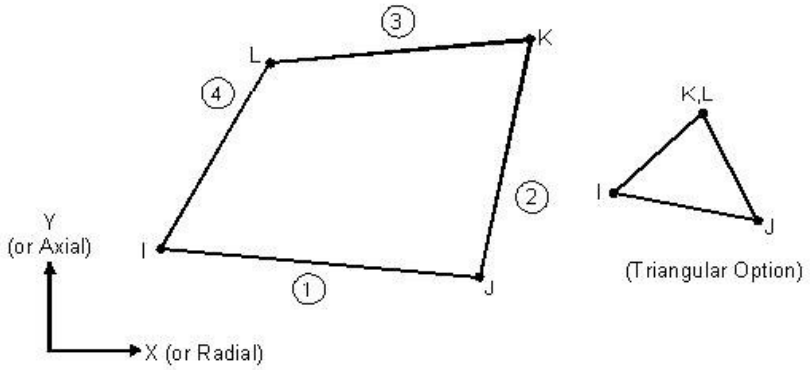

Figura 5.4 – Elemento FLUID141

Fonte: ANSYS, 2001

5.2.3. Solução numérica

Para a aplicação da abordagem numérica no estudo do fluxo de ar foram utilizadas três configurações de galpão. As configurações de galpões se diferenciam uma da outra pelo número de aberturas de entrada e saída de ar. Uma primeira configuração considera somente uma abertura de entrada e uma abertura de saída, Figura 5.5. A segunda configuração considera uma abertura de entrada e duas aberturas de saída, Figura 5.6, e a terceira considera duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, Figura 5.7.

Para discretizar o domínio de cálculo é empregado um arranjo de malhas onde as grandezas escalares como pressões e temperaturas são tratadas no centro (interior) do volume de controle, enquanto as grandezas vetoriais, no caso as velocidades, são tratadas nas faces dos volumes (ANSYS, 2001).

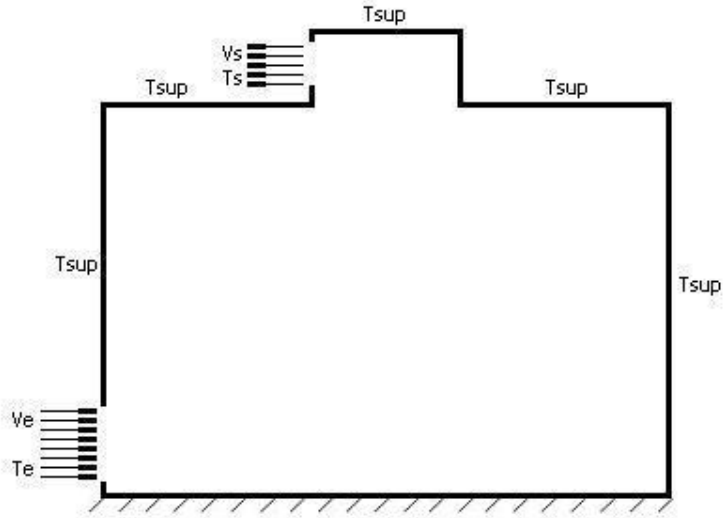

Figura 5.5 – Configuração A

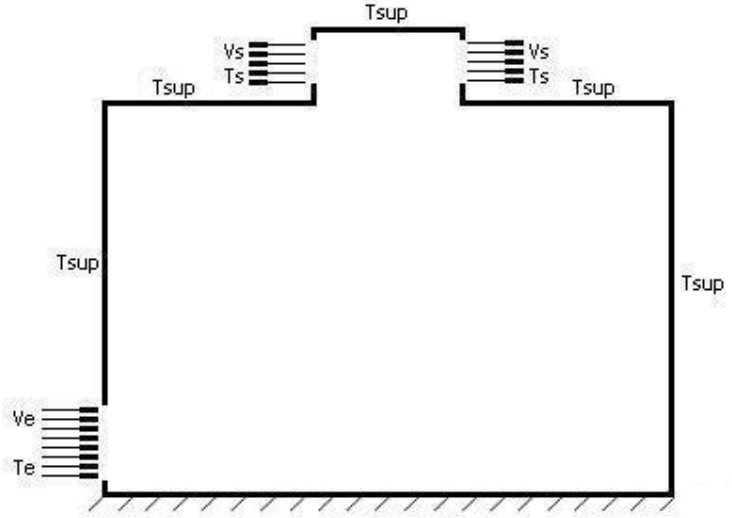

Figura 5.6 – Configuração B

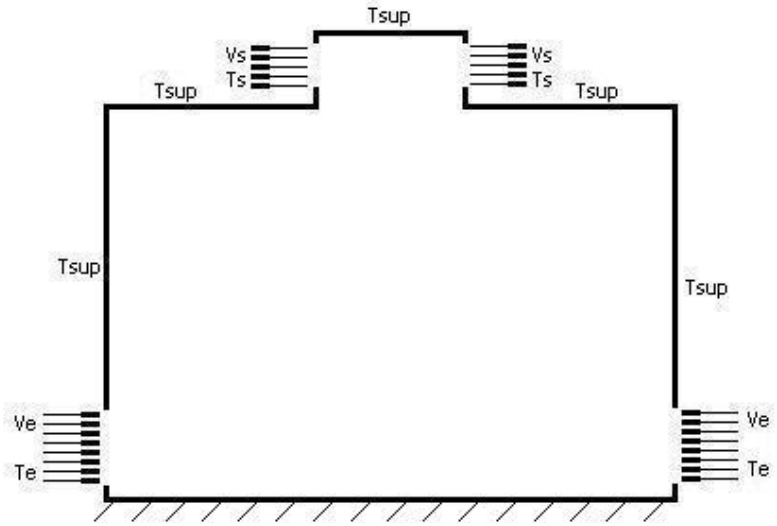

Figura 5.7 – Configuração C

Considera-se que o fluxo de ar fresco flui para o interior da edificação através da(s) abertura(s) inferior(es) e o fluxo de ar flui para o exterior através da(s) abertura(s) superior(es). As hipóteses consideradas, para resolução numérica das equações governantes, são: escoamento turbulento (modelo de turbulência K-ξ), regime transiente e escoamento compressível. Admitem-se condições de temperatura conhecidas nas superfícies. Não é considerada a presença de fontes internas de calor. Considera-se ainda, a condição de superfície isolada para a superfície inferior (piso).

5.3. Resultados obtidos

Os estudos foram realizados considerando-se uma diferença entre as temperaturas interna e externa de 8º C, exceto Caso 1, pelo fato dos resultados obtidos para este valor representarem uma distribuição de temperatura e de velocidade do ar mais próxima da situação real. Nota-se que os valores referentes a cada cor nas escalas apresentadas nos resultados obtidos variam de resultado a resultado.

5.3.1. Verificação da malha de discretização

As malhas de discretização do domínio de cálculo foram elaboradas de maneira que os contornos do escoamento coincidam com as superfícies do galpão. Esta concepção permite não só assegurar a conservação global do fluxo, mas também a fácil incorporação das condições de contorno que definem o problema estudado. Foram adotadas malhas bidimensionais triangulares, Figuras 5.8.

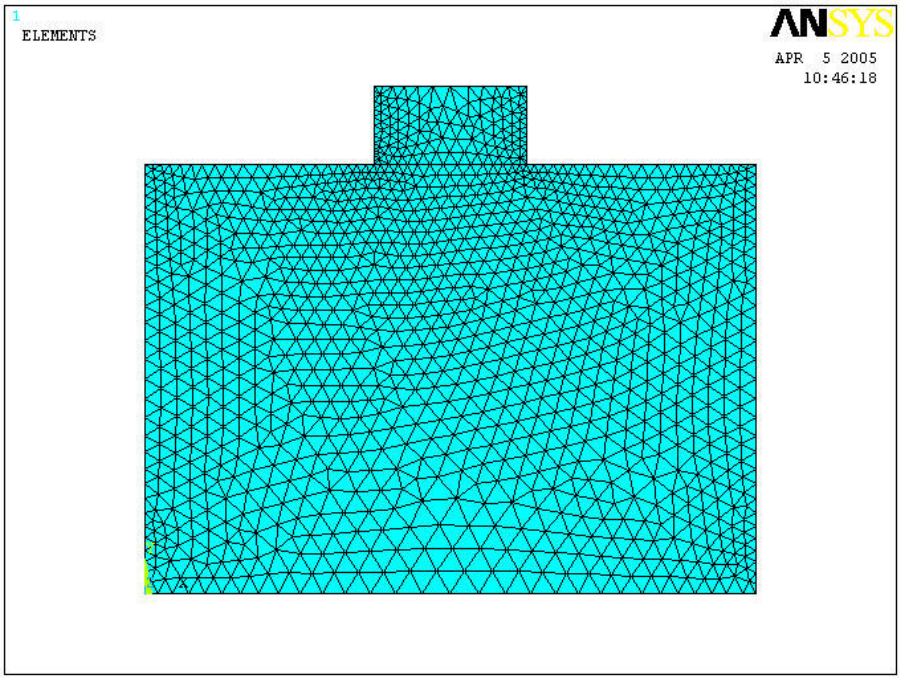

Figura 5.8 – Malha bidimensional triangular no domínio de cálculo

Avalia-se a influência da malha utilizada na solução do problema. Consideram-se basicamente três tamanhos de malhas compostas por 1896 elementos (Malha A), 2334 elementos (Malha B) e 4107 elementos (Malha C). Foram realizadas análises computacionais em um galpão com uma abertura de entrada e uma abertura de saída, com 10 m de largura, 7 m de pé-direito e alturas das aberturas inferior e superior, 1,4 m e 0,7 m, respectivamente. O galpão está sujeito a uma diferença de temperatura de 8 ºC e a uma velocidade do vento de 0,3 m/s, Figuras 5.9, 5.10 e 5.11.

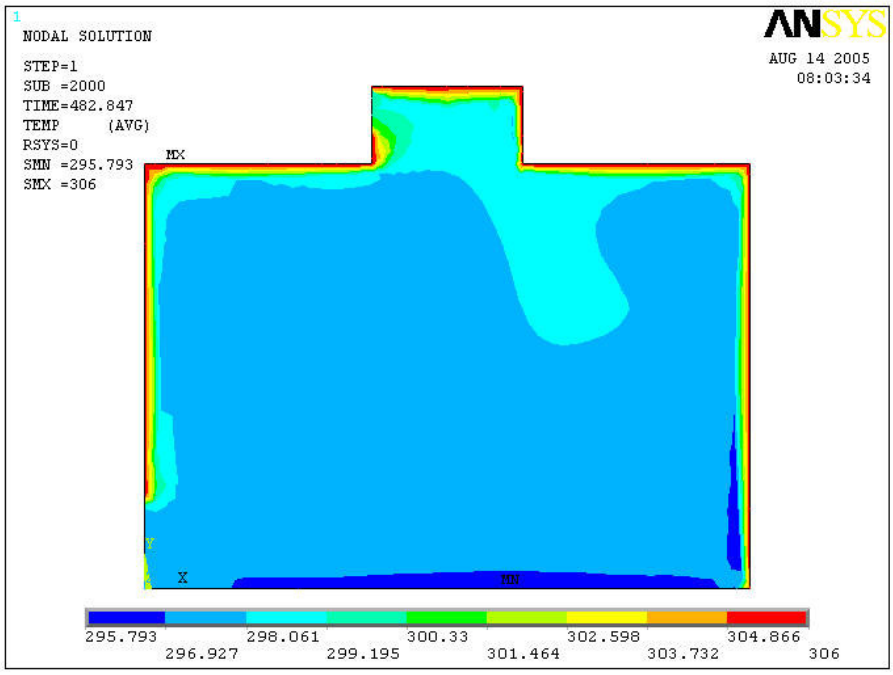

Figura 5.9 – Perfil da temperatura do ar interno – Malha A

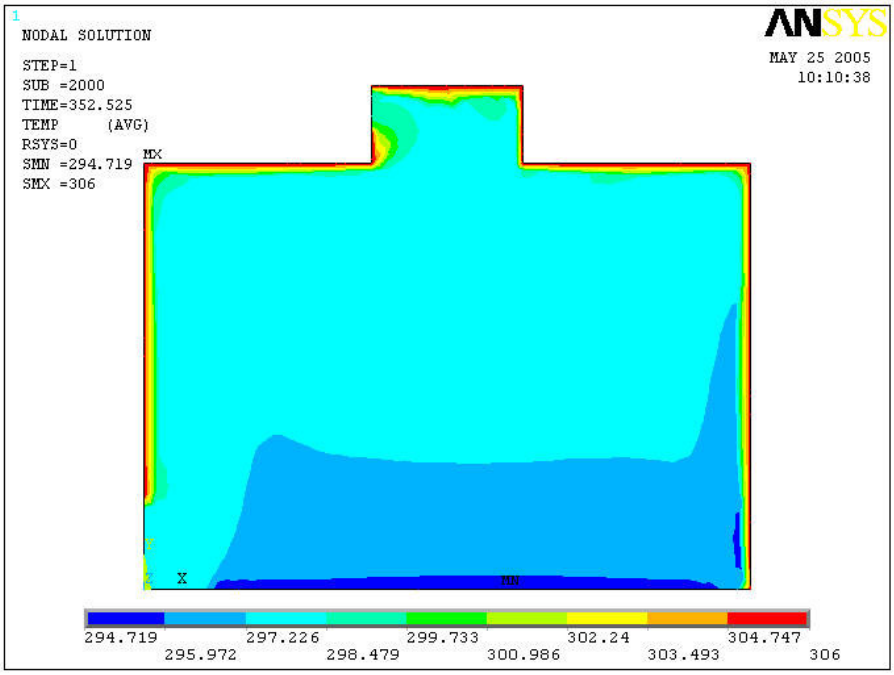

Figura 5.10 – Perfil da temperatura do ar interno – Malha B

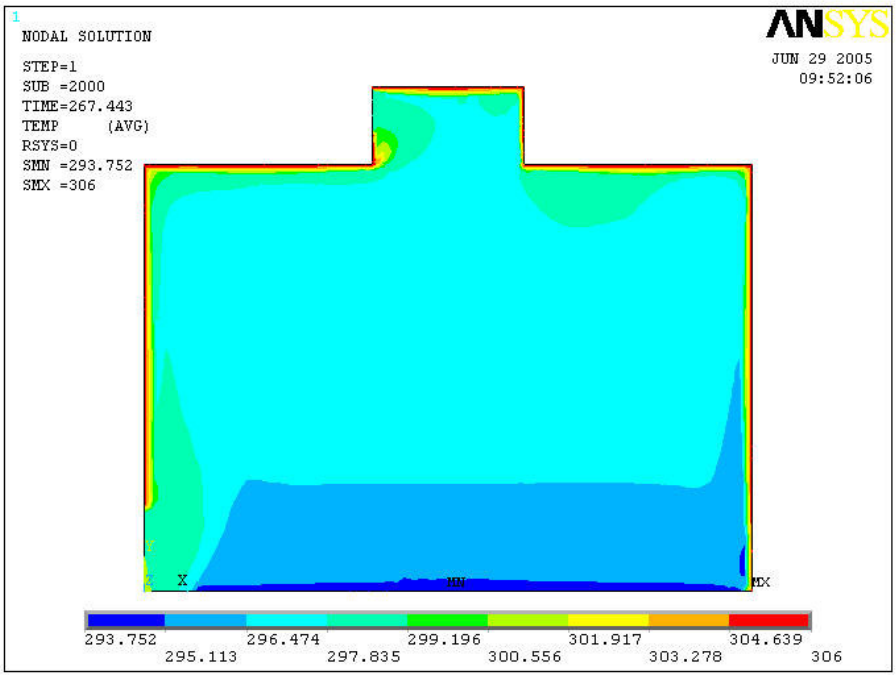

Figura 5.11 – Perfil da temperatura do ar interno – Malha C

É de extrema importância a escolha da malha adequada a ser empregada na simulação numérica, pois esta influi fortemente no resultado. Com o objetivo de avaliar a independência de malha nos resultados faz-se uma análise utilizando as três malhas mencionadas acima. Observou-se que a malha com o número de nós intermediário (Malha B) apresentou resultados que não sofreram variação quando com um maior refinamento da malha (Malha C), além de um tempo de simulação menor. Desse modo, como não foi observada nenhuma mudança significativa entre os perfis de velocidade e temperatura nos resultados obtidos através das análises computacionais com as Malhas B e C optou-se por utilizar a Malha B, que já garante a não interferência da malha escolhida nos resultados obtidos. Na Figura 5.12 mostra-se a distribuição do ar interno para a configuração do galpão analisada.

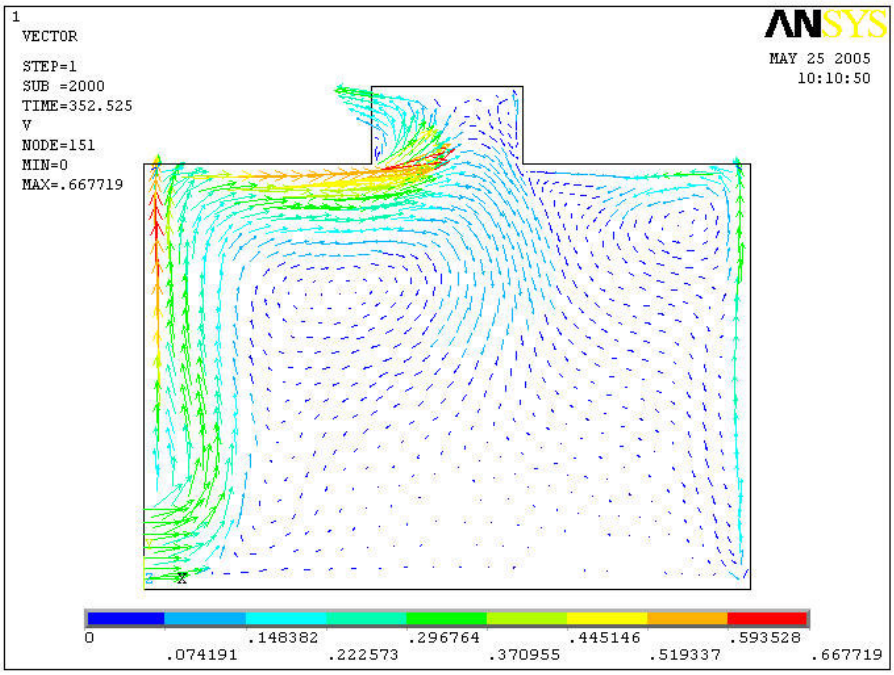

Figura 5.12 – Configuração do fluxo do ar interno – Malha B

5.3.2. Casos estudados

Analisou-se o perfil da distribuição da velocidade do ar e da temperatura no interior de duas configurações de galpão, previamente dimensionadas por meio do programa computacional MAPLE, via simulações numéricas. Para a solução numérica considera-se apenas um módulo com largura de 10 m devido à impossibilidade de simular o galpão como um todo, Figura 5.1. A diferença entre as duas configurações está apenas no valor da temperatura do ar interno, Caso 1 e Caso 2, Tabela 5.1.

5.3.2.1. Caso 1

Simulou-se numericamente o fluxo do ar no interior do galpão com dimensões 50 X 20 X 7 m, que corresponde ao primeiro caso da Tabela 5.1. Considerou-se a altura da abertura de saída de ar no lanternim a obtida na metodologia aplicada, ou seja, 0,8 m, e a área da abertura de entrada como sendo o dobro da área de saída, como sugerido por Clezar e Nogueira (1999). Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.13 e 5.14.

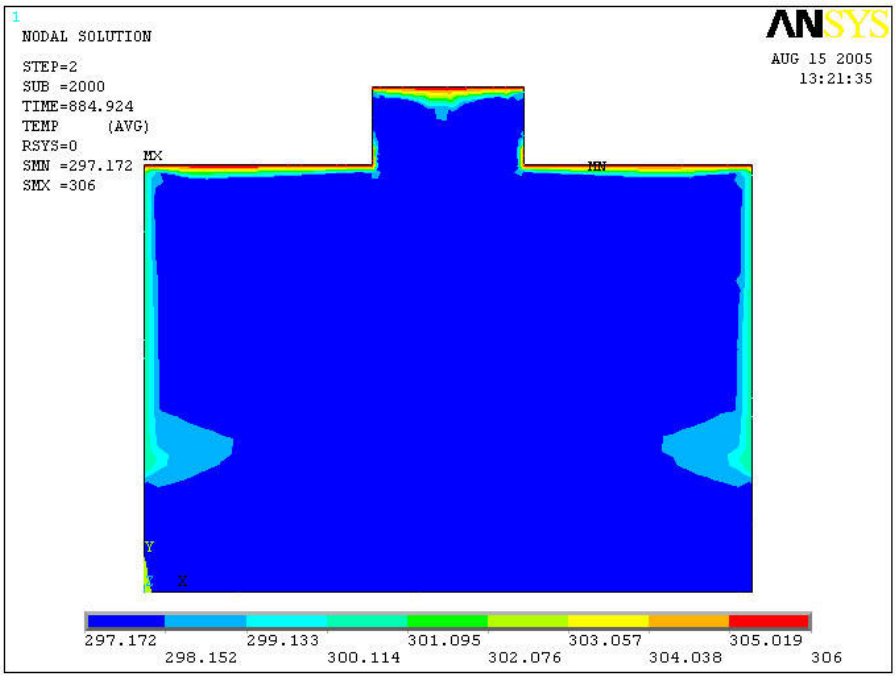

Figura 5.13 – Distribuição da temperatura interna – Caso 1

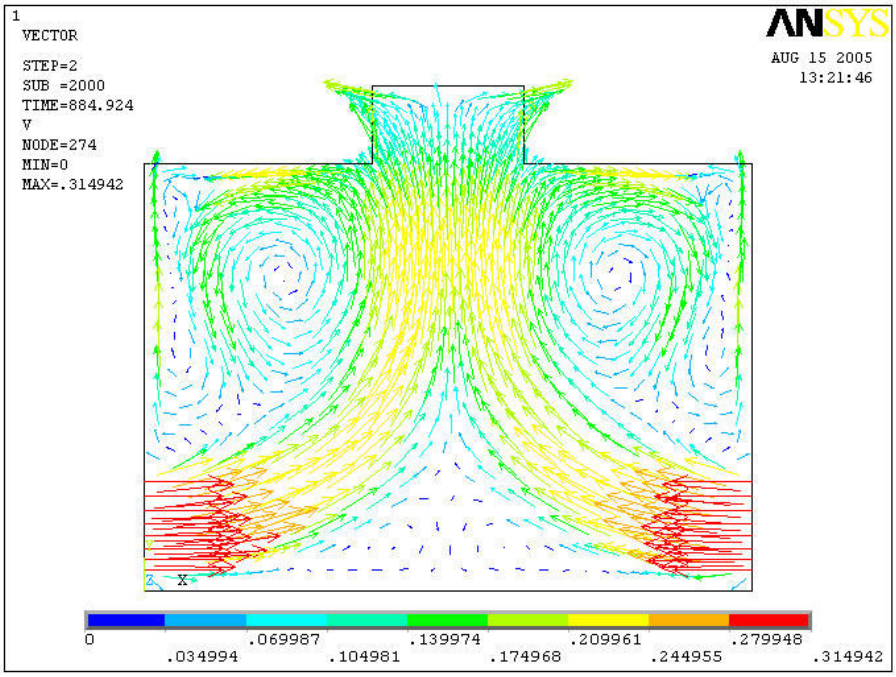

Figura 5.14 – Distribuição da velocidade interna – Caso 1

Observa-se através dos resultados obtidos, que o galpão encontra-se numa condição de conforto térmico, pois os valores médios de temperatura e velocidade do ar no interior do mesmo (24 ºC e 0,2 m/s) estão dentro dos limites de conforto térmico estabelecidos para o Brasil, 29 ºC e 0,8 m/s, respectivamente (GIVONI, 1992; ASHRAE: 2004). Em relação a distribuição da velocidade do ar interno, Figura 5.14, observa-se uma simetria no escoamento. Isto ocorre em função da simetria das aberturas de entrada e saída do ar.

5.3.2.2. Caso 2

Simulou-se numericamente o fluxo do ar no interior do galpão com dimensões 50 X 20 X 7 m, que corresponde ao segundo caso da Tabela 5.1. Considera-se a altura da abertura de saída de ar no lanternim a obtida na metodologia aplicada, 1,0 m, e a área da abertura de entrada como sendo o dobro da área de saída, como sugerido por Clezar e Nogueira (1999). Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.15 e 5.16.

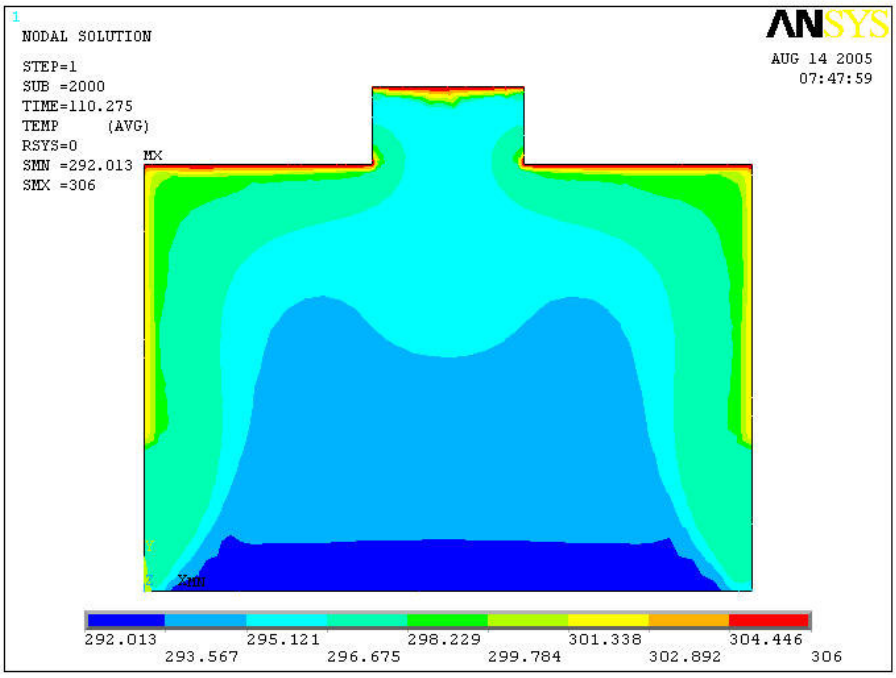

Figura 5.15 – Distribuição da temperatura interna – Caso 2

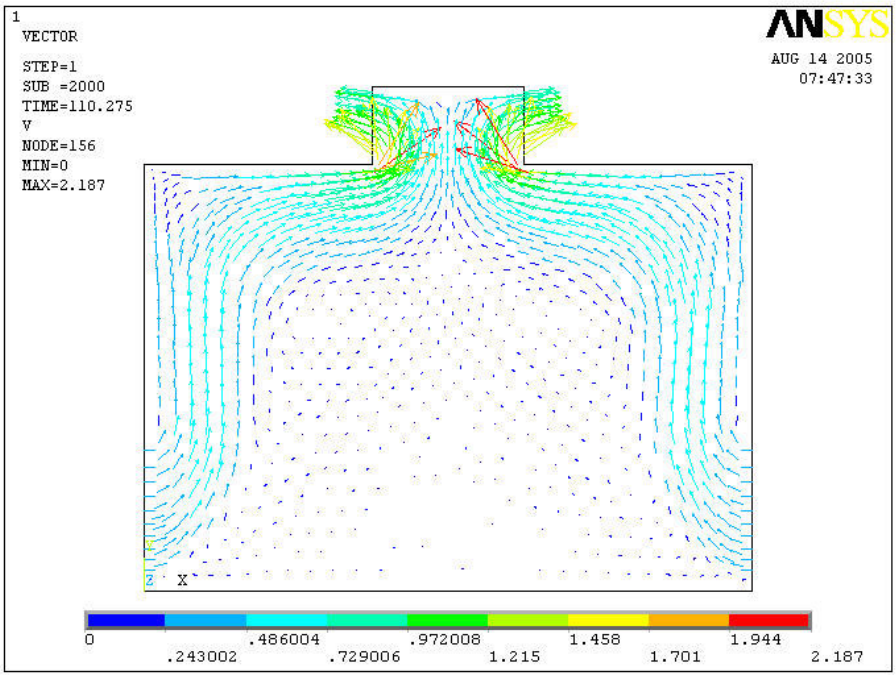

Figura 5.16 – Distribuição da velocidade interna – Caso 2

Quando se considera uma diferença maior entre as temperaturas externa e interna, Caso 2 mostrado na Tabela 5.1, obtém-se uma estratificação mais acentuada na temperatura interna, Figura 5.15. Pode-se perceber que a temperatura interna na região central do galpão, valor médio de 22 ºC, encontra-se também, dentro do limite estabelecido por Givoni (1992). Esse resultado influencia a distribuição da velocidade interna, Figura 5.16, deslocando o ar para regiões superiores e ficando uma região próxima do piso com baixa circulação de ar.

