

Alejandro Antonio Naranjo Gaviria

**AVALIAÇÃO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE VENTILAÇÃO DE
COZINHAS RESIDENCIAIS EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO NA COLÔMBIA
POR MEIO DE CHAMINÉS SOLARES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gaviria, Alejandro Antonio Naranjo

Avaliação por simulação computacional de ventilação de cozinhas residenciais em clima quente e úmido na Colômbia por meio de chaminés solares [dissertação] / Alejandro Antonio Naranjo Gaviria ; orientador, Roberto Lamberts - Florianópolis, SC, 2012.

211 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

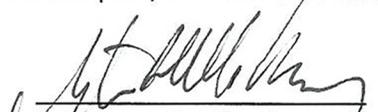
1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Desempenho térmico. 3. Ventilação. 4. Chaminé solar. 5. Efeito chaminé. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Alejandro Antonio Naranjo Gaviria

**AVALIAÇÃO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE VENTILAÇÃO DE
COZINHAS RESIDENCIAIS EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO NA COLÔMBIA
POR MEIO DE CHAMINÉS SOLARES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Arquitetura e Urbanismo”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 de Julho de 2012.



Prof. Ayrton Portilho Bueno, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Orientador - Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mauricio Roniz, Dr.
Universidade Federal de São Carlos



Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Fernando Simon Westphal, DrEng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas inúmeras oportunidades e a companhia incondicional.

A minha família, fonte de apoio e estímulo permanente.

Aos meus amigos tanto da Colômbia quanto do Brasil, pessoas que enriqueceram o caminho com seu apoio, alegria e amizade.

Ao professor Roberto Lamberts, pela amizade e a inspiração para ir além dos limites, exercitar o senso crítico e manter a calma.

Aos professores Fernando Ruttkay Pereira e Fernando Westphal, pelas críticas e sugestões apontadas na etapa da qualificação, que foram de grande valia para o trabalho. Também por aceitarem participar da avaliação do trabalho final.

Ao professor Maurício Roriz por ter aceitado avaliar o trabalho em sua forma final.

Aos professores Jorge Hernán Salazar e Ader Garcia, os quais semearam boas perguntas e paixão pela pesquisa e pela vida acadêmica desde a graduação.

Ao professor Saulo Güths pela grande competência na docência e por facilitar o aprendizado de temas que estão fora do âmbito comum dos arquitetos.

A Marcio Sorgato, Leticia Neves, Fernando Sá Cavalcanti, Renata de Vecchi, Ulisses Munarim, Leticia Niero, Marcelo Galafassi, Lucas Arango, Ricardo Rupp, Natalia Giraldo, Laura Rendón, Adriane Sobreira, William Barbosa Vianna e Rogério Versace pela ajuda nas diferentes etapas da pesquisa.

A Ivonete Coutinho e Ana Maria Wisintainer, pela valiosa ajuda desde a secretaria do Pós-ARQ.

A CAPES e ao programa “Enlazamundos” da prefeitura de Medellín, pelo apoio econômico que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

“A arquitetura [...] adoece de beleza. Sofrendo de bulimia estética e anorexia ética, nos últimos anos conseguiu combinar níveis inesperados de refinamento plástico e formal, com uma impotente indiferença para o contexto urbano, social e ecológico em que se encontra”

Balague - 2002

RESUMO

O aumento considerável das cargas de resfriamento devido às fontes internas e externas e o acúmulo de ar poluído devido aos processos de cocção, fazem com que o melhoramento do comportamento térmico e da ventilação de uma cozinha residencial localizada em clima quente e úmido seja prioritário. A ventilação pode constituir uma estratégia eficiente para resolver esses problemas. Porém, localidades geográficas que possuem momentos consideráveis de calma em relação ao vento como, por exemplo, a cidade de Quibdó na Colômbia, requerem o uso de outras estratégias de condicionamento. Pesquisas anteriores demonstraram as possibilidades de utilização das chaminés solares para melhorar o desempenho ambiental de um espaço localizado sob essas condições climáticas. Com o intuito de avaliar o potencial das chaminés solares sobre uma cozinha residencial, neste trabalho foi utilizado um método de simulação computacional através do programa Energyplus. Na modelagem das aberturas da chaminé, encontrou-se que o objeto “Horizontal Opening”, incluído na versão 7.0 desse programa, não representa adequadamente a ventilação gerada pela diferença de temperatura. Entre os resultados, verificou-se (1) que a presença de vento potencializava o “efeito chaminé” sem importar a direção que tivesse a corrente, (2) a inclinação da chaminé em 50° é o valor que permite atingir o melhor comportamento da cozinha para a latitude de Quibdó, (3) a localização da cozinha na planta arquitetônica que permitiu obter o melhor comportamento devido ao uso de uma chaminé é aquela na qual se tem o maior afastamento no plano vertical entre as aberturas de entrada e saída da chaminé e (4) encontrou-se que a melhoria obtida através do aumento da área de absorção na chaminé tem um limite quando considerado o dia inteiro. A partir das simulações realizadas para o dia inteiro, conclui-se que o uso de chaminés solares não produziu melhorias significativas na temperatura e na ventilação de cozinhas residenciais localizadas no clima quente e úmido de Quibdó.

Palavras-chave: Arquitetura. Desempenho térmico. Ventilação. Efeito Chaminé. Chaminé solar.

ABSTRACT

The significant increase in cooling loads due to internal and external sources and the accumulation of polluted air due to cooking, make the improvement of thermal and ventilation performance of a residential kitchen located in hot and humid climate a priority. The ventilation is an effective strategy to solve these problems. However, geographical places which have considerable moments without wind, like the case of Quibdó – Colombia, require the use of other conditioning strategies. Previous researches have shown the possibility of using solar chimney's to improve the performance of a space located under such climatic conditions. This work used the Energyplus simulation software for evaluating the potential of a solar chimney on a residential kitchen. Modeling the chimney openings, it was found that the "Horizontal Opening" object included in version 7.0 of this program doesn't represent adequately the ventilation created by the stack effect. Among the results, it was found (1) that the presence of wind enhanced the stack effect regardless of the flow direction, (2) a slope of 50° for the chimney absorber surface is the ideal inclination value to achieve the best performance in a kitchen located in the Quibdó latitude, (3) the kitchen location within the house which allowed to obtain the best performance due to the use of a solar chimney, was that which let to have a larger distance between the inlet and outlet on the vertical plane and (4) it was found that the performance improvement obtained due to the increase in the chimney absorption area has a limit when considered the whole day. Based on daily simulations, it was concluded that the solar chimney use didn't produce significant improvements in the temperature and ventilation of a residential kitchen located in the hot and humid climate of Quibdó.

Keywords: Architecture. Thermal performance. Ventilation. Stack effect. Solar chimney.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição de pressões para fluxos conduzidos por diferença de temperaturas. Fonte: CHEN; ALLOCCA; GLICKSMAN (2003)	10
Figura 2. Distribuição de pressões para fluxos conduzidos pelo vento. Fonte: LIDDAMENT (1996).....	11
Figura 3. Incertezas na determinação do efeito acoplado do vento e a diferença de temperaturas. Fonte: CHEN; ALLOCCA; GLICKSMAN (2003)	12
Figura 4. Técnicas da ventilação natural	14
Figura 5. Padrões de fluxo em torno de um edifício retangular. Fonte: ASHRAE (2001).....	15
Figura 6. Coeficientes de pressão na cobertura de edificações térreas. Fonte: ASHRAE (2001)	16
Figura 7. Variações do coeficiente de pressão ao longo de cada uma das fachadas de uma edificação térrea com beirais para uma direção de vento = 45°. Fonte: Tokyo Polytechnic University (2012).....	17
Figura 8. Setas comumente utilizadas pelos projetistas para prever o fluxo do ar no interior e ao redor dos edifícios. Fonte: CHEN (2004).....	20
Figura 9. Quadro resumo modelos de ventilação.	20
Figura 10. Faixas aceitáveis de temperatura para ambientes ventilados naturalmente. Fonte: Adaptado (ASHRAE, 2010).....	32
Figura 11. Carta bioclimática. Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (1997).....	33
Figura 12. Distribuição de temperaturas com valor de temperatura ambiente.....	35
Figura 13. Tipos de chaminés solares. Fonte: Adaptado (KHANAL; LEI, 2011).....	36
Figura 14. Três dos quatro tipos de chaminés avaliadas e posição das medições feitas. Fonte: KHEDARI; BOONSRI; HIRUNLABH (2000).....	37
Figura 15. Perfil de velocidades e temperaturas através da câmara de ar. Fonte: Adaptado (SAKONIDOU et al., 2008).....	38
Figura 16. Comparação da distribuição de temperaturas ao longo do tempo para dois tipos de chaminés (Esquerda = Chaminé duto duplo; Direita = Chaminé de duto simples). Fonte: ZISKIND; DUBOVSKY; LETAN (2002)	40
Figura 17. Aumento do fluxo do ar dependendo da profundidade da câmara de ar da chaminé. Fonte: NEVES; RORIZ (2011).....	42
Figura 18. Ganhos de calor dependendo do tamanho das aberturas de entrada e saída de uma chaminé vertical de 6m de pé direito localizada em São Luis, MA – Brasil. Fonte: NARANJO; LAMBERTS; VERSAGE (2011)	43
Figura 19. Aproveitamento da irradiação solar segundo o tipo de chaminé solar em função da trajetória aparente do sol nas latitudes tropicais	44

Figura 20. Variação no ângulo de inclinação da chaminé. Fonte: NEVES; RORIZ (2011).....	47
Figura 21. Aumento do fluxo de ar dependendo da inclinação da chaminé. Fonte: NEVES; RORIZ (2011)	47
Figura 22. Distribuição de temperatura desde o teto até o chão. Fonte: HE et al. (2001)	49
Figura 23. Velocidade de ar induzida pelo protótipo A para condições de céu semiaberto e escuro (com nuvens = overcast). Fonte: YUSSOF et al. (2010)	50
Figura 24. Esquerda: BRE Building, Direita: BSKyB - Harlequin 1	51
Figura 25. Participação das diferentes abordagens disponíveis para estudar chaminés solares. Fonte: Adaptado (KHANAL; LEI, 2011)	53
Figura 26. Resumo da metodologia	57
Figura 27. Precipitação em Quibdó. Fonte: IDEAM (2005)	58
Figura 28. Normais Climatológicas (1961-1990) – Quibdó. Fonte: IDEAM (2005)	60
Figura 29. Carta bioclimática Quibdó.....	60
Figura 30. Carta solar Quibdó. Fonte: Analysis Sol-ar, LABEEE (2012)	61
Figura 31. Rosa dos ventos – Quibdó. Fonte: IDEAM (2011)	61
Figura 32. Materiais da chaminé	68
Figura 33. Dimensões da chaminé	68
Figura 34. Simplificação geométrica da Chaminé no Energyplus	71
Figura 35. Direção do fluxo no momento de maior temperatura na chaminé dependendo do objeto utilizado para modelar as aberturas no Energyplus	73
Figura 36. Fluxos reversos – Objeto “HorizontalOpening”	73
Figura 37. Comportamento desejado na conexão da cozinha com a chaminé – Objeto “DetailedOpening”	73
Figura 38. Núcleo Cozinha + Banheiro	75
Figura 39. Núcleo Estar	75
Figura 40. Núcleo Quarto.....	75
Figura 41. Desenho esquemático Casa 1	76
Figura 42. Desenho esquemático Casa 2	76
Figura 43. Desenho esquemático Casa 3	76
Figura 44. Desenho esquemático Casa 4	76
Figura 45. Diminuição do ganho de calor através de beirais e ático	77
Figura 46. Planta arquitetônica - Casa 1	77
Figura 47. Planta cobertura - Casa 1	78
Figura 48. Elevações - Casa 1	78
Figura 49. Plantas - Casa 2	79
Figura 50. Elevações - Casa 2	80
Figura 51. Plantas - Casa 3	81

Figura 52. Elevações - Casa 3	82
Figura 53. Plantas - Casa 4	83
Figura 54. Elevações - Casa 4	84
Figura 55. Conexão da chaminé com cozinha das Casas 1, 2 e 3	87
Figura 56. Conexão da chaminé com cozinha da Casa 4.....	87
Figura 57. Detalhe da janela	90
Figura 58. Janela tipo 1	91
Figura 59. Janela tipo 2	91
Figura 60. Janela Modo 1: Vidro e veneziana abertos	92
Figura 61. Janela Modo 2: Vidro aberto e veneziana fechada	93
Figura 62. Janela Modo 3: Vidro e veneziana fechados	93
Figura 63. Localização dos pontos de coeficientes de pressão.....	94
Figura 64. Cálculo do “Height Factor” com veneziana	95
Figura 65. Direção de fluxo – Janela sul – Modo 2 – Vento norte	97
Figura 66. Direção de fluxo – Janela sul – Modo 2 – Vento sul.....	98
Figura 67. Direção de fluxo – Janela sul – Modo 2 – Sem vento.....	98
Figura 68. Calculo de irradiação solar direta segundo o modelo de distribuição solar	100
Figura 69. Chaminés utilizadas no teste do modelo de distribuição solar	101
Figura 70. Intervalos de avaliação.....	108
Figura 71. Temperatura dias de projeto	110
Figura 72. Irradiação em cada dia de projeto	110
Figura 73. Temperatura – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento Norte e sul	115
Figura 74. Temperatura – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento.....	115
Figura 75. Temperatura - Comportamento típico Modo 3	115
Figura 76. Esquema fluxos entrando (azul) e fluxos saindo (vermelho)	119
Figura 77. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento norte	121
Figura 78. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento sul	122
Figura 79. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento	123
Figura 80. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 3 – Com e Sem Vento	123
Figura 81. Desenho aberturas da cozinha.....	124
Figura 82. Coeficientes de pressão nas aberturas da cozinha	125
Figura 83. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 1 e 2 - Vento sul	126

Figura 84. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 1 e 2 - Vento norte	126
Figura 85. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento.....	127
Figura 86. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 3 – Todas as condições de vento.....	127
Figura 87. Conexão entre cozinha e chaminé – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento norte e sul	129
Figura 88. Conexão entre cozinha e chaminé –	129
Figura 89. Conexão entre cozinha e chaminé – Comportamento típico Modo 3 – Todas as condições de vento.....	130
Figura 90. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento norte	131
Figura 91. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento sul.....	132
Figura 92. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento.....	132
Figura 93. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 3 – Vento norte e sul.....	133
Figura 94. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 3 – Sem vento	133
Figura 95. Modelos utilizados para avaliar ganho de calor por irradiação	135
Figura 96. Ganho de calor por irradiação dependendo da inclinação da chaminé para cada dia de projeto. Esquerda: Verão, Centro: Equinócio, Direita: Inverno	136
Figura 97. Ganho de calor por irradiação – Solstício de verão (10:00-15:00h)	137
Figura 98. Ganho de calor por irradiação – Equinócio (10:00-15:00h)	138
Figura 99. Ganho de calor por irradiação – Equinócio (11:00-14:00h)	138
Figura 100. Ganho de calor por irradiação – Solstício de inverno (11:00-14:00h)	139
Figura 101. Inclinações avaliadas.....	140
Figura 102. Trocas de ar e temperatura VS Inclinação – Solstício de verão.....	142
Figura 103. Trocas de ar e temperatura VS Inclinação – Equinócio.....	142
Figura 104. Trocas de ar e temperatura – Solstício de inverno	142
Figura 105. Comportamento típico das temperaturas da chaminé e cozinha para as três inclinações	143
Figura 106. Comportamento típico do fluxo entre a cozinha e chaminé para as três inclinações	143
Figura 107. Temperatura radiante média das 4 cozinhas.....	147

Figura 108. Temperatura do ar das 4 Cozinhas.....	147
Figura 109. Temperatura operativa das 4 cozinhas	147
Figura 110. Trocas de ar por hora e Temperatura operativa das 4 cozinhas	149
Figura 111. Fluxo de ar entre cozinha e sala de estar das 4 cozinhas.	149
Figura 112. Fluxo de ar na conexão entre cozinha e chaminé	150
Figura 113. Estratégias avaliadas na fase 4.....	151
Figura 114. Temperatura operativa na cozinha em função da estratégia	153
Figura 115. Trocas de ar por hora na cozinha em função da estratégia	154
Figura 116. Fluxo na conexão entre a cozinha e cada estratégia.....	154
Figura 117. Avaliação conforto adaptativo – ASHRAE Standard 55-2010	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos modelos disponíveis para estudar a ventilação baseado nas observações de Chen (2004), Chen (2009) e Chen et al. (2010).....	27
Tabela 2. Resultados experimentais e teóricos do cálculo de “trocas de ar por hora” para diferentes espessuras de câmaras de ar em função dos valores de irradiação solar. Fonte: MATHUR et al. (2006).....	42
Tabela 3. Variação do ângulo de inclinação ótimo da chaminé solar dependendo da latitude. Fonte: Adaptado (MATHUR, MATHUR e ANUPMA, 2006).....	46
Tabela 4. Redução da carga de resfriamento dependendo do período de tempo considerado na simulação. Fonte: Adaptado (LEE; STRAND, 2009).....	48
Tabela 5. Classificação climática Quibdó	59
Tabela 6. Dias típicos de projeto para simulações	65
Tabela 7. Propriedades dos materiais da Chaminé.....	69
Tabela 8. Objeto do “AirFlowNetwork: Simulation Control”	69
Tabela 9. Objeto do “AirFlowNetwork: MultiZone: Zone”	70
Tabela 10. Objeto do “AirFlowNetwork: MultiZone: Surface”.....	70
Tabela 11. Objeto do “AirFlowNetwork: Multizone: Component: DetailedOpening”	71
Tabela 12. Propriedades da envoltória segundo NBR15220.....	85
Tabela 13. Propriedades da envoltória obtidas no Energyplus.....	86
Tabela 14. Valores de transmitância térmica para cada tipo de vedação externa segundo NBR15220 na Tabela C.2.....	86
Tabela 15. Taxas metabólicas	89
Tabela 16. Padrão de ocupação: Número de ocupantes	89
Tabela 17. Padrão de equipamentos	89
Tabela 18. Padrão de iluminação.....	89
Tabela 19. Resumo Modelagem janelas na categoria “Detailed Opening”	96
Tabela 20. Temperatura e ACH para os três modos de abertura, variando o Coeficiente de Descarga nas pequenas janelas do Modo 2.....	99
Tabela 21. Vazão total do dia [m ³ /dia] dependendo do modelo de distribuição solar	102
Tabela 22. Diferença na vazão dependendo do modelo de distribuição solar	102
Tabela 23. Esquema das simulações.....	105
Tabela 24. Temperatura média para as 3 condições de vento	111
Tabela 25. Temperaturas - Fase 1.....	112
Tabela 26. Diferenciais de Temperatura.....	113