5.3.3. Outras configurações de galpão analisadas

O galpão estudado possui 10 m de largura, 7 m de pé-direito, aberturas inferior e superior, 1,4 m e 0,7 m, respectivamente. Foram feitas análises numéricas para diferentes valores da velocidade do vento. O galpão está sujeito a uma diferença de temperatura de 8 ºC. São analisadas três configurações que diferem entre si pelo número e posição de aberturas, Figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

5.3.3.1. Configuração A

Numa primeira configuração, o galpão possui uma abertura de entrada e uma abertura de saída, considerando as condições de contorno mostradas na Figura 5.5. Lembrando ainda, que se considera condição de contorno de superfície isolada no piso.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 mostram-se os resultado obtido para uma velocidade de entrada do ar de 0,3 m/s. Para outros valores de velocidade de entrada do ar, os resultados são apresentados no Anexo III.

Na Figura 5.19, mostra-se a variação da velocidade do ar no lanternim em função da variação do valor da velocidade do ar de entrada conforme resultados apresentados no Anexo III.

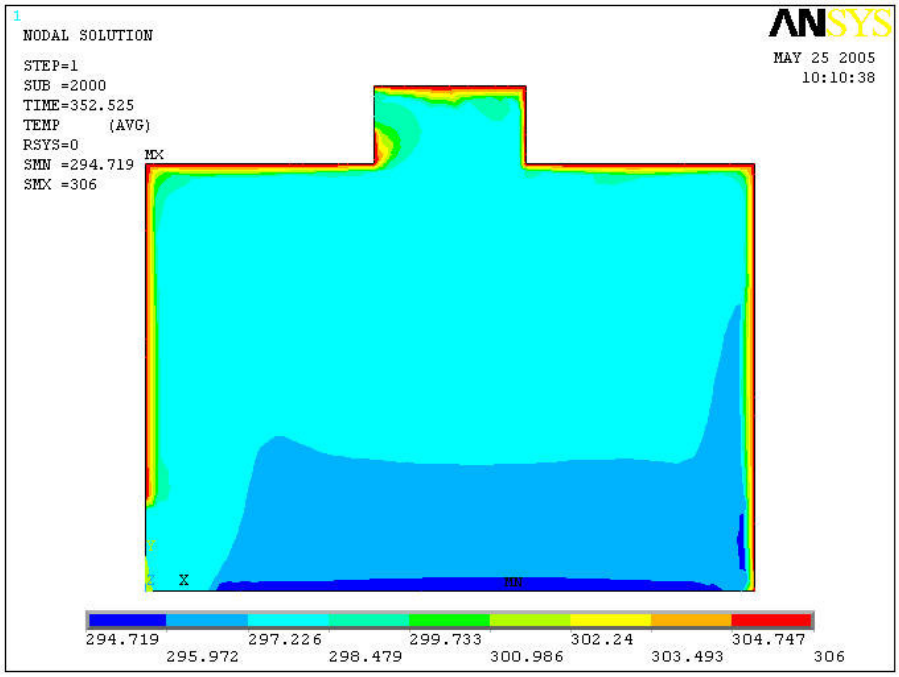

Figura 5.17 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

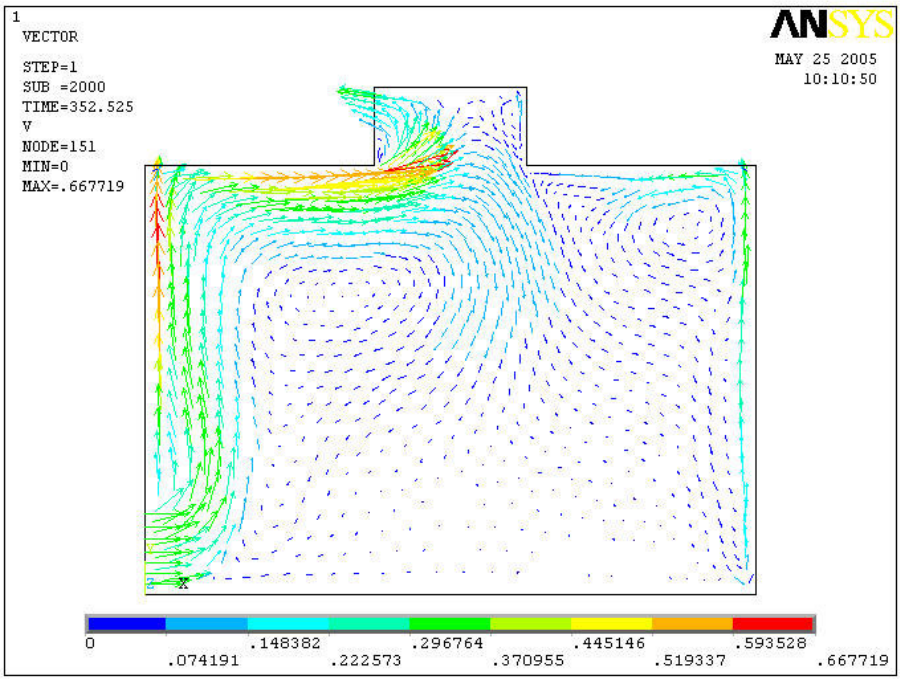

Figura 5.18 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para V_{entr} = 0,3 m/s

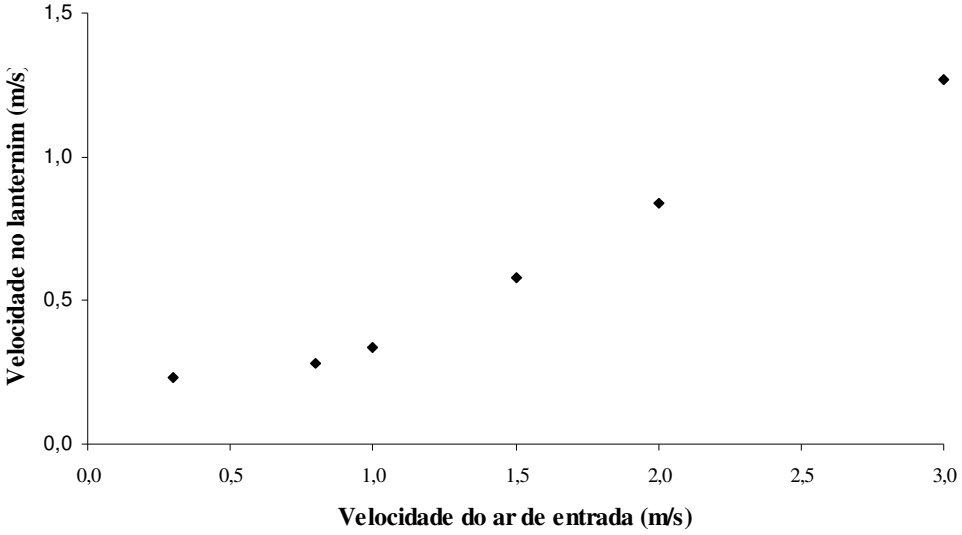

Figura 5.19 – Variação da velocidade do ar no lanternim para a configuração A

Observa-se que para um mesmo gradiente de temperatura existe uma relação direta entre a velocidade de saída no lanternim, previamente dimensionado, com a velocidade do ar de entrada.

5.3.3.2. Configuração B

Numa segunda configuração, o galpão possui uma abertura de entrada e duas aberturas de saída, considerando as condições de contorno mostradas na Figura 5.6.

Nas Figuras 5.20 e 5.21, mostram-se os resultados obtidos para uma velocidade de entrada do ar de 0,3 m/s. Para outros valores de velocidade de entrada do ar, os resultados são apresentados no Anexo III. Na Figura 5.22 mostra-se a variação da velocidade do ar no lanternim em função da variação do valor da velocidade do ar de entrada conforme resultados apresentados no Anexo III.

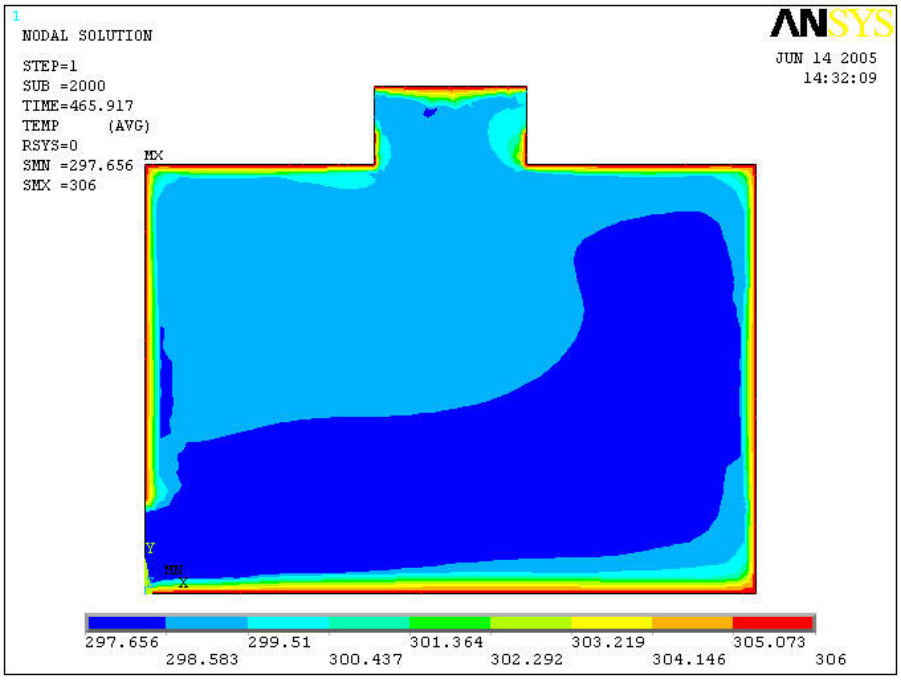

Figura 5.20 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

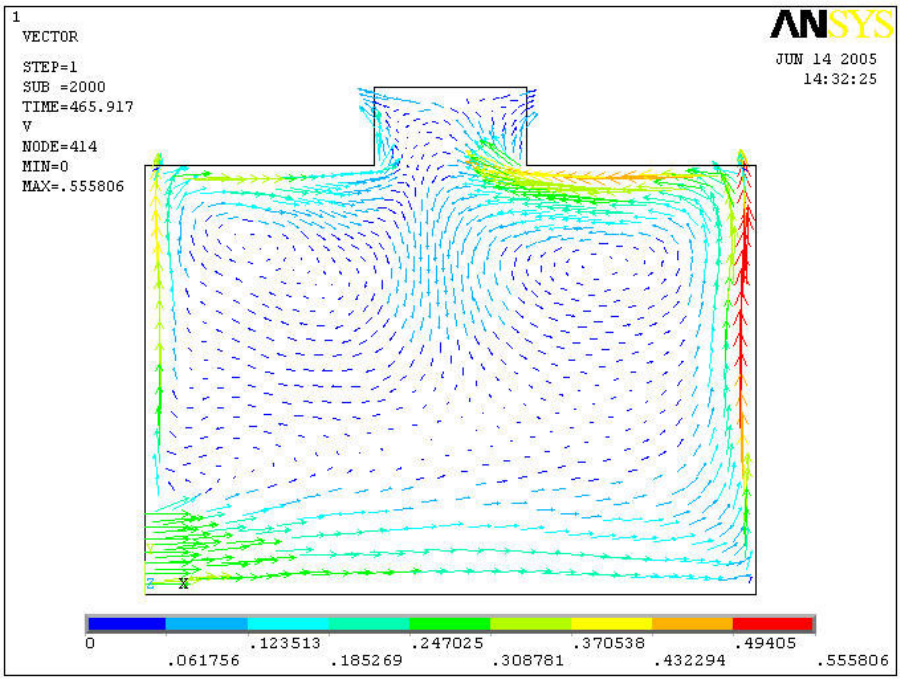

Figura 5.21 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

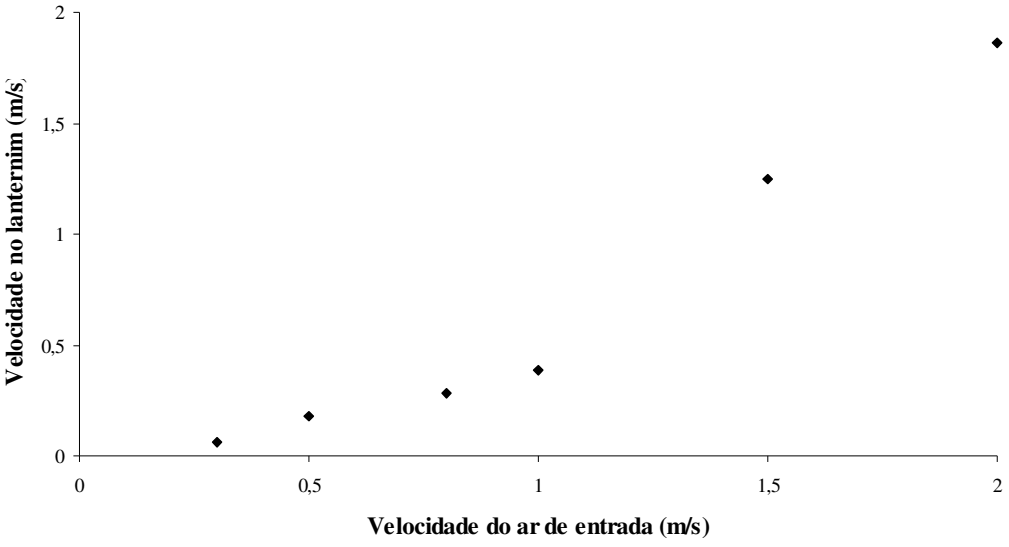

Figura 5.22 – Variação da velocidade do ar no lado direito do lanternim para a configuração B

5.3.3.3. Configuração C

Numa terceira configuração, o galpão possui duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, considerando as condições de contorno mostradas na Figura 5.7. Lembrando ainda, que se considera condição de contorno de superfície isolada no piso.

Na Figura 5.23 e 5.24, mostram-se os resultados obtidos para uma velocidade de entrada do ar de 0,3 m/s. Para outros valores de velocidade de entrada do ar, os resultados são apresentados no Anexo III.

Nas Figuras 5.25 e 5.26 mostram-se as variações da velocidade do ar no lanternim em função da variação do valor da velocidade do ar de entrada conforme resultados apresentados no Anexo III.

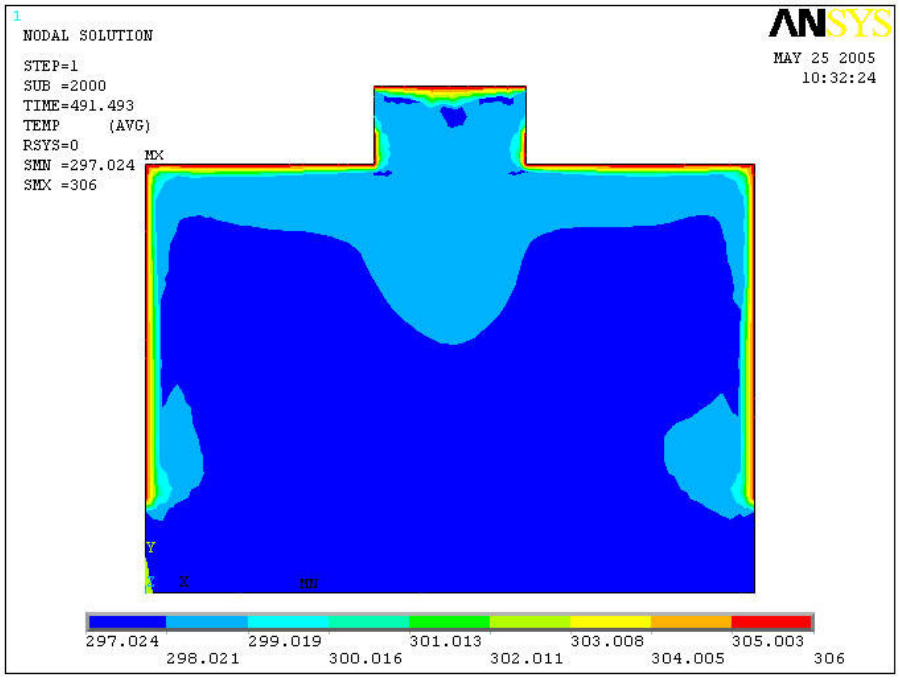

Figura 5.23 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

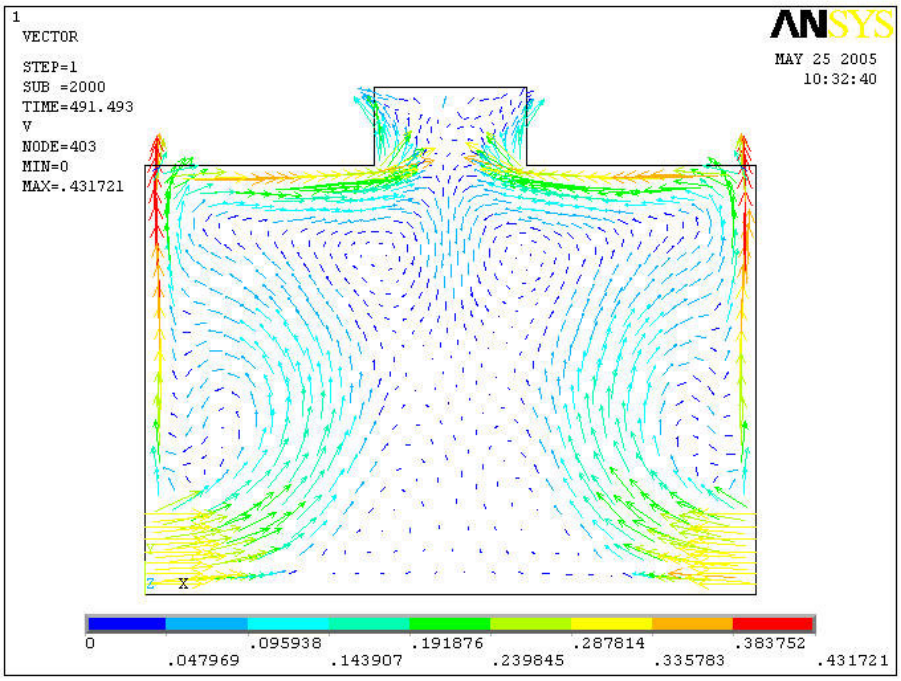

Figura 5.24 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

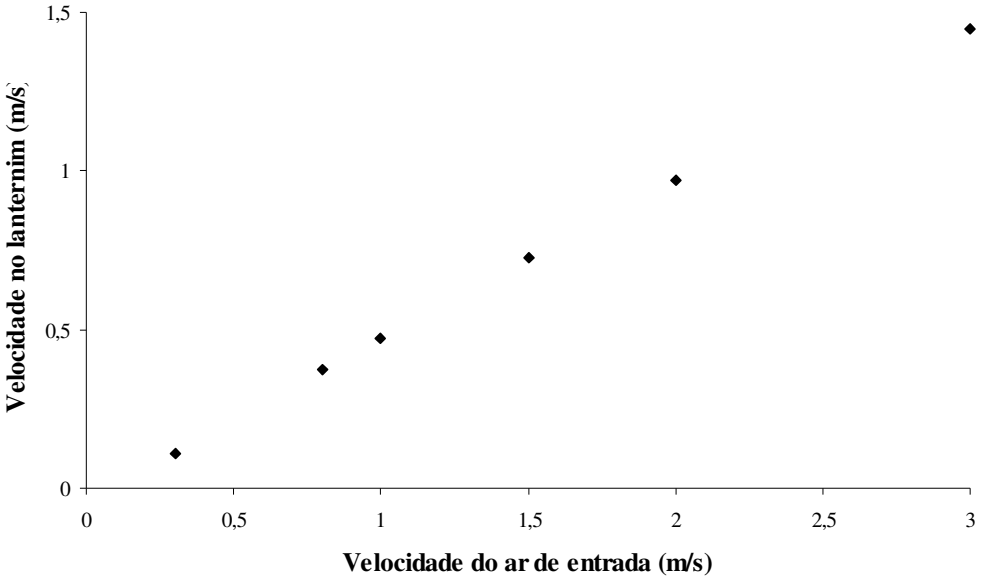

Figura 5.25 – Variação da velocidade do ar no lado esquerdo do lanternim para a configuração C

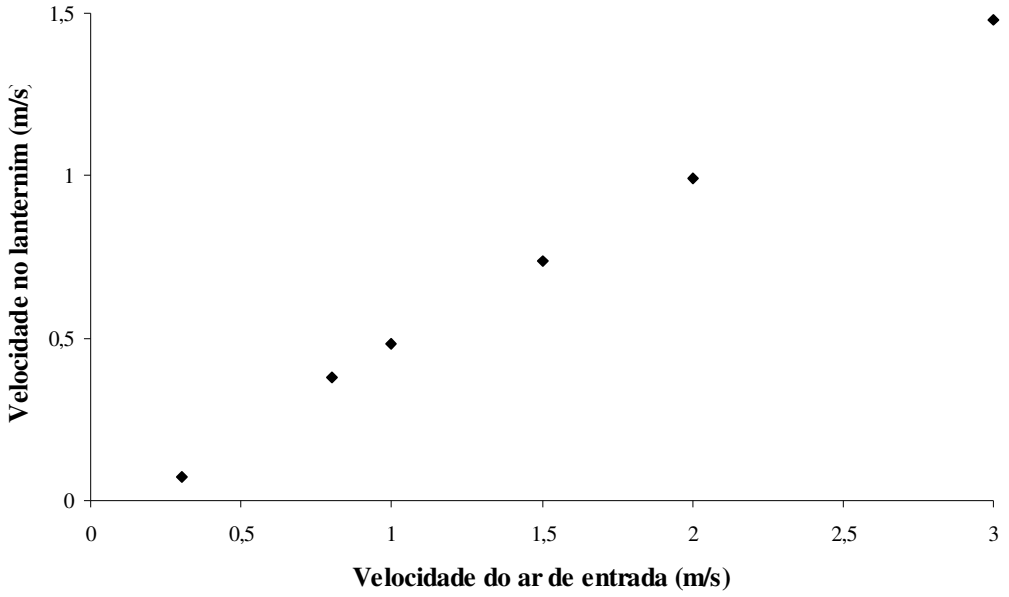

Figura 5.26 – Variação da velocidade do ar no lado direito do lanternim para a configuração C

A ventilação natural cria uma estratificação vertical de temperatura em todo o galpão, exceto próximo da(s) abertura(s) de entrada, que são relativamente pequenas. Normalmente, o gradiente de temperatura na parte mais baixa da edificação é um pouco maior do que na parte mais alta. Isto ocorre porque a maioria das fontes de calor está localizada na parte inferior. Este fato não é percebido nos resultados, pois não são levadas em consideração as fontes internas de calor, pois se pretendeu analisar somente os efeitos devido à diferença de temperatura e ao vento.

A estrutura do escoamento é caracterizada por um movimento global bem caracterizado, originado pelo ar que entra pela(s) abertura(s) inferior(es) e favorecido pelas forças ascendentes de empuxo no sentido vertical (efeito chaminé). Não são visíveis quaisquer perturbações do padrão do escoamento com origem específica nos efeitos de empuxo. Na primeira e na segunda configuração, onde se considera somente uma entrada do ar, o perfil do escoamento desenvolve-se formando um único vórtice, que se desloca com o aumento da velocidade de entrada. Na terceira configuração, o escoamento desenvolve-se na parte central do galpão, onde são atingidos os valores máximos da velocidade.

Nas configurações A e B, encontra-se um valor médio de temperatura no interior do galpão de 24 ºC para os diferentes valores adotados de velocidade de entrada do ar, e na configuração C, de 24,5 ºC. Como valor médio da velocidade máxima atingida no interior dos galpões para a variação da velocidade de entrada do ar, obteve-se 1 m/s para as configurações A e B, e 1,4 m/s para a configuração C. Para as condições de entrada e condições de contorno estabelecidas os resultados mostram que a temperatura interna, bem como a velocidade resultante, se encontra dentro do limite de conforto estabelecidos por Givoni, como descrito no Capítulo 2.

5.3.4. Influência da posição de aberturas

Analisa-se a influência da posição das aberturas de entrada em um galpão com 12 m de largura, 10 m de pé-direito e altura das aberturas de entrada e saída de ar, 1,0 m e 0,5 m, respectivamente. O galpão está sujeito a uma diferença de temperatura de 8º C e a velocidade do ar de entrada é de 1,0 m/s. A configuração adotada foi a de duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída. Nas Figuras 5.27 a 5.30 mostram-se os resultados numéricos obtidos.