Tabela 27. Média das trocas de ar por hora (ACH) para as 3 condições de vento.....	116
Tabela 28. Trocas de ar por hora (ACH) - Fase 1.....	117
Tabela 29. Diferenças das trocas de ar (ACH) dependendo do método utilizado.....	118
Tabela 30. Comparação entre somatória de fluxos entrando e saindo.....	119
Tabela 31. Comparação entre somatória de fluxos entrando e somatória de “volume mixing” e “volume infiltration”.....	120
Tabela 32. Média dos fluxos na porta da cozinha – Para cada modo e condição de vento.....	134
Tabela 33. Média dos fluxos na porta da cozinha – Para cada condição de vento.....	134
Tabela 34. Ganho de calor por Irradiação para cada dia de projeto ...	136
Tabela 35. Comportamento da cozinha em função da mudança na inclinação da chaminé.....	141
Tabela 36. Comportamento da cozinha em função da mudança na inclinação da chaminé – média entre os três dias de desenho.....	141
Tabela 37. Superfícies opacas e aberturas da Cozinha em contato com o exterior.....	145
Tabela 38. Média diária de temperatura em função da localização da cozinha.....	146
Tabela 39. Média diária de “graus hora de refrigeração” e “trocas de ar por hora” em função da localização da cozinha.....	148
Tabela 40. Média diária de “Graus hora de refrigeração” e “Trocas de ar por hora” na cozinha em função de cada estratégia.....	153
Tabela 41. Média no período de 07:00 às 20:00h de “Graus hora de refrigeração” e “Trocas de ar por hora” na cozinha em função de cada estratégia.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACH – Air changes per hour

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

HVAC – Heating, Ventilating and Air Conditioning

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	VENTILAÇÃO	5
2.1.1	<i>Usos da Ventilação</i>	5
2.1.1.1	Controle da qualidade do ar interno	5
2.1.1.2	Conforto térmico	6
2.1.1.3	Resfriamento de espaços	6
2.1.2	<i>Tipos de ventilação</i>	7
2.1.2.1	Ventilação natural	7
2.1.2.2	Ventilação mecânica	8
2.1.3	<i>Infiltração</i>	9
2.1.4	<i>Forças motrizes da ventilação</i>	9
2.1.4.1	Diferença de temperaturas	9
2.1.4.2	Vento	10
2.1.4.3	Efeito conjugado do vento e a diferença de temperatura	11
2.1.5	<i>Tipos de ventilação natural</i>	12
2.1.5.1	Ventilação cruzada	12
2.1.5.2	Ventilação unilateral	13
2.1.5.3	Ventilação através de chaminés solares	13
2.1.5.4	Torres de captação de vento	13
2.1.5.5	Ventilação de átrios	14
2.1.6	<i>Coefficientes para cálculos de ventilação</i>	14
2.1.6.1	Coefficiente de pressão	14
2.1.6.2	Coefficiente de descarga	17
2.1.7	<i>Grandezas da ventilação</i>	18
2.1.8	<i>Modelos para estudar a ventilação</i>	19
2.1.8.1	Analíticos	20
2.1.8.2	Empíricos	21
2.1.8.3	Experimentais: Escala reduzida	21
2.1.8.4	Experimentais: Escala real	22
2.1.8.5	Rede multizonal	22
2.1.8.6	Modelos numéricos	23

2.1.8.6.1	Zonais	23
2.1.8.6.2	CFD (Computer Fluid Dynamics).....	24
2.1.8.7	Considerações finais quanto aos modelos de ventilação	25
2.2	CLIMA	28
2.2.1	<i>Classificação do clima</i>	28
2.2.2	<i>Clima quente e úmido</i>	29
2.2.3	<i>Recomendações arquitetônicas</i>	29
2.3	CONFORTO TÉRMICO	30
2.3.1	<i>Modelo estático</i>	30
2.3.1.1	Voto Médio Estimado (PMV = Predicted Mean Vote):	30
2.3.1.2	Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD= Predicted Percentage Dissatisfied):.....	31
2.3.2	<i>Modelo adaptativo</i>	31
2.3.2.1	ASHRAE 55 – Ambientes ventilados naturalmente.....	31
2.3.3	<i>Carta bioclimática</i>	32
2.4	POTENCIAÇÃO DA VENTILAÇÃO POR DIFERENÇA DE TEMPERATURAS.	34
2.4.1	<i>Insuficiência das técnicas passivas</i>	36
2.4.2	<i>Velocidades muito baixas</i>	37
2.4.3	<i>Critério de avaliação</i>	38
2.4.4	<i>Incertezas nas especificações ideais</i>	40
2.4.5	<i>Risco de aquecimento</i>	42
2.4.6	<i>Maior captação de irradiação não gera mais ventilação</i>	43
2.4.7	<i>Importância relativa das simulações anuais</i>	47
2.4.8	<i>Isolamento da chaminé em relação ao espaço interno</i>	48
2.4.9	<i>Irradiação solar</i>	49
2.4.10	<i>Combinação de estratégias</i>	50
2.4.11	<i>Integração de chaminés solares em um edifício real</i>	50
2.4.12	<i>Modelos para estudar chaminés solares</i>	51
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DA LITERATURA.....	54
3	METODOLOGIA	57
3.1	INSUMOS BÁSICOS PARA AS SIMULAÇÕES	58
3.1.1	<i>Dados climáticos</i>	58
3.1.1.1	Dias de projeto	62
3.1.1.1.1	Bases de dados climáticos.....	63
3.1.2	<i>Modelagem da chaminé</i>	66
3.1.2.1	Modelagem chaminé no Air Flow Network	69
3.1.2.2	Modelagem das aberturas da chaminé	72
3.1.3	<i>Modelagem das casas</i>	74
3.1.3.1	Núcleos	75

3.1.3.2	Tipos de casas	75
3.1.3.3	Zonas térmicas no Energyplus.....	77
3.1.3.3.1	Casa 1:.....	77
3.1.3.3.2	Casa 2:.....	79
3.1.3.3.3	Casa 3:.....	81
3.1.3.3.4	Casa 4:.....	83
3.1.3.4	Materiais	85
3.1.3.5	Conexão da chaminé com as cozinhas	86
3.1.4	<i>Cargas de resfriamento e padrão de uso</i>	87
3.1.5	<i>Modelagem da ventilação natural</i>	90
3.1.5.1	Modelagem das Janelas	90
3.1.5.1.1	Tipos de janela.....	90
3.1.5.1.2	Modo de abertura das janelas.....	92
3.1.5.2	Coeficientes de pressão	93
3.1.5.3	Coeficientes de descarga	94
3.1.5.4	Resumo das janelas.....	94
3.1.5.5	Alternativas para modelar as Venezianas	97
3.1.6	<i>Modelo de distribuição solar</i>	100
3.1.6.1	Implicações da escolha do modelo de distribuição solar.....	101
3.2	SIMULAÇÃO	102
3.2.1	<i>Fase 1: Análise dos dias de projeto, a condição de vento e o modo de abertura</i>	103
3.2.2	<i>Fase 2: Inclinação da chaminé</i>	103
3.2.3	<i>Fase 3: Localização da cozinha</i>	104
3.2.4	<i>Fase 4: Aumento da área de absorção de irradiação</i>	104
3.2.5	<i>Avaliação do comportamento da cozinha</i>	106
3.2.5.1	Cálculo de trocas de ar por hora	106
3.2.5.2	Avaliação do conforto	107
3.2.5.3	Ponderação do comportamento.....	107
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	109
4.1	FASE 1: DIAS DE PROJETO, CONDIÇÃO DE VENTO E MODO DE ABERTURA	109
4.1.1	<i>Dias de projeto</i>	109
4.1.1.1	Temperatura nos dias de projeto.....	109
4.1.1.2	Irradiação em cada dia de projeto	110
4.1.1.3	Temperatura da cozinha	111
4.1.1.4	Comportamento típico da temperatura.....	114
4.1.1.4.1	Modo 1 e 2 + Vento Norte e sul.....	115
4.1.1.4.2	Modo 1 e 2 + Sem vento	115
4.1.1.4.3	Modo 3	115
4.1.2	<i>Trocas de ar na cozinha</i>	116

4.1.2.1	Considerações do cálculo das trocas de ar	117
4.1.3	<i>Fonte do ar que entra na cozinha</i>	121
4.1.3.1	Vento norte – Modo 1 e 2	121
4.1.3.2	Vento sul – Modo 1 e 2.....	122
4.1.3.3	Sem vento – Modo 1 e 2.....	122
4.1.3.4	Modo 3	123
4.1.4	<i>Balanço de fluxo</i>	123
4.1.4.1	Modo 1 e 2 – Vento sul.....	125
4.1.4.2	Modo 1 e 2 – Vento norte	126
4.1.4.3	Modo 1 e 2 – Sem vento.....	126
4.1.4.4	Modo 3 – Todas as condições de vento.....	127
4.1.5	<i>Direção do fluxo na chaminé</i>	127
4.1.5.1	Modo 1 e 2 – Vento norte e sul	128
4.1.5.2	Modo 1 e 2 – Sem vento.....	129
4.1.5.3	Modo 3 – Todas as condições de vento.....	130
4.1.5.3.1	Direção do fluxo na saída da chaminé.....	130
4.1.6	<i>Direção de fluxo entre cozinha e sala de estar</i>	130
4.1.6.1	Modo 1 e 2 – Vento norte	131
4.1.6.2	Modo 1 e 2 – Vento sul.....	131
4.1.6.3	Modo 1 e 2 – Sem vento.....	132
4.1.6.4	Modo 3 – Vento norte e sul.....	132
4.1.6.5	Modo 3 – Sem vento	133
4.1.6.6	Magnitude do isolamento do ar da cozinha	133
4.2	FASE 2: INCLINAÇÃO DA CHAMINÉ	135
4.2.1	<i>Ganho de calor por irradiação em função da inclinação</i>	135
4.2.1.1	Ganho de calor por irradiação - Solstício de verão.....	137
4.2.1.2	Ganho de calor por irradiação - Equinócio	137
4.2.1.3	Ganho de calor por irradiação - Solstício de inverno.....	139
4.2.2	<i>Comportamento da cozinha em função da inclinação da chaminé</i> 139	
4.2.2.1	Análise do comportamento	140
4.2.2.1.1	Gráficos das trocas de ar por hora e temperatura	141
4.2.2.1.2	Fluxos reversos.....	142
4.2.3	<i>Critérios a serem adotados nas fases seguintes</i>	143
4.3	FASE 3: LOCALIZAÇÃO DA COZINHA	144
4.3.1	<i>Implicações da mudança na localização da cozinha</i>	144
4.3.2	<i>Comportamento das cozinhas em função da sua localização</i> 146	
4.4	FASE 4: AUMENTO DA ÁREA DE ABSORÇÃO DE IRRADIAÇÃO	150
4.4.1	<i>Avaliação para todas as horas do dia</i>	152
4.4.2	<i>Avaliação para o período de ocupação</i>	154
4.4.3	<i>Avaliação de conforto</i>	156

5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	157
5.1	CONCLUSÕES	157
5.1.1	<i>Dia de projeto, condição de vento e modo de abertura</i>	<i>157</i>
5.1.2	<i>Inclinação da chaminé.....</i>	<i>160</i>
5.1.3	<i>Localização da cozinha</i>	<i>160</i>
5.1.4	<i>Aumento da área de absorção de irradiação</i>	<i>160</i>
5.1.5	<i>Geral</i>	<i>162</i>
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	162
5.2.1	<i>Limitações do trabalho</i>	<i>162</i>
5.2.2	<i>Sugestões para trabalhos futuros.....</i>	<i>163</i>
	REFERÊNCIAS.....	165
	APÊNDICES	173

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Considerando que a arquitetura deve levar em consideração outros fatores além da aparência estética, este trabalho faz uma procura pela qualificação ambiental de cozinhas residenciais, levando em conta a condição climática quente e úmida e a necessidade de higiene e conforto das pessoas.

As altas cargas internas de resfriamento de uma cozinha residencial dificultam a obtenção de níveis aceitáveis de conforto térmico. O calor gerado por uma pessoa quando está cozinhando e por equipamentos tais como a geladeira, o forno e o fogão, acumula-se na cozinha elevando consideravelmente a sua temperatura.

Dificuldades adicionais surgem quando a cozinha está localizada em um ambiente de clima quente e úmido, devido às altas concentrações de umidade e altas temperaturas próprias dessas condições climáticas. Uma vez que a troca de calor depende da diferença de temperaturas, nestes climas existe uma grande dificuldade para perder essa energia devido ao pequeno diferencial térmico entre o exterior e o interior dos espaços. Adicionalmente, as altas concentrações de umidade diminuem a capacidade do corpo humano de liberar calor através do suor. O suor acumulado na pele e a alta temperatura do ar fazem com que o estado de ânimo das pessoas seja alterado e sua disposição para realizar atividades diminua. Como apontado por Trujillo e Arroyave (2006),

é comum que muitas pessoas que vivem em zonas quentes reclamem do quanto suas casas são desconfortáveis, de como isso afeta suas atividades diárias e da incapacidade de resolver ou amenizar esses problemas

Por outro lado, as cozinhas apresentam problemas com relação à higiene devido ao acúmulo de vapores, gases e gordura derivados dos processos de cocção. Quando essa situação não é solucionada, podem surgir problemas não somente no interior da cozinha, mas também nos demais ambientes da residência devido ao espalhamento dessa poluição.

Obtendo suporte com o uso de equipamentos mecânicos, os projetistas acabam ignorando sua responsabilidade perante essas questões. No entanto, essa atitude traz consigo grandes problemas para o planeta. Como apontado por Santamouris e Wouters (2006), os dados do Instituto Internacional de Refrigeração - IRI - no ano de 2002 mostram que os sistemas de refrigeração e ar condicionado consomem cerca de 15% da eletricidade usada em todo o mundo. Santamouris (2007) alerta que quase 46% das residências dos países pertencentes à “Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico” – OCDE - utilizam sistemas de ar condicionado e que este nível vem aumentando 7% a cada ano. De acordo com Adnot (apud Santamouris, 2007), em 1990 o consumo de energia para refrigeração nos países da União Européia (UE) estava perto de 1900 GWh e espera-se que ultrapasse os 44.430 GWh, em 2020. O aumento no uso de condicionadores de ar aumenta as cargas pico da eletricidade, trazendo a necessidade de construir novas usinas de abastecimento elétrico para atender a demanda crescente. Consequentemente, diversos problemas surgem no planeta, tais como o desmatamento, a inundação de grandes áreas de terra, a emissão de gases que aumentam o efeito estufa, o risco de acidentes nucleares, entre outros.

Motivado por Gonzales (2002), o qual afirma que

mais do que um obstáculo para o acondicionamento natural ou passivo do ambiente construído, as condições climáticas quentes e úmidas devem representar um desafio para a pesquisa e a criatividade na busca de novas e práticas soluções

este trabalho busca soluções de condicionamento passivo mediante as quais seja possível solucionar a problemática formulada.

Incorporar soluções desse tipo torna-se ainda mais relevante quando se consideram populações de baixa renda. Como constatado através da pesquisa de campo feita antes do presente trabalho (IPSE, 2012), as difíceis condições econômicas destas comunidades acabam piorando a situação. Devido à pobreza e ausência de serviços públicos, as pessoas não têm nem possibilidade de utilizar a energia elétrica para operar estratégias ativas de condicionamento.

O desenho bioclimático estabelece que uma das estratégias mais eficazes para atender as necessidades de conforto térmico em climas quentes e úmidos consiste em favorecer a ventilação dos espaços.

Quando o corpo humano é exposto ao ar em movimento, é possível compensar o efeito fisiológico causado pela alta umidade. Quando as velocidades do ar são mais elevadas, a taxa de evaporação do suor na superfície da pele aumenta. Além disso, se o ar exterior estiver a uma temperatura mais baixa do que a do ar interior é possível perder parte do calor armazenado nas superfícies do espaço através da convecção. Adicionalmente, através da ventilação é possível atender as necessidades higiênicas de um espaço, renovando o ar poluído com ar de melhores condições químicas.

No entanto, existem regiões de clima quente e úmido onde as correntes de vento não têm intensidade nem frequência suficientes para serem consideradas estratégias eficazes para compensar as necessidades térmicas e de higiene das pessoas. Assim, cria-se a necessidade de procurar estratégias alternativas através das quais seja possível resolver a questão do conforto e higiene das cozinhas residenciais, mesmo sem ter vento e evitando o uso de equipamentos mecânicos.

Diante dessa situação, esta pesquisa pretende focar na avaliação de uma estratégia de condicionamento passiva conhecida como chaminé solar. Mediante esta estratégia, é possível potencializar a ventilação gerada pela diferença de temperaturas graças ao aproveitamento da irradiação solar para aumentar o diferencial entre a temperatura do ar contido na chaminé e a temperatura do espaço exterior.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento térmico e de ventilação de cozinhas residenciais localizadas no clima quente e úmido de uma cidade da Colômbia, com a utilização de chaminés solares.

1.2.2 Objetivos Específicos

Analisar o efeito produzido por diferentes dias de projeto, condições de vento diversas e modos de abertura das janelas no comportamento de uma cozinha ligada a uma chaminé solar.

Analisar a influência do grau de inclinação da chaminé no comportamento da cozinha.

Verificar em que localização na planta arquitetônica a cozinha apresenta melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar.

Avaliar a melhoria que pode ser obtida quanto à temperatura e ventilação com o aumento da área de absorção de irradiação na chaminé solar.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em **cinco** capítulos. O **primeiro** capítulo corresponde à introdução, apresentando a justificativa e os objetivos do trabalho. O **segundo** capítulo contém a revisão bibliográfica de questões relativas à ventilação, ao conforto térmico, às condições dos climas quentes e úmidos, assim como o relato de alguns estudos feitos com chaminés solares por outros pesquisadores. O **terceiro** corresponde à metodologia, onde são explicados os procedimentos que foram adotados para alcançar os objetivos desta pesquisa. O **quarto** capítulo apresenta os resultados, os quais estão organizados em função dos quatro objetivos específicos do trabalho. O **quinto** capítulo contém as conclusões, as limitações do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros. No final, são apresentadas as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a revisão da literatura referente aos principais assuntos desta pesquisa: ventilação, clima e conforto térmico. Ao final, dá-se ênfase especialmente aos estudos realizados com o intuito de potencializar a ventilação por diferença de temperaturas.

2.1 VENTILAÇÃO

Segundo Liddament (1996), a “ventilação é o processo pelo qual o ar "limpo" (normalmente ar externo) é intencionalmente fornecido a um espaço e o ar poluído é removido. Isto pode ser feito por meios naturais ou mecânicos”. Através da circulação do ar, é possível manter condições adequadas de ar interno, resfriar os espaços e melhorar a sensação térmica das pessoas. Tal processo pode reduzir ou até mesmo eliminar o consumo de energia necessário para utilização de equipamentos mecânicos de condicionamento.

2.1.1 Usos da Ventilação

2.1.1.1 Controle da qualidade do ar interno

A ventilação natural pode ser indicada como uma estratégia passiva e eficiente quando se busca melhorar a qualidade interna do ar, renovando-o e diluindo a concentração de poluentes que se encontram em um ambiente interno. A boa qualidade do ar em uma edificação é definida pela ausência de poluentes que geram desconforto ou problemas de saúde em seus ocupantes. Assim, é necessário considerar a ventilação ao fornecer oxigênio para o corpo humano, diluindo os poluentes que são produzidos pelo metabolismo tais como o dióxido de carbono, os odores naturais e até mesmo os poluentes emitidos por outras fontes.

Em uma cozinha, a poluição do ar deve ser tratada adequadamente devido à grande quantidade de gases, vapores e gordura produzida nos processos de cocção.

2.1.1.2 Conforto térmico

O movimento do ar em torno do corpo humano pode ajudar a controlar o nível de conforto térmico que uma pessoa pode experimentar. Isto é possível porque este movimento determina as trocas de calor por convecção e umidade entre o corpo humano e o ar circundante. Quando a temperatura corporal é maior que a temperatura do ambiente, é possível que o corpo perca calor através da convecção. Além disso, através do mecanismo da transpiração, o corpo humano pode dissipar o calor em excesso graças à evaporação do suor da pele. Ao incrementar a velocidade do ar, pode-se aumentar a taxa de evaporação na superfície da pele produzindo uma sensação de refrescamento. Por exemplo, em um ambiente com velocidades do ar de 0,8 m/s com umidade relativa de 60%, a temperatura de bulbo seco poderia ficar 2 °C acima do limite superior da zona de conforto térmico por causa da compensação que pode ser obtida com essa velocidade de vento (ALLARD; SANTAMOURIS, 1998). Isto significa que os ocupantes podem estar em boas condições de conforto térmico, mesmo que se tenham temperaturas mais altas, graças ao aumento da velocidade do ar. Embora o limite da zona de conforto possa ser expandido enquanto a velocidade do ar aumenta, não é recomendado ultrapassar esses valores de velocidade em alguns ambientes, pois velocidades muito altas podem gerar distúrbios adicionais.

Estudos tais como o de Humphreys (apud De Vecchi, 2011) demonstram que pessoas habituadas a edifícios ventilados naturalmente admitem uma variação maior na temperatura e velocidade do ar quando comparadas àquelas que vivem em espaços condicionados artificialmente. Com base nestas evidências, foi proposto um modelo de conforto diferente ao modelo estático tradicionalmente utilizado. Esse modelo é conhecido como “adaptativo” e tem demonstrado ser mais conveniente para ser aplicado em edifícios ventilados naturalmente.

2.1.1.3 Resfriamento de espaços

A ventilação natural pode eliminar ou reduzir os ganhos internos de calor em um edifício, limitando a maneira com que a temperatura do ar aumenta dentro dele. Tendo em vista que a temperatura interior

tende a igualar-se com a do exterior, é possível diminuir a temperatura interna dos espaços caso o ar exterior possua uma temperatura mais baixa. Em climas quentes, esta é a estratégia de resfriamento usual. As edificações deste tipo de clima devem apresentar grandes aberturas voltadas ao exterior, otimizando a renovação de ar e, portanto, diminuindo as temperaturas em um intervalo de tempo menor. Para que esta estratégia funcione de maneira eficaz, ela deve estar atrelada a um bom sobreamento que limite a entrada da radiação solar para dentro do edifício através de paredes e aberturas. Esta técnica é eficiente quando a temperatura externa encontra-se dentro da zona de conforto térmico, mas não funciona para ambientes onde é necessário controlar a velocidade do ar durante os períodos de ocupação, nem quando as temperaturas estão fora dessa zona. Em prédios que exigem este cuidado, a ventilação poderia ser utilizada no período noturno, permitindo reduzir a temperatura das superfícies opacas do edifício devido à convecção entre elas e à menor temperatura do ar nesses horários. Dessa maneira, é possível dissipar o calor acumulado durante o dia, condicionando passivamente os espaços que serão ocupados no dia seguinte devido ao princípio da inércia térmica. Assim, as temperaturas das superfícies opacas de um prédio terão uma temperatura menor do que a da pele, e o corpo conseguirá perder calor pela radiação de ondas longas (balanço radiativo negativo para o corpo humano).

2.1.2 Tipos de ventilação

O ar fresco pode ser introduzido no espaço interno através de aberturas na envoltória da edificação (ventilação natural), através do uso de ventiladores (ventilação mecânica) ou por uma combinação de aberturas e ventiladores (ventilação híbrida).

2.1.2.1 Ventilação natural

A necessidade de ventilação dentro de um espaço interno tem sido resolvida tradicionalmente através da ventilação natural, que pode ser provocada pela diferença de temperaturas ou simplesmente pela movimentação do ar. Através da sua utilização, pode-se diminuir a demanda de sistemas de condicionamento de ar (HVAC) ou até mesmo

serem substituídos. O êxito na utilização desta estratégia depende de vários fatores, tais como condições climáticas, padrão de uso da edificação, ruído, qualidade do ar, entre outros.

A ventilação natural pode ser a preferida ao invés da ventilação mecânica, já que representa um sistema eficiente energeticamente. Além disso, dependendo da tipologia do edifício e do entorno, pode ser facilmente integrada no edifício proporcionando um ambiente confortável e saudável quando devidamente integrada.

Porém, o fato de ser “natural”, implica em um comportamento variável que é, portanto, de difícil controle. A variação das forças através das quais ela é gerada, pode causar períodos de ventilação inadequados, seguidos de ventilação em excesso. Além disso, mesmo que os fenômenos físicos que devem ser levados em consideração sejam conceitos simples, estes são difíceis de manipular devido à grande quantidade de incertezas e complexidade dos cálculos a serem realizados. Fatores como a aleatoriedade nos padrões de fluxo e a dificuldade para determinar a transferência de calor entre o ar e as paredes constituem-se as principais dificuldades encontradas no projeto da ventilação natural.

Às vezes, em muitos ambientes urbanos as condições de ruído e qualidade do ar podem não ser aceitáveis devido à poluição sonora e partículas no ar. Sob essas condições, a ventilação natural pode não ser desejável ou vai requerer um projeto especial mediante o qual se possa controlar o contato direto entre o interior e o exterior.

Caso seja necessário utilizar dutos para conduzir a ventilação natural, as dimensões destes podem ser muito maiores que aquelas necessárias para os sistemas mecânicos.

Para ser eficaz, a ventilação natural exige um alto grau de permeabilidade no interior do prédio. Em alguns edifícios isto pode causar problemas de segurança e dificultar o atendimento dos regulamentos contra incêndio.

2.1.2.2 Ventilação mecânica

Os sistemas de ventilação mecânica são capazes de fornecer uma taxa controlável de renovações de ar e atender as necessidades relacionadas à concentração de poluentes e ocupantes, independentemente das condições meteorológicas. Em princípio, todos

os problemas da ventilação natural podem ser resolvidos com a ventilação mecânica e sua aplicação pode aumentar o fluxo de ar em qualquer uma das várias técnicas de ventilação natural.

No entanto, a ventilação mecânica é evitada às vezes por causa do barulho que produz, pelos problemas de saúde que podem ser gerados, pela necessidade de manutenção e pelo consumo de energia.

2.1.3 Infiltração

Além da ventilação, é necessário considerar outro fenômeno associado com o fluxo de ar nos espaços chamado de “infiltração”. A infiltração é definida como “o fluxo não intencional de ar que entra nos espaços através de rachaduras, fendas ou aberturas na envoltória da edificação” (LIDDAMENT, 1996). Independentemente da ventilação, o ar entra de maneira inevitável na edificação através da infiltração. A correspondente perda de ar através deste meio é definida como exfiltração.

2.1.4 Forças motrizes da ventilação

A ventilação natural pode ser gerada através de dois tipos de forças: o vento e a diferença de temperatura. A diferença na pressão do vento ao longo das fachadas de um edifício e a diferença entre a temperatura interna e externa de um espaço podem produzir uma troca natural entre o ar interno e externo. A quantidade de ventilação varia de acordo com a magnitude e direção dessas forças, o que não é fácil de prever dada a complexidade dos processos físicos envolvidos e a alta variabilidade dos fenômenos. O projeto de ventilação natural vai consistir então no bom uso dessas forças, posicionando e dimensionando adequadamente as aberturas.

2.1.4.1 Diferença de temperaturas

Quando o ar é aquecido, ele se expande causando uma diminuição na sua densidade que lhe permite elevar-se acima das massas de ar mais frio e denso graças à alteração das pressões. O desequilíbrio na diferença de pressão das massas de ar interno e externo cria diferenças verticais de pressões. A diferença de

temperatura entre um espaço e o ambiente faz com que o ar quente suba e saia pela zona superior, permitindo, ao mesmo tempo, a entrada de fluxos de ar mais frio pela zona baixa. A direção do fluxo se inverte quando a temperatura do ar interno é menor que a temperatura do ar externo. O cálculo deste fenômeno, conhecido popularmente como “efeito chaminé”, depende da magnitude da diferença de temperaturas entre as duas massas de ar, a distância de separação vertical entre as duas aberturas e área das mesmas. Quanto maior a separação entre a abertura de entrada e saída de ar e quanto maior a diferença de temperatura entre o interior e o exterior, mais forte será o fluxo de ar induzido (Figura 1).

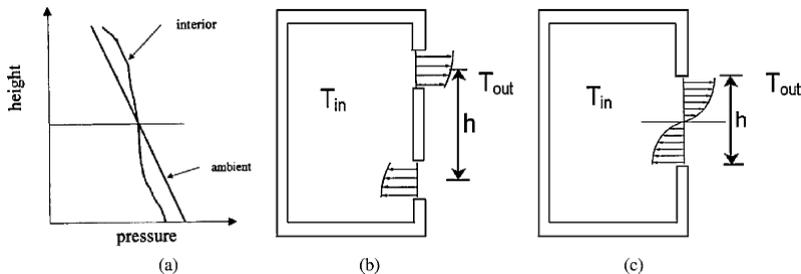


Figura 1. Distribuição de pressões para fluxos conduzidos por diferença de temperaturas. Fonte: CHEN; ALLOCCA; GLICKSMAN (2003)

2.1.4.2 Vento

O vento, por sua vez, é o resultado de diferenciais na temperatura do ar, só que em escala planetária. Grandes massas de ar movem-se ao longo do planeta devido ao aquecimento diferenciado da superfície da terra segundo a latitude. Além disso, a rotação do planeta (efeito Coriolis) gera movimentos nas massas de ar. Em uma escala menor, o vento pode ser gerado por diferenças no terreno ou pela presença de corpos de água e terra. O resultado destes fenômenos gerados em grandes escalas pode ser percebido pelas pessoas na forma de grandes massas de ar que se movem em torno delas, o que frequentemente é chamado de “vento”. Quando o vento atinge um edifício de planta retangular, é gerada uma pressão positiva na fachada que está contra o vento (barlavento) e pressões negativas nas fachadas oposta e laterais. Isto possibilita ao vento atravessar o edifício desde as

aberturas a barlavento (alta pressão) até as zonas a favor do vento - sotavento (baixa pressão) (Figura 2). Se a geometria do edifício não for muito complexa, é possível fazer estimativas muito rápidas sobre a distribuição de pressões. No entanto quando se trabalha com geometrias de maior complexidade é necessário utilizar modelos de cálculo mais complexos.

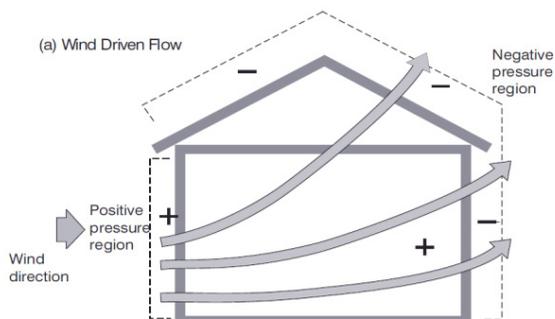


Figura 2. Distribuição de pressões para fluxos conduzidos pelo vento. Fonte: LIDDAMENT (1996)

2.1.4.3 Efeito conjugado do vento e a diferença de temperatura

Ao projetar um sistema de ventilação, deve-se começar estabelecendo a força geradora do vento com a qual se deseja trabalhar. No caso de existirem, ao mesmo tempo, vento e diferença de temperaturas, estas forças devem ser cuidadosamente conduzidas procurando uma complementação entre elas ao invés da anulação de uma em função da outra. Este resultado pode ser alcançado através da compreensão e o aproveitamento da distribuição de pressões desenvolvidas por cada força e localizando as aberturas de maneira estratégica a fim de obter algumas vantagens. Chen, Alloca e Glicksman (2003) estabelecem que para ventos de baixa velocidade, a ventilação é dominada pelo efeito chaminé; no entanto, quando as velocidades se incrementam, a ventilação é conduzida pelo vento. Na Figura 3, é possível verificar, de maneira esquemática, o exposto anteriormente: conforme a velocidade aumenta de 1m/s para 4m/s, a ventilação do recinto começa a ser dominada pelo vento. A pressão gerada com determinadas velocidades de vento pode agir contra as forças geradas

pela diferença de temperaturas, diminuindo a eficácia do sistema devido às pequenas taxas de ventilação total.

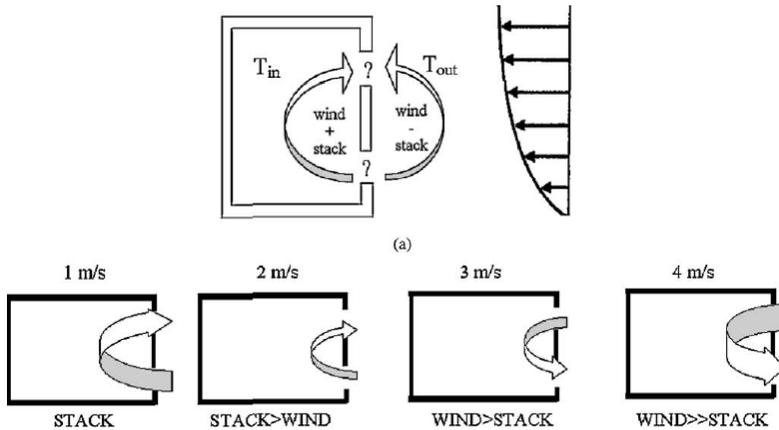


Figura 3. Incertezas na determinação do efeito acoplado do vento e a diferença de temperaturas. Fonte: CHEN; ALLOCCA; GLICKSMAN (2003)

2.1.5 Tipos de ventilação natural

O projeto dos sistemas de ventilação, assim como a seleção das estratégias mais adequadas a utilizar, depende de parâmetros climáticos, técnicos, operacionais, econômicos e culturais. Existem vários tipos que podem ser usados para fornecer ventilação natural a um edifício, listados a seguir:

2.1.5.1 Ventilação cruzada

A ventilação cruzada surge graças à diferença na distribuição de pressões geradas pelo vento ao redor do edifício. Para se alcançar tal resultado, deve-se escolher um caminho livre de obstáculos entre os fluxos do ar que entram e saem através de um espaço. Caso existam várias zonas no interior do edifício a ser ventilado, deve-se ter muito cuidado com as divisões entre elas, pois podem diminuir o fluxo do ar. Por conseguinte, esta técnica de ventilação é recomendada para espaços de planta aberta (Figura 4a).

2.1.5.2 Ventilação unilateral

Às vezes, devido às limitações impostas pelo desenho ou pelos códigos de obra, a ventilação de um espaço só pode ser alcançada através de uma fachada. Nesse caso, as aberturas para ventilação só podem estar localizadas em uma única fachada. Para aumentar a sua eficácia, é recomendável colocar mais de uma abertura ou criar uma abertura suficientemente grande para permitir que o ar flua através dela em ambas as direções e se necessário de maneira simultânea (Figura 4b).

2.1.5.3 Ventilação através de chaminés solares

Uma chaminé solar é um duto vertical que utiliza a irradiação solar para aumentar a ventilação natural nos edifícios. Mediante a maximização do ganho de calor por irradiação solar, é possível incrementar a temperatura do ar que fica no interior da chaminé, diminuindo a sua densidade e facilitando, portanto, a sua saída. Dentro da chaminé, o ar é movido por uma combinação entre a diferença de pressões causada pela diferença de temperaturas, e pela pressão por sucção causada pelo vento. Esta estratégia requer tipicamente uma parede absorvente, uma câmara de ar e uma cobertura de vidro. Em lugares onde existem grandes diferenças entre a temperatura externa e interna dos espaços, é possível trabalhar com sistemas de ventilação que utilizem chaminés para mover o ar. Em climas moderados e frios, estes sistemas têm maior viabilidade, já que nos invernos podem gerar forças de maior magnitude. Eventualmente, pode ocorrer um retorno de ar ao interior da chaminé, quando a pressão gerada nela não consegue vencer a pressão estática do ar de menor temperatura localizado fora desta. Quando for preciso ventilar diferentes espaços, recomenda-se utilizar chaminés independentes para cada um deles a fim de evitar a mistura de ar contaminado. O princípio das chaminés solares pode ser aplicado em uma série de dispositivos diferentes, tais como a parede Trombe, as fachadas duplas e as chaminés inclinadas em tetos (Figura 4c).