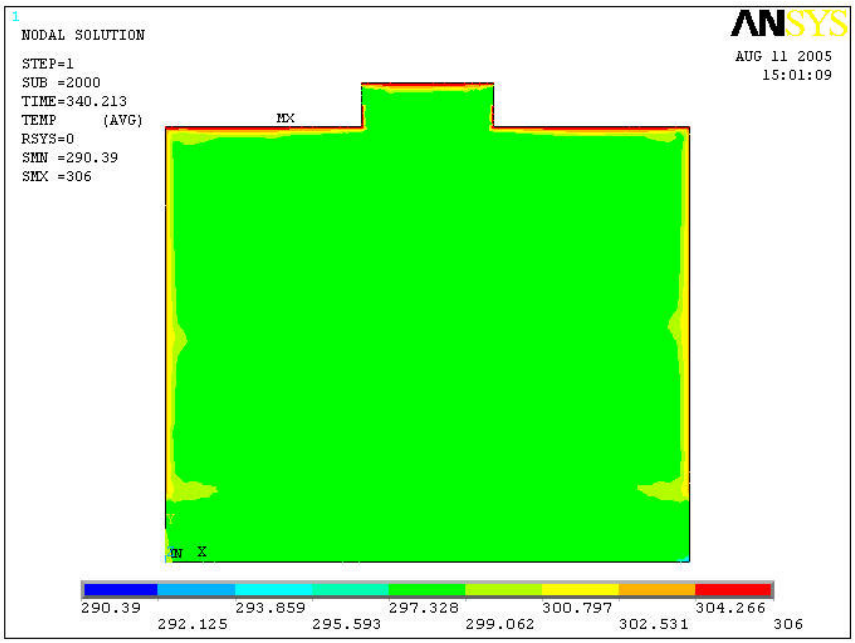

Figura 5.27 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

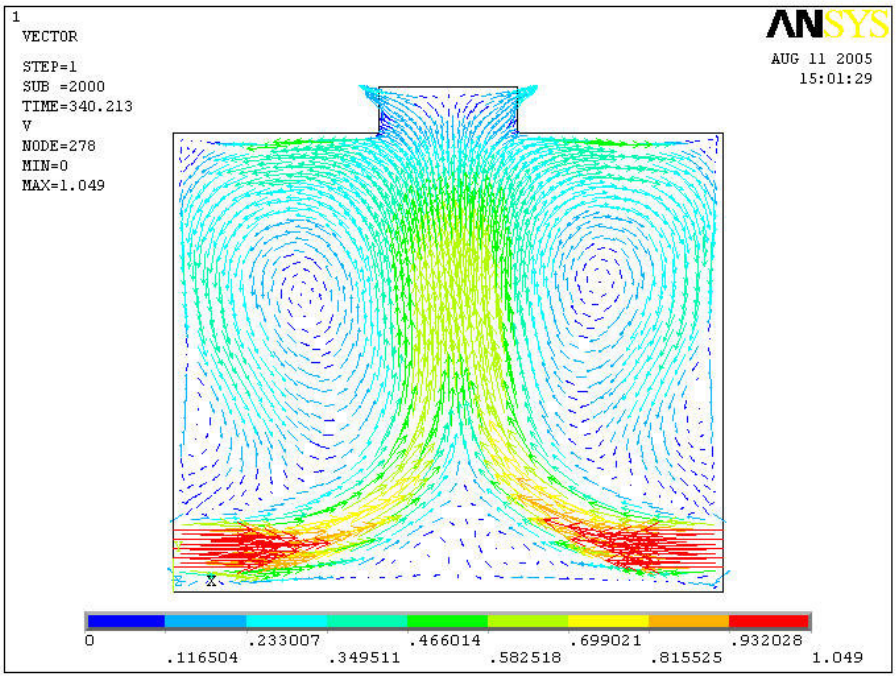

Figura 5.28 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

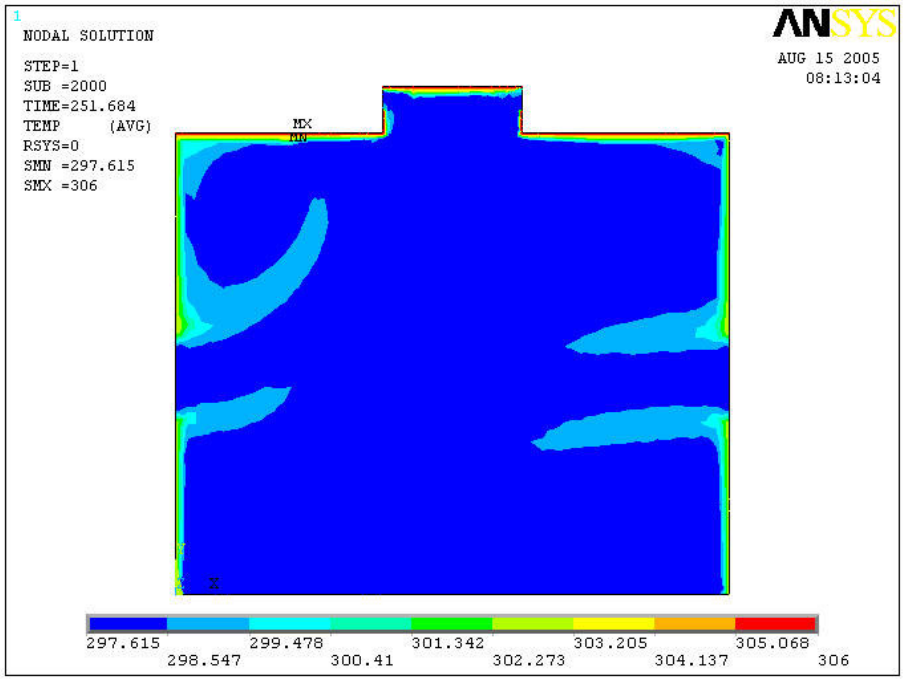

Figura 5.29 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

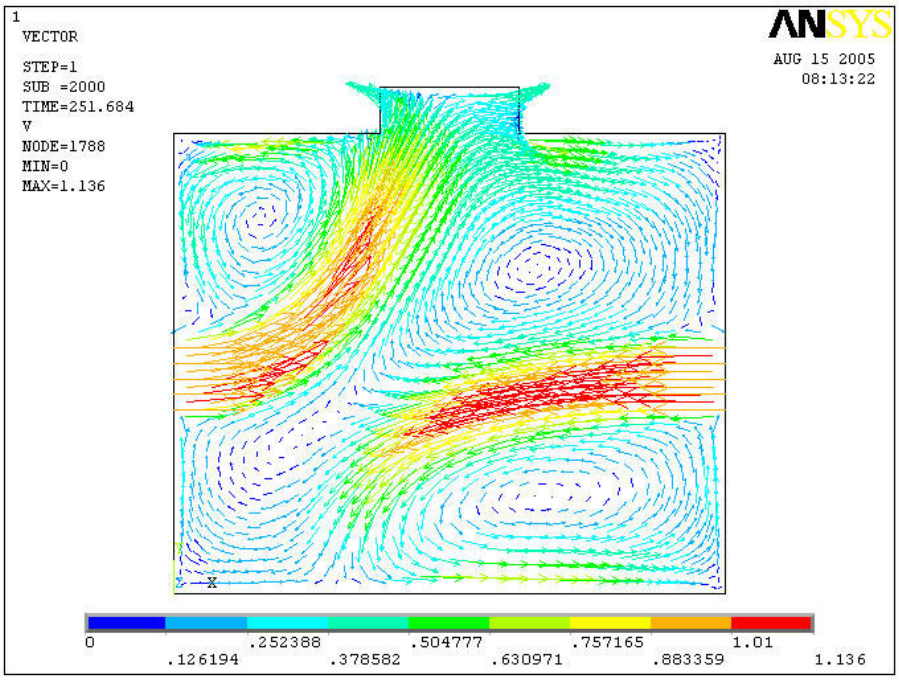

Figura 5.30 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

Observa-se, pelos resultados obtidos, que as aberturas colocadas numa altura mediana da fachada prejudicam o efeito chaminé, que é um fator importante para uma eficiente ventilação natural. Com esta posição de abertura para a entrada do ar, pode ocorrer ainda desconforto local para velocidades mais elevadas.

Na configuração do fluxo do ar interno mostrado na Figura 5.30, observa-se um comportamento diferenciado em relação às duas aberturas de entrada (não simétrico) em função de uma pequena diferença da posição destas aberturas.

5.3.5. Diferentes alturas das aberturas do lanternim

Para a análise da influência da altura da abertura de saída utiliza-se um galpão com 10 m de largura, 7 m de pé-direito e abertura inferior 1,4 m. Estudaram-se três diferentes valores de altura da abertura de saída de ar no lanternim, 0,5 m, 0,7 m e

0,9 m. O galpão está sujeito a uma diferença de temperatura de 8 ºC e a velocidade do ar de entrada considerada é de 0,3 m/s. A configuração adotada foi a de uma abertura de entrada e uma abertura de saída. Nas Figuras 5.31 a 5.36, mostram-se os resultados obtidos.

Aumentando-se a área da abertura de saída do ar e mantendo-se constante as demais dimensões e condições de contorno, pode-se perceber um leve aumento nos valores máximos da velocidade do ar no interior do galpão, como mostram as Figuras 5.32, 5.34 e 5.36. Esta alteração não apresenta diferenças significativas no valor da temperatura interna do galpão, Figuras 5.31, 5.33 e 5.35. Uma diferença no fluxo de ar e no perfil da temperatura no interior do galpão seria percebida com uma alteração nas áreas das aberturas de entrada do ar, mantendo-se as demais características constantes.

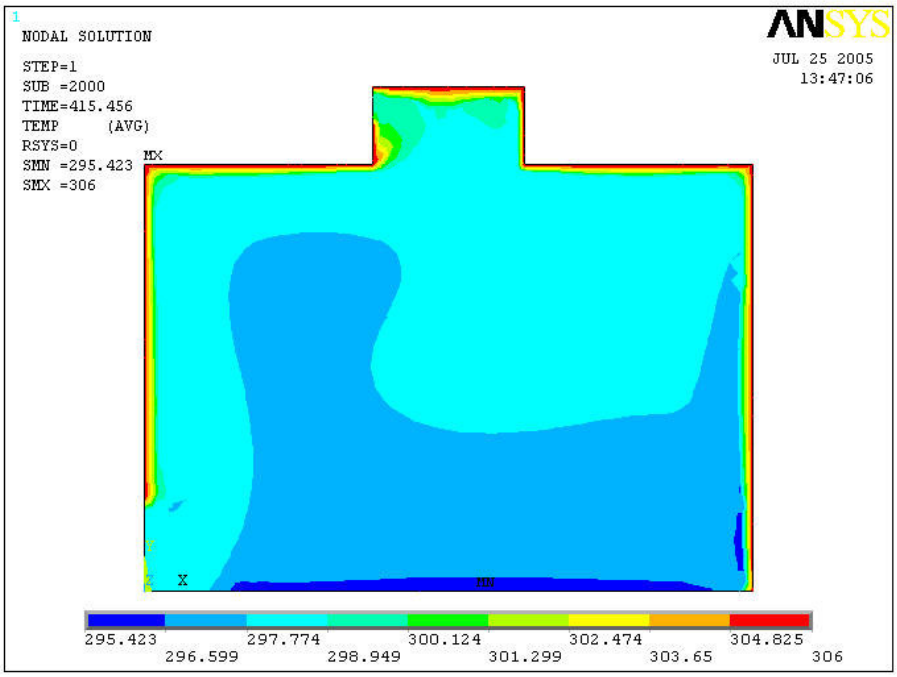

Figura 5.31 – Perfil da temperatura interna, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída de 0,5 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

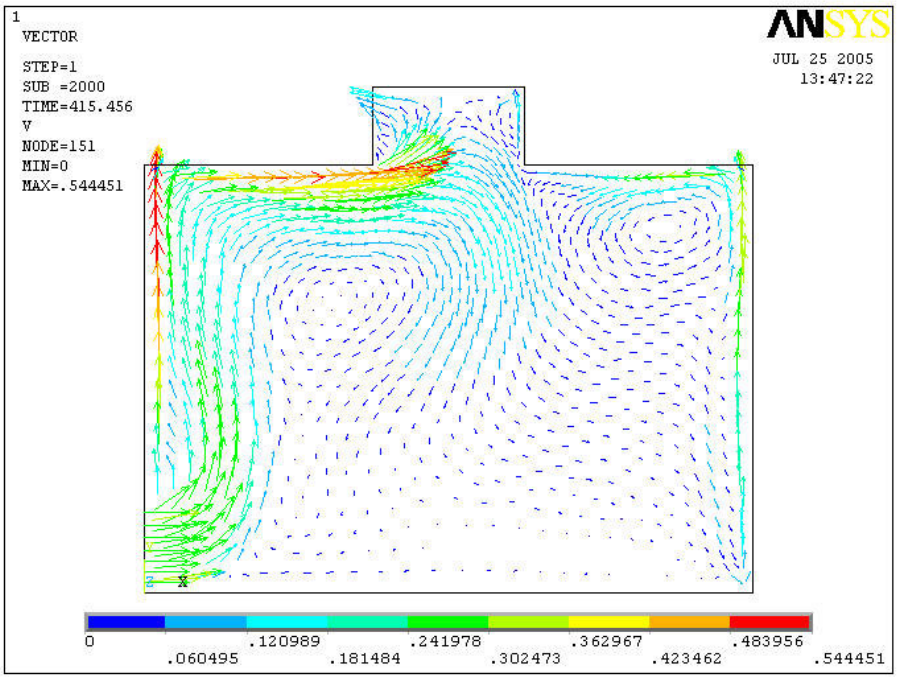

Figura 5.32 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura entrada e uma abertura de saída de 0,5 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

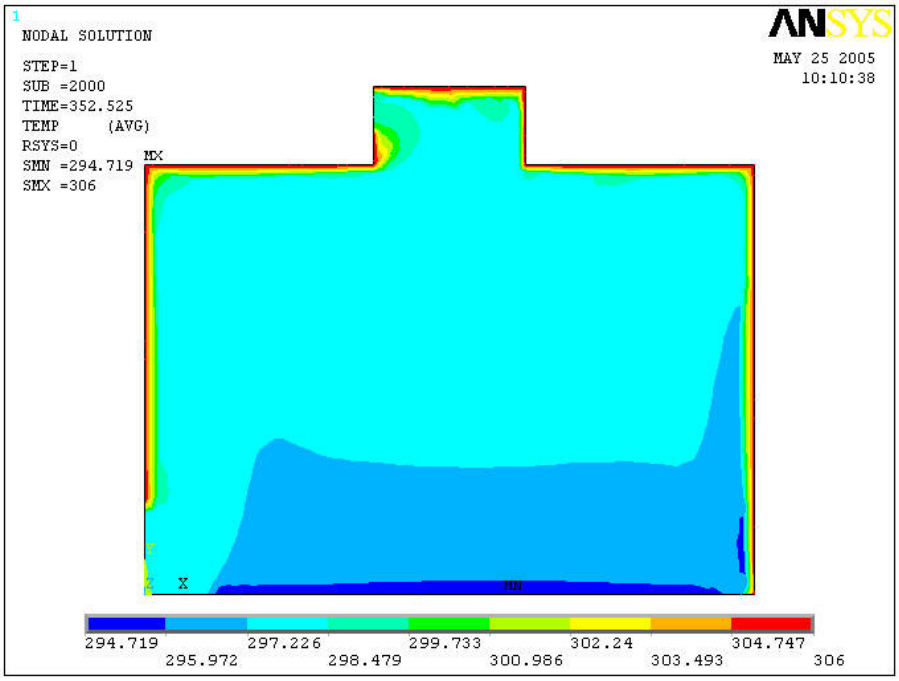

Figura 5.33 – Perfil da temperatura interna, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída de 0,7 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

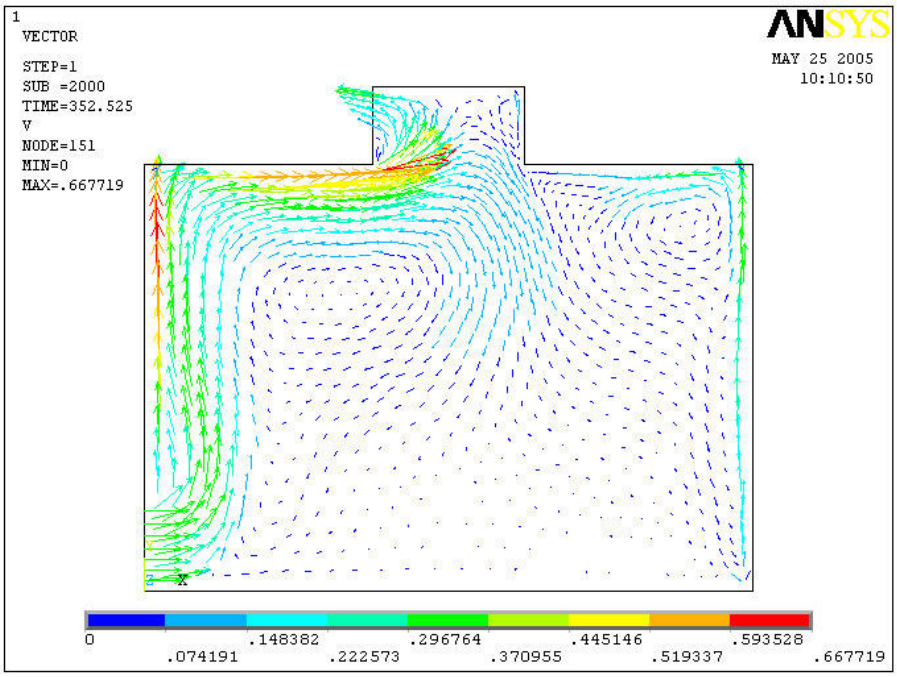

Figura 5.34 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura entrada e uma abertura de saída de 0,7 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

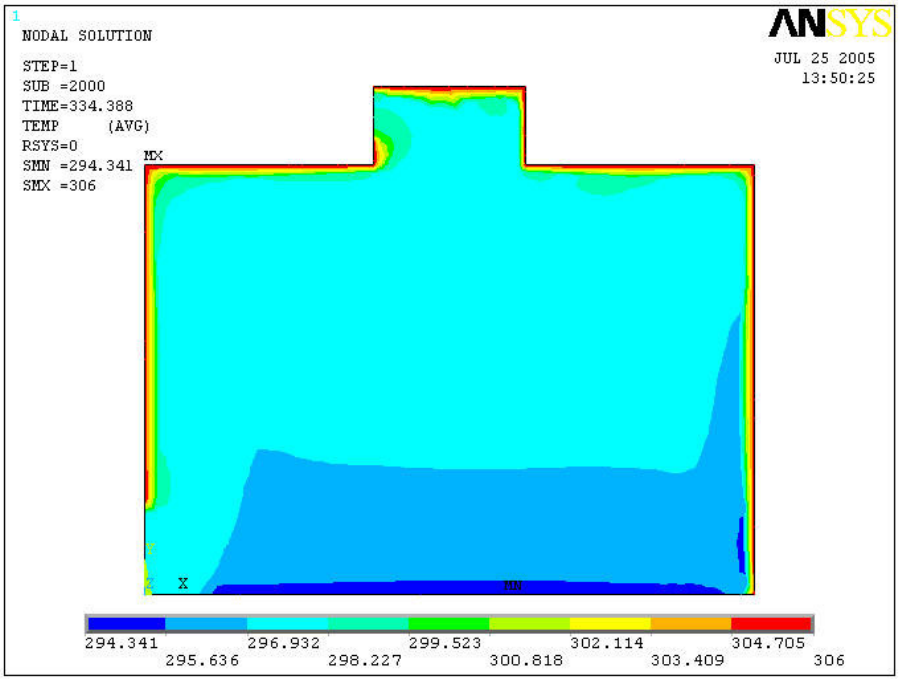

Figura 5.35 – Perfil da temperatura interna, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída de 0,9 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

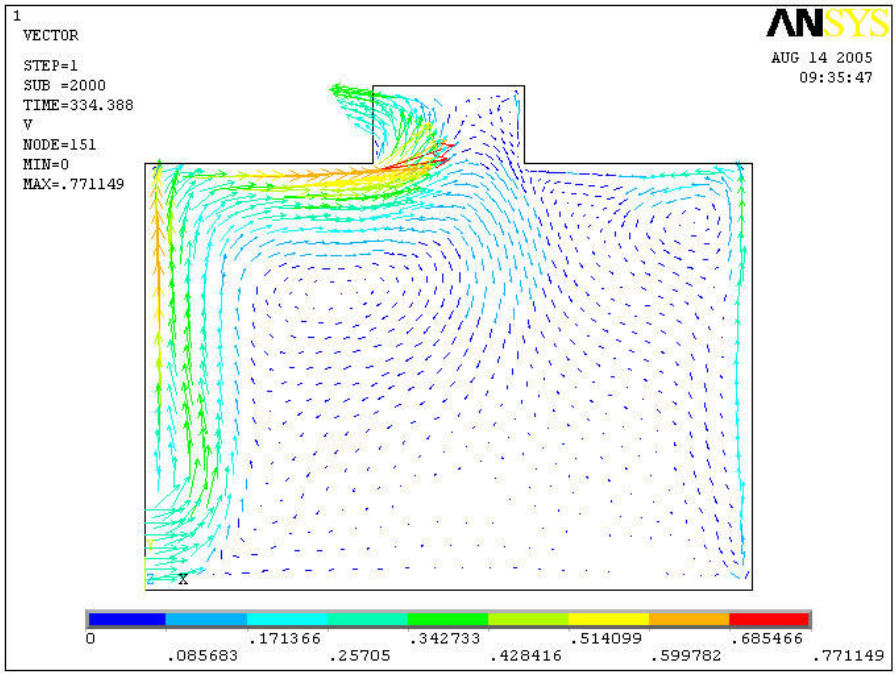

Figura 5.36 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma abertura entrada e uma abertura de saída de 0,9 m, para $V_{entr.}$ = 0,3 m/s

5.3.6. Influência do pé-direito

Faz-se ainda análises numéricas num galpão com 30 m de largura e alturas das aberturas de entrada e saída de ar, 1,0 m e 0,5 m, respectivamente, variando-se o pé-direito. Admite-se uma diferença de temperatura de 8 ºC e uma velocidade de entrada do ar de 1,0 m/s. A configuração adotada é aquela com duas aberturas de entrada e duas aberturas de saída. Nas Figuras 5.37, 5.38 e 5.39, mostra-se a distribuição do ar interno em função da variação do pé-direito.

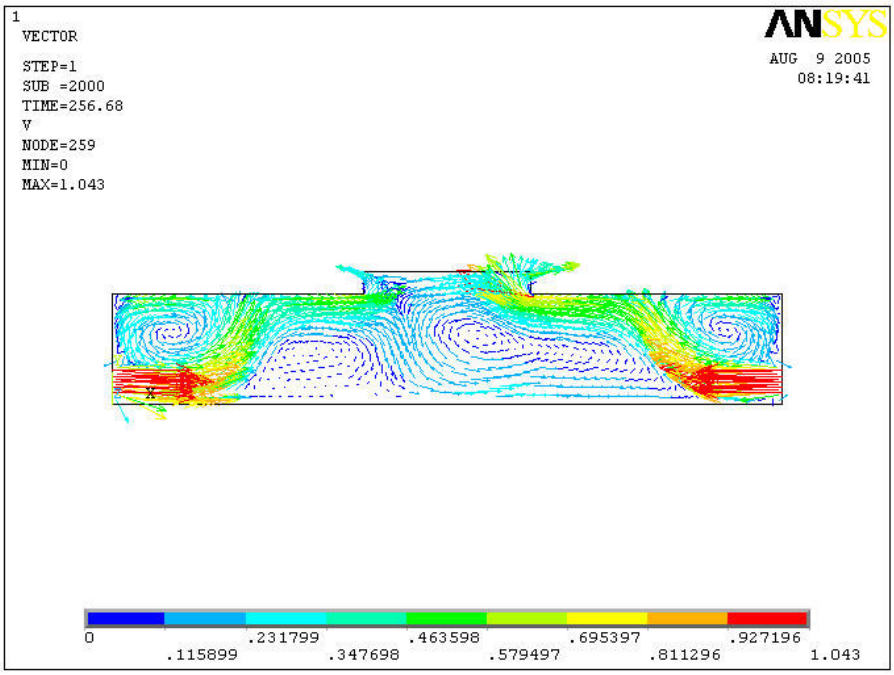

Figura 5.37 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 5 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

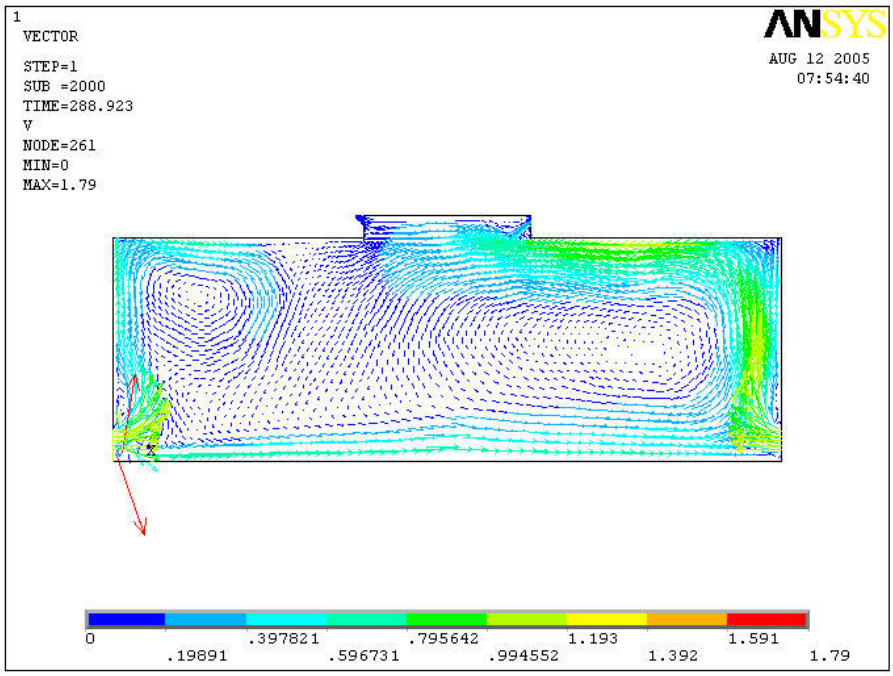

Figura 5.38 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 10 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

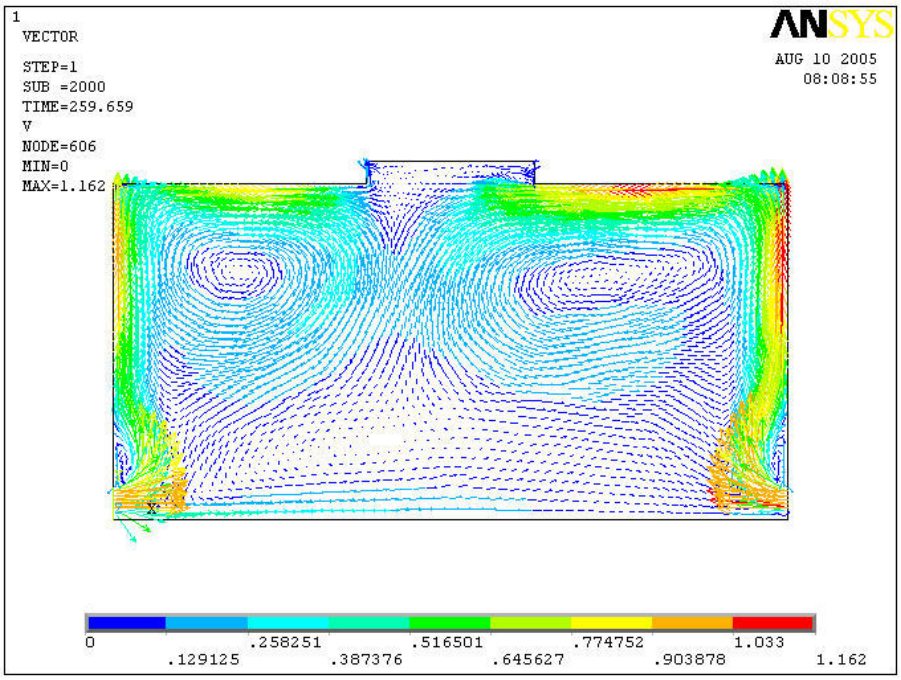

Figura 5.39 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 15 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

Observa-se que no modelo estudado, com estes valores de pé-direito, não ocorre uma adequada distribuição de ar no domínio. O ar tem que percorrer uma grande distância horizontal sob a cobertura até alcançar a saída de ar no lanternim. Em relação à distribuição de temperatura, observou-se também um estado de total desconforto térmico, pois a temperatura interna se apresenta praticamente constante no interior do mesmo, não apresentando nenhuma estratificação vertical.