2.1.5.4 Torres de captação de vento

Em ambientes onde as correntes de vento predominantes possuem magnitudes apreciáveis, é possível pensar em torres que introduzam o vento nos espaços internos. Esta estratégia requer um duto para conduzir o ar, uma abertura de frente para os ventos, no sentido para o qual eles se direcionam predominantemente, e outra abertura através da qual o ar possa ser conduzido para o interior do espaço que se deseja ventilar (Figura 4d).

2.1.5.5 Ventilação de átrios

Em edifícios que possuem átrios, é possível utilizar estes espaços para induzir a ventilação utilizando-os como se fossem chaminés. Um átrio pode ser definido como um pátio coberto através do qual se pode criar um microclima para os ocupantes do edifício. A altura do átrio deve ser suficientemente grande para garantir que o “plano de pressão neutra” fique acima do nível que se quer ventilar. Para que o fluxo de ar seja controlado, deve-se garantir um bom isolamento do edifício, evitando renovações indesejadas e correntes de ar com altas velocidades. Os padrões de fluxo podem ser alterados pelas pressões induzidas pelo vento (Figura 4e).

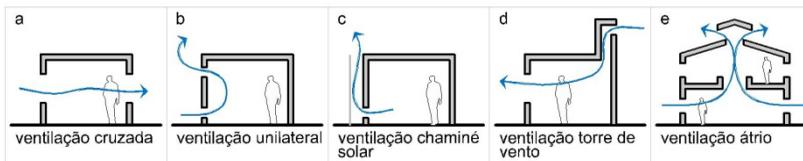


Figura 4. Técnicas da ventilação natural

2.1.6 Coeficientes para cálculos de ventilação

Com o intuito de simplificar o cálculo da ventilação sem perder de vista a complexidade dos fenômenos que devem ser considerados, uma série de coeficientes foram criados.

2.1.6.1 Coeficiente de pressão

Este coeficiente representa as relações entre as pressões nas fachadas de um edifício. Os seus valores dependem da forma do

edifício, da direção do vento, e da influência de obstáculos do entorno tais como outras edificações, vegetação e a topografia do terreno. Um valor positivo denota a condição na qual o vento exerce uma pressão superior à pressão exercida pela atmosfera sobre uma determinada superfície. Caso exista uma abertura localizada em um ponto determinado de uma superfície na qual os coeficientes sejam positivos, o ar entrará no espaço interno. Se o coeficiente for negativo, o ar interno será levado para o exterior devido à sucção (Figura 5).

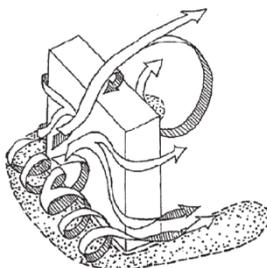


Figura 5. Padrões de fluxo em torno de um edifício retangular. Fonte: ASHRAE (2001)

Quando o vento incide perpendicularmente em uma das superfícies de um edifício retangular, os coeficientes de pressão apresentam os maiores valores e são sempre positivos. Perto das arestas, a magnitude do fluxo de ar diminui e a velocidade aumenta sob essa direção de vento. Para o restante das superfícies, as magnitudes diminuem e a face que está a favor do vento (sotavento) apresenta coeficientes negativos.

Para coberturas inclinadas de edificações térreas, os valores deste coeficiente dependem entre outras variáveis, do grau de inclinação que tenha a cobertura. A Figura 6 apresenta as distribuições típicas do coeficiente de pressão para diferentes valores de inclinação de cobertura. De modo geral, os coeficientes de pressão sempre são negativos para baixas inclinações em relação à horizontal. Para inclinações acima de 20° começam aparecer coeficientes positivos na face inclinada da cobertura que está contra o vento. Enquanto a inclinação for maior, a área com coeficientes de pressão positivos aumentará. A face inclinada a favor do vento sempre apresenta valores negativos.

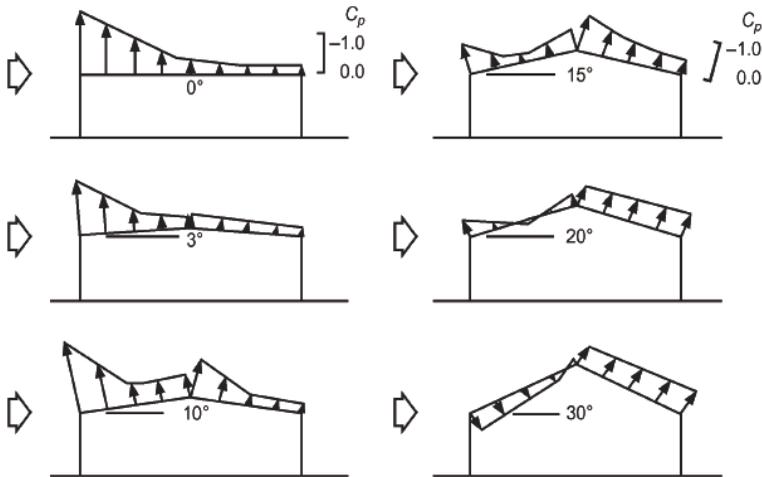


Figura 6. Coeficientes de pressão na cobertura de edificações térreas. Fonte: ASHRAE (2001)

Para obter valores precisos desse coeficiente, é necessário utilizar modelos experimentais com túneis de vento ou medições feitas em ambientes reais. Para edifícios retangulares, é possível estimar valores deste coeficiente com razoável exatidão utilizando bases de dados e programas computacionais criados a partir de estudos especializados deste coeficiente. Dentre essas alternativas para estimar os coeficientes de pressão, encontram-se os programas “CpCalc” e o “TNO Cp Generator” (TNO, 2012), algumas equações e uma base de dados criada pela Universidade Politécnica de Tóquio. A Figura 7 apresenta uma das opções para obter os valores do coeficiente de pressão, fornecida por essa última base de dados. Através desta imagem, é possível verificar claramente como esse coeficiente varia ao longo de uma fachada.

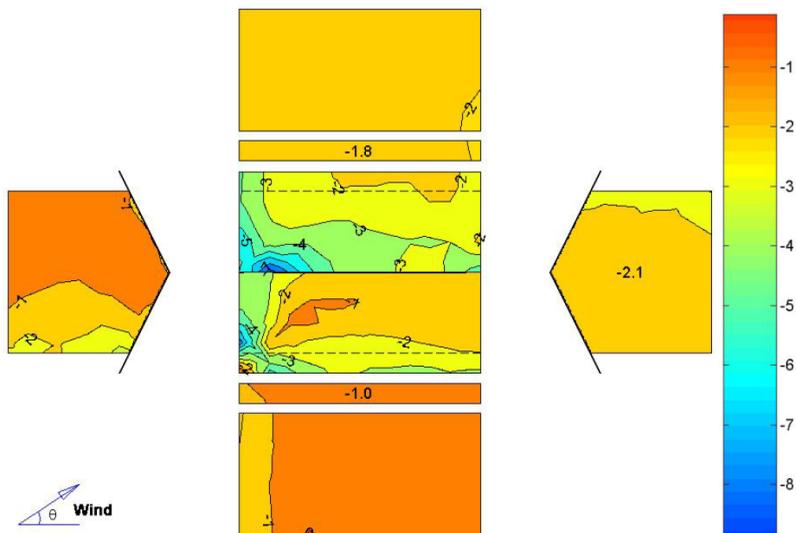


Figura 7. Variações do coeficiente de pressão ao longo de cada uma das fachadas de uma edificação térrea com beirais para uma direção de vento = 45°. Fonte: Tokyo Polytechnic University (2012)

2.1.6.2 Coeficiente de descarga

O coeficiente de descarga (C_d) representa a resistência exercida pelas aberturas de um espaço ao fluxo de ar. Essa resistência é causada pela turbulência criada na abertura de entrada do espaço, devido à fricção do ar com as bordas da superfície. Uma vez que isto acontece, geram-se redemoinhos que dissipam a energia cinética e reduzem a seção de escoamento do ar devido ao fenômeno da “vena contracta”. (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006).

A determinação desse coeficiente está em função da diferença de temperatura, da velocidade do vento e da geometria da abertura. O seu valor apresenta muitas variações dependendo da fonte e método adotado para sua determinação (ALLARD; SANTAMOURIS, 1998). Na revisão feita para a presente pesquisa, encontraram-se valores que oscilavam desde 0,4 até quase 1. O valor de 0,4 foi proposto por Idel'cik (apud Clezar e Nogueira, 2009) para aberturas com venezianas que tivessem 50% de área livre. O valor perto de 1 foi sugerido por Santamouris (apud ALLARD; SANTAMOURIS, 1998) para grandes

aberturas internas. Alguns estudos sugerem um valor médio de 0,78 e outros sugerem que este valor fica em torno de 0,65.

2.1.7 Grandezas da ventilação

Para descrever as taxas de ventilação, existem as seguintes grandezas:

. Taxa de fluxo volumétrico: A ventilação e a infiltração podem ser expressas em termos de taxas de fluxo ou vazão de ar (litros/s) ou (m^3/s).

. Vazão de massa: O fluxo de ar pode ser expresso em termos de fluxo de massa de ar (Kg/s). O fluxo de massa é necessário para determinar a energia térmica levada pela corrente de vento.

. Vazão de ar por ocupante: As normas que regulam as questões relativas à ventilação costumam relacionar o caudal de ar com a quantidade de ocupantes do espaço. Para isto, divide-se o caudal volumétrico de ar pelo número de ocupantes em um espaço. Usualmente, isto é expresso em termos de (litros/s x pessoa), ou (m^3/s x pessoa).

. Vazão por unidade de área: Alternativamente, o caudal de ar pode ser dividido pela área do piso de um espaço para obter um valor por unidade de área (litros/s.m²).

. Número de trocas de ar por hora: O caudal de ar também pode expressar-se em termos de quantidade de renovações de ar por hora (ACH: Air Changes per Hour), representando o número de vezes em que o ar de um ambiente é substituído ao longo de uma hora. Para sua obtenção, é necessário multiplicar o fluxo volumétrico de ar (m^3/s) pelos segundos que tem uma hora. O resultado dessa multiplicação deve ser dividido pelo volume do ambiente (m^3).

Equação 1. Cálculo do número de trocas de ar por hora

$$N = \frac{Q \times 3600}{V}$$

Q = Fluxo Volumétrico de ar (m^3/s)
V = Volume do espaço (m^3)

Os manuais e regulamentações de ventilação geralmente incorporam valores sugeridos com relação à quantidade de trocas de ar em função do uso de um determinado ambiente.

- . Velocidade: A velocidade do vento, expressa geralmente em (m/s), é importante para avaliar as condições de conforto.

- . Pressão: Sabendo que as diferenças de pressão permitem o movimento do ar, conhecer o seu valor em (Pa) é necessário para fazer cálculos de vazão.

- . Densidade: Caso seja necessário obter o volume de ar que atravessa um espaço partindo da vazão mássica, é necessário fazer a conversão desse valor utilizando a densidade do ar (kg/m^3). Para sua determinação é necessário conhecer a temperatura do ar.

Para um maior aprofundamento no tópico de ventilação, sugere-se a consulta direta em fontes em torno das quais foi construída a presente seção deste trabalho (ALLARD; SANTAMOURIS, 1998), (LIDDAMENT, 1996), (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006) e (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006).

2.1.8 Modelos para estudar a ventilação

Mesmo que seja relativamente fácil compreender os conceitos utilizados em ventilação, projetar edifícios ventilados naturalmente é um grande desafio, devido aos múltiplos fatores e complexas relações envolvidas. No entanto, como assinalado por Chen (2004), os projetistas tendem a ignorar este fato e se limitam a desenhar setas que indicam a direção das correntes de vento. Mesmo que as setas possam fornecer informações valiosas quanto ao movimento do ar, elas não oferecem toda a informação necessária para fazer uma avaliação completa da ventilação (Figura 8). Além disso, deve-se considerar que representar graficamente os fluxos de ar de forma correta exige um grande conhecimento de mecânica dos fluidos.

Devido a estes fatores, existem vários modelos que procuram prever ou avaliar o desempenho de um sistema de ventilação, dentre

os quais é possível listar os seguintes: analíticos, empíricos, experimentais (em escala reduzida ou real), rede multizonal e numéricos (zonais ou CFD - Computer Fluid Dynamics) (Figura 9). Sendo que a resposta a ser obtida depende do tipo de modelo escolhido, convém conhecer com maior profundidade as características, possibilidades e limitações de cada um deles. Para tanto, foram abordados os artigos de Chen (2004), Chen (2009) e Chen et al. (2010), que contêm uma revisão muito abrangente dos diferentes estudos feitos nos últimos anos com cada um desses modelos.

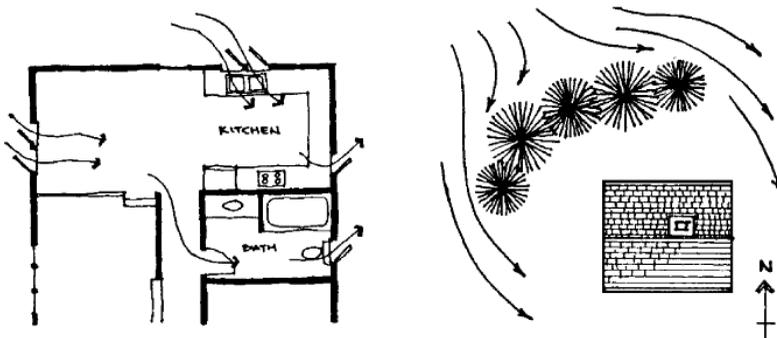


Figura 8. Setas comumente utilizadas pelos projetistas para prever o fluxo do ar no interior e ao redor dos edifícios. Fonte: CHEN (2004)

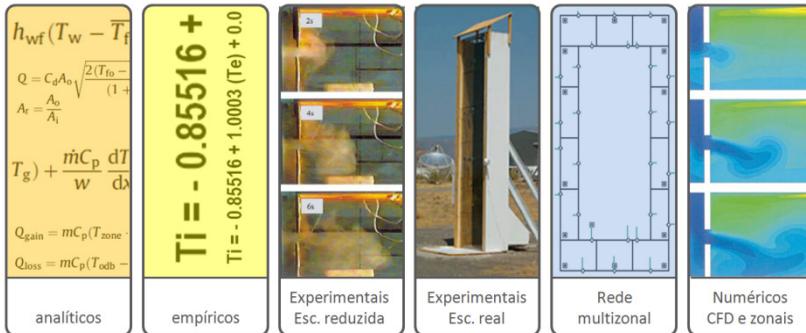


Figura 9. Quadro resumo modelos de ventilação.

2.1.8.1 Analíticos

Provavelmente são os modelos mais antigos utilizados para prever o comportamento da ventilação. Hoje em dia ainda são usados

pela sua “simplicidade”, profundidade em termos da física e os mínimos requerimentos na capacidade dos computadores. Esses modelos permitem fazer avaliações rápidas e fornecem informações gerais por meio de computadores com capacidade mínima. No entanto, eles não permitem estudar fenômenos muito complexos, já que simplificam a geometria e as condições térmicas e dinâmicas dos fluidos. Além disso, os resultados obtidos com eles podem não ser muito descritivos, as equações criadas para um caso podem não ser aplicáveis em outro caso sem as necessárias modificações, e não é possível prever a direção do escoamento. Para desenvolver um modelo analítico, é necessário considerar que isto não é uma tarefa trivial, pois requer profundos conhecimentos de matemática e física, além da capacidade para simplificar o problema.

2.1.8.2 Empíricos

Estes modelos não diferem muito dos analíticos, motivo pelo qual o desempenho deles é muito semelhante. De modo geral, os métodos empíricos utilizam mais aproximações que os modelos analíticos. Além disso, eles incorporam informações a partir de medições experimentais ou simulações computacionais, utilizando alguns coeficientes que facilitam os cálculos. Geralmente, os manuais para o cálculo de ventilação incorporam modelos empíricos devido a sua eficácia, baixo custo e facilidade de uso.

2.1.8.3 Experimentais: Escala reduzida

Os modelos experimentais podem fornecer dados confiáveis aplicáveis à realidade em tempos e custos razoáveis. Porém, é preciso manter os valores dos números adimensionais (Número de Reynolds, Grashof, Prandtl), o que pode ser um grande desafio. Uma alternativa para estudar a transferência de calor e ter uma aproximação do comportamento real dela consiste em utilizar líquidos com densidades diferentes para simular a diferença de temperatura, uma vez que isto é impossível de se fazer com estudos realizados com ar. Os resultados obtidos podem ser usados para alimentar os modelos empíricos e analíticos. No entanto, eles podem não corresponder aos apresentados na realidade. Para os projetistas que desejam aperfeiçoar seus

projetos, podem não ser práticos, por causa do grande tempo consumido para realizar um experimento. A maioria dos estudos que utilizam esses modelos tira partido deles para validar modelos analíticos, empíricos ou numéricos em vez de fazer estudos exclusivamente com eles.

2.1.8.4 Experimentais: Escala real

Estes são os modelos que podem simular as condições mais ajustadas com a realidade e fornecer dados mais confiáveis, porém, a construção de um deles nem sempre é viável. Eles podem ser divididos em duas categorias: experimento de laboratório e medição in-situ. A primeira categoria utiliza câmaras de estudo devidamente isoladas, permitindo o controle sobre muitas variáveis; a segunda utiliza espaços já construídos que tenham condições semelhantes às estudadas, embora seja quase impossível de controlá-las devido à variabilidade de um ambiente real. A maioria das medições in-situ tem sido feitas para avaliar o desempenho de edifícios existentes. Entre as dificuldades que se tem com um modelo em escala real encontram-se o fato de não estar livre de erro, a necessidade de calibrar frequentemente os equipamentos de medição e a necessidade de investir grandes períodos de tempo para coletar e processar os dados do experimento. De modo geral, tem-se a percepção de que são esses os modelos que permitem obter as predições mais reais. No entanto, eles são custosos e consomem muito tempo. Os modelos experimentais a escala real são usados com mais frequência para avaliar o desempenho de um edifício construído ou para gerar dados que validem os resultados de outros modelos.