Com o intuito de se melhorar a distribuição do ar interno, aumenta-se a área da abertura de entrada do ar considerando-se a altura da mesma de 2,30 m, para o modelo com pé-direito de 10 m. Apesar de apresentar uma melhora no fluxo do ar, levando a uma velocidade mais alta no lanternim, não houve mudança no comportamento térmico do galpão. Modifica-se então a largura do galpão e realizam-se novas análises numéricas para as mesmas condições de contorno e para os mesmos valores de pé-direito apresentados anteriormente, alterando somente a largura do galpão para 12 m. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.40 a 5.45.

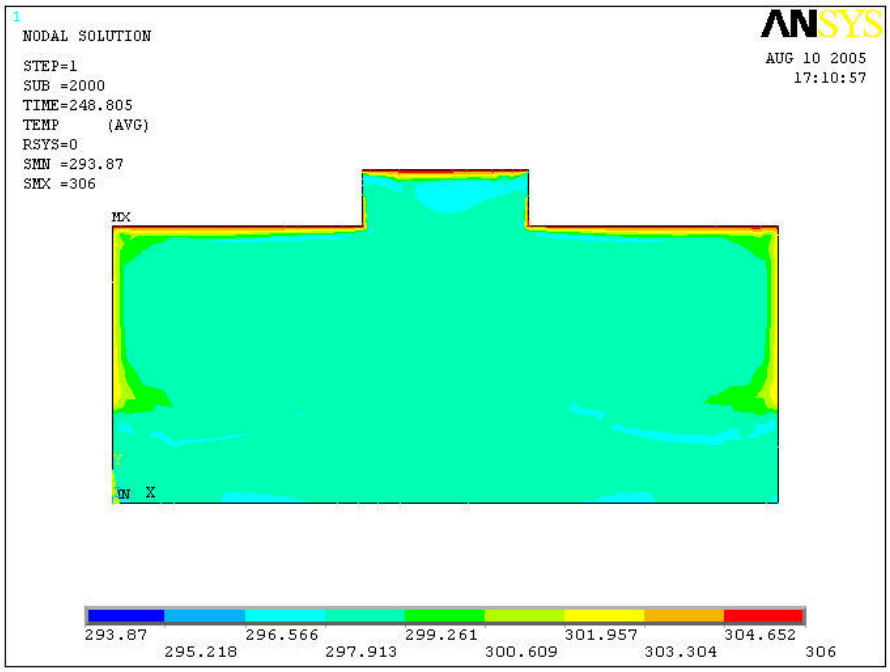

Figura 5.40 – Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 5 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

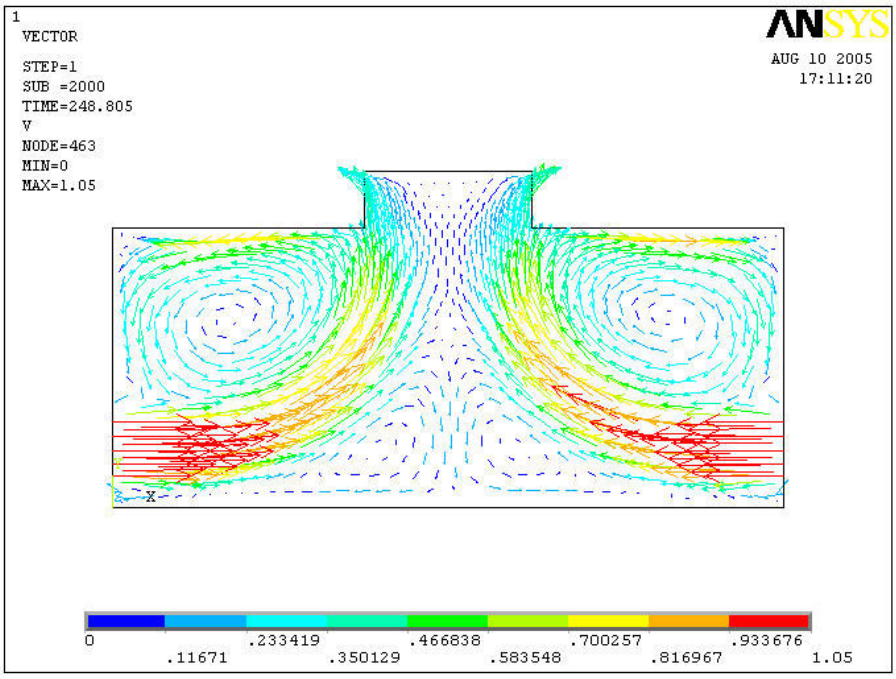

Figura 5.41 - Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 5 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

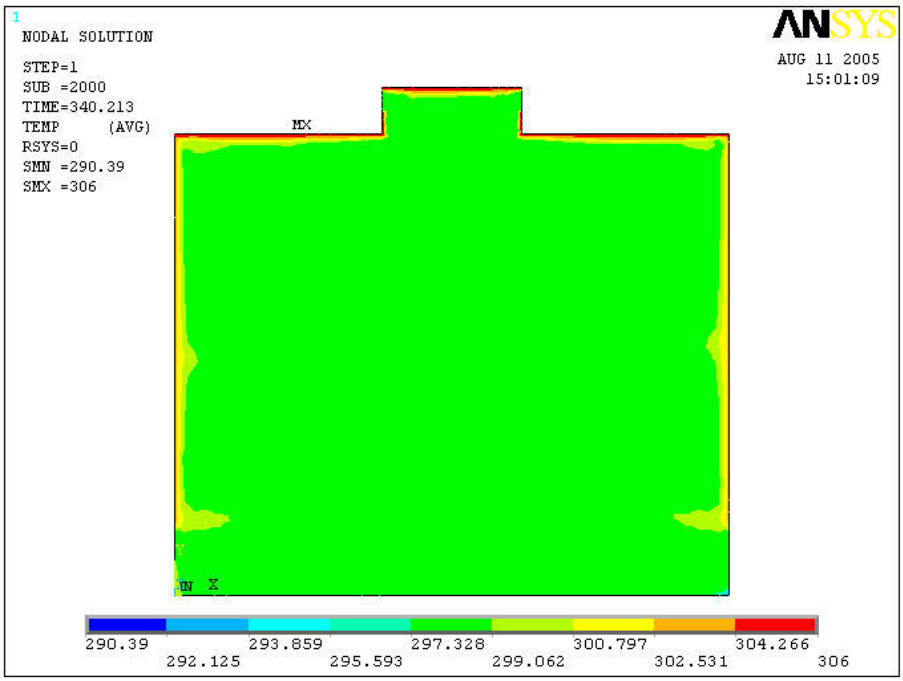

Figura 5.42 - Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 10 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

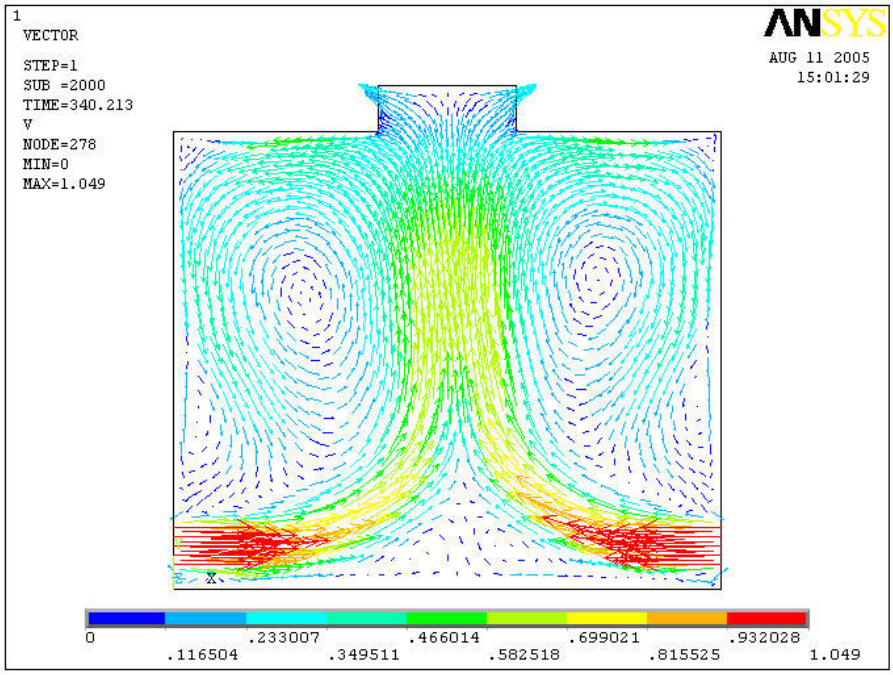

Figura 5.43 - Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 10 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

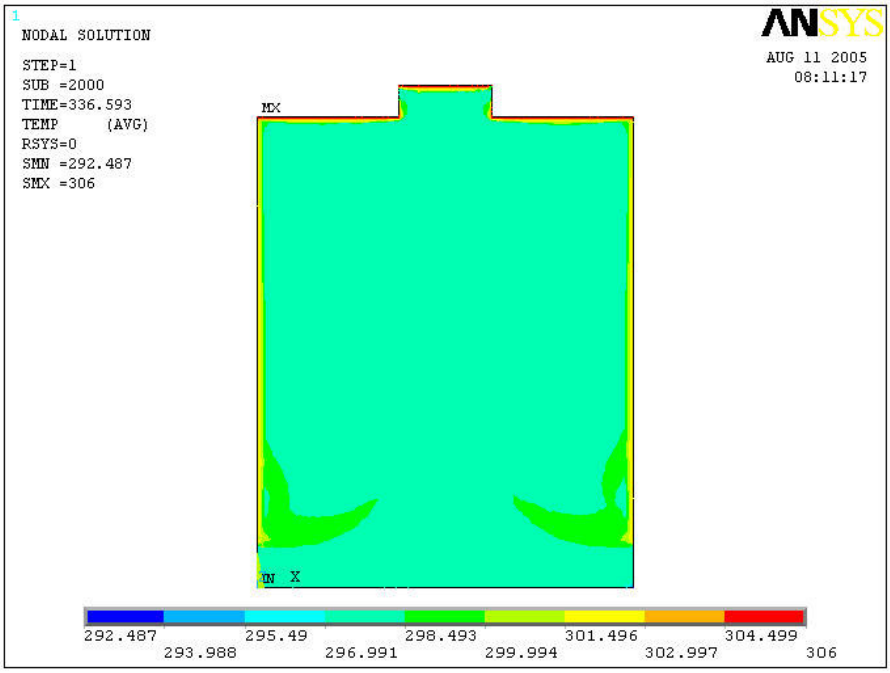

Figura 5.44 - Perfil da temperatura interna, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 15 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

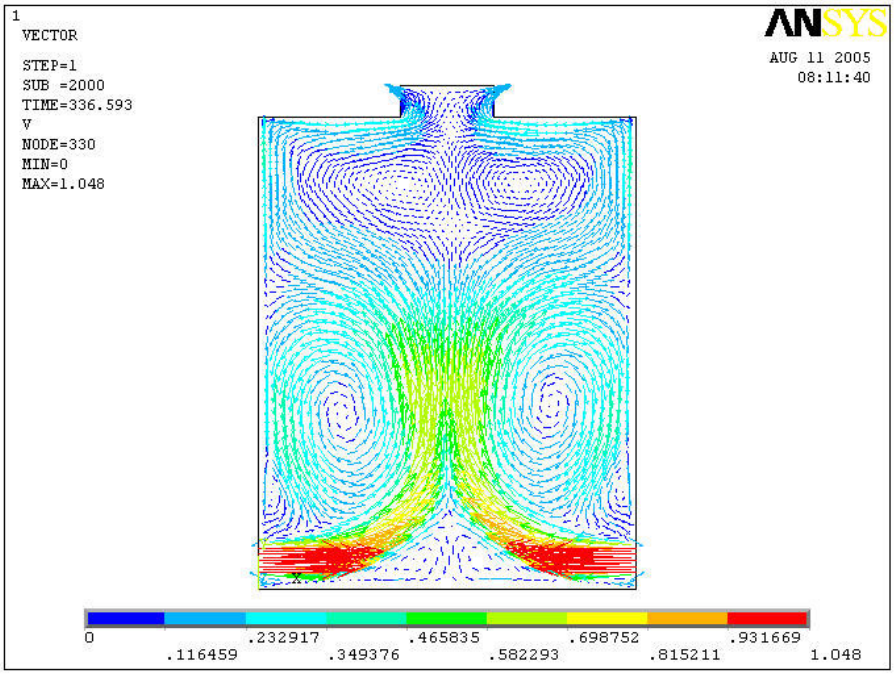

Figura 5.45 - Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas aberturas de entrada, duas aberturas de saída e pé-direito de 15 m, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

Pode-se observar, com a diminuição da largura do galpão, uma diferença significante no comportamento térmico do mesmo. Scigliano & Hollo (2001) constatam através de estudos experimentais em mais de 1100 construções que o percurso do deslocamento do ar aquecido sob a cobertura deve ser de no máximo 5 m. Fica então comprovado pela análise numérica que a distância horizontal máxima de 5 m, definida pelos autores, a ser percorrida pelo ar sob a cobertura até atingir a saída no lanternim, possibilita uma ventilação natural mais eficiente. Segundo Scigliano & Hollo (2001) esta é uma solução econômica aceitável na maioria dos casos nos últimos 50 anos.

Ainda nessa análise, de acordo com os resultados mostrados nas Figuras 5.40 a 5.45, pode-se perceber que quanto maior o pé direito, melhor a circulação do ar no interior do galpão. Há uma melhora na ventilação natural, pois o efeito chaminé que gera a mesma varia proporcionalmente à variação da altura do prédio. Além disso, a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar também propicia uma melhor circulação, pois gera uma maior eficiência do efeito chaminé.

Percebe-se por meio dos resultados obtidos que os valores médios de temperatura e velocidade do ar encontrados na região central do galpão, 24º C e 0,7 m/s, respectivamente, encontram-se dentro dos limites estabelecidos por Givoni (1992) e ASHRAE 55 :1994, como descritos no Capítulo 2.

6. CONCLUSÕES

A ventilação natural constitui uma importante solução para a obtenção do conforto térmico no interior da grande maioria das edificações. A colocação de lanternins na cobertura de galpões é de extrema importância para o bom funcionamento da ventilação natural, que propicia um ambiente interno confortável resultando numa maior produtividade, numa melhor qualidade do ar interno, economia da energia e proteção à saúde dos ocupantes. É importante a adequada escolha dos materiais de cobertura e suas associações, bem como a concepção arquitetônica e o paisagismo circundante.

Para a obtenção de uma ventilação natural eficiente, devem-se levar em consideração vários fatores, sendo os mais importantes o pé-direito e aberturas para entrada e saída do ar. O pé-direito do edifício influi fortemente no conforto, pois o efeito chaminé que gera a ventilação natural varia proporcionalmente à variação da altura do prédio. Para se alcançar o conforto térmico, é de fundamental importância, a posição em que foram colocadas as aberturas para a passagem de ar nas edificações, a área total delas, a uniformidade da sua distribuição e, principalmente, os tipos de aparelhos utilizados para permitir a entrada de luz e proteger contra a entrada de chuva.

No presente trabalho foi desenvolvido, primeiramente, uma abordagem analítica simplificada para o cálculo da altura da abertura adequada de passagem de ar no lanternim com a finalidade de se obter uma ventilação natural eficiente. Posteriormente, foi desenvolvido um estudo numérico das distribuições de temperatura e velocidade que ocorrem num ambiente interno, considerando-se modelos de galpões bidimensionais sujeitos à ventilação natural.

Este estudo envolveu o modelamento dos fenômenos físicos presentes no problema e posterior solução das equações governantes através de um método numérico, utilizando como dados de aberturas de lanternins, os valores obtidos com a abordagem analítica simplificada. A determinação dos campos de velocidade e temperatura é necessária para a avaliação das condições de conforto térmico no interior dos galpões.

Deve-se utilizar o sistema artificial para o condicionamento térmico do ambiente somente quando os recursos naturais estiverem esgotados ou quando a introdução deste complementar com economia o sistema de ventilação natural.

Com base nos resultados numéricos obtidos, conclui-se a eficiência da metodologia analítica utilizada para o pré-dimensionamento da abertura de lanternim e a necessidade de se observar os detalhes construtivos para que se aproveite completamente a ação combinada das forças do vento e do efeito chaminé. Observa-se que em função das dimensões (pé-direito, largura do galpão, altura do lanternim) o efeito chaminé pode ser prejudicado devido a perda de carga que ocorre no fluxo de ar.

6.1. Sugestões para pesquisas futuras

Para trabalhos futuros têm-se as seguintes conclusões:

- Realizar novos estudos a fim de se buscar a convergência da solução numérica do problema abordado observando-se o modelo de turbulência.

- Realizar novas simulações numéricas variando-se as condições de contorno e levando em conta as fontes internas de calor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, F.; GHIAUS, C.; MANSOURI, Y. Natural ventilation for health comfort and energy efficiency. **ENCAC 2003**, Curitiba, 2003.

ALLOCA, Camille; CHEN, Qingyan; GLICKSMAN, Leon R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, London, v. 35, p. 785-795, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. ASHRAE 55 :2004. New York, 2004.

ANDERSEN, Karl Terpager. Theory for natural ventilation by thermal buoyancy in one zone with uniform temperature. **Building and Environment**, London, v. 38, p. 1281-1289, 2003.

ANSYS. **User's Manual for Revision 6**: Swanson Analysis Systems Inc. Houston, 2001.

ARAUJO, V.M.D. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. 1996. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 1996.

BUSCH, J. F. A tale of two populations: thermal comfort in air conditioned and naturally ventilated offices in Tailand. **Energy and Buildings**, California, Lawrence Laboratory, v.18, 1992.

CAPELUTO, I. G. A methodology for the qualitative analysis of winds: natural ventilation as a strategy for improving the thermal comfort in open spaces. **Building and Environment**, London, v. 40, p. 175-181, 2004.

CHEN, Q. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. **Energy and Buildings**, London, 2003.

CHEN, Z. D.; LI, Yuguo. Buoyancy-driven displacement natural ventilation in a single-zone building with three-level openings. **Building and Environment**, London, v. 37, p. 295-303, 2001.

CHENVIDYAKARN, T.; WOODS A. W. Multiple steady states in stack ventilation. **Building and Environment**, 2005.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação Industrial**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

COOPERIN, 2005. Disponível em:< www.cooperin.com.br >. Acesso em: 2005.

DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, London, v. 34, p. 549-561, 2002.

EFTEKHARI, M. M.; MARJANOVIC, L. D.; PINNOCK, D. J. Air flow distribution in and around a single-sided naturally ventilated room. **Building and Environment**, London, v. 38, p. 389-397, 2001.

EMBRAPA, 2005 Disponível em:< http://www.embrapa.br/ >. Acesso em: 2005.

EMMERICH, 2001, S. J.; DOLS, W. S.; AXLEY, J. W. **Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools**. Colorado, 2001. Disponível em:< http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01073.pdf>. Acesso em: 2005.

ETHERIDGE, 2001. An Example of Solution Multiplicity in a Building with Bi-directional Flow Openings. **Indoor and Built Environment**. 2005; 14: 359-369.

FANGER, P. O. (1972). **Thermal Comfort**: **Analysis And Applications in Environmental Engineering**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972.

FAVAROLO, P. A.; MANZ, H. Temperature-driven single-sided ventilation through a large rectangular opening. **Building and Environment**, London, v. 40, p. 689-699, 2005.

FERIADI, H.; WONG, N H. Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia. **Energy and Buildings**, London, v. 36, p. 614-626, 2004.

GAN, Guohui. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, London, v. 31, p. 65-73, 1999.

GIVONI B. **Comfort climate analysis and building guidelines**. Energy and Buildings, nº 18, 1992.

GIVONI B. **Man, Climate and Architecture. Londres**, 1976.

GIVONI. B.; MILNE. M. **Architectural design based on climate. Energy conservation trough buildings designs.** New York, 1979.

GOLDMAN, R.F. Produtivity in the United States: A question of capacity or motivation. . In: **ASHRAE Transactions**, v. 100, part 2, 1994.

GRIEFAHN, B.; KÜNEMUND, C.; GEHRING, U. **Annoyance caused by draught: The extension of the draught-rating model (ISO 7730)**. In: MOVING THERMAL COMFORT STANDARDS INTO 21CENTURY, 2001, Windsor. **Proceedings**. Windsor: Oxford Brookes University, 2001. p. 135-145.

GUGLIELMETTI, A. H. G. **A Legislação energética como ferramenta de redução do consumo de energia em edifícios: os impactos para a cidade de São Paulo**. 164p. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2002.

HEISELBERG, Per; SVIDT, Kjeld; NIELSEN, Peter V. Characteristics of airflow from open windows. **Building and Environment**, London, v. 36, p. 859-869, 2001.

HERNANDEZ, A. et al. **Análise da Ventilação Natural em Ambientes não Condicionados**, São Paulo: NUTAU, 1998.

HUNT, G. R.; LINDEN, P. F. The fluid mechanics of natural ventilation: displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. **Building and Environment**, London, v. 34, p. 707-720, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort**. ISO 7730 :1994. Geneva, 1994.

IZARD, J. L.; GUYOT, A. **Arquitetura bioclimática**. Barcelona, Gustavo Gilli, 1983.

JIANG, Yi; CHEN, Qingyan. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. **Building and Environment**, London, v. 37, p. 379-386, 2001.

KAYNAKLI, O.; KILIC, M. Investigation for indoor thermal comfort under transient conditions. **Building and Environment**, London, v. 40, p. 165-174, 2004.

LI, Yuguo; DELSANTE, Angelo. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. **Building and Environment**, London, v. 36, p. 59-71, 1999.

LI, Yuguo; DELSANTE, Ângelo; SYMONS Jeff. Prediction of natural ventilation in buildings with large openings. **Building and Environment**, London, v. 35, p. 191-206, 2000.

LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S. Ventilação e Conforto em Climas Quentes e Úmidos. **ENCAC 2001**, São Pedro, 2001.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.

MARTIN, A.; FITZSIMMONS, J. **Making Natural Ventilation Work**: guidance note GN 7. Bracknell, 2000. Disponível em: <http://www.bsria.co.uk/bookshop/system/index.html>. Acesso em: 2005.

METALFER, 2005 Disponível em:< http://www.metalfer.ind.br/>. Acesso em: 2005

MONTENEGRO, G. A. **Ventilação e cobertas**: **estudo teórico, histórico e descontraído**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

NAAS; I. A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. São Paulo: Ícone, 1989.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Compendium of human responses to the aerospace environment**. NASA CR-1205. Washington D.C., 1968.

NETO, A. S. **Regulamentação de desempenho térmico e energético de edificações**. 2003. 213f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

NEWMAN, O. **Defensible Space**. New York. Collier Books, 1972.

NICOL, F. **A Handbook for Field Studies Toward an Adaptive Model**. University of East London, Londres, 1993.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, London, v. 34, p. 563-572, 2002.

NORDESTERURAL, 2005. Disponível em:<http://www.nordesterural.com.br/ >. Acesso em: 2005.

OLGYAY, V. **Arquitectura y Clima. Manual de deseño bioclimático para arquitectos e urbanistas**. Barcelona, 1998.

OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regio**nalism. New Jersey. Princenton University Press, 1963.

PAPAKONSTANTINOU, K. A.; KIRANOUDIS, C. T.; MARKATOS, N. C. Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated buildings. **Energy and Buildings**, London, v. 34, p. 563-572, 2000.

PRIYADARSINI, R.; CHEONG, K. W.; WONG, N. H. Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system. **Energy and Buildings**, London, v. 36, p. 61-71, 2003.

RAJA, I. A. et al. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. **Energy and Buildings**, London, v. 33, p. 235-244, 2001.

RAMSEY, J.D. Heat and cold. In: HOCKEY, R. Stress and fadigue in human performance. England: John Wiley & Sons ltd, 1984. chapter 2, pp. 33- 60.

ROHLES, F. H.; KONZ, S. A.; JONES, B. W. Ceiling fans as extenders of the summer comfort envelope. **ASHRAE Transactions**, v. 89, part. 1, 1983.

RUAS; A. C. **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificados e sua aplicação num software**. 2002. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SCHEATZLE, D.G.; WU, H.; YELLOTT, J. Extending the summer comfort envelope with ceiling fans in hot, arid climates. **ASHRAE Transactions**, v. 95, part 1, 1989.

SCHMIDT, D.; MAAS, A.; HAUSER, G. **Experimental and Theoretical Case Study on Cross Ventilation – designing a mathematical model.** Nordic Journal of Building Physics, 1999.