2.1.8.5 Rede multizonal

Este tipo de modelos calcula o fluxo e transporte de ar e poluentes entre os espaços de um edifício ou entre o edifício e o exterior. Neles resolvem-se as equações de massa, energia e composição química com notável rapidez. No entanto, exigem determinados pressupostos que prejudicam a precisão. Embora sua interface para inserir dados e olhar os resultados não seja muito atraente, muitos dos projetistas especializados em ventilação têm a

percepção que estes modelos são os que fornecem a informação mais útil. Devido à agilidade com que podem ser obtidos os resultados, é possível fazer simulações anuais, facilitando a sua integração com programas que simulam o edifício por inteiro para calcular o consumo energético. Um modelo multizonal típico permite calcular o fluxo de ar e de poluentes entre várias zonas de um edifício ou entre o edifício e o exterior. Embora estes modelos não ofereçam muita informação para o cálculo de uma zona só, são uma poderosa ferramenta para calcular o fluxo de ar em grandes edifícios. Neles, assume-se que a temperatura e concentração de poluentes no ar são uniformes, o que pode produzir erros significativos em alguns casos.

2.1.8.6 Modelos numéricos

Estes modelos foram desenvolvidos devido à falta de informações detalhadas sobre a distribuição de ar em uma sala. É possível dividi-los em duas categorias: zonais e CFD.

2.1.8.6.1 Zonais

Ao contrário dos modelos multizonais, os modelos zonais não assumem que as temperaturas e os componentes do ar estejam completamente misturados. Para considerar a não uniformidade do espaço, eles dividem a zona estudada em um número de células normalmente inferior a 1000. Essa suposição pode ser válida para espaços pequenos, mas no intuito de conhecer os detalhes de uma zona de grandes dimensões os cálculos devem ser feitos considerando essas diferenças. O método zonal calcula o fluxo de ar dependendo da distribuição externa de pressões ocasionadas tanto pelo vento como pela diferença de temperaturas. No entanto, determinar a pressão externa com exatidão é uma questão muito complexa devido a sua dependência a múltiplas variáveis, tais como direção e velocidade do vento, tamanho e forma do edifício além do tamanho e localização das aberturas. Ao trabalhar com forças de momento muito fortes (movimento de ar considerável), a exatidão desses modelos é prejudicada significativamente. Isso acontece porque esses modelos estão baseados nas equações de massa e balanço de energia, mas não resolvem as equações de momento, com o intuito de diminuir o tempo

e a necessidade de processamento dos computadores. Isto faz com que os cálculos de conforto térmico feitos com estes modelos não sejam suficientes, pelo fato de não oferecerem os dados de velocidade do vento. Esses modelos são pouco utilizados em casos práticos e a literatura existente refere-se principalmente ao seu desenvolvimento. No futuro, os modelos zonais poderão ser substituídos por modelos de CFD graças ao avanço dos computadores, ao rápido desenvolvimento dos CFD's e às interfaces mais amigáveis para seus usuários.

2.1.8.6.2 CFD (*Computer Fluid Dynamics*)

Esses são os modelos que fornecem a maior quantidade de informação quantitativa sobre o desempenho da ventilação e permitem calcular a distribuição do fluxo de ar tanto para o exterior quanto para o interior. Eles são cada vez mais utilizados devido ao aumento na capacidade dos computadores, à melhora nas interfaces e aos resultados mais claros que fornece. Tais modelos resolvem equações diferenciais de massa, momento, energia, composição química e turbulência. No entanto, é necessário que o usuário possua bons conhecimentos em mecânica dos fluidos e computadores de alta capacidade. Salvo sejam validados com modelos experimentais, os resultados podem não ser adequados, o que impede a realização de análises confiáveis. O tempo de simulação necessário é muito grande. Para calcular o caudal com um modelo CFD, por exemplo, podem ser necessários dias, enquanto que um modelo multizonal pode obter o mesmo resultado em segundos. Mesmo que os modelos de CFD não possam substituir os modelos multizonais, os dois podem ser usados em conjunto para melhorar o desempenho de cada um: os CFD podem melhorar a exatidão dos multizonais e os multizonais podem reduzir o tempo de simulação dos CFD. Nos estudos feitos com CFD deve-se escolher com muita precaução o modelo de turbulência utilizado e o tamanho da rede na qual é dividido o espaço estudado. No que se refere ao modelo de turbulência, existem, de modo geral, dois modelos: LES (Large Eddy Simulation) e RANS (Reynolds Averaged Navier - Stokes). Embora os LES ofereçam resultados mais detalhados, estes requerem mais tempo de cálculo do que os RANS. Para determinar o tamanho das redes utilizadas, deve-se levar em conta a capacidade e velocidade de cálculo do computador utilizado. Para

estudos de ventilação em escala urbana, as redes não podem ser muito pequenas (devem medir alguns metros), enquanto para espaços internos a rede deve ser suficientemente pequena, a fim de dar conta dos detalhes do que acontece no interior de uma zona (a escala de centímetros). Além disso, deve-se considerar com muita precaução os limites do modelo utilizado, sendo que eles podem ter um grande impacto sobre a exatidão dos resultados da simulação.

Embora os CFD tenham sido aplicados no estudo da ventilação por mais de 30 anos, os projetistas ainda estão procurando modelos mais confiáveis e rápidos.

2.1.8.7 Considerações finais quanto aos modelos de ventilação

De modo geral Chen et al. (2010) concluem que:

Os modelos analíticos permitem fazer uma avaliação global de um sistema de ventilação, caso possam ser feitas simplificações para obter uma solução analítica. Os modelos empíricos são semelhantes aos analíticos em termos de suas capacidades, mas são desenvolvidos em conjunto com um banco de dados. Os modelos experimentais de escala reduzida podem ser úteis para avaliar problemas complexos, caso possa se manter a semelhança das características do fluido entre a realidade e o modelo. Os modelos experimentais em escala real são os mais confiáveis para prever o desempenho da ventilação, mas são custosos e requerem muito tempo para preparar o experimento e recolher os dados. Os modelos multizonais são muito úteis para projetar a ventilação de um edifício por inteiro, mas podem não fornecer informações detalhadas para uma zona em particular. Os modelos zonais podem ser úteis quando o usuário conhece com antecedência o fluxo em uma zona. Os modelos de CFD fornecem a maior quantidade de informação sobre o desempenho da ventilação e são os mais sofisticados. No entanto, devem ser validados com dados de modelos experimentais e o usuário deve possuir

sólidos conhecimentos de mecânica dos fluidos e técnicas numéricas.

Depois de revisar a literatura sobre os modelos disponíveis para o estudo da ventilação, Chen et al. (2010) conclui que “não existe um modelo universal para prever o comportamento da ventilação. A escolha do modelo depende do problema a ser estudado.”

Sendo que a escolha do modelo influencia a qualidade e exatidão na resposta obtida, é muito comum que as pesquisas em ventilação sejam feitas utilizando vários modelos simultaneamente para avaliar um mesmo problema. A comparação entre os resultados dos diferentes modelos aumenta a probabilidade de obter respostas mais semelhantes ao que ocorre na realidade.

Com base na interpretação das observações feitas por Chen (2004), Chen (2009) e Chen et al. (2010), elaborou-se a Tabela 1, onde são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada modelo: um valor “bom” está representado pelo número 1 e a cor verde; um valor “intermediário” está representado pelo número 2 e a cor amarela; um valor “ruim” está representado pelo número 3 e a cor vermelha.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos modelos disponíveis para estudar a ventilação baseado nas observações de Chen (2004), Chen (2009) e Chen et al. (2010)

Modelo	Dificuldade para configurar o modelo	Complexidade considerada do fenômeno	Tempo de cálculo	Visualização dos resultados	Precisão	Custo	Detalhamento de uma zona	Possibilidade de estudo de varias zonas	Simulação anual
Analíticos	1 *	3	1	3	2	1	3	3	-
	3 *								
Empíricos	1 *	3	1	3	3	1	3	3	-
	3 *								
Experimentais Escala reduzida	3	2	3	1	** 1	3	1	2	-
					** 3				
Experimentais Escala real	3	1	3	1	1	3	1	2	-
Rede multizonal	2	2	1	2	3	1	2	1	1
Numéricos	3	1	3	1	*** 1	2	1	1	3
					*** 3				

1	bom
2	meio
3	ruim

* 1 = Caso seja possível utilizar um modelo existente, 3 = Caso seja necessário criar o modelo.
** 1 = Caso sejam mantidos os números adimensionais, 3 = Caso não sejam mantidos os números adimensionais.
*** 1 = Caso seja calibrado com resultados de modelos experimentais ou analíticos, 3 = Caso não seja calibrado.

2.2 CLIMA

2.2.1 Classificação do clima

A palavra grega “Klima” que significa inclinação, foi o parâmetro com base no qual se fez a primeira classificação climática da qual se tem registro. Para os gregos, cada hemisfério dividia-se em três zonas levando em consideração simplesmente as diferenças latitudinais do ângulo de declinação solar: verão, intermediário e inverno. Desde essa primeira classificação até os nossos dias, tem-se incluído uma maior quantidade de variáveis que deram origem a uma série de métodos, os quais pretendem classificar com maior exatidão o clima. Entre esses métodos podemos listar o de Caldas, Lang, Schaufelberguer, Martonne, Köppen, Holdridge, entre outros. De modo geral, todos eles estão elaborados com base no comportamento médio da precipitação e temperatura. Em 1802, Francisco Jose de Caldas considerou a variação da temperatura em função da altura através de vários níveis térmicos, criando assim cinco tipos de clima: quente, moderado, frio, paramo baixo e paramo alto. Depois, em 1915, Richard Lang utiliza a precipitação anual e a temperatura média anual para estabelecer seis tipos de clima: desértico, árido, semiárido, semiúmido, úmido e superúmido. A localização de cada clima nessas categorias dependia do resultado do quociente entre a precipitação e a temperatura, o qual foi chamado de “fator de Lang”. Em 1962, Schaufelberguer misturou a classificação de Caldas e Lang obtendo 25 tipos de clima com base na elevação do local, na temperatura média anual e na precipitação mensal. Martonne utilizaria, em 1937, o “índice de aridez” para estabelecer seis classes de clima: árido, semiárido, subúmido, úmido, úmido chuvoso e úmido chuvoso sem diferenças sazonais o ano todo. Esse índice considera a precipitação total anual em (mm), a temperatura média anual em (°C) e a precipitação e temperatura média do mês mais seco. Em 1923, Köppen cria uma classificação muito mais extensa do que as anteriores, estabelecendo cinco tipos de climas, os quais, por sua vez, dividem-se em subgrupos que dão origem a treze tipos de climas. Para cada um desses treze climas, surge uma terceira categoria que permite fazer um detalhamento ainda melhor. Esse método, além de considerar a temperatura média e a precipitação, leva em conta as temperaturas mínimas e máximas. Adicionalmente, é feita

uma relação das chuvas com as estações do ano. Do mesmo modo que os métodos anteriores, Holdridge utiliza a temperatura e a precipitação para classificar o clima, conseguindo fazer coincidir os intervalos com os níveis térmicos de Caldas. Essa classificação foi feita para condições tropicais e ajusta-se muito bem para a maioria das regiões da Colômbia (IDEAM, 2005).

2.2.2 Clima quente e úmido

Segundo Bittencourt e Cândido (2006),

em climas quentes e úmidos, as flutuações diárias e sazonais da temperatura do ar são pequenas e os níveis de umidade são geralmente altos. A temperatura do ar é, em geral, menor que a temperatura da pele. O céu típico é parcialmente nublado, produzindo uma quantidade apreciável de radiação difusa e intensa luminosidade. Nestas regiões, as construções devem evitar ganhos de calor proveniente da radiação solar enquanto dissipam o calor produzido internamente (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2006).

Na Colômbia, 68,19% do território é catalogado como “quente úmido”, salientando-se que 7,65% desse total é catalogado como “quente muito úmido” (IDEAM, 2005).

2.2.3 Recomendações arquitetônicas

Com o intuito de diminuir os ganhos de calor devidos à irradiação solar, é desejável que as construções destes climas utilizem sombreamento nas fachadas e possuam superfícies com baixa absorvância. Além disso, devido ao fato de que as residências são ocupadas à noite, sugere-se empregar materiais leves para evitar o armazenamento do calor ganho nas horas com sol. A ventilação apresenta-se como uma estratégia muito efetiva para compensar as necessidades de conforto térmico.

2.3 CONFORTO TÉRMICO

Definir o conceito de conforto térmico é uma questão complexa, dado que ele depende de um conjunto de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Uma definição geral de conforto térmico tomada do ASHRAE Standard 55, estabelece que o conforto é “*A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico*” (ASHRAE, 2010). Para avaliar as condições de conforto de um determinado ambiente, existem duas maneiras de se aproximar do problema: por meio de modelos “estáticos” e modelos “adaptativos”.

2.3.1 Modelo estático

Os estudos feitos com este modelo concebem o homem como um simples receptor passivo do ambiente térmico. Para o seu cálculo é necessário considerar variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade do ar) e pessoais (atividade e vestimenta). A atividade é estimada através da taxa metabólica em W/m^2 ou MET ($1 \text{ MET} = 58 \text{ W}/m^2$) e a vestimenta é considerada através do nível de isolamento da roupa dado em CLO ($1 \text{ CLO} = 0,155 \text{ m}^2K/W$). Para desenvolver esses modelos é necessário utilizar ambientes nos quais o pesquisador tenha controle sob todas essas variáveis.

Sabe-se que quando a velocidade do ar é baixa, a percepção do conforto térmico é tão sensível à temperatura radiante quanto à temperatura do ar. No entanto, quando a velocidade aumenta, é a temperatura do ar que determina o nível de conforto atingido (CLARK, G apud Bittencourt e Cândido, 2006).

Os estudos feitos desde 1970 por Ole Fanger na Dinamarca em câmaras climatizadas, constituem a maior referência para este tipo de modelo. Baseado neles nasceu a norma internacional ISO7730 e os conceitos de PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Percentage of Dissatisfied), possíveis de serem calculados mediante equações.

2.3.1.1 Voto Médio Estimado (PMV = Predicted Mean Vote):

Este é um índice desenvolvido para determinar a sensação térmica que pode ter a maioria das pessoas em relação ao ambiente.

Para isso, existem sete possíveis sensações, as quais apontam desde muito frio até muito quente.

2.3.1.2 Percentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD= Predicted Percentage Dissatisfied):

Este índice estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente. Ele se baseia na porcentagem de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio. A sua determinação pode ser feita a partir do valor obtido no cálculo do PMV.

2.3.2 Modelo adaptativo

Alguns questionamentos quanto ao modelo estático deram origem ao enfoque adaptativo. Nestes modelos, o homem é considerado um agente ativo que interage com o ambiente em resposta às suas sensações e preferências térmicas. Contrário aos estudos realizados com o modelo estático feitos em câmaras climatizadas, estes são feitos em situações reais do cotidiano, com pessoas desempenhando suas atividades rotineiras. Os experimentos de campo têm demonstrado que a resposta térmica nesses espaços depende do clima externo, das diferentes experiências térmicas, das mudanças na vestimenta, da possibilidade de controle das janelas e das mudanças nas expectativas dos ocupantes.

2.3.2.1 ASHRAE 55 – Ambientes ventilados naturalmente

Na ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2010) existe uma seção que contempla um método de avaliação de conforto adaptativo para espaços condicionados naturalmente. Para que sua aplicação seja possível, o espaço avaliado deve cumprir as seguintes condições: deve possuir janelas que permitam ser abertas e ajustadas pelos ocupantes, ausência de sistemas de condicionamento mecânico, taxa metabólica dos ocupantes compreendida no intervalo entre 1 e 1,3 MET (58 – 75,4 W/m²) e os ocupantes devem ter a possibilidade de mudar a sua vestimenta dependendo das condições térmicas.

Através da Figura 10 que apresenta a temperatura operativa do espaço (eixo Y) e a temperatura média mensal do ar externo (eixo X), é

possível saber qual o grau de conforto térmico obtido. Caso essas duas variáveis se encontrem na faixa do centro (cor verde), significa que o 90% das pessoas estará em condições de conforto; se estiverem nas faixas extremas (cinza), o gráfico indicará uma condição na qual 80% dos ocupantes estará em conforto. Esse gráfico não é válido se a temperatura média exterior é inferior a 10°C ou superior a 33,5°C. Para fazer a avaliação de conforto através desse gráfico não é necessário considerar o nível de vestimenta, nem os valores de umidade e velocidade do ar.

A partir da versão 2010 foi possível considerar a melhoria induzida por velocidades de vento variando entre 0,15 e 3 m/s sobre as condições de conforto. Para tanto, deve ser calculada uma temperatura chamada de “SET”, na qual são consideradas as mesmas variáveis levadas em conta no modelo estático. O resultado do cálculo feito representa a temperatura equivalente do ar de um ambiente isotérmico com 50% de umidade relativa no qual uma pessoa, dependendo do nível de vestimenta que possua para uma determinada atividade, tem o mesmo estresse térmico (temperatura da pele) do que a tensão termorregulatória (umidade da pele) que o ambiente real. Por exemplo, caso a velocidade do ar mudasse de 0,15 m/s para 1 m/s e mantendo constantes os valores do resto das variáveis (temperatura do ar = 28 °C, temperatura média radiante = 28 °C, Umidade relativa = 50%, estação = verão, MET = 1,3 e CLO = 0,8), a temperatura SET poderia diminuir de 29,9 °C para 27,5 °C (2,4 °C de diferença).

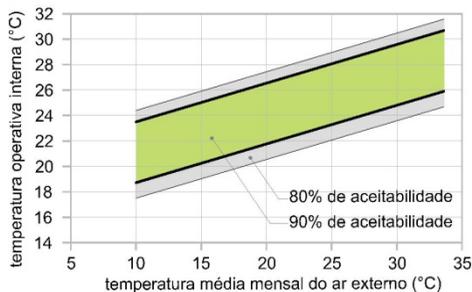


Figura 10. Faixas aceitáveis de temperatura para ambientes ventilados naturalmente. Fonte: Adaptado (ASHRAE, 2010).

2.3.3 Carta bioclimática

Tomando como base a carta psicrométrica na qual se apresentam as principais características do ar úmido, é possível considerar as condições ambientais e as necessidades de conforto das pessoas, junto com as estratégias que devem ser utilizadas para adequar a arquitetura ao clima. Essa ferramenta é chamada de “carta bioclimática” e foi criada por Givoni no ano 1969. Ela está dividida em nove zonas: (1) zona de conforto, (2) zona de ventilação, (3) zona de resfriamento evaporativo, (4) zona de massa térmica para resfriamento, (5) zona de ar condicionado, (6) zona de umidificação, (7) zona de massa térmica para aquecimento, (8) zona de aquecimento solar passivo e (9) zona de aquecimento artificial (Figura 11). No ano de 1992 foi feita uma atualização dessa carta para ser utilizada em edificações naturalmente ventiladas, sendo que nelas os seus habitantes aceitam maiores temperaturas e velocidades do ar. Desta maneira foi possível expandir os limites máximos da zona de conforto da primeira carta.