SCIGLIANO, S.; HOLLO, V. **IVN: Índice de Ventilação Natural**. São Paulo: Pini, 2001.

SENSHARMA, N.P.; WOODS, J.E.; GOODWIN, A.K. Relationships between the indoor environment and productivity: A literature review. In: **ASHRAE Transactions**, v. 104, 1998.

SPRATT, D. 2002. **Natural Ventilation**. Article for the Canadian Property Management Magazine (B.C. Edition), 2002.

TANABE, S.; KIMURA, K. Effects of air temperature, humidity, and air movement on thermal comfort under hot and humid conditions. **ASHRAE Transactions**, v. 100, part. 2, 1994.

TINÔCO, I. F. F. **Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros**. Departamento de Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

TOLEDO, E. **Ventilação natural das edificações**. Maceió: EDUFAL, 1999.

VIANNA, Nelson Solano; GONÇALVES, Joana Carla. Iluminação e Arquitetura. São Paulo: Geros/ UniABC/ FUPAM, 2001.

XAVIER, A. A. P. **Condições de conforto térmico para estudantes de 2° grau na região de Florianópolis. Florianópolis**. 1999. 213f. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

XUE, H; SHU, C. Mixing characteristics in a ventilated room with non-isothermal ceiling air supply. **Building and Environment**, London, v. 34, p. 245-251, 1999.

YANG, K. H., SU, C. H. An Approach to Building Energy Savings using the PMV Index. **Building and Environment**. Oxford, v. 32, n 1, p. 25-30, 1997.

Windowmaster. Disponível em:< http://www.windowmaster.com/>. Acesso em: 2005.

WONG, 2003.

WOODS, J. E., WINAKOR, G., et al. Relationships between measures of Thermal Environment and measures of Worker Productivity. **ASHRAE Transactions**. Atlanta: v. 87, n. 2, p. 117-144, 1981.

ANEXO I

A. Algoritmo de cálculo da área de abertura do lanternim

Apresentam-se os algoritmos de cálculo para as geometrias de galpões apresentadas na Tabela 5.1.

A.1. Caso 1

Cálculo das áreas de entrada e saída do ar:

Dados de entrada:

```
> Q:=40.0;
```

$$Q := 40.0$$

```
> Cp1:=0.5;
```

$$Cp1 := .5$$

```
> Cp2:=-0.7;
```

$$Cp2 := -.7$$

```
> Cp3:=-0.7;
```

$$Cp3 := -.7$$

```
> Cp4:=0.5;
```

$$Cp4 := .5$$

```
> K1:=0.6;
```

$$K1 := .6$$

```
> K2:=0.6;
```

$$K2 := .6$$

```
> K3:=0.6;
```

$$K3 := .6$$

```
> K4:=0.6;
```

$$K4 := .6$$

```
> V:=.30;
```

$$V := .30$$

```
> Patm:=101300;
```

$$Patm := 101300$$

```
> g:=9.81;
```

$$g := 9.81$$

```
> Z1:=0.0;
```

$$Z1 := 0.$$

```
> Z2:=7.0;
```

$$Z2 := 7.0$$

```
> Z3:=7.0;
```

$$Z3 := 7.0$$

```
> Z4:=0.0;
```

$$Z4 := 0.$$

```
> Rar:=287.0;
```

$$Rar := 287.0$$

```
> Te:=273+25;
```

$$Te := 298$$

```
> Ti:=273+30;
```

$$Ti := 303$$

Massas específicas externa e interna do ar:

```
> Me:=(Patm/(Rar*Te));
```

$$Me := 1.184435143$$

```
> Mi:=(Patm/(Rar*Ti));
```

$$Mi := 1.164890008$$

Pressões externas em cada abertura:

```
> Pe1:=Cp1*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z1);
```

$$Pe1 := .02664979072$$

```
> Pe2:=Cp2*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z2);
```

$$Pe2 := -81.37247096$$

```
> Pe3:=Cp3*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z3);
```

$$Pe3 := -81.37247096$$

```
> Pe4:=Cp4*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z4);
```

$$Pe4 := .02664979072$$

Pressões internas em cada abertura:

```
> P1:=P0-(Mi*g*Z1);
```

$$P1 := P0$$

```
> P2:=P0-(Mi*g*Z2);
```

$$P2 := P0 - 79.99299686$$

```
> P3:=P0-(Mi*g*Z3);
```

$$P3 := P0 - 79.99299686$$

```
> P4:=P0-(Mi*g*Z4);
```

$$P4 := P0$$

Diferenças de pressão:

```
> AP1:=Pe1-P1;
```

$$AP1 := .02664979072 - P0$$

```
> AP2:=Pe2-P2;
```

$$AP2 := -1.37947410 - P0$$

```
> AP3:=Pe3-P3;
```

$$AP3 := -1.37947410 - P0$$

```
> AP4:=Pe4-P4;
```

$$AP4 := .02664979072 - P0$$

Fatores de área:

```
> f1:=1.0;
```

$$f1 := 1.0$$

```
> f2:=1/2.0;
```

$$f2 := .5000000000$$

```
> f3:=1/2.0;
```

$$f3 := .5000000000$$

```
> f4:=1.0;
```

$$f4 := 1.0$$

Cálculo do valor da pressão de referência:

```
> eq:=((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)-(K2*f2*(2*Mi*(-AP2))^0.5)-
  (K3*f3*(2*Mi*(-AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5)=0);
```

$$eq := 1.697056274\ (.03156494868 - 1.184435143\ P0)^{.5} - .6000000000\ (3.213871190 + 2.329780016\ P0)^{.5} = 0$$

```
> solve(eq,P0);
```

$$-.2508501560$$

```
> P0:=-.2508501560;
```

$$P0 := -.2508501560$$

Áreas de entrada e saída de ar:

```
> A1:=(2*Q*Me*f1)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
  AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A1 := 48.69540004$$

```
> A2:=(2*Q*Me*f2)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
  AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A2 := 24.34770002$$

```
> A3:=(2*Q*Me*f3)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
               AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A3 := 24.34770002$$

```
> A4:=(2*Q*Me*f4)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
               AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A4 := 48.69540004$$

```
> As:=A2+A3;
```

$$As := 48.69540004$$

Valor adotado para A de cada lanternim:

```
> A:=50.0;
```

$$A := 50.0$$

Área total de saída de ar, para uma cobertura que possui cinco lanternins:

```
> Aa:=5*A;
```

$$Aa := 250.0$$

Cálculo para o dimensionamento do lanternim:

```
> Larg:=50.0;
```

$$Larg := 50.0$$

```
> Comp:=20.0;
```

$$Comp := 20.0$$

```
> Ap:=Comp*Larg;
```

$$Ap := 1000.00$$

Cada lanternim possui duas aberturas. Logo, têm-se dez aberturas para passagem do ar. Cálculo da largura de cada passagem de ar, antes da instalação do aparelho:

```
> Lv:=(0.2*Ap/2)/Comp;
```

$$Lv := 5.000000000$$

```
> tpl:=0.98;
```

$$tpl := .98$$

```
> tpi:=0.05;
```

$$tpi := .05$$

Para lanternins sem venezianas, adota-se:

```
> Rmd:=1.0;
```

$$Rmd := 1.0$$

```
> Lm:=Lar*(tpl/(tpl+tpi));
```

$$Lm := .9514563107\ Lar$$

```
> Raa:=Lm/Lv;
```

$$Raa := .1902912621\ Lar$$

```
> IVN:=((Aa*Raa*Rda*Rmd*100/Ap)=4.0);
```

$$IVN := 4.757281552\ Lar\ Rda = 4.0$$

```
> solve(IVN,Lar);
```

$$.8408163268\ \frac{1}{Rda}$$

```
> Lar:=.8408163268/Rda;
```

$$Lar := .8408163268\ \frac{1}{Rda}$$

Pelo método interativo, atribui-se um valor tabelado para R_{da} e acha-se um valor para L_{ar}. O valor de L_{ar} escolhido será aquele que satisfaça as condições da tabela do R_{da}. Logo:

```
> Rda:=1;
```

$$Rda := 1$$

```
> Lar:=.8408163268/Rda;
```

$$Lar := .8408163268$$

Logo, a altura da abertura de cada lanternim deve ser de 80 cm.

A.2. Caso 2

Cálculo das áreas de entrada e saída do ar:

Dados de entrada:

```
> Q:=40.0;
```

$$Q := 40.0$$

```
> Cp1:=0.5;
```

$$Cp1 := .5$$

```
> Cp2:=-0.7;
```

$$Cp2 := -.7$$

```
> Cp3:=-0.7;
```

$$Cp3 := -.7$$

```
> Cp4:=0.5;
```

$$Cp4 := .5$$

```
> K1:=0.6;
```

$$K1 := .6$$

```
> K2:=0.6;
```

$$K2 := .6$$

```
> K3:=0.6;
```

$$K3 := .6$$

```
> K4:=0.6;
```

$$K4 := .6$$

```
> V:=.30;
```

$$V := .30$$

```
> Patm:=101300;
```

$$Patm := 101300$$

```
> g:=9.81;
```

$$g := 9.81$$

```
> Z1:=0.0;
```

$$Z1 := 0.$$

```
> Z2:=7.0;
```

$$Z2 := 7.0$$

```
> Z3:=7.0;
```

$$Z3 := 7.0$$

```
> Z4:=0.0;
```

$$Z4 := 0.$$

```
> Rar:=287.0;
```

$$Rar := 287.0$$

```
> Te:=273+25;
```

$$Te := 298$$

```
> Ti:=273+33;
```

$$Ti := 306$$

Massas específicas externa e interna do ar:

```
> Me:=(Patm/(Rar*Te));
```

$$Me := 1.184435143$$

```
> Mi:=(Patm/(Rar*Ti));
```

$$Mi := 1.153469518$$

Pressões externas em cada abertura:

```
> Pe1:=Cp1*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z1);
```

$$Pe1 := .02664979072$$

```
> Pe2:=Cp2*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z2);
```

$$Pe2 := -81.37247096$$

```
> Pe3:=Cp3*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z3);
```

$$Pe3 := -81.37247096$$

```
> Pe4:=Cp4*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z4);
```

$$Pe4 := .02664979072$$

Pressões internas em cada abertura:

```
> P1:=P0-(Mi*g*Z1);
```

$$P1 := P0$$

```
> P2:=P0-(Mi*g*Z2);
```

$$P2 := P0 - 79.20875179$$

```
> P3:=P0-(Mi*g*Z3);
```

$$P3 := P0 - 79.20875179$$

```
> P4:=P0-(Mi*g*Z4);
```

$$P4 := P0$$

Diferenças de pressão:

```
> AP1:=Pe1-P1;
```

$$AP1 := .02664979072 - P0$$

```
> AP2:=Pe2-P2;
```

$$AP2 := -2.16371917 - P0$$

```
> AP3:=Pe3-P3;
```

$$AP3 := -2.16371917 - P0$$

```
> AP4:=Pe4-P4;
```

$$AP4 := .02664979072 - P0$$

Fatores de área:

```
> f1:=1.0;
```

$$f1 := 1.0$$

```
> f2:=1/2.0;
```

$$f2 := .5000000000$$

```
> f3:=1/2.0;
```

$$f3 := .5000000000$$

```
> f4:=1.0;
```

$$f4 := 1.0$$

Cálculo do valor da pressão de referência:

```
> eq:=((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)-(K2*f2*(2*Mi*(-AP2))^0.5)-
  (K3*f3*(2*Mi*(-AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5)=0);
```

$$eq := 1.697056274\ (.03156494868 - 1.184435143\ P0)^{.5} - .6000000000\ (4.991568216 + 2.306939036\ P0)^{.5} = 0$$

```
> solve(eq,P0);
```

$$-.4022135146$$

```
> P0:=-.4022135146;
```

$$P0 := -.4022135146$$

Áreas de entrada e saída de ar:

```
> A1:=(2*Q*Me*f1)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
  AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A1 := 39.17057492$$

```
> A2:=(2*Q*Me*f2)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
  AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A2 := 19.58528746$$

```
> A3:=(2*Q*Me*f3)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
  AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A3 := 19.58528746$$

```
> A4:=(2*Q*Me*f4)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A4 := 39.17057492$$

```
> As:=A2+A3;
```

$$As := 39.17057492$$

Valor adotado para A de cada lanternim:

```
> A:=40.0;
```

$$A := 40.0$$

Área total de saída de ar, para uma cobertura que possui cinco lanternins:

```
> Aa:=5*A;
```

$$Aa := 200.0$$

Cálculo para o dimensionamento do lanternim:

```
> Larg:=50.0;
```

$$Larg := 50.0$$

```
> Comp:=20.0;
```

$$Comp := 20.0$$

```
> Ap:=Comp*Larg;
```

$$Ap := 1000.00$$

Cada lanternim possui duas aberturas. Logo, têm-se dez aberturas para passagem do ar. Cálculo da largura de cada passagem de ar, antes da instalação do aparelho:

```
> Lv:=(0.2*Ap/2)/Comp;
```

$$Lv := 5.000000000$$

```
> tpl:=0.98;
```

$$tpl := .98$$

```
> tpi:=0.05;
```

$$tpi := .05$$

Para lanternins sem venezianas, adota-se:

```
> Rmd:=1.0;
```

$$Rmd := 1.0$$

```
> Lm:=Lar*(tpl/(tpl+tpi));
```

$$Lm := .9514563107\ Lar$$

```
> Raa:=Lm/Lv;
```

$$Raa := .1902912621\ Lar$$

```
> IVN:=((Aa*Raa*Rda*Rmd*100/Ap)=4.0);
```

$$IVN := 3.805825242\ Lar\ Rda = 4.0$$

```
> solve(IVN,Lar);
```

$$1.051020408\ \frac{1}{Rda}$$

```
> Lar:=1.051020408/Rda;
```

$$Lar := 1.051020408\ \frac{1}{Rda}$$

Pelo método interativo, atribui-se um valor tabelado para R_{da} e acha-se um valor para L_{ar}. O valor de L_{ar} escolhido será aquele que satisfaça as condições da tabela do R_{da}. Logo:

```
> Rda:=1;
```

$$Rda := 1$$

```
> Lar:=1.051020408/Rda;
```

$$Lar := 1.051020408$$

Logo, a altura da abertura de cada lanternim deve ser de 100 cm.

A.3. Caso 3

Cálculo das áreas de entrada e saída do ar:

Dados de entrada:

```
> Q:=40.0;
```

$$Q := 40.0$$

```
> Cp1:=0.5;
```

$$Cp1 := .5$$

```
> Cp2:=-0.7;
```

$$Cp2 := -.7$$

```
> Cp3:=-0.7;
```

$$Cp3 := -.7$$

```
> Cp4:=0.5;
```

$$Cp4 := .5$$

```
> K1:=0.6;
```

$$K1 := .6$$

```
> K2:=0.6;
```

$$K2 := .6$$

```
> K3:=0.6;
```

$$K3 := .6$$

```
> K4:=0.6;
```

$$K4 := .6$$

```
> V:=1.0;
```

$$V := 1.0$$

```
> Patm:=101300;
```

$$Patm := 101300$$

```
> g:=9.81;
```

$$g := 9.81$$

```
> Z1:=0.0;
```

$$Z1 := 0.$$

```
> Z2:=7.0;
```

$$Z2 := 7.0$$

```
> Z3:=7.0;
```

$$Z3 := 7.0$$

```
> Z4:=0.0;
```

$$Z4 := 0.$$

```
> Rar:=287.0;
```

$$Rar := 287.0$$

```
> Te:=273+25;
```

$$Te := 298$$

```
> Ti:=273+33;
```

$$Ti := 306$$

Massas específicas externa e interna do ar:

```
> Me:=(Patm/(Rar*Te));
```

$$Me := 1.184435143$$

```
> Mi:=(Patm/(Rar*Ti));
```

$$Mi := 1.153469518$$

Pressões externas em cada abertura:

```
> Pe1:=Cp1*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z1);
```

$$Pe1 := .2961087858$$

```
> Pe2:=Cp2*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z2);
```

$$Pe2 := -81.74971355$$

```
> Pe3:=Cp3*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z3);
```

$$Pe3 := -81.74971355$$

```
> Pe4:=Cp4*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z4);
```

$$Pe4 := .2961087858$$

Pressões internas em cada abertura:

```
> P1:=P0-(Mi*g*Z1);
```

$$P1 := P0$$

```
> P2:=P0-(Mi*g*Z2);
```

$$P2 := P0 - 79.20875179$$

```
> P3:=P0-(Mi*g*Z3);
```

$$P3 := P0 - 79.20875179$$

```
> P4:=P0-(Mi*g*Z4);
```

$$P4 := P0$$

Diferenças de pressão:

```
> AP1:=Pe1-P1;
```

$$AP1 := .2961087858 - P0$$

```
> AP2:=Pe2-P2;
```

$$AP2 := -2.54096176 - P0$$

```
> AP3:=Pe3-P3;
```

$$AP3 := -2.54096176 - P0$$

```
> AP4:=Pe4-P4;
```

$$AP4 := .2961087858 - P0$$

Fatores de área:

```
> f1:=1.0;
```

$$f1 := 1.0$$

```
> f2:=1/2.0;
```

$$f2 := .5000000000$$

```
> f3:=1/2.0;
```

$$f3 := .5000000000$$

```
> f4:=1.0;
```

$$f4 := 1.0$$

Cálculo do valor da pressão de referência:

```
> eq:=((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)-(K2*f2*(2*Mi*(-AP2))^0.5)-
  (K3*f3*(2*Mi*(-AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5)=0);
```

$$eq := 1.697056274\ (.3507216521 - 1.184435143\ P0)^{.5} - .6000000000\ (5.861843874 + 2.306939036\ P0)^{.5} = 0$$

```
> solve(eq,P0);
```

$$-.2593754607$$

```
> P0:=-.2593754607;
```

$$P0 := -.2593754607$$

Áreas de entrada e saída de ar:

```
> A1:=(2*Q*Me*f1)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
  AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A1 := 34.41783250$$

```
> A2:=(2*Q*Me*f2)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                    AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
                  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A2 := 17.20891625$$

```
> A3:=(2*Q*Me*f3)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                    AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
                  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A3 := 17.20891625$$

```
> A4:=(2*Q*Me*f4)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                    AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
                  AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A4 := 34.41783250$$

```
> As:=A2+A3;
```

$$As := 34.41783250$$

Valor adotado para A de cada lanternim:

```
> A:=35.0;
```

$$A := 35.0$$

Área total de saída de ar, para uma cobertura que possui cinco lanternins:

```
> Aa:=5*A;
```

$$Aa := 175.0$$

Cálculo para o dimensionamento do lanternim:

```
> Larg:=50.0;
```

$$Larg := 50.0$$

```
> Comp:=20.0;
```

$$Comp := 20.0$$

```
> Ap:=Comp*Larg;
```

$$Ap := 1000.00$$

Cada lanternim possui duas aberturas. Logo, têm-se dez aberturas para passagem do ar. Cálculo da largura de cada passagem de ar, antes da instalação do aparelho:

```
> Lv:=(0.2*Ap/2)/Comp;
```

$$Lv := 5.000000000$$

```
> tpl:=0.98;
```

$$tpl := .98$$

```
> tpi:=0.05;
```

$$tpi := .05$$

Para lanternins sem venezianas, adota-se:

```
> Rmd:=1.0;
```

$$Rmd := 1.0$$

```
> Lm:=Lar*(tpl/(tpl+tpi));
```

$$Lm := .9514563107\ Lar$$

```
> Raa:=Lm/Lv;
```

$$Raa := .1902912621\ Lar$$

```
> IVN:=((Aa*Raa*Rda*Rmd*100/Ap)=4.0);
```

$$IVN := 3.330097087\ Lar\ Rda = 4.0$$

```
> solve(IVN,Lar);
```

$$1.201166181\ \frac{1}{Rda}$$

```
> Lar:=1.201166181/Rda;
```

$$Lar := 1.201166181 \frac{1}{Rda}$$

Pelo método interativo, atribui-se um valor tabelado para R_{da} e acha-se um valor para L_{ar}. O valor de Lar escolhido será aquele que satisfaça as condições da tabela do R_{da}. Logo:

```
> Rda:=1;
```

$$Rda := 1$$

```
> Lar:=1.201166181/Rda;
```

$$Lar := 1.201166181$$

Logo, a abertura de cada lanternim deve ser de 120 cm.

A.4. Caso 4

Cálculo das áreas de entrada e saída do ar:

Dados de entrada:

```
> Q:=40.0;
```

$$Q := 40.0$$

```
> Cp1:=0.5;
```

$$Cp1 := .5$$

```
> Cp2:=-0.7;
```

$$Cp2 := -.7$$

```
> Cp3:=-0.7;
```

$$Cp3 := -.7$$

```
> Cp4:=0.5;
```

$$Cp4 := .5$$

```
> K1:=0.6;
```

$$K1 := .6$$

```
> K2:=0.6;
```

$$K2 := .6$$

```
> K3:=0.6;
```

$$K3 := .6$$

```
> K4:=0.6;
```

$$K4 := .6$$

```
> V:=1.0;
```

$$V := 1.0$$

```
> Patm:=101300;
```

$$Patm := 101300$$

```
> g:=9.81;
```

$$g := 9.81$$

```
> Z1:=0.0;
```

$$Z1 := 0.$$

```
> Z2:=7.0;
```

$$Z2 := 7.0$$

```
> Z3:=7.0;
```

$$Z3 := 7.0$$

```
> Z4:=0.0;
```

$$Z4 := 0.$$

```
> Rar:=287.0;
```

$$Rar := 287.0$$

```
> Te:=273+25;
```

$$Te := 298$$

```
> Ti:=273+33;
```

$$Ti := 306$$

Massas específicas externa e interna do ar:

```
> Me:=(Patm/(Rar*Te));
```

$$Me := 1.184435143$$

```
> Mi:=(Patm/(Rar*Ti));
```

$$Mi := 1.153469518$$

Pressões externas em cada abertura:

```
> Pe1:=Cp1*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z1);
```

$$Pe1 := .2961087858$$

```
> Pe2:=Cp2*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z2);
```

$$Pe2 := -81.74971355$$

```
> Pe3:=Cp3*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z3);
```

$$Pe3 := -81.74971355$$

```
> Pe4:=Cp4*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z4);
```

$$Pe4 := .2961087858$$

Pressões internas em cada abertura:

```
> P1:=P0-(Mi*g*Z1);
```

$$P1 := P0$$

```
> P2:=P0-(Mi*g*Z2);
```

$$P2 := P0 - 79.20875179$$

```
> P3:=P0-(Mi*g*Z3);
```

$$P3 := P0 - 79.20875179$$

```
> P4:=P0-(Mi*g*Z4);
```

$$P4 := P0$$

Diferenças de pressão:

```
> AP1:=Pe1-P1;
```

$$AP1 := .2961087858 - P0$$

```
> AP2:=Pe2-P2;
```

$$AP2 := -2.54096176 - P0$$

```
> AP3:=Pe3-P3;
```

$$AP3 := -2.54096176 - P0$$

```
> AP4:=Pe4-P4;
```

$$AP4 := .2961087858 - P0$$

Fatores de área:

```
> f1:=1.0;
```

$$f1 := 1.0$$

```
> f2:=1/2.0;
```

$$f2 := .5000000000$$

```
> f3:=1/2.0;
```

$$f3 := .5000000000$$

```
> f4:=1.0;
```

$$f4 := 1.0$$

Cálculo do valor da pressão de referência:

```
> eq:=((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)-(K2*f2*(2*Mi*(-AP2))^0.5)-
  (K3*f3*(2*Mi*(-AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5)=0);
```

$$eq := 1.697056274\,(.3507216521 - 1.184435143\,P0)^{.5} - .6000000000\,(5.861843874 + 2.306939036\,P0)^{.5} = 0$$

```
> solve(eq,P0);
```

$$-.2593754607$$

```
> P0:=-.2593754607;
```

$$P0 := -.2593754607$$

Áreas de entrada e saída de ar:

```
> A1:=(2*Q*Me*f1)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
              AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A1 := 34.41783250$$

```
> A2:=(2*Q*Me*f2)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
              AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A2 := 17.20891625$$

```
> A3:=(2*Q*Me*f3)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
              AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A3 := 17.20891625$$

```
> A4:=(2*Q*Me*f4)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
                AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
              AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

$$A4 := 34.41783250$$

```
> As:=A2+A3;
```

$$As := 34.41783250$$

Valor adotado para A de cada lanternim:

```
> A:=35.0;
```

$$A := 35.0$$

Área total de saída de ar, para uma cobertura que possui três lanternins:

```
> Aa:=3*A;
```

$$Aa := 105.0$$

Cálculo para o dimensionamento do lanternim:

```
> Larg:=30.0;
```

$$Larg := 30.0$$

```
> Comp:=30.0;
```

$$Comp := 30.0$$

```
> Ap:=Comp*Larg;
```

$$Ap := 900.00$$

Cada lanternim possui duas aberturas. Logo, têm-se seis aberturas para passagem do ar. Cálculo da largura de cada passagem de ar, antes da instalação do aparelho:

```
> Lv:=(0.2*Ap/2)/Comp;
```

$$Lv := 3.000000000$$

```
> tpl:=0.98;
```

$$tpl := .98$$

```
> tpi:=0.05;
```

$$tpi := .05$$

Para lanternins sem venezianas, adota-se:

```
> Rmd:=1.0;
```

$$Rmd := 1.0$$

```
> Lm:=Lar*(tpl/(tpl+tpi));
```

$$Lm := .9514563107\ Lar$$

```
> Raa:=Lm/Lv;
```

$$Raa := .3171521036\ Lar$$

```
> IVN:=((Aa*Raa*Rda*Rmd*100/Ap)=4.0);
```

$$IVN := 3.700107876\ Lar\ Rda = 4.0$$

```
> solve(IVN,Lar);
```

$$1.081049562\ \frac{1}{Rda}$$

```
> Lar:=1.081049562/Rda;
```

$$Lar := 1.081049562\ \frac{1}{Rda}$$

Pelo método interativo, atribui-se um valor tabelado para R_{da} e acha-se um valor para L_{ar}. O valor de L_{ar} escolhido será aquele que satisfaça as condições da tabela do R_{da}. Logo:

```
> Rda:=1;
```

$$Rda := 1$$

```
> Lar:=1.081049562/Rda;
```

$$Lar := 1.081049562$$

Logo, a altura da abertura de cada lanternim deve ser de 100 cm.

A.5. Caso 5

Cálculo das áreas de entrada e saída do ar:

Dados de entrada:

```
> Q:=40.0;
```

$$Q := 40.0$$

```
> Cp1:=0.5;
```

$$Cp1 := .5$$

```
> Cp2:=-0.7;
```

$$Cp2 := -.7$$

```
> Cp3:=-0.7;
```

$$Cp3 := -.7$$

```
> Cp4:=0.5;
```

$$Cp4 := .5$$

```
> K1:=0.6;
```

$$K1 := .6$$

```
> K2:=0.6;
```

$$K2 := .6$$

```
> K3:=0.6;
```

$$K3 := .6$$

```
> K4:=0.6;
```

$$K4 := .6$$

```
> V:=1.0;
```

$$V := 1.0$$

```
> Patm:=101300;
```

$$Patm := 101300$$

```
> g:=9.81;
```

$$g := 9.81$$

```
> Z1:=0.0;
```

$$Z1 := 0.$$

```
> Z2:=7.0;
```

$$Z2 := 7.0$$

```
> Z3:=7.0;
```

$$Z3 := 7.0$$

```
> Z4:=0.0;
```

$$Z4 := 0.$$

```
> Rar:=287.0;
```

$$Rar := 287.0$$

```
> Te:=273+25;
```

$$Te := 298$$

```
> Ti:=273+30;
```

$$Ti := 303$$

Massas específicas externa e interna do ar:

```
> Me:=(Patm/(Rar*Te));
```

$$Me := 1.184435143$$

```
> Mi:=(Patm/(Rar*Ti));
```

$$Mi := 1.164890008$$

Pressões externas em cada abertura:

```
> Pe1:=Cp1*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z1);
```

$$Pe1 := .2961087858$$

```
> Pe2:=Cp2*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z2);
```

$$Pe2 := -81.74971355$$

```
> Pe3:=Cp3*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z3);
```

$$Pe3 := -81.74971355$$

```
> Pe4:=Cp4*0.5*Me*(V^2)-(Me*g*Z4);
```

$$Pe4 := .2961087858$$

Pressões internas em cada abertura:

```
> P1:=P0-(Mi*g*Z1);
```

$$P1 := P0$$

```
> P2:=P0-(Mi*g*Z2);
```

$$P2 := P0 - 79.99299686$$

```
> P3:=P0-(Mi*g*Z3);
```

$$P3 := P0 - 79.99299686$$

```
> P4:=P0-(Mi*g*Z4);
```

$$P4 := P0$$

Diferenças de pressão:

```
> AP1:=Pe1-P1;
```

$$AP1 := .2961087858 - P0$$

```
> AP2:=Pe2-P2;
```

$$AP2 := -1.75671669 - P0$$

```
> AP3:=Pe3-P3;
```

$$AP3 := -1.75671669 - P0$$

```
> AP4:=Pe4-P4;
```

$$AP4 := .2961087858 - P0$$

Fatores de área:

```
> f1:=1.0;
```

$$f1 := 1.0$$

```
> f2:=1/2.0;
```

$$f2 := .5000000000$$

```
> f3:=1/2.0;
```

$$f3 := .5000000000$$

```
> f4:=1.0;
```

$$f4 := 1.0$$

Cálculo do valor da pressão de referência:

```
> eq:=((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)-(K2*f2*(2*Mi*(-AP2))^0.5)-
  (K3*f3*(2*Mi*(-AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5)=0);
```

$$eq := 1.697056274\,(.3507216521 - 1.184435143\,P0)^{.5} - .6000000000\,(4.092763438 + 2.329780016\,P0)^{.5} = 0$$

```
> solve(eq,P0);
```

-.1090183612

```
> P0:=-.1090183612;
```

P0 := -.1090183612

Áreas de entrada e saída de ar:

```
> A1:=(2*Q*Me*f1)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

A1 := 40.30173260

```
> A2:=(2*Q*Me*f2)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

A2 := 20.15086630

```
> A3:=(2*Q*Me*f3)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

A3 := 20.15086630

```
> A4:=(2*Q*Me*f4)/((K1*f1*(2*Me*AP1)^0.5)+(K2*f2*(2*Mi*(-
AP2))^0.5)+(K3*f3*(2*Mi*(-
AP3))^0.5)+(K4*f4*(2*Me*AP4)^0.5));
```

A4 := 40.30173260

```
> As:=A2+A3;
```

As := 40.30173260

Valor adotado para A de cada lanternim:

```
> A:=41.0;
```

$$A := 41.0$$

Área total de saída de ar, para uma cobertura que possui três lanternins:

```
> Aa:=3*A;
```

$$Aa := 123.0$$

Cálculo para o dimensionamento do lanternim:

```
> Larg:=30.0;
```

$$Larg := 30.0$$

```
> Comp:=45.0;
```

$$Comp := 45.0$$

```
> Ap:=Comp*Larg;
```

$$Ap := 1350.00$$

Cada lanternim possui duas aberturas. Logo, têm-se seis aberturas para passagem do ar.

Cálculo da largura de cada passagem de ar, antes da instalação do aparelho:

```
> Lv:=(0.2*Ap/2)/Comp;
```

$$Lv := 3.000000000$$

```
> tpl:=0.98;
```

$$tpl := .98$$

```
> tpi:=0.05;
```

$$tpi := .05$$

Para lanternins sem venezianas, adota-se:

```
> Rmd:=1.0;
```

$$Rmd := 1.0$$

```
> Lm:=Lar*(tpl/(tpl+tpi));
```

$$Lm := .9514563107\ Lar$$

```
> Raa:=Lm/Lv;
```

$$Raa := .3171521036\ Lar$$

```
> IVN:=((Aa*Raa*Rda*Rmd*100/Ap)=4.0);
```

$$IVN := 2.889608055\ Lar\ Rda = 4.0$$

```
> solve(IVN,Lar);
```

$$1.384270781\ \frac{1}{Rda}$$

```
> Lar:=1.384270781/Rda;
```

$$Lar := 1.384270781\ \frac{1}{Rda}$$

Pelo método interativo, atribui-se um valor tabelado para R_{da} e acha-se um valor para L_{ar}. O valor de L_{ar} escolhido será aquele que satisfaça as condições da tabela do R_{da}. Logo:

```
> Rda:=1;
```

$$Rda := 1$$

```
> Lar:=1.384270781/Rda;
```

$$Lar := 1.384270781$$

Logo, a altura da abertura de cada lanternim deve ser de 140 cm.

ANEXO II

B. Definições utilizadas para a definição do conforto térmico

B.1. Variáveis pessoais ou individuais

B.1.1. A atividade desempenhada pela pessoa (taxa metabólica)

A taxa metabólica é a taxa de produção de energia do corpo, Figura B.1. O metabolismo, que varia de acordo com a atividade desempenhada é expresso em unidade "met". A taxa de 1 met, que corresponde a 58,2 W/m², é igual à energia produzida por unidade de área superficial do corpo para uma pessoa sentada em repouso, Tabela B.1. A área superficial aproximada de uma pessoa média é de 1,8 m².

B.1.2. A vestimenta (isolamento térmico da roupa)

A roupa utilizada pela pessoa é responsável pela resistência oferecida às trocas de calor sensível entre o corpo e o ambiente, através de seu isolamento térmico. É descrito como o isolamento intrínseco da pele para a superfície externa das roupas, não incluindo a resistência fornecida pela camada de ar ao redor do corpo. A representação convencional dessa variável é I_{cl}, expresso em m^2.K/W ou em CLO, sendo que 1 CLO equivale a 0,155 m^2.K/W. Os valores do isolamento térmico das roupas, ou das peças que compõem o traje utilizado pela pessoa, é função do material de confecção dos mesmos, bem como da espessura dos tecidos e materiais das roupas. A determinação desses valores foi feita utilizando-se manequins aquecidos, (FANGER, 1972), sendo que os resultados dessas determinações encontram-se devidamente tabelados nas normas ISO 7730: 1994, ISO 9920: 1995 e ASHRAE 55: 2004. Na Tabela B.2 apresentam-se os valores do índice de resistência térmica para vestimentas segundo ISO 7730: 1994.

B.2. Variáveis físicas ou ambientais

B.2.1. Temperatura do ar

A temperatura do ar ao redor do corpo humano é uma variável que é levada em consideração nos estudos de conforto térmico para determinar-se a troca de calor por convecção entre as pessoas e o ambiente ao redor. Essa variável pode ser medida através de sensores de expansão de líquidos ou sólidos, termômetros elétricos, de resistência variável ou termopares.

B.2.2. Temperatura radiante média

É a temperatura uniforme de um ambiente imaginário, no qual a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no ambiente real não uniforme. A temperatura radiante média pode ser medida utilizando-se um termômetro de globo negro, um radiômetro de duas esferas, um sensor esférico ou elipsoidal à temperatura do ar constante, através das temperaturas superficiais das superfícies ao redor do corpo humano, ou ainda através das temperaturas radiantes planas determinadas nas seis direções ao redor do indivíduo. O termômetro de globo negro é o dispositivo mais usual na determinação dessa variável, sendo que, nesse caso a temperatura média radiante é obtida por observações dos valores simultâneos da temperatura de globo, T_g, e da temperatura e velocidade do ar ao redor do globo.

B.2.3. Velocidade do ar

Em ambientes térmicos, a velocidade do ar, é considerada a magnitude do vetor velocidade do fluxo de ar no ponto de medição, e deve ser levada em consideração nos estudos de conforto térmico devido à sua participação na transferência de calor por convecção e por evaporação na posição da pessoa. Os tipos de equipamentos mais comuns para a medição da velocidade do ar, são os anemômetros de fio quente, direcionais, e os anemômetros de esfera aquecida.

B.2.4. Umidade absoluta do ar

A umidade absoluta é a quantidade de água contida em um volume de ar úmido e pode ser expressa pela pressão parcial do vapor de água do ar úmido. É a pressão que o vapor de água poderia exercer se ocupasse sozinho todo o volume ocupado pelo ar úmido, à mesma temperatura. Sua determinação usual é através da utilização de um psicrômetro, equipamento que mede simultaneamente a temperatura de bulbo seco, ou do ar e a temperatura de bulbo úmido aspirado. Com essas duas leituras, o valor da umidade do ar é obtido pela utilização de cartas psicrométricas adequadas para cada região. A umidade no ar afeta as trocas térmicas associadas ao processo de evaporação do suor na pele e ao processo de respiração.

Tabela B.1 – Taxa metabólica para diferentes atividades

Atividade	Metabolismo (W/m^2)
Reclinado	46
Sentado, relaxado	58
Atividade sedentária (escritório, escola etc.)	70
Fazer compras, atividades laboratoriais	93
Trabalhos domésticos	116
Caminhando em local plano a 2 km/h	110
Caminhando em local plano a 3 km/h	140
Caminhando em local plano a 4 km/h	165
Caminhando em local plano a 5 km/h	200

Fonte: ISO 7730: 1994

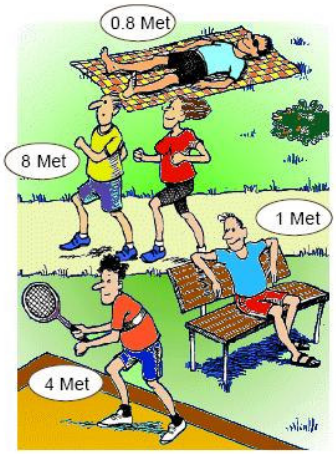

Figura B.1 – Atividades metabólicas e suas taxas expressas em met

Tabela B.2 – Índice de resistência térmica para vestimentas

Vestimenta	Índice de resistência térmica – I_{cl} (clo)
Meia calça	0,10
Meia fina	0,03
Meia grossa	0,05
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Cuecão longo	0,10
Camiseta de baixo	0,09
Camisa de baixo mangas compridas	0,12
Camisa manga curta	0,15
Camisa fina mangas comprida	0,20
Camisa manga comprida	0,25
Camisa flanela manga comprida	0,30
Blusa com mangas compridas	0,15
Saia grossa	0,25
Vestido leve	0,15
Vestido grosso manga comprida	0,40
Jaqueta	0,35
Calça fina	0,20
Calça média	0,25
Calça flanela	0,28
Sapatos	0,04

Fonte: ISO 7730:1994

B.3. Parâmetros subjetivos ligados ao conforto térmico

Esses parâmetros são inerentes à natureza humana e as diferenças individuais entre as pessoas. São basicamente dois os de maior interesse nos estudos de conforto térmico: sensações e preferências térmicas, estando estreitamente ligados às diferenças entre os conceitos de conforto e neutralidade térmica.

B.3.1. As sensações térmicas (Como você está se sentindo nesse momento?)

As sensações térmicas são basicamente os resultados da condição da mente na percepção da sensação de conforto térmico. São normalmente obtidas de escalas sensoriais, descritivas ou de percepção, as quais espelham o estado psicológico das pessoas com relação ao ambiente térmico, no momento de seus relatos. Na Tabela B.3 apresentam-se as escalas de percepção comumente utilizadas.

A respeito destas duas escalas apresentadas, Nicol (1993), aponta a diferença do termo neutro pelo termo confortável de uma para a outra, o qual pode trazer alguma dúvida com relação à diferença entre neutralidade e conforto térmico. Afirma, porém que a maioria dos pesquisadores utiliza tanto uma como outra, sem maiores problemas. Ainda segundo o autor, é de concordância da maioria dos pesquisadores que não haja maior precisão nos resultados, se forem adicionados mais pontos às escalas, e que sete pontos fornece resultados satisfatórios.