No eixo X é apresentada a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), no eixo Y do lado direito se tem a razão de umidade (w_a), no eixo Y do lado esquerdo encontra-se a pressão parcial de vapor de água (p_a) e um terceiro eixo inclinado apresenta a temperatura de bulbo úmido. Além disso, existem curvas que atravessam a carta e que representam a umidade relativa do ar. Através dessa variável é possível conhecer o grau de saturação de umidade do ar para uma determinada combinação das temperaturas de bulbo úmido e seco.

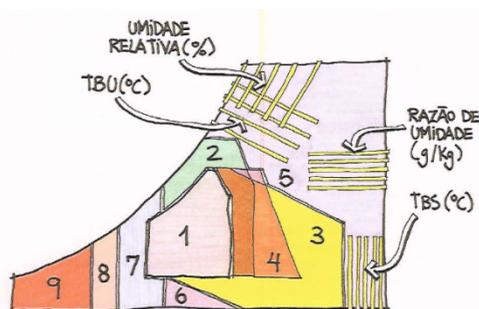


Figura 11. Carta bioclimática. Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (1997)

2.4 POTENCIAÇÃO DA VENTILAÇÃO POR DIFERENÇA DE TEMPERATURAS.

Dado que existem regiões de clima quente e úmido onde as correntes de vento não podem ser consideradas um recurso efetivo para suprir as necessidades térmicas e de higiene das pessoas, é necessário explorar os alcances que pode ter a ventilação gerada pela diferença de temperatura.

No entanto, estudos como o de Liu, Lin e Chou (2009) demonstram que ventilar um espaço localizado em uma região de clima quente e úmido somente através da diferença de temperaturas não produz efeitos consideráveis sobre o conforto térmico. Nesse estudo, avaliou-se o desempenho que poderia ter a ventilação pela diferença de temperaturas no interior de um edifício localizado no clima quente e úmido de Tainan, em Taiwan. O prédio tinha três andares, ligados uns aos outros através de um átrio de 16 m de altura. As temperaturas do ar superavam facilmente os 35°C. Utilizando simulações numéricas com CFD e modelos experimentais de escala reduzida, os autores concluíram que o desempenho da ventilação por diferença de temperatura em um clima quente e úmido é insuficiente para reduzir a temperatura do ar interno a um valor que possa ser considerado confortável (Figura 12). O fato de haver um diferencial térmico muito baixo entre o interior e o exterior dos espaços construídos nessas condições climáticas faz com que a efetividade dessa estratégia seja muito limitada. Resultados como os desse estudo permitem intuir que em espaços de menor altura, como os que se pretendem analisar na presente pesquisa, não se poderia esperar um desempenho superior. Conforme a altura diminui, também diminui a diferença de temperaturas ao longo da altura do edifício, perdendo-se força para renovar o ar interior.



Figura 12. Distribuição de temperaturas com valor de temperatura ambiente de 25°C. Fonte: LIU; LIN; CHOU (2009)

Considerando que geralmente o diferencial térmico apresentado entre o interior e o exterior de um espaço localizado em um ambiente de clima quente e úmido é muito baixo e que isto diminui a capacidade da ventilação por diferença de temperatura para melhorar o desempenho de um espaço, é necessário incorporar estratégias que permitam aumentar esse diferencial. Uma alternativa para aumentar esse diferencial é adotar estratégias que utilizam o aquecimento solar. Elas são conhecidas como chaminés solares (Figura 13) e podem ser utilizadas em tetos, paredes e chaminés (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006). Quando a temperatura do ar aumenta, sua densidade diminui. Isso faz com que o ar mais quente suba e saia pela parte superior da chaminé. O ar que sai pela chaminé é substituído pelo ar externo que entra no edifício através das aberturas. Quanto menor a temperatura do ar externo, mais efetivo será o resfriamento natural produzido por esta renovação.

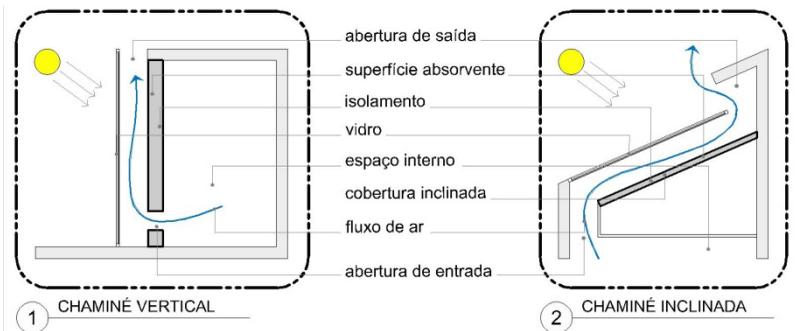


Figura 13. Tipos de chaminés solares. Fonte: Adaptado (KHANAL; LEI, 2011)

Devido à grande quantidade de informações referentes às chaminés solares, nas quais se analisam muitas de suas variáveis, apresenta-se na sequência uma compilação dos temas mais relevantes para a presente pesquisa. Os temas estão organizados em subseções nas quais se agrupam os diferentes artigos relacionados com um mesmo assunto.

2.4.1 Insuficiência das técnicas passivas

Com a revisão da bibliografia sobre as chaminés solares apresentada na presente pesquisa, pode-se concluir que as condições ambientais obtidas com o uso dessa estratégia não são suficientes para oferecer espaços confortáveis. Khedari, Boonsri e Hirunlabh (2000) apresentaram uma coletânea sobre pesquisas feitas desde o ano de 1997, com modelos em escala natural, estudando o efeito da utilização de quatro chaminés solares juntas para induzir a ventilação em uma sala de 25m³ (Figura 14). Os tipos de chaminés analisados foram: chaminé solar de teto, parede Trombe alterada, parede Trombe e parede solar metálica. Apesar dos aumentos significativos nas trocas de ar por hora (entre 8 e 15 vezes a mais de ACH) e da redução no superaquecimento dos espaços em quase 50%, os autores concluem que essas estratégias não são suficientes para satisfazer as necessidades de conforto térmico em um clima quente e úmido, onde a temperatura de um ambiente fica por volta de 35°C. He et al. (2001) avaliaram uma residência na cidade de Nanning, na China, de clima quente e úmido, a qual possuía uma chaminé solar de teto em combinação com uma outra chaminé convencional, podendo remover

parte do calor do espaço mediante a ventilação da envoltória. Mesmo utilizando outras estratégias passivas de resfriamento e sem considerar a carga térmica interna de uma residência, os autores concluíram que as estratégias passivas de resfriamento não oferecem condições suficientes para atingir conforto térmico em edificações localizadas em um clima quente e úmido.

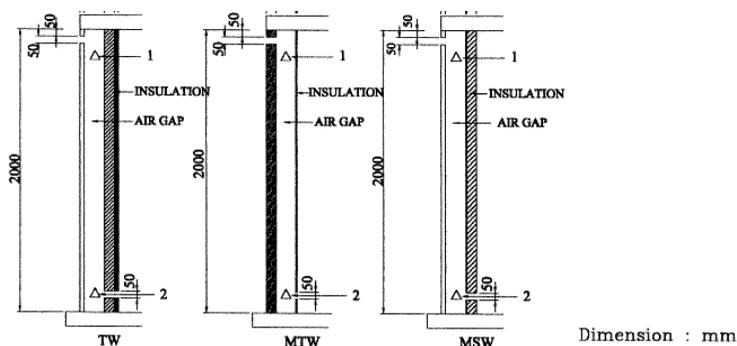


Figura 14. Três dos quatro tipos de chaminés avaliadas e posição das medições feitas. Fonte: KHEDARI; BOONSRI; HIRUNLABH (2000)

2.4.2 Velocidades muito baixas

Dentro de certo limite de valores acima das temperaturas consideradas confortáveis, é possível gerar sensações de resfriamento devido ao movimento do ar. A maior velocidade do ar permite remover o ar quente que fica perto da pele e evaporar o suor com maior efetividade. Embora isso possa acontecer, as velocidades do ar obtidas com chaminés solares são muito baixas, motivo pelo qual não se podem esperar melhorias significativas para o conforto.

De acordo com relatos de muitas pesquisas feitas com múltiplos métodos para estudar a ventilação (analíticos, experimentais, de rede e CFD), as velocidades obtidas com chaminés solares não excedem valores de 1m/s. A seguir, apresentam-se alguns desses valores junto com a referência do estudo correspondente: Velocidades entre 0,02 – 0,09 m/s (KHEDARI; BOONSRI; HIRUNLABH, 2000); velocidade máxima de 0,39 m/s (ONG; CHOW, 2003); velocidade máxima de 0,24 m/s (BANSAL et al., 2005); velocidade máxima igual a 0,58 m/s (NUGROHO; HAMDAN, 2006); para alturas inferiores a 8m se apresentaram velocidades abaixo de 1 m/s e só para chaminés de 12m foi possível

obter velocidades máximas de 1,4 m/s (SAKONIDOU et al., 2008); velocidades inferiores a 1 m/s (LIU; LIN; CHOU, 2009). Na Figura 15 é possível verificar alguns desses valores, dependendo do comprimento utilizado na chaminé. É curioso observar como através da profundidade da chaminé o perfil de velocidades varia dependendo do tipo de superfície com a qual o ar está em contato. A superfície absorvente possui uma temperatura maior, o que faz com que o ar atinja uma velocidade ligeiramente superior à velocidade apresentada perto do vidro devido à influência da camada limite térmica. Por sua vez, no centro das chaminés de maior comprimento o ar atinge as maiores velocidades devido à menor influência da camada limite cinética.

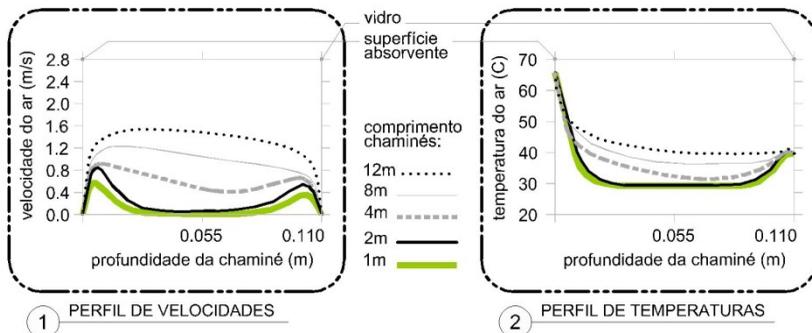


Figura 15. Perfil de velocidades e temperaturas através da câmara de ar. Fonte: Adaptado (SAKONIDOU et al., 2008)

2.4.3 Critério de avaliação

No desafio de condicionar um espaço é importante determinar adequadamente os parâmetros e locais a serem avaliados, visando obter a maior influência na zona habitada pelos ocupantes. É preciso ter em mente que o critério para determinar a conveniência de uma determinada estratégia deve estar ligado ao comportamento apresentado na zona habitada pelas pessoas. Uma avaliação feita para o comportamento geral do espaço não irá necessariamente satisfazer a zona na qual as pessoas estão localizadas.

Este fato é ilustrado claramente por Ziskind, Dubovsky e Letan (2002) através das avaliações feitas para várias opções de chaminés solares em tetos e paredes (Figura 16). De acordo com os resultados de seus estudos, eles constataram que uma chaminé de duto duplo tem

melhor desempenho do que uma chaminé de duto simples do ponto de vista da temperatura, embora ela diminua as trocas de ar por hora por causa da resistência hidráulica gerada. O fator que muda o comportamento entre as duas configurações é a localização da abertura de entrada de ar na chaminé: perto do teto para o caso do duto duplo e perto do chão para o caso de duto simples. Utilizando o duto duplo, evitam-se pontos de estancamento na zona superior do espaço e atinge-se uma temperatura média menor. Resultados como esse constituem um alerta nos estudos de ventilação, os quais, de modo geral, afirmam que tirar maior quantidade de ar de um espaço é o único parâmetro necessário para avaliar uma determinada estratégia. Além das trocas de ar por hora, devem ser consideradas outras variáveis, tais como o local do qual o ar é captado, quais as temperaturas na zona ocupada, velocidades do ar atingidas, etc. Seguindo esses critérios apoiados em uma quantidade considerável de outras pesquisas relacionadas com chaminés solares ao longo dos últimos 20 anos, Khanal e Lei (2011) afirmam que a maioria desses estudos está focalizada em incrementar a vazão de ar mediante a otimização do desenho. Porém, só um estudo tratou sobre o nível desejado de trocas de ar por hora em um espaço ventilado naturalmente. Os autores criticam o fato de não haver clareza de parâmetros nem diretrizes que devam ser adotadas para avaliar um sistema de ventilação. Esta pode ser uma futura área de aprofundamento nas pesquisas.

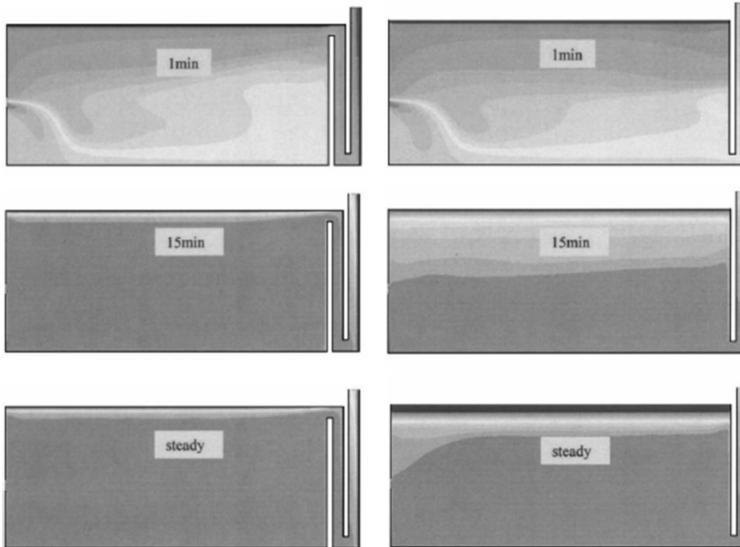


Figura 16. Comparação da distribuição de temperaturas ao longo do tempo para dois tipos de chaminés (Esquerda = Chaminé duto duplo; Direita = Chaminé de duto simples). Fonte: ZISKIND; DUBOVSKY; LETAN (2002)

2.4.4 Incertezas nas especificações ideais

As pesquisas sobre chaminés solares demonstram a importância de estudar em detalhe as relações entre as dimensões dos componentes destes sistemas e as propriedades térmicas dos materiais empregados na sua construção, para obter melhores desempenhos. Ao longo de todos os artigos revisados na presente pesquisa foram analisados diferentes parâmetros, incluindo comprimento, largura, área e inclinação da chaminé, profundidade da câmara de ar, localização e tamanho das aberturas de saída e entrada de ar na chaminé, propriedades dos materiais (absortância da superfície absorvente e transmitância do vidro). Porém, como é estabelecido por Khanal e Lei (2011), mesmo com a grande quantidade de pesquisas feitas em chaminés solares ao longo dos últimos 20 anos, existem afirmações contraditórias, as quais indicam que essa estratégia não tem sido completamente entendida. Dentre os possíveis motivos para que existam tantas diferenças entre as pesquisas, pode-se listar a grande variedade de modelos disponíveis para estudar as chaminés

solares, as variações no tipo de espaço avaliado e a latitude e clima do local no qual se encontra localizada a chaminé. Para ilustrar essas diferenças, apresenta-se na sequência um resumo das conclusões de vários estudos em relação à profundidade ótima da câmara de ar. Do mesmo modo que acontece com a profundidade da câmara de ar, para os demais parâmetros encontra-se resultados com grandes variações ou, de forma contrária, pouco explorados.

De acordo com o estabelecido por Khanal e Lei (2011), uma profundidade de 0,3m para a câmara de ar parece ser a dimensão ideal a ser utilizada em chaminés solares. Ong e Chow (2003) complementam que, para um aumento de 0,1m para 0,3m na profundidade de câmara de ar, a velocidade do fluxo incrementou-se de 0,25m/s para 0,39m/s com uma intensidade de radiação solar de 650W/m². De modo semelhante, Mathur et al. (2006), Miyazaki, Akisawa e Kashiwagi (2006), e Arce et al. (2009) reportaram a profundidade de câmara de ar de 0,3m como sendo a dimensão ideal para se obter a máxima quantidade de trocas de ar por hora (Tabela 2). No estudo de Mathur et al. (2006), a maior quantidade de “trocas de ar por hora” induzida através da chaminé sob um espaço de 27m³ e considerando um valor de irradiação de 700 W/m² foi de 5,6 trocas. Nos resultados apresentados por Neves e Roriz (2011), o aumento na profundidade da câmara do ar sempre produziu um aumento na vazão mássica dada em (kg/s). Para essa pesquisa, o aumento de 0,1m para 0,35m incrementou a vazão em 135%, e o aumento de 0,35m para 0,6m produziu um incremento na vazão de 44% (Figura 17). A quantidade de trocas de ar produzidas pela chaminé sob um espaço de 32,4m³ localizado em Belém, PA, oscilou entre 2,4 e 11,3 para o horário de maior ganho de calor por irradiação equivalente às 12 horas. No entanto, os autores detectaram que após determinado valor de profundidade, a temperatura do ar contido na chaminé diminuía devido ao ingresso de ar externo de menor temperatura. De modo semelhante, Chen et al (2003) observaram fluxos reversos para câmaras de ar com profundidade igual a 0,4m através de modelos experimentais.

Por outro lado, enquanto a maioria das pesquisas observou que a profundidade da câmara de ar é o parâmetro que tem maior influência na vazão de ar, Lee e Strand (2009) apontam que esse é o parâmetro de menor influência sobre o desempenho desta variável.

Tabela 2. Resultados experimentais e teóricos do cálculo de “trocas de ar por hora” para diferentes espessuras de câmaras de ar em função dos valores de irradiação solar. Fonte: MATHUR et al. (2006)

Air gap (d) (m)	ACH at 300 W/m ²		ACH at 500 W/m ²		ACH at 700 W/m ²	
	Exp.	Theo.	Exp.	Theo.	Exp.	Theo.
0.1	3.2	2.406	4.0	3.09	4.4	3.524
0.2	4.0	3.619	5.2	4.205	5.2	4.942
0.3	4.4	4.173	4.8	5.160	5.6	5.810

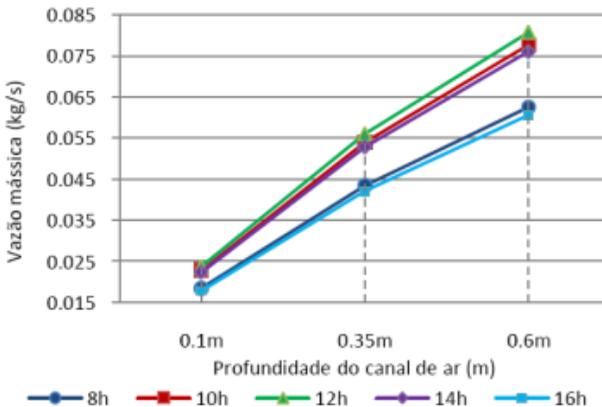


Figura 17. Aumento do fluxo do ar dependendo da profundidade da câmara de ar da chaminé. Fonte: NEVES; RORIZ (2011)

2.4.5 Risco de aquecimento

Embora as chaminés solares sejam consideradas como estratégia de resfriamento, Miyazaki, Akisawa e Kashiwagi (2006) alertam, mediante simulações de CFD, que elas podem aumentar a carga de refrigeração de um espaço em 12%. De modo semelhante, Naranjo, Lamberts e Versage (2011) detectaram ganhos de calor em uma chaminé nas horas de maior temperatura (13:00 h – 16:00 h) utilizando o modelo criado por Lee e Strand (2009) para simular uma chaminé solar no software Energyplus (Figura 18). Neste estudo os autores avaliaram os efeitos ocorridos quando modificados alguns dos parâmetros geométricos de uma chaminé vertical, entre eles o

tamanho das aberturas de entrada e saída. Variando as aberturas desde um valor de $0,02\text{m}^2$ até $0,08\text{m}^2$, conclui-se que quanto maior é o tamanho das aberturas, maior será o ganho de calor ao meio-dia. Neste trabalho foram anuladas as velocidades de vento no intuito de avaliar o efeito da ventilação por diferença de temperaturas com independência do vento.

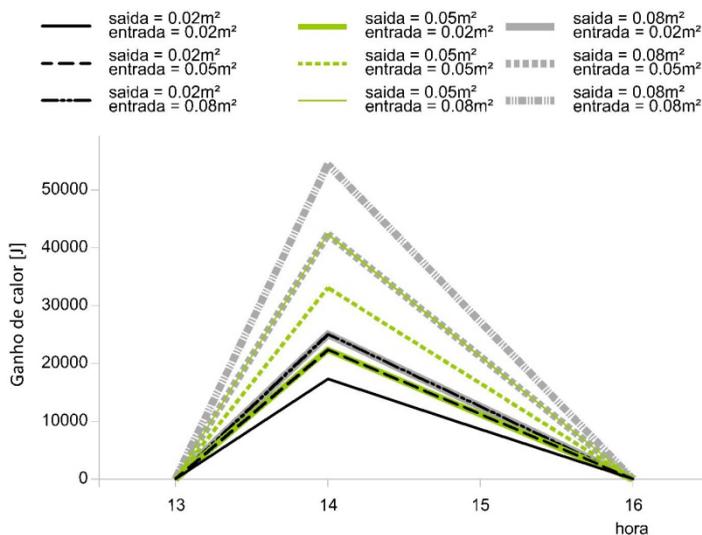


Figura 18. Ganhos de calor dependendo do tamanho das aberturas de entrada e saída de uma chaminé vertical de 6m de pé direito localizada em São Luis, MA – Brasil. Fonte: NARANJO; LAMBERTS; VERSAGE (2011)

2.4.6 Maior captação de irradiação não gera mais ventilação

Coletar maior quantidade de irradiação permite elevar ainda mais a temperatura do ar, podendo melhorar, conseqüentemente, o desempenho da ventilação por diferença de temperaturas. No entanto, deve-se ter cuidado na forma utilizada para captar mais irradiação. Um dos métodos identificados na literatura para aumentar a quantidade de irradiação consiste em inclinar a parte da chaminé através da qual é coletada a irradiação solar. No entanto, como explicado por Sakonidou et al. (2008), quando a chaminé é inclinada, ocorrem dois fenômenos que atuam em direções opostas em relação ao fluxo de ar. No caso de uma latitude tropical, mesmo que uma inclinação menor em relação à

horizontal permita coletar maior irradiação (Figura 19), esse artifício diminui a pressão dentro da chaminé devido à diminuição da distância vertical entre a abertura de entrada e saída da chaminé. O efeito dessa diminuição fará com que o fluxo de ar que circula através da chaminé seja reduzido. De modo contrário, uma maior inclinação permite ter maior diferença de altura entre as aberturas da chaminé, porém o ganho de calor por irradiação diminui. Na Equação 2, verifica-se que quando o ângulo de inclinação é menor, o valor do termo “altura chaminé” ($L_s \sin\theta$) irá diminuir e, conseqüentemente, o fluxo de ar será menor.

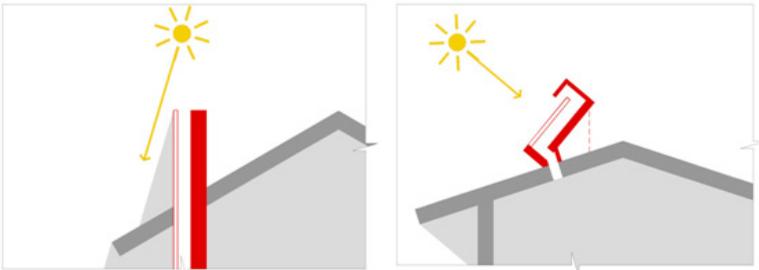


Figura 19. Aproveitamento da irradiação solar segundo o tipo de chaminé solar em função da trajetória aparente do sol nas latitudes tropicais

Equação 2. Cálculo da vazão de mássica de ar através da chaminé. Fonte: MATHUR, MATHUR e ANUPMA (2006)

$$m = C_d \rho_{f1} A_0 \sqrt{\frac{2gL_s \sin \theta (T_f - T_r)}{(1 + A_r^2) T_r}}$$

Sendo

- m Vazão mássica
- C_d Coeficiente de descarga (0.57)
- ρ_{f1} Densidade do ar
- A_0 Área secção transversal da abertura de saída (m^2)
- g Gravidade
- L_s Altura da chaminé (m)
- θ Ângulo de inclinação em relação à superfície horizontal ($^\circ$)
- T_f Temperatura média do ar no interior da chaminé (K)
- T_r Temperatura do ambiente (K)
- A_r Relação entre a área da abertura de entrada e a de saída

Essas evidências sugerem que deve haver uma inclinação ideal que produza o maior fluxo de ar, capturando a máxima quantidade de irradiação para uma diferença de altura aceitável entre as aberturas da chaminé. Uma inclinação ideal para capturar mais irradiação é diferente da inclinação ideal para atingir vazões e velocidades superiores no ar que circula pela chaminé.

Nessa abordagem, Mathur, Mathur e Anupma (2006) tentam averiguar a relação entre a vazão de ar obtida para uma determinada inclinação de uma chaminé solar. De modo geral, eles concluem que a inclinação ideal para uma chaminé solar varia entre 40° e 60°, dependendo da latitude do local. Na Tabela 3, apresentam-se os valores de inclinação sugeridos pelos autores de acordo com a latitude. Confirmando os resultados encontrados em pesquisas anteriores, Chen et al. (2003) e Mathur, Anupma e Mathur (2006) apresentam conclusões semelhantes para as latitudes específicas onde são realizados os seus respectivos estudos. Em Chen et al. (2003), reportou-se, mediante pesquisas experimentais, que o fluxo máximo de ar é atingido com uma chaminé inclinada em um ângulo de 45°, o qual pode gerar um fluxo 45% maior que aquele obtido com uma chaminé vertical em condições idênticas. Por outro lado, Mathur, Anupma e Mathur (2006) determinam que a taxa de ventilação pode aumentar em 15,94% com a chaminé inclinada em um ângulo de 45°. No entanto, é preciso esclarecer que, caso a inclinação seja mantida constante, o aumento na irradiação aumentará de forma linear o fluxo de ar, conforme observado por Mathur et al. (2006).

Tabela 3. Variação do ângulo de inclinação ótimo da chaminé solar dependendo da latitude. Fonte: Adaptado (MATHUR, MATHUR e ANUPMA, 2006)

Latitude (°)	Inclinação ótima da chaminé(°)
0	55
5	50
10	50
15	50
20	45
25	45
30	45
35	50
40	50
45	55
50	55
55	60
60	60
65	60

Neves e Roriz (2011) avaliam os efeitos produzidos pela mudança na inclinação da chaminé de um valor de 17° para 45°. O valor de 17° corresponde ao ângulo ótimo de inclinação para obter a máxima irradiação na chaminé solar para o mês de novembro em Belém, PA às 12h. O valor de 45° representa uma inclinação que permite aumentar a distância vertical entre as aberturas, mesmo que diminua o ganho de calor por irradiação. Adicionalmente, além dessas duas inclinações, considera-se um terceiro tipo de chaminé que utiliza a inclinação sob a qual se absorve maior irradiação (17°) e adiciona-se um extensor de modo que se atinja a mesma distância vertical entre as aberturas de saída e entrada da chaminé de 45° (Figura 20). Os resultados constatam que a melhor chaminé foi aquela de 45°, no entanto a chaminé de 17° com o extensor permitiu atingir um desempenho semelhante ao dessa chaminé. Inclinando a chaminé em um ângulo de 45°, obteve-se um incremento entre 28-30% na vazão mássica em comparação com a chaminé inclinada em 17° sem extensor. Por sua vez, a chaminé de 17° com extensor permitiu aumentar a vazão entre 16-27% (Figura 21).



Figura 20. Variação no ângulo de inclinação da chaminé. Fonte: NEVES; RORIZ (2011)

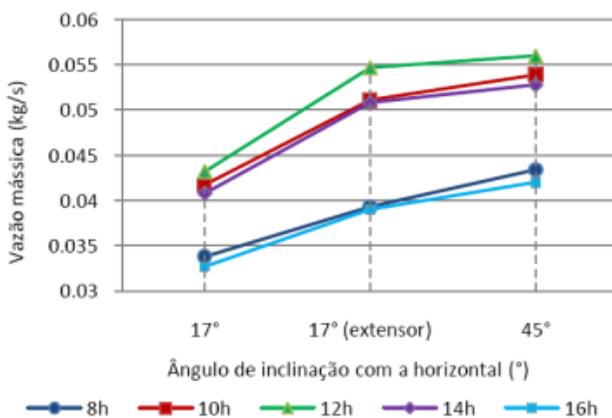


Figura 21. Aumento do fluxo de ar dependendo da inclinação da chaminé. Fonte: NEVES; RORIZ (2011)

2.4.7 Importância relativa das simulações anuais

O período de tempo escolhido para avaliar uma determinada estratégia tem uma influência muito importante sobre as conclusões que podem ser obtidas. Por esta razão, Lee e Strand (2009) fazem uma comparação entre os resultados das simulações feitas somente para um dia de clima moderado, com as simulações anuais de três chaminés solares localizadas em três cidades diferentes dos Estados Unidos. As diferenças entre os resultados para ambos cenários demonstram a necessidade de ir além da simulação para um dia só. Mesmo que existam chaminés com desempenho superior em relação às outras para as avaliações diárias, quando comparados esses resultados com simulações anuais, a classificação do desempenho entre elas pode ser

invertida completamente por causa das variações no clima ao qual a chaminé é exposta. Uma comparação entre os resultados dependendo do período de tempo considerado (Tabela 4) evidencia como nas simulações realizadas para um único dia na cidade de Spokane foi possível reduzir a carga de resfriamento em 69,18%, enquanto que na simulação anual essa redução caiu para 20,44%. Em Minneapolis, a redução para a simulação de um único dia foi de 33,4%, mas na simulação anual, a carga de resfriamento reduz em 13%. Em Phoenix, tinha-se uma redução de 6,64% para um único dia, e de 18,93% para a simulação anual. Com base nessas evidências, conclui-se que um estudo anual permite fazer leituras mais adequadas comparando-se com as que poderiam ser feitas por meio de uma simulação diária quanto à aplicabilidade de uma determinada tecnologia. No entanto, a realização de estudos anuais pode demandar muitos recursos (tempo, dinheiro, aquisição de dados, etc), dependendo do método utilizado. Embora as simulações anuais sejam muito importantes, até a presente data existe apenas um modelo disponível para simular chaminés solares no software Energyplus, criado por Lee e Strand (2009), razão pela qual é necessário fazer mais pesquisas no desenvolvimento de modelos que permitam entender melhor o comportamento das chaminés solares. Contudo, vale ressaltar que, em climas quentes e úmidos, as diferenças entre o comportamento diário e o anual são diminuídas. Dessa maneira é possível conhecer o comportamento anual multiplicando o comportamento diário.

Tabela 4. Redução da carga de resfriamento dependendo do período de tempo considerado na simulação. Fonte: Adaptado (LEE; STRAND, 2009)

Cidade	Carga de resfriamento (kWh)					
	Simulação dia de projeto			Simulação ano inteiro		
	Sem chaminé	Com chaminé	% redução	Sem chaminé	Com chaminé	% redução
Minneapolis	19,692	13,112	33,4%	4,602,496	4,002,917	13%
Spokane	16,109	4,965	69,18%	3,563,572	2,835,182	20,44%
Phoenix	38,218	35,679	6,64%	15,176,508	12,302,837	18,93%

2.4.8 Isolamento da chaminé em relação ao espaço interno

Quando se deseja utilizar chaminés solares para melhorar a ventilação de um edifício, deve-se garantir que as altas temperaturas do ar no interior da chaminé e das superfícies próximas estejam

devidamente isoladas do ambiente interno. He et al. (2001) apresentam um bom exemplo através de medições feitas em uma residência em escala real. Neste experimento, apesar de se atingir valores de temperaturas do ar de 75°C ao meio dia na câmara de ar localizada sob a superfície de metal de um telhado solar, a temperatura da face interna do telhado varia ligeiramente ao longo do dia atingindo valores entre 31° e 32,5°C. Isto é possível porque a maior parte do calor coletado no teto fica armazenado na câmara de ar graças às propriedades isolantes dos materiais empregados (Figura 22).

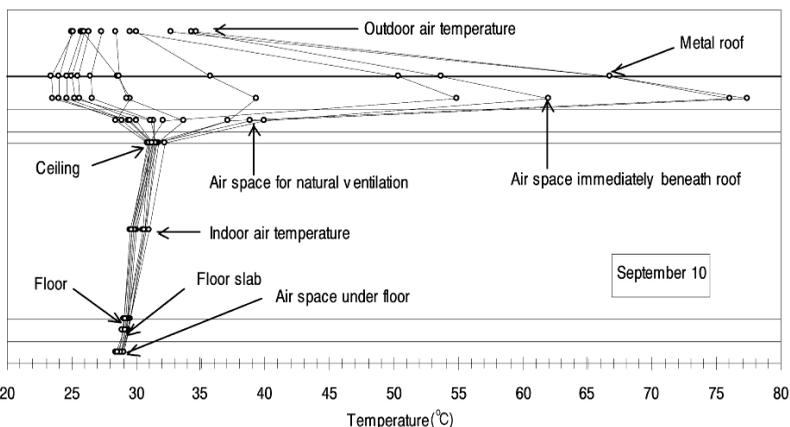


Figura 22. Distribuição de temperatura desde o teto até o chão. Fonte: HE et al. (2001)

2.4.9 Irradiação solar

Considerando que em um clima quente e úmido é comum ter condições de céu com muitas nuvens, Yussuf et al. (2010) avaliaram o desempenho de dois tipos de chaminés solares durante os meses de menor quantidade de irradiação solar, a fim de assegurar o desempenho nos outros meses do ano com maior quantidade de irradiação. Utilizando modelos experimentais em escala reduzida inseridos em um ambiente real, estudou-se o efeito de utilizar uma chaminé solar de teto em combinação com outra chaminé para potencializar a ventilação pelo efeito chaminé na Malásia. Os resultados mostram que, em condições de céu encoberto, os dispositivos possuem capacidade de induzir a ventilação pelo efeito

chaminé, diminuindo a temperatura interna às 14 horas em 6,2 °C (39,3 °C – 33,1 °C), e em até 8,5 °C em condições de céu semi-aberto, às 13 horas (Figura 23)

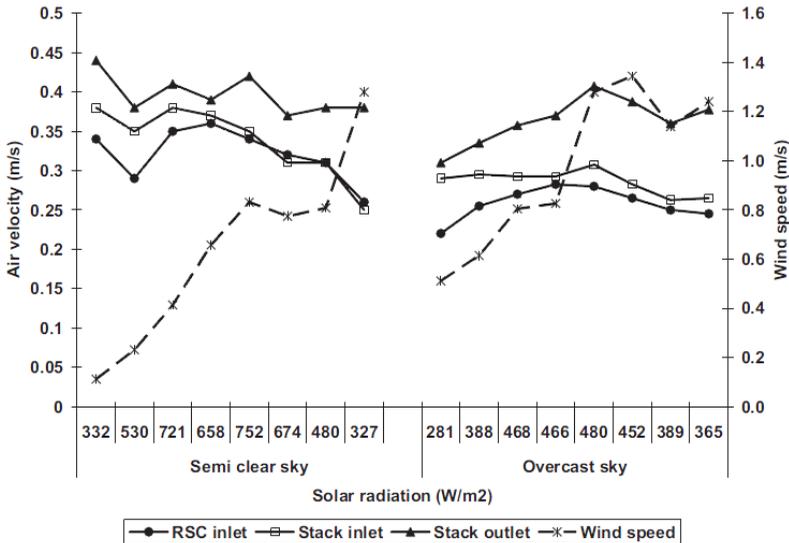


Figura 23. Velocidade de ar induzida pelo protótipo A para condições de céu semiaberto e escuro (com nuvens = overcast). Fonte: YUSSOF et al. (2010)

2.4.10 Combinação de estratégias

Embora alguns dos estudos revisados sobre chaminés solares concluam que não é possível obter condições de conforto suficientes através do uso delas, é possível melhorar o seu desempenho quando combinadas com outras estratégias. Chungloo e Limmeechokchai (2007) estudaram o efeito de uma chaminé solar combinado com a irrigação de água no teto na Tailândia. Quando era utilizada a chaminé sozinha, a maior diminuição de temperatura no interior do espaço era de 3,5°C em relação aos 40°C do exterior. No entanto, quando eram utilizadas as duas estratégias ao mesmo tempo, conseguiu-se diminuir a temperatura em 6,2°C.