O maior problema com relação ao uso de ambas, segundo o autor, é que se corre o risco de se colidir com fatores culturais pelo uso das palavras. Argumenta ele que uma pessoa que more em um local de clima frio, possa entender o termo levemente quente com uma conotação positiva, e fornecer essa resposta em casos quando se encontrar em conforto. A mesma observação é feita para o termo levemente frio para as pessoas que morem em locais de clima quente. Para se evitar esse risco, o autor sugere a utilização de uma escala semântica diferencial, com sete espaços internos em branco. A escala proposta por Nicol (1993) é mostrada na Figura B.2.

Tabela B.3 - Escalas de percepção existentes

ISO 10551 (1995)		Bedford (1936; *apud* Nicol, 1993)
MUITO QUENTE	+3	MUITO QUENTE
QUENTE	+2	QUENTE
LEVEMENTE QUENTE	+1	CONFORTAVELMENTE QUENTE
NEUTRO	0	CONFORTÁVEL
LEVEMENTE FRIO	-1	CONFORTAVELMENTE FRIO
FRIO	-2	FRIO
MUITO FRIO	-3	MUITO FRIO

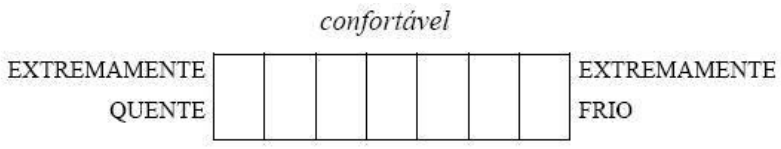

Figura B.2 – Escala diferencial de percepção térmica

Fonte: NICOL, 1993

B.3.2. As preferências térmicas (Como você gostaria de estar se sentindo agora?)

As preferências térmicas são basicamente o resultado da condição do corpo na percepção da sensação de conforto térmico. São normalmente obtidas de escalas de preferências as quais espelham o estado fisiológico das pessoas com relação ao ambiente térmico, no momento de seus relatos. McIntyre (1976; *apud* Nicol, 1993), foi o primeiro a utilizá-la, não como uma escala de preferências propriamente dita, mas simplesmente para evitar o risco dos aspectos de entendimento culturais, conforme dito anteriormente. Essa escala utilizada pelo autor era uma escala de três pontos apenas, Figura B.3. Na escala de preferências segundo a ISO 10551:1995, tem-se uma escala de preferência de sete pontos, Figura B.4.

Eu gostaria de me sentir:

1:Mais aquecido *2:Assim mesmo* *3:Mais refrescado*

Figura B.3 – Escala de preferência térmica
Fonte: MCINTYRE, 1976; *apud* NICOL, 1993

Bem mais quente	-3
Mais quente	-2
Um pouquinho mais quente	-1
Assim mesmo, nem mais quente ou frio	0
Um pouquinho mais frio	+1
Mais frio	+2
Bem mais frio	+3

Figura B.4 – Escala de preferência térmica
Fonte: ISO 10551:1995

ANEXO III

C. Resultados numéricos

Apresentam-se os resultados obtidos, via simulação numérica considerando as configurações de galpão A, B e C, para várias velocidades do ar de entrada.

C.1. Configuração A

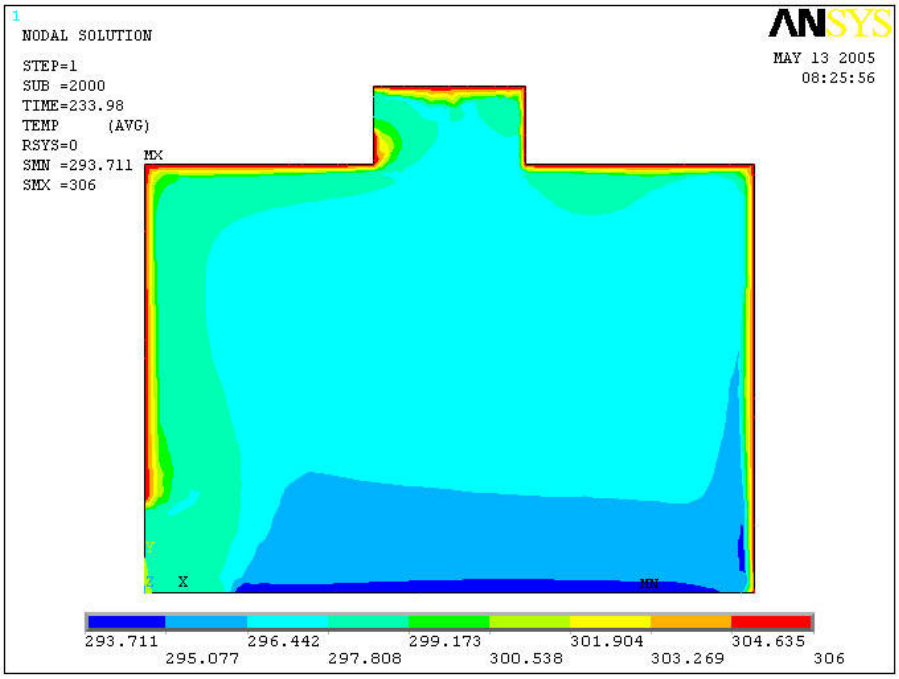

Figura C.1 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s

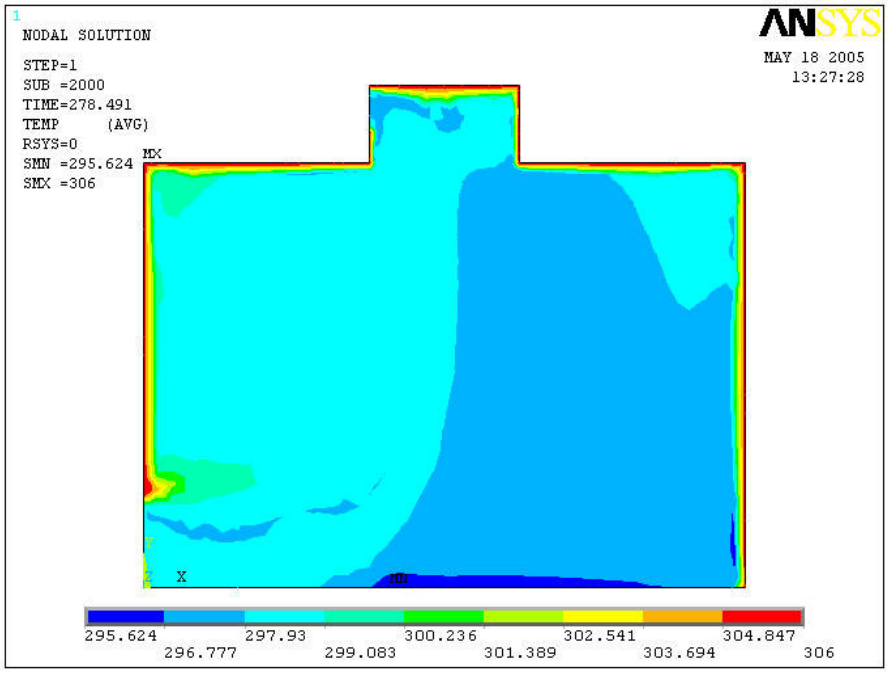

Figura C.2 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s

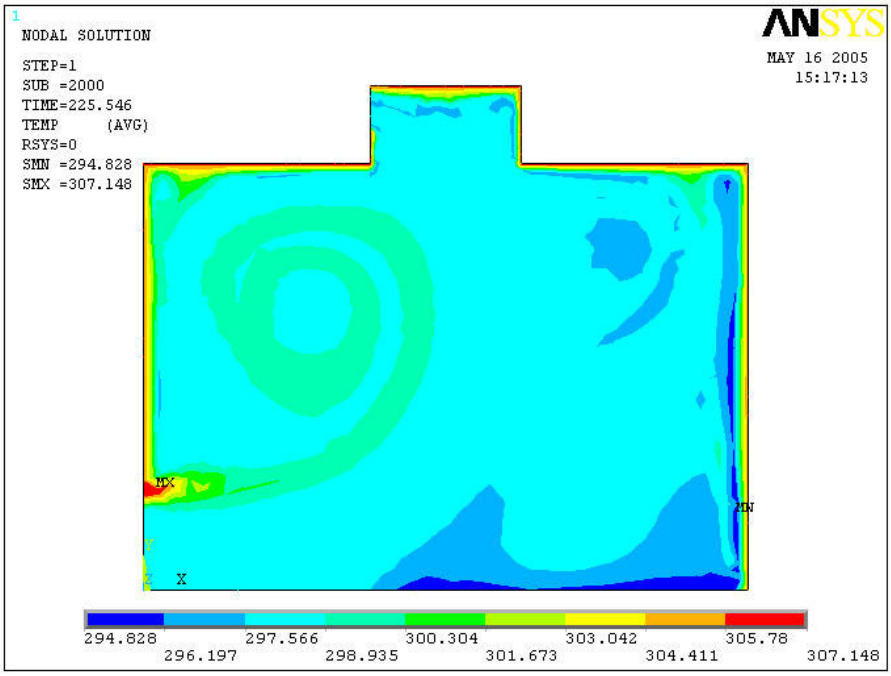

Figura C.3 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

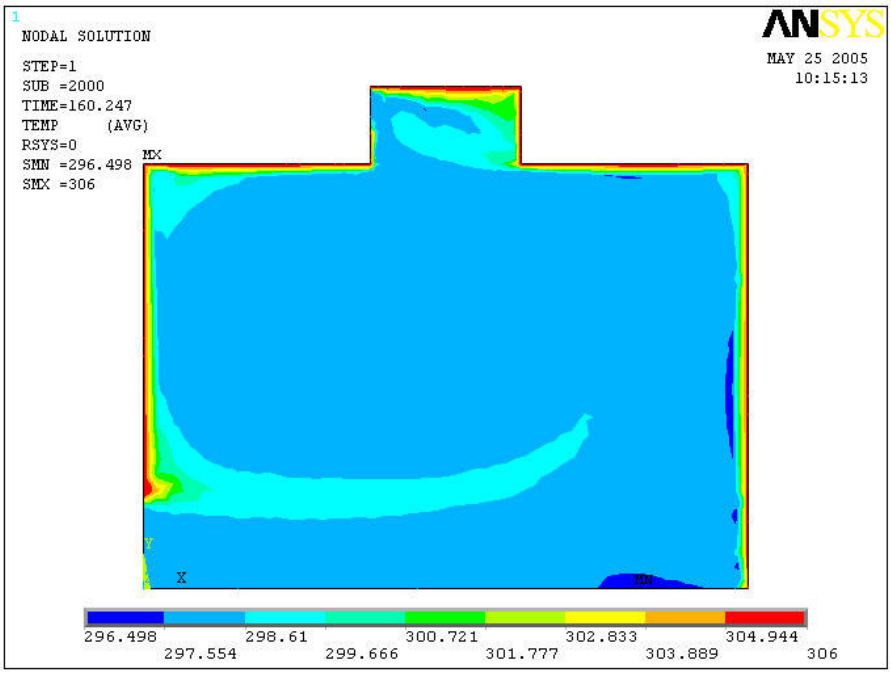

Figura C.4 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s

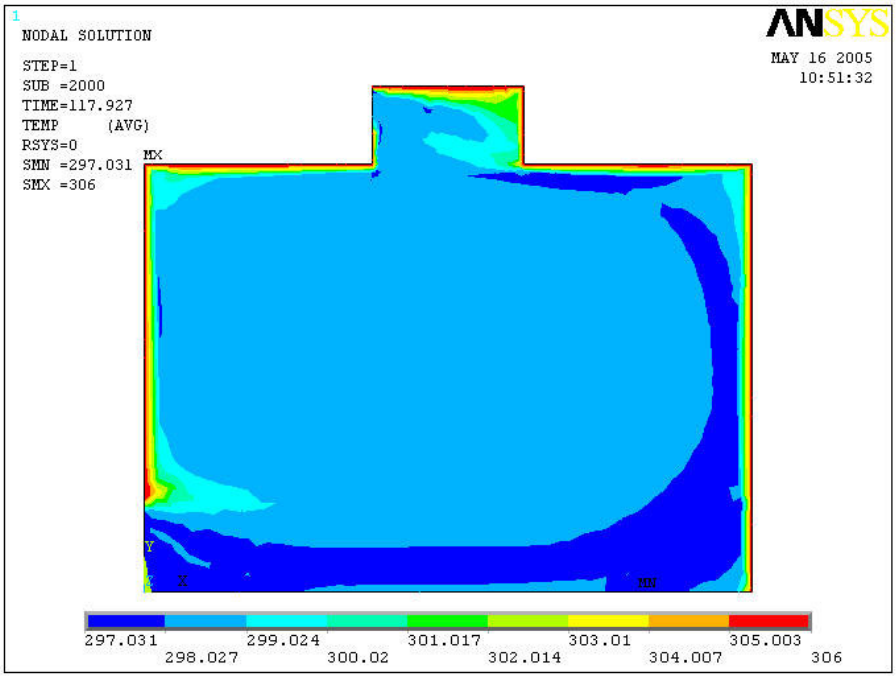

Figura C.5 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s

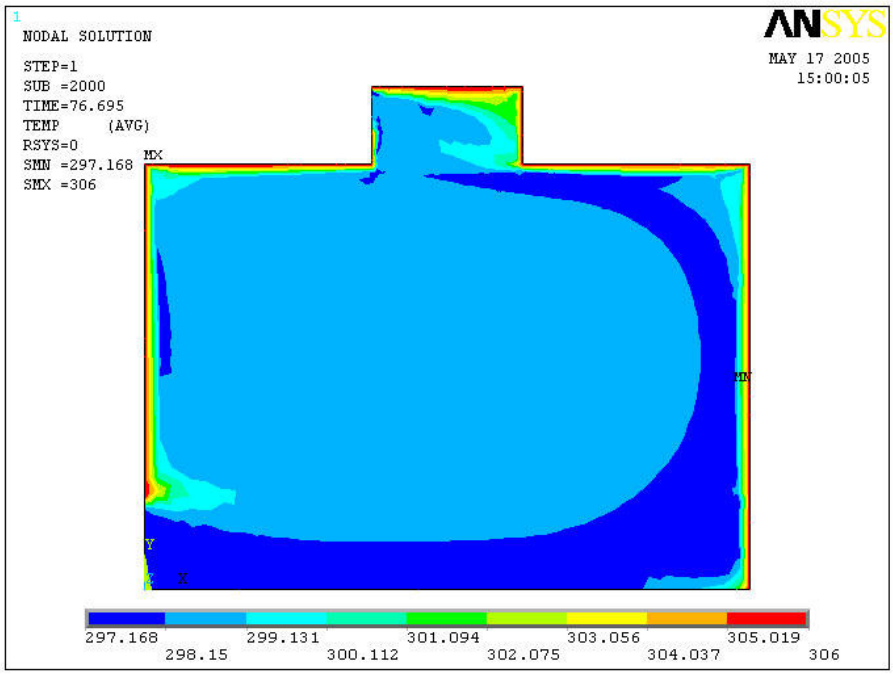

Figura C.6 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma abertura de entrada e uma abertura de saída, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s

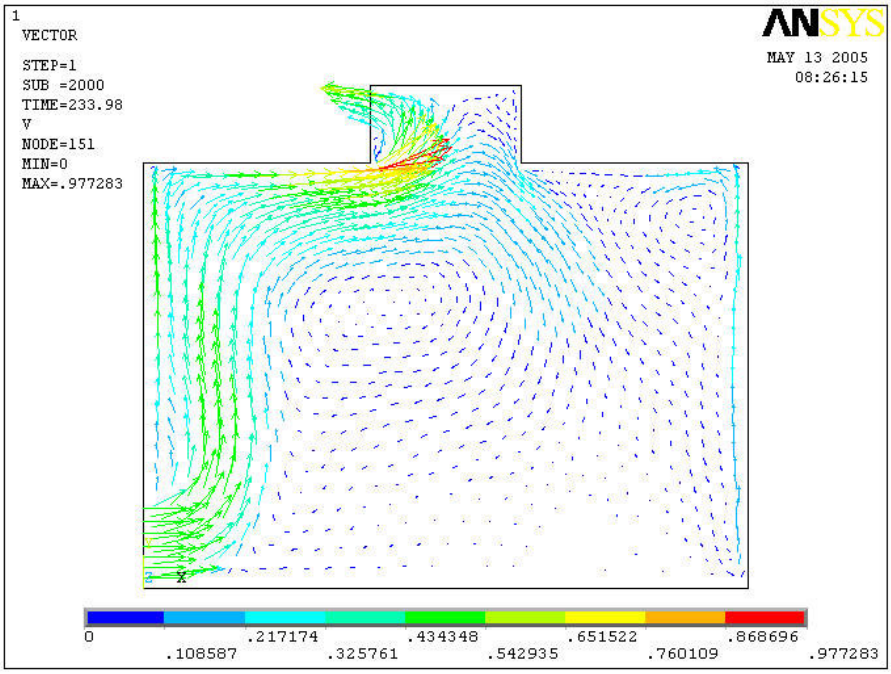

Figura C.7 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s

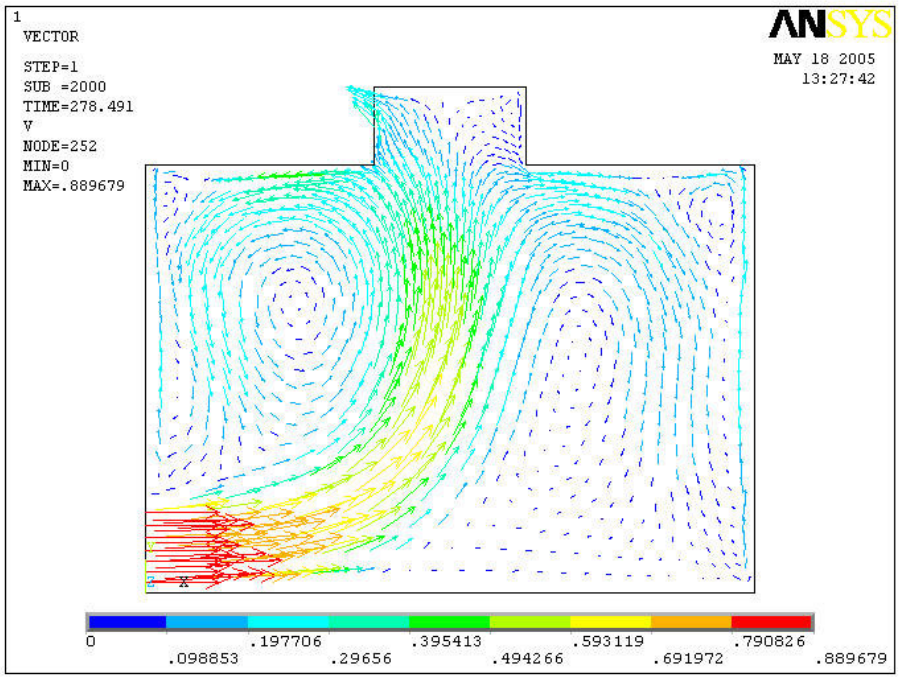

Figura C.8 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s

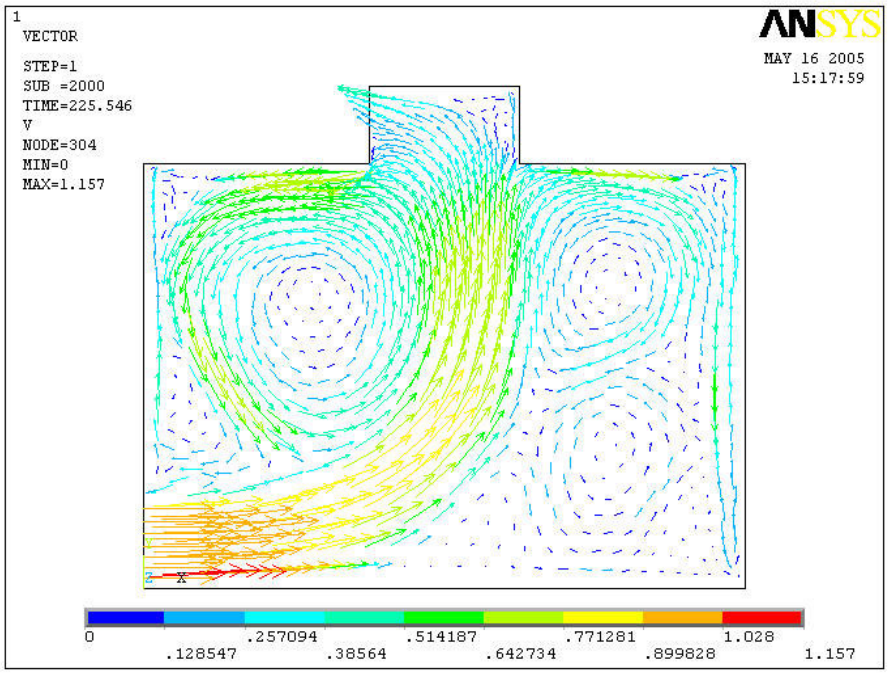

Figura C.9 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

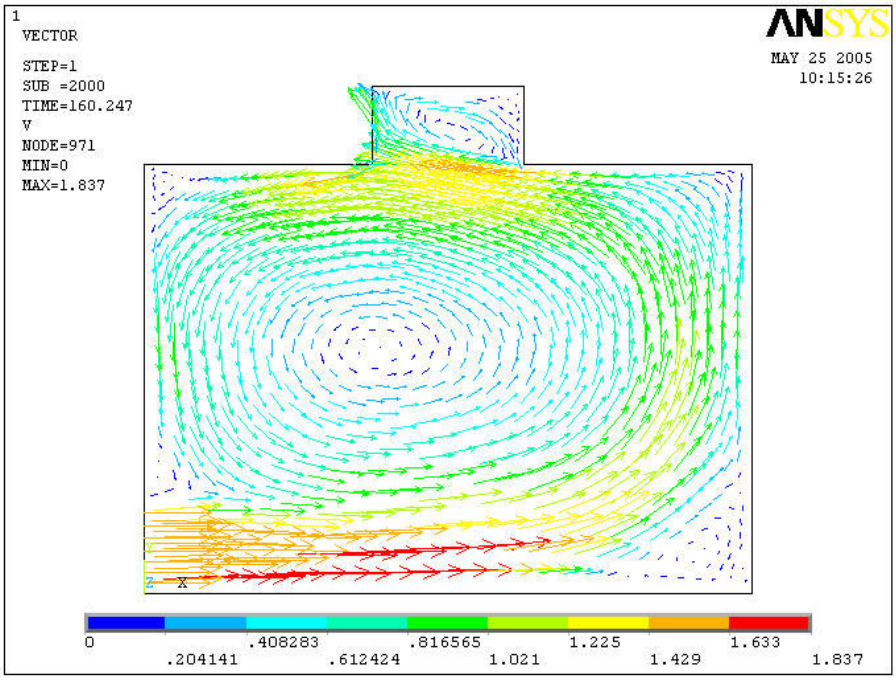

Figura C.10 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s

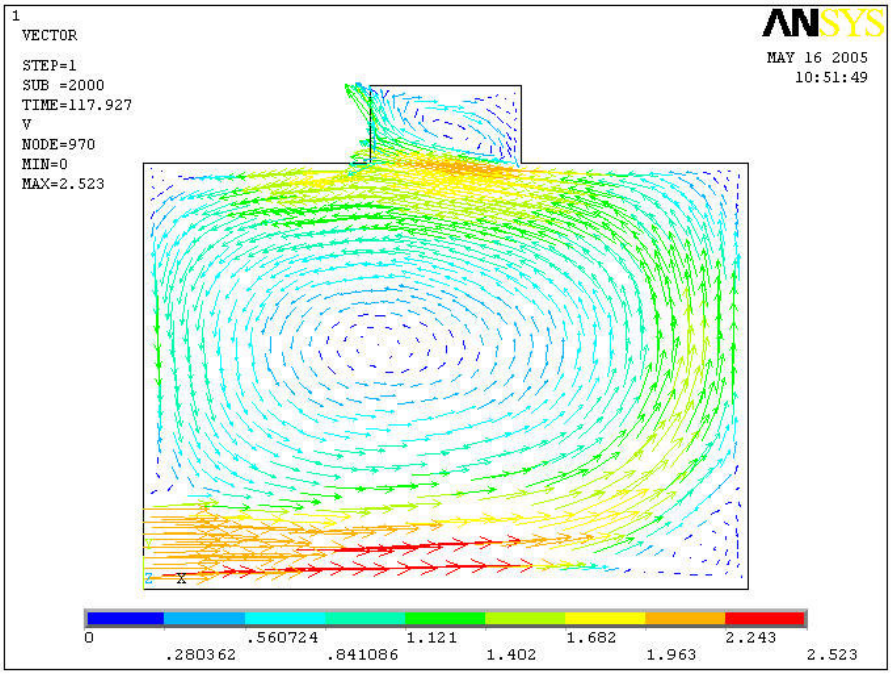

Figura C.11 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s

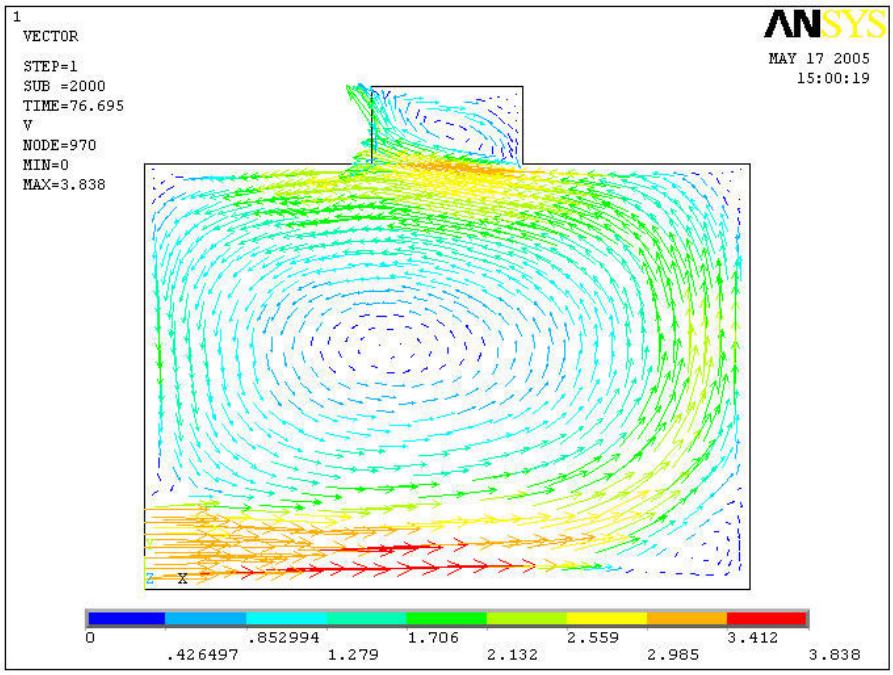

Figura C.12 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e uma saída, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s

C.2. Configuração B

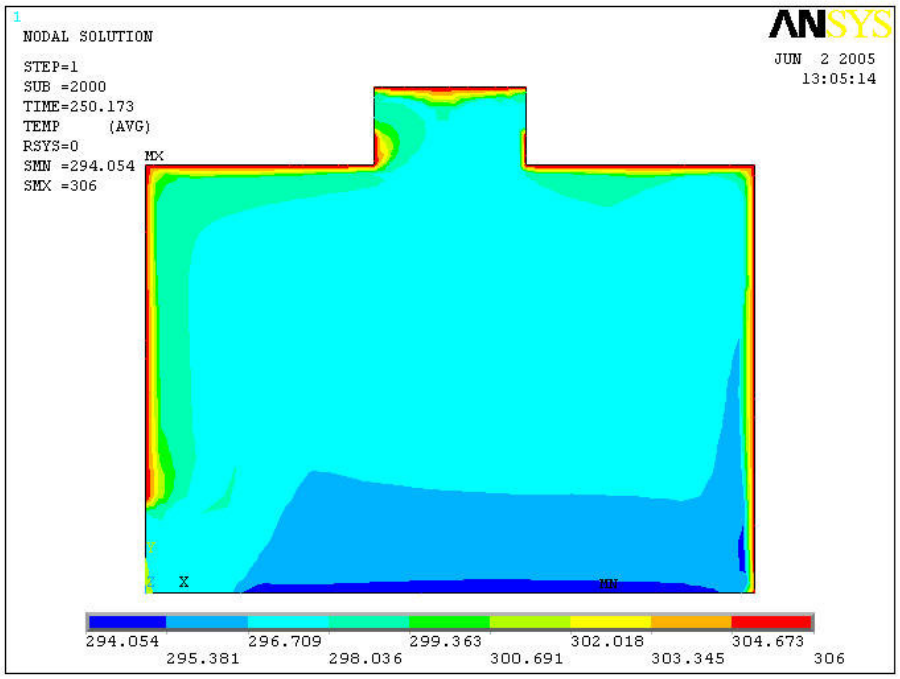

Figura C.13 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s

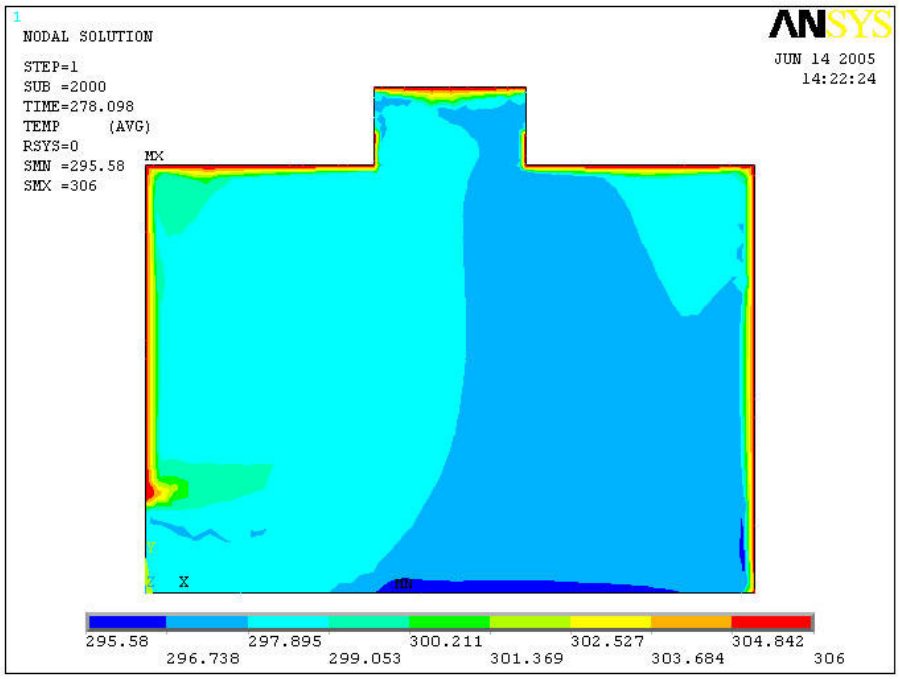

Figura C.14 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s

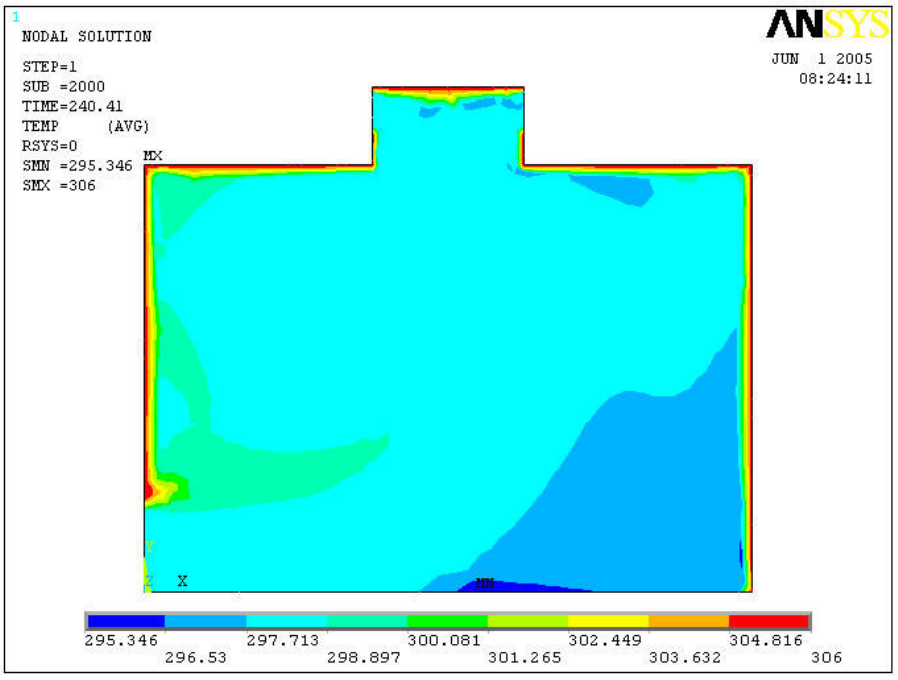

Figura C.15 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

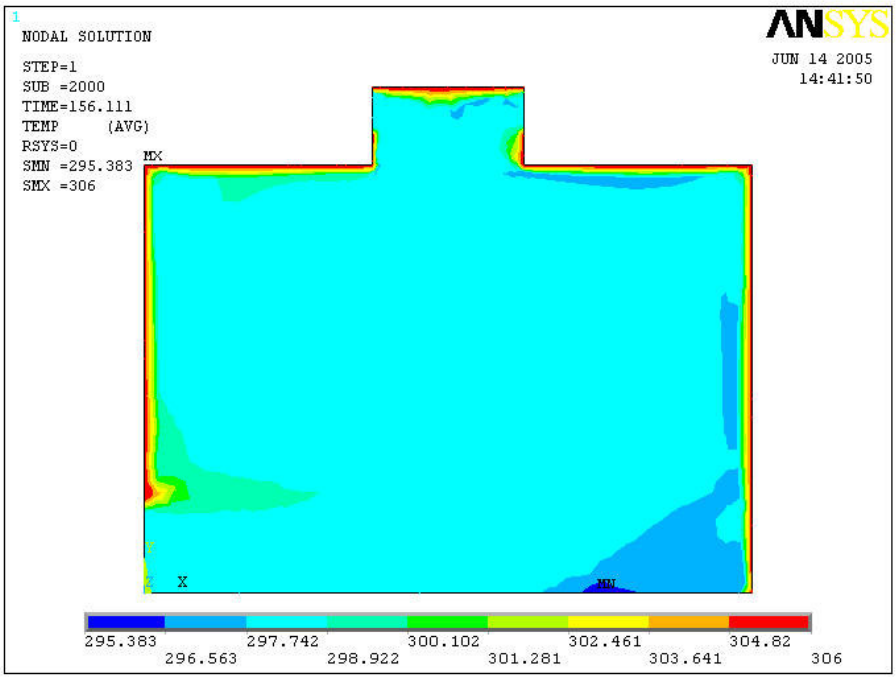

Figura C.16 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s

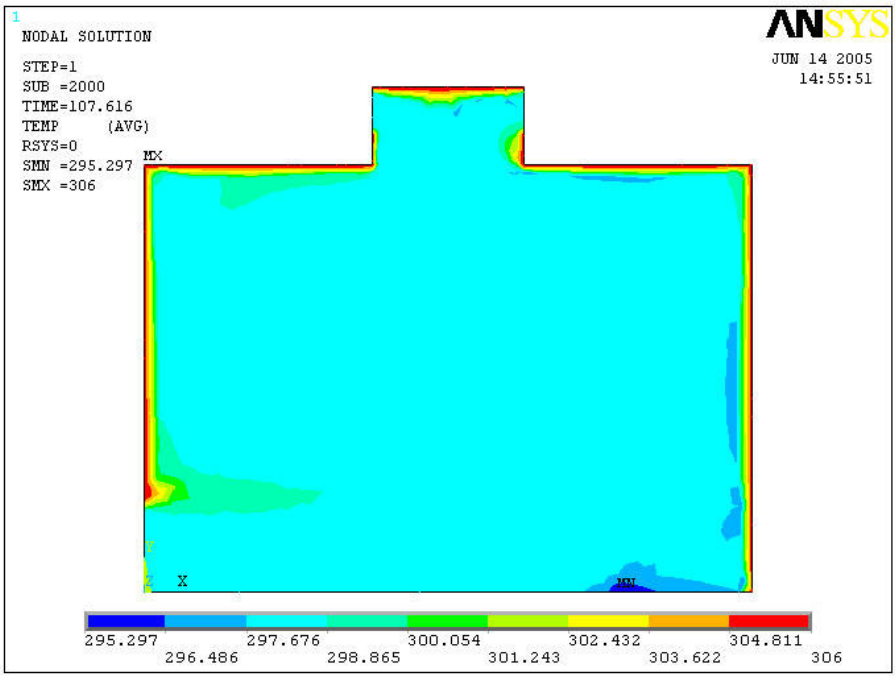

Figura C.17 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s

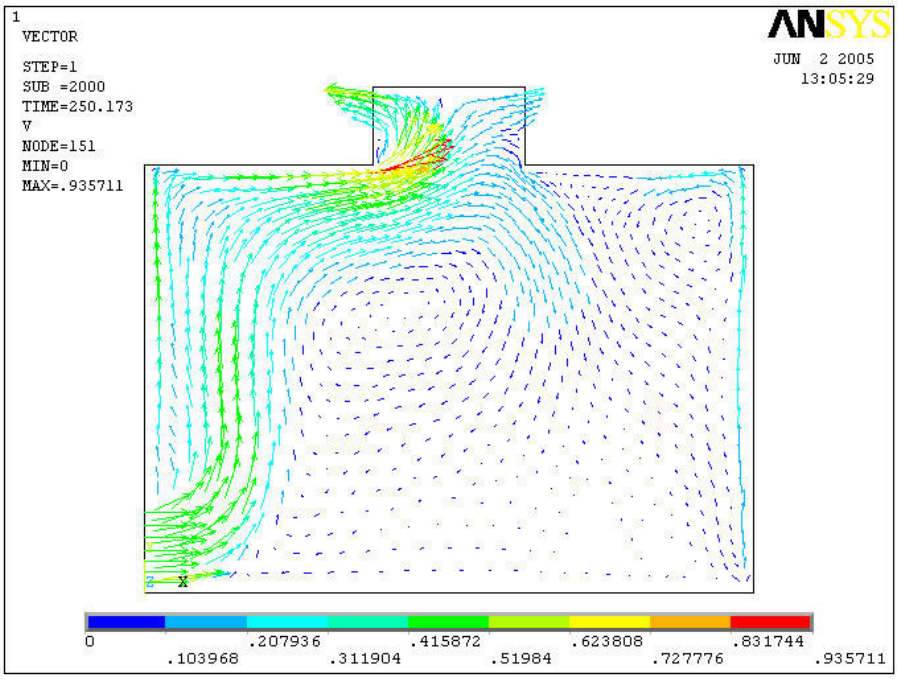

Figura C.18 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,5 m/s

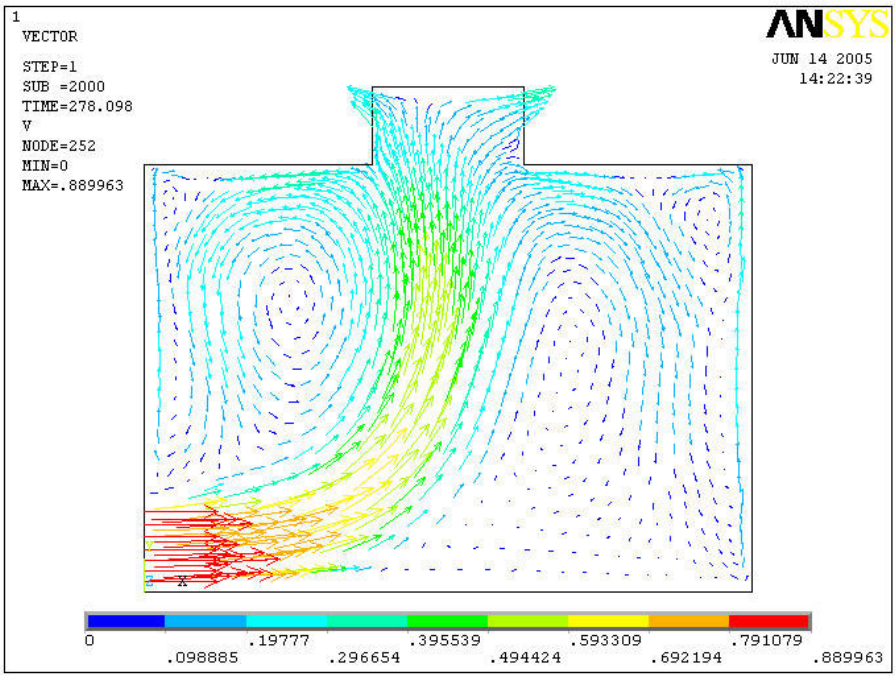

Figura C.19 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s

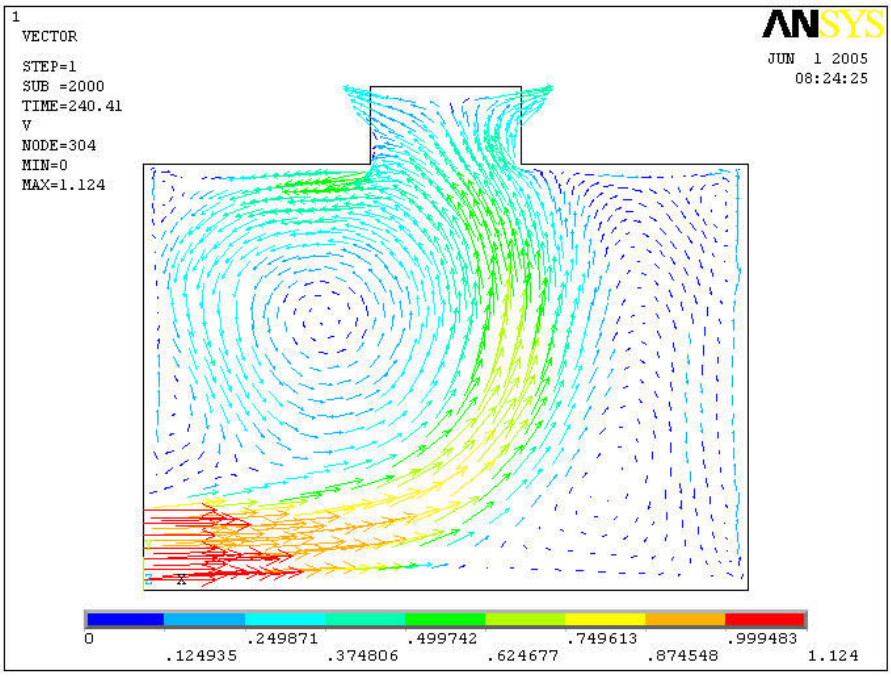

Figura C.20 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

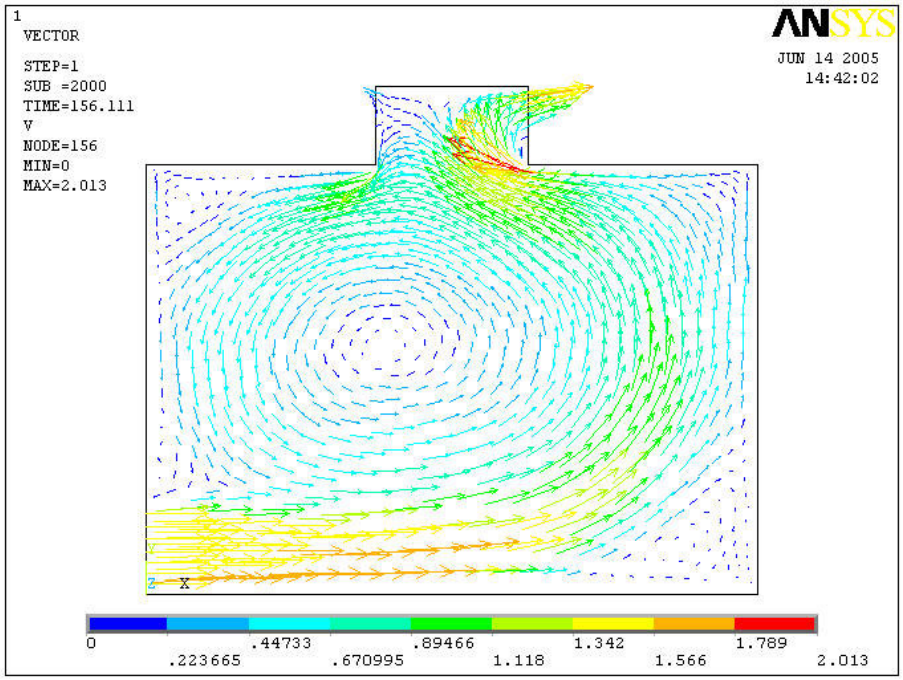

Figura C.21 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s

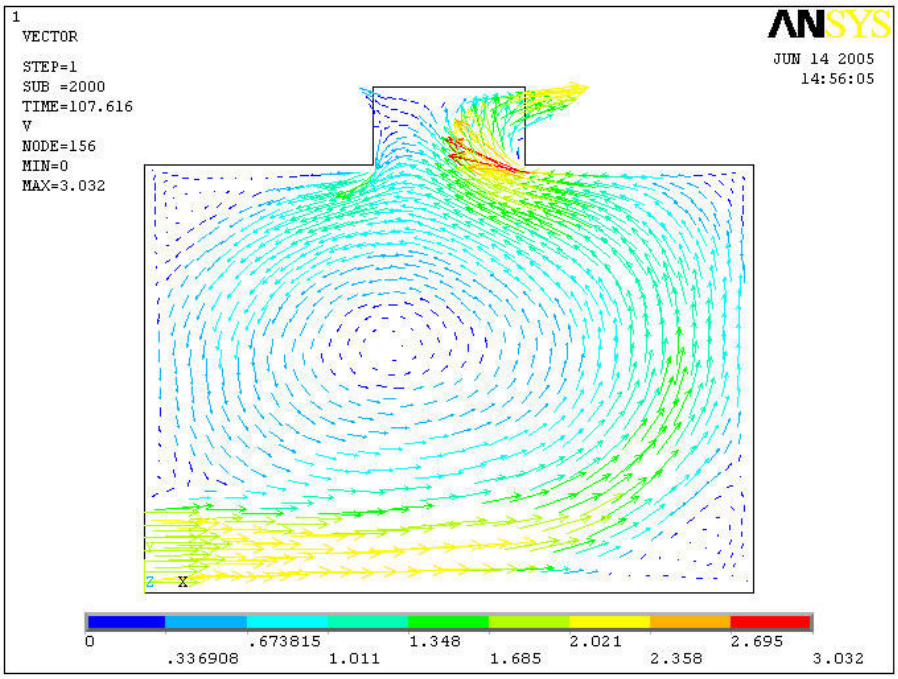

Figura C.22 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando uma entrada e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s

C.3. Configuração C

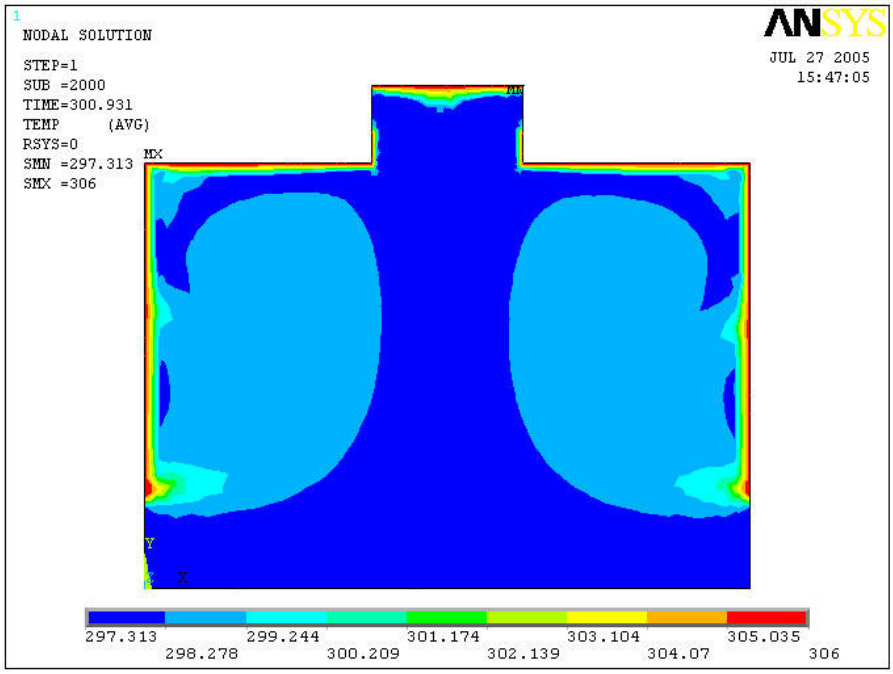

Figura C.23 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s

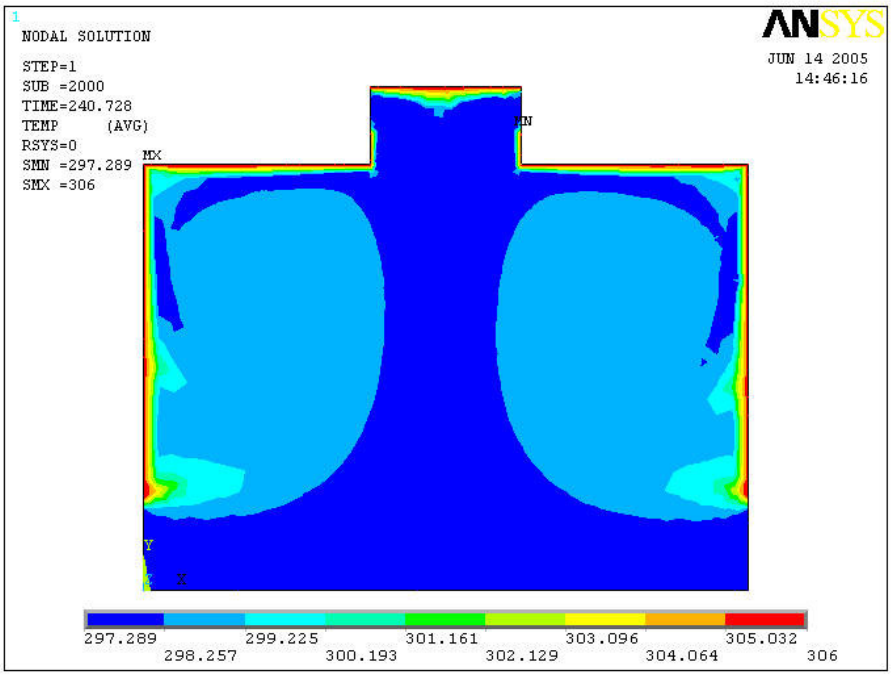

Figura C.24 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

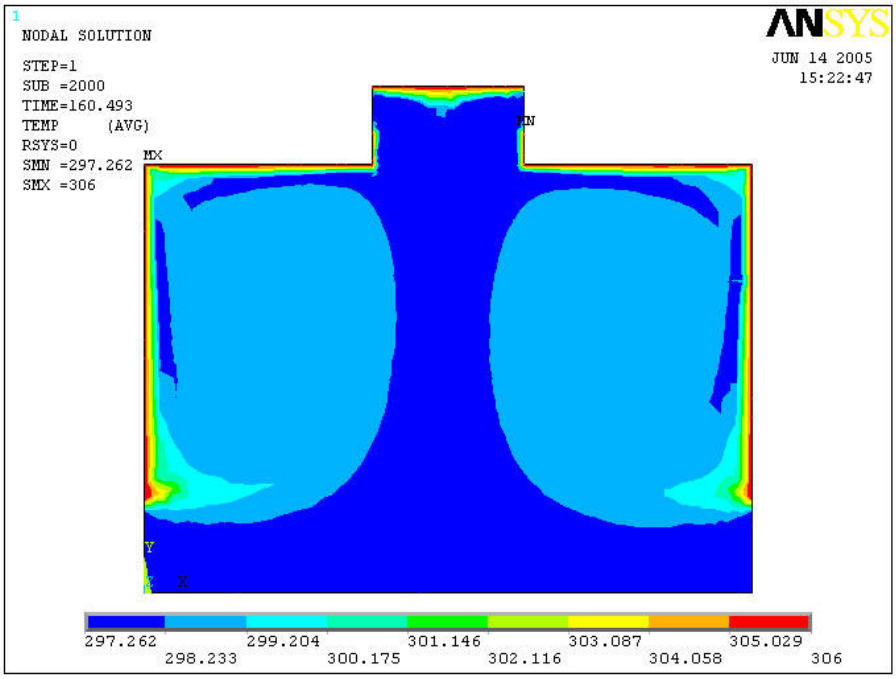

Figura C.25 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s

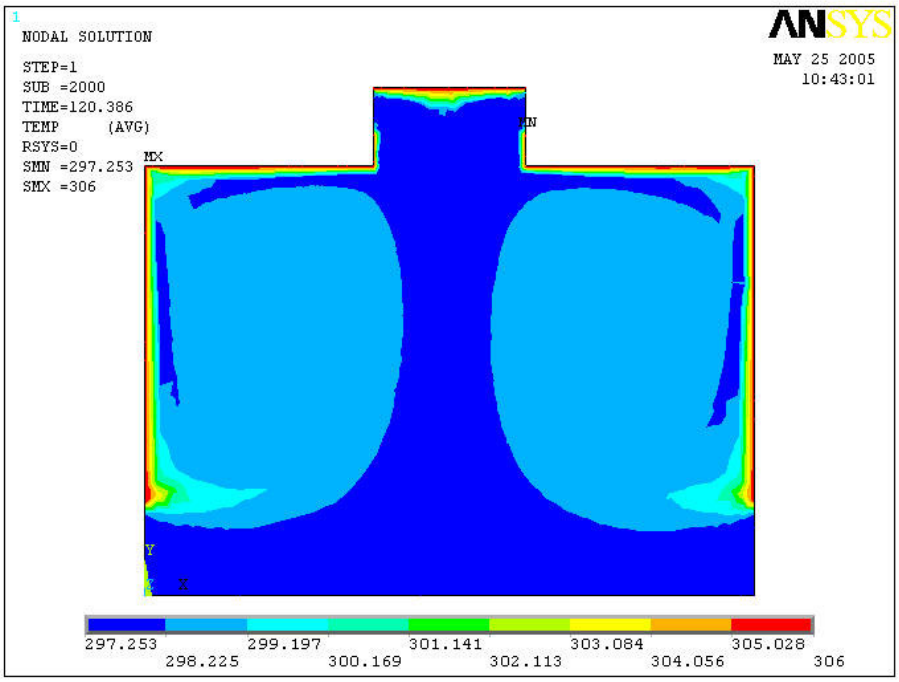

Figura C.26 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s

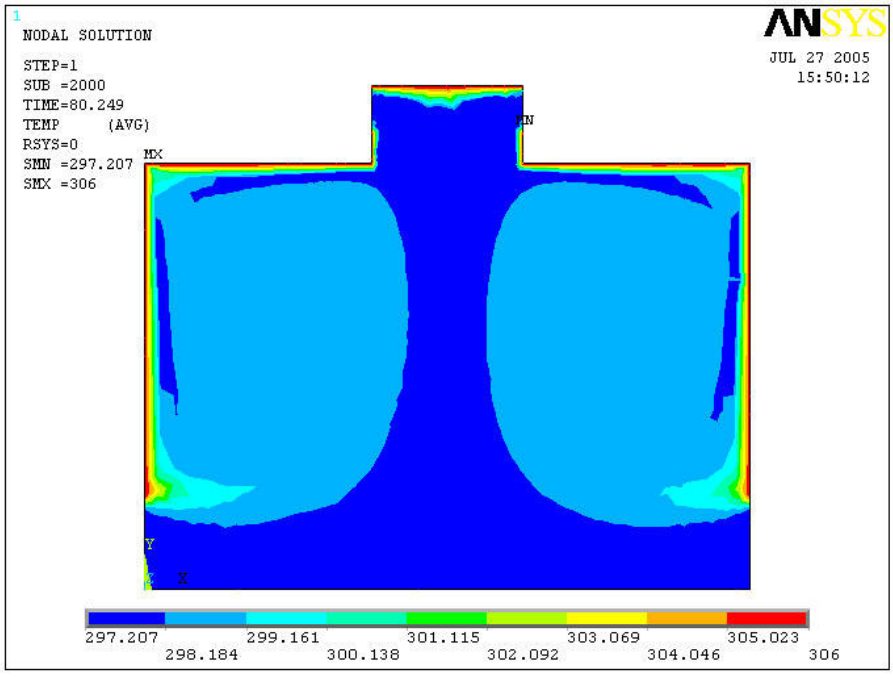

Figura C.27 – Perfil da temperatura do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s

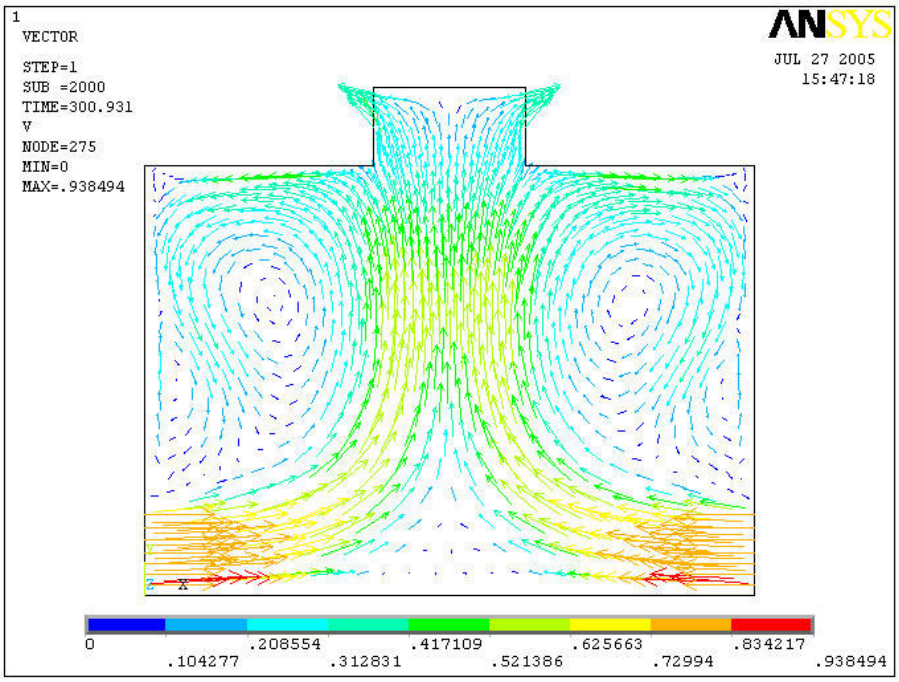

Figura C.28 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 0,8 m/s

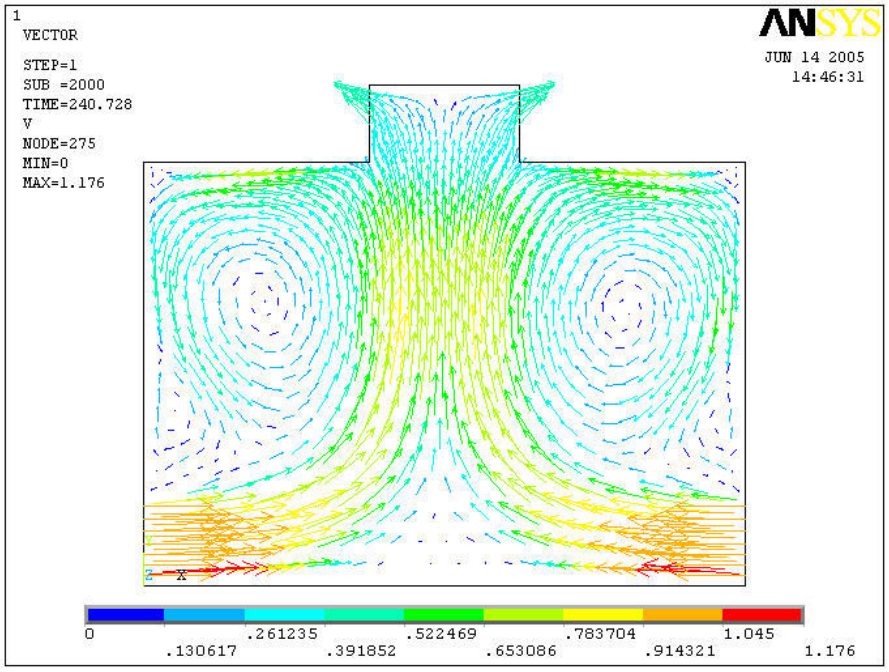

Figura C.29 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,0 m/s

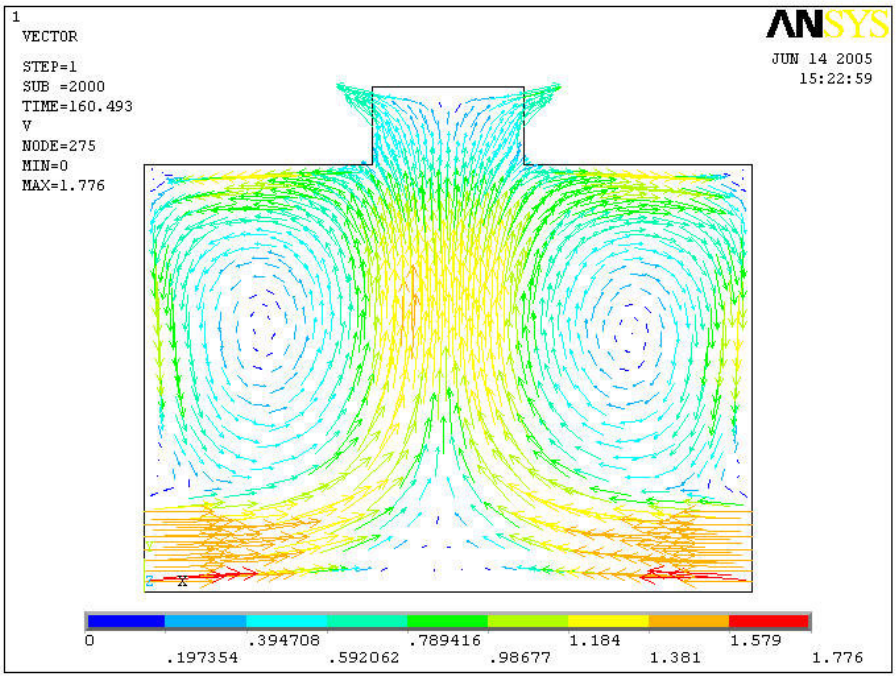

Figura C.30 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 1,5 m/s

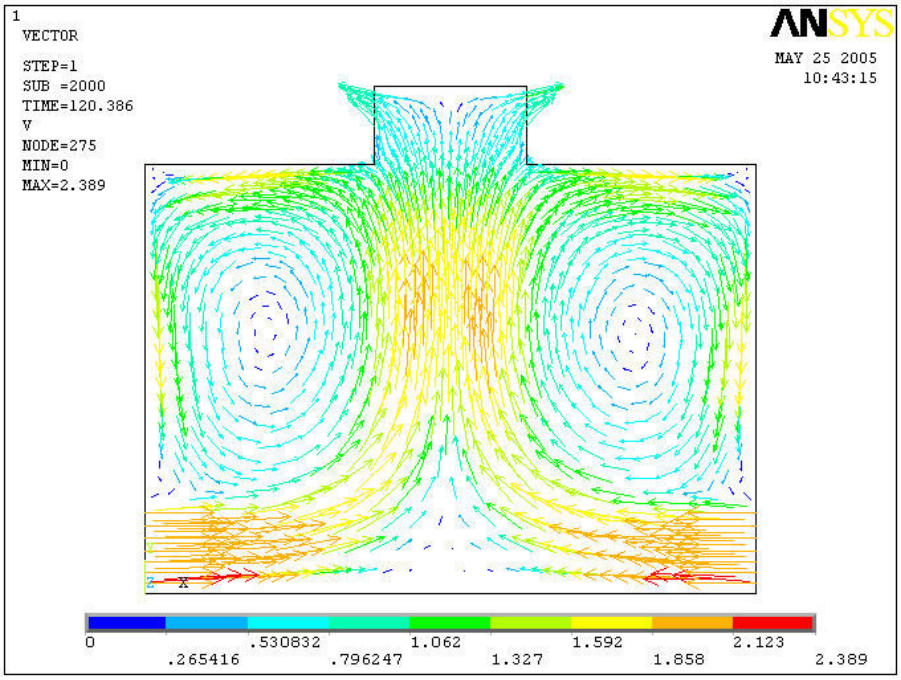

Figura C.31 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 2,0 m/s

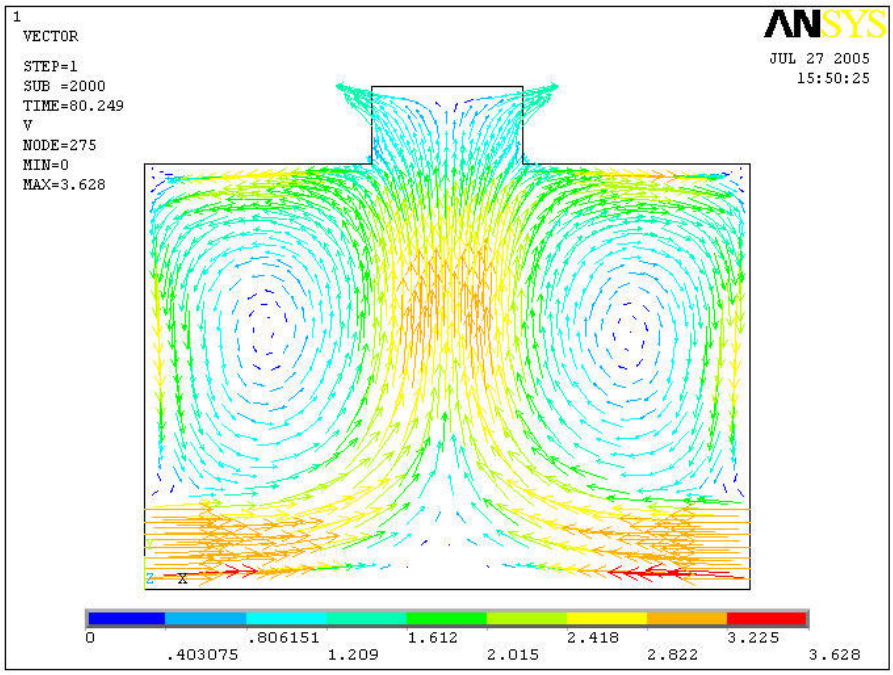

Figura C.32 – Configuração do fluxo do ar interno, considerando duas entradas e duas saídas, para $V_{entr.}$ = 3,0 m/s