2.4.11 Integração de chaminés solares em um edifício real

Algumas estratégias de condicionamento podem criar complicações quando integradas em um edifício real, devido à necessidade de se fazer mudanças significativas na configuração do espaço. No caso dos edifícios que utilizam chaminés, é necessário considerar sua presença desde as primeiras etapas do projeto, sendo que elas têm um grande protagonismo na aparência final do prédio.



Figura 24. Esquerda: BRE Building, Direita: BSKyB - Harlequin 1

No intuito de facilitar a integração das chaminés solares em residências, Khedari, Hirunlabh e Bunnag (1996) e Mathur et al (2006) restringiram o comprimento das chaminés usadas nos seus experimentos para um valor máximo de 1m. É interessante a ideia desenvolvida neste último estudo, porque as chaminés propostas nele são susceptíveis de serem integradas nas janelas de uma residência típica sem que isso ocasione grandes mudanças estruturais. Desta forma, haveria proteção para as horas em que a irradiação solar direta incide, sem perder a possibilidade de ventilação através das janelas.

2.4.12 Modelos para estudar chaminés solares

O trabalho feito por Khanal e Lei (2011) permite reconhecer as pesquisas produzidas desde o ano de 1990 em relação às chaminés solares. Os autores apontaram que os modelos mais utilizados em todas essas pesquisas são os experimentais, devido à possibilidade que oferecem de validar com maior confiabilidade os modelos analíticos e numéricos. Nesse estudo, percebeu-se que há uma tendência de se adotar cada vez mais métodos numéricos, mesmo que isto possa prejudicar a confiabilidade dos resultados. Uma das principais razões para que isso aconteça pode ser a flexibilidade oferecida por esta classe de modelos para variar a geometria e outros parâmetros a serem estudados. A Figura 25 mostra que cerca de 23% dos estudos revisados têm utilizado técnicas puramente numéricas. No entanto, informações experimentais de qualidade sempre serão necessárias para validar os resultados de CFD.

Dado que os modelos analíticos são criados a partir de pressupostos simplificados, eles geralmente apresentam limitações, e algumas delas são especificadas por Khanal e Lei (2011) especificam algumas dessas limitações. A maioria destes modelos resolve o cálculo do fluxo de ar e as equações de balanço energético utilizando o método de diferenças finitas. Um dos pressupostos utilizados por esse método, que considera que a temperatura é uniforme ao longo da largura, pode não ser válido para chaminés mais amplas (DIMOUDI, 2009). Além dos fatores expostos acima, o efeito da radiação é geralmente negligenciado na maioria destes modelos, ignorando o fato de que a transferência de calor nas chaminés solares é conjugada em muitos casos. Nouanégué e Bilgen (2009) demonstraram que a radiação da superfície muda o fluxo e o campo de temperatura no interior da chaminé solar, o que acaba afetando o número de Nusselt e a vazão de volume. Por outro lado, há discussões sobre a adequação de certas expressões para prever a taxa de fluxo de massa (CHEN et al., 2003). Além disso, o fenômeno para o fluxo reverso perto da abertura de saída nas chaminés mais amplas ainda não foi explicado por esta classe de modelos. Assim, têm-se levantado mais discussões sobre a precisão de tais modelos.

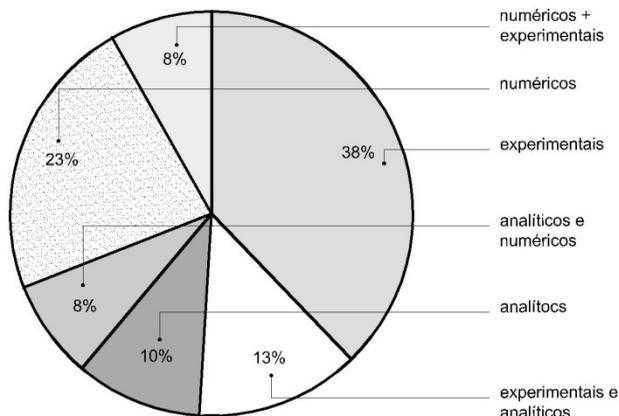


Figura 25. Participação das diferentes abordagens disponíveis para estudar chaminés solares. Fonte: Adaptado (KHANAL; LEI, 2011)

No Brasil várias pesquisas têm sido feitas acerca das chaminés solares, utilizando protótipos e simulações computacionais, além de alguns modelos matemáticos serem criados. Cavalcanti e Roriz (2011) desenvolveram um modelo empírico para prever a temperatura do ar interior na chaminé e calcular a vazão obtida através dela. As equações resultantes desse modelo foram criadas por meio de regressão estatística dos resultados obtidos nas simulações feitas com o programa Energyplus. Os autores verificaram que os resultados obtidos através das simulações feitas utilizando o módulo “Air flow network” do Energyplus tinham semelhança com os dados experimentais apresentados por Mathur et al (2006) para a cidade de Jaipur, na Índia. Tendo calibrado o modelo do Energyplus, Cavalcanti e Roriz (2011) avaliaram o efeito das chaminés solares para as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Por outro lado, Neves e Roriz (2011) adotaram equações desenvolvidas por outros autores, para fazer análises de diferentes configurações geométricas e construtivas de chaminés solares. Além disso, testaram diferentes alternativas para obter algumas das variáveis solicitadas nessas equações, tais como o coeficiente de transferência de calor por convecção, a temperatura do céu e a vazão mássica. Assim como no trabalho anterior, o modelo matemático utilizado foi calibrado em função das medições experimentais de Mathur et al (2006).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica deste trabalho apresentou conceitos teóricos da ventilação, clima e conforto térmico, assim como alguns dos estudos realizados com o intuito de potenciar a ventilação por diferença de temperatura.

Os estudos precedentes estabelecem claramente o rigor das condições quentes, úmidas e sem vento, além de comprovarem a insuficiência das estratégias passivas para resolver por completo os requerimentos de conforto térmico para essas condições.

No entanto, o desafio e a necessidade de qualificar ambientalmente os espaços localizados sob essas condições despertam o interesse de muitos pesquisadores que passam a produzir nova literatura relacionada a esses temas.

A estratégia conhecida como “chaminé solar” tem sido pesquisada por muitas pessoas e para ser utilizada em múltiplas condições, acumulando uma quantidade considerável de informação sobre o tema. Porém, ainda existem várias perguntas sem resposta quanto ao desempenho e as especificações ideais que essas chaminés devem ter. Quanto aos temas que já foram pesquisados relacionados ao assunto, existem resultados contraditórios que criam uma grande confusão no momento de definir um referencial teórico para tratar essa estratégia.

Pode-se dizer que a maior parte da bibliografia existente está focalizada em entender, melhorar e avaliar o desempenho de uma chaminé através da manipulação dos elementos diretamente relacionados com ela. Porém, são poucos os trabalhos que consideram a influência do espaço em que a chaminé está inserida. Além disso, são poucos os trabalhos que comentam sobre a melhoria no espaço que a chaminé proporciona, devido à preferência dada nesses estudos ao entendimento de como funciona essa estratégia.

Mesmo que nos últimos anos tenham sido feitas muitas pesquisas sobre chaminés solares, não foi encontrada nenhuma referência que fizesse uma avaliação do efeito das cargas internas de uma cozinha residencial.

Percebe-se que as conclusões apresentadas na bibliografia disponível sobre as chaminés solares são focadas no momento em que

se tem irradiação solar, por ser este o período em que se apresenta o maior desempenho delas. Porém, o desempenho considerando a noite e a madrugada não tem sido analisado com a mesma profundidade. Uma análise do que acontece nas horas sem sol pode contribuir para o melhor entendimento da estratégia, assim como permitir vislumbrar algumas precauções que se devem ter com seu uso.

Além disso, lidar exclusivamente com os parâmetros relativos às chaminés solares pode desviar uma pesquisa da aplicação direta no projeto arquitetônico devido à grande complexidade implicada nesses estudos.

Apesar de o uso das chaminés solares não produzir resultados significativos, impossibilitando de se concluir que elas sejam uma técnica efetiva para oferecer conforto térmico em um clima quente e úmido, há a possibilidade de combiná-las com outras alternativas utilizadas nessas condições climáticas. No entanto, devido à complexidade que encerram os estudos de chaminés solares por si só, esta pesquisa limita-se a estudá-las individualmente.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa pretende avaliar o comportamento térmico e de ventilação de cozinhas residenciais, localizadas no clima quente e úmido de uma cidade da Colômbia, com a utilização de chaminés solares. Com o intuito de atingir este objetivo, foi adotada a seguinte metodologia, que pode ser vista de forma sintética na Figura 26.

Em primeiro lugar, foi configurado o modelo de simulação computacional no programa Energyplus, por meio do qual seriam obtidos os resultados da pesquisa. Sendo assim, coletaram-se os insumos necessários para fazer as simulações: informação climática, modelagem da chaminé, modelagem das casas, cargas de resfriamento, padrão de uso e configuração do grupo “AirFlowNetwork”.

As simulações foram divididas em quatro fases, sendo que cada uma visava atingir um objetivo específico da pesquisa. Assim, começou-se analisando a influência que exerciam diferentes dias de projeto, diversas condições de vento e modos variados de abertura das janelas em relação ao comportamento de uma cozinha ligada a uma chaminé solar.

Na fase 2 analisou-se a influência do grau de inclinação da chaminé no comportamento da cozinha.

Já na fase 3 verificou-se em que localização na planta arquitetônica a cozinha apresentava o melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar.

Na quarta fase avaliou-se a melhoria que poderia ser obtida quanto à temperatura e ventilação, devido ao aumento da área de absorção de irradiação na chaminé solar.

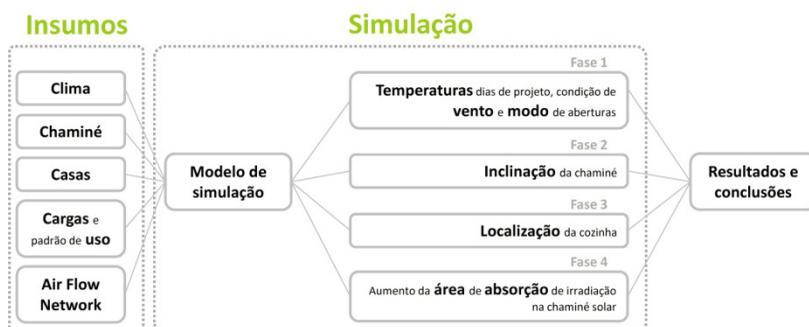


Figura 26. Resumo da metodologia

3.1 INSUMOS BÁSICOS PARA AS SIMULAÇÕES

A seguir, apresentam-se os dados de entrada que serviram de base para as simulações.

3.1.1 Dados climáticos

As simulações do presente trabalho foram feitas para uma cidade chamada Quibdó, com o intuito de trabalhar em condições de clima quente e úmido com momentos consideráveis de calma. Esta cidade fica na Colômbia, no estado de Chocó, uma das zonas com os mais altos níveis de precipitação pluviométrica do mundo (Figura 27) e um dos departamentos mais pobres da Colômbia. Consequentemente, encontrar soluções para residências de baixa renda nesta zona torna-se uma prioridade.

A latitude da cidade é 5,72° Norte, longitude -76,62 e altitude 53m. Em média, chove em 298 dos 365 dias do ano. Os múltiplos métodos que existem para classificar o clima refletem as difíceis condições para atingir conforto térmico nesta cidade (Tabela 5).

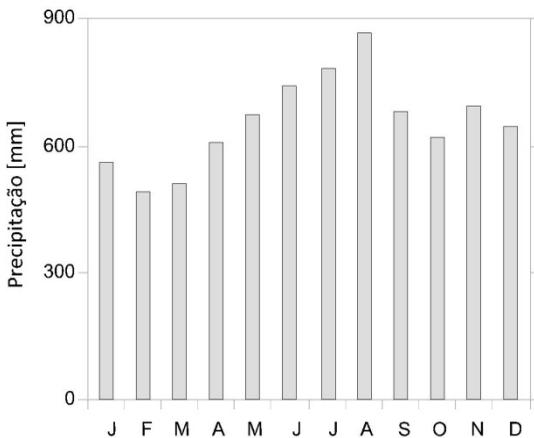


Figura 27. Precipitação em Quibdó. Fonte: IDEAM (2005)

Tabela 5. Classificação climática Quibdó

Método	Cidade = Quibdó
Lang	Superúmido
Martonne	Úmido-chuvoso, sem diferenças sazonais, o ano todo
Köppen	Floresta tropical chuvoso
Holdridge	Quente muito úmido

Segundo as normais climatológicas referentes ao período de 1961-1990 (Figura 28), a temperatura média de Quibdó é de 26,5°C, a temperatura média máxima é de 30,6°C, a temperatura média mínima é de 23 °C e a umidade relativa média é de 86% (IDEAM, 2005).

A fim de conhecer com maior precisão os efeitos dessas condições climáticas sobre o conforto, foi construída uma carta bioclimática para Quibdó (Figura 29). Para isto, foi utilizado o programa “Analysis Bio 2.2” (LABEEE, 2012), aplicando como dados de entrada a informação das normais climatológicas. Assim, foi necessário inserir a temperatura média [C°], temperatura média máxima [C°] e temperatura média mínima [C°], além da percentagem de umidade relativa média e pressão barométrica [hPa] para cada mês do ano. Adicionalmente, o programa pede a altitude [m], latitude [°] e longitude [°].

A localização das linhas das normais na zona superior direita da carta bioclimática revela como, ao longo de todo o ano, os habitantes dessa cidade sofrem desconforto por calor e umidade. A ventilação apresenta-se como a estratégia mais indicada para solucionar as necessidades de conforto nessa cidade em 93,1% das horas do ano. Além da ventilação, é necessário utilizar estratégias de condicionamento mecânico para resolver o conforto nos restantes 6,91% das horas do ano.

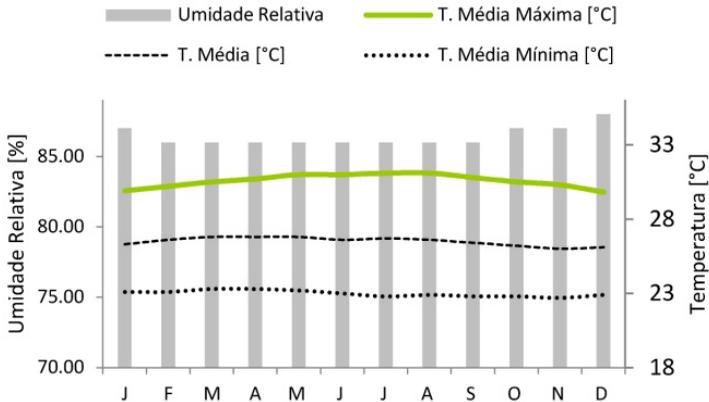


Figura 28. Normais Climatológicas (1961-1990) – Quibdó. Fonte: IDEAM (2005)

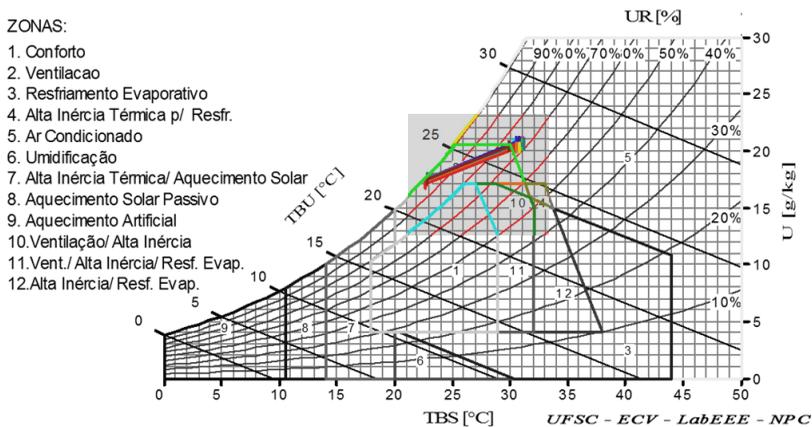


Figura 29. Carta bioclimática Quibdó

A carta solar para Quibdó apresenta condições de insolação semelhantes ao longo do ano, próprio de uma latitude equatorial. No entanto a irradiação incidente desde o hemisfério sul é superior devido a sua localização no hemisfério norte (Figura 30).

Tomando como base a rosa dos ventos (Figura 31) produzida pelo Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais, ou IDEAM, pode-se constatar a inexistência de vento em Quibdó por um período que abrange mais da metade do ano (verificar dado titulado “calma” no canto inferior esquerdo). Para o tempo restante, a direção

dos ventos é predominantemente norte, sul e oeste. O valor médio da velocidade de vento ao longo do ano é de 1,5 [m/s], em uma altura de 10 m sobre o solo.

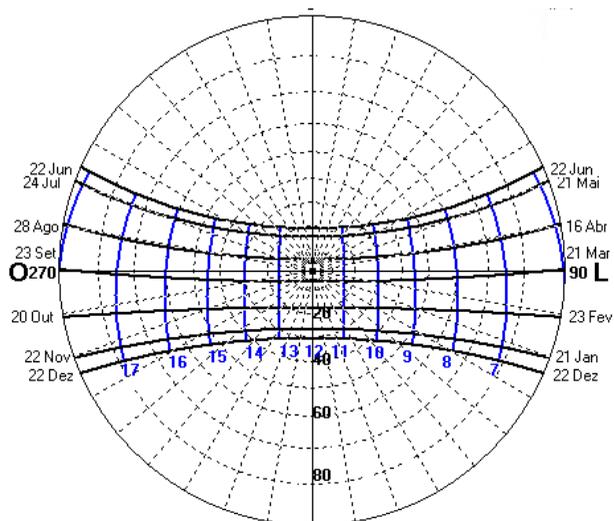


Figura 30. Carta solar Quibdó. Fonte: Analysis Sol-ar, LABEEE (2012)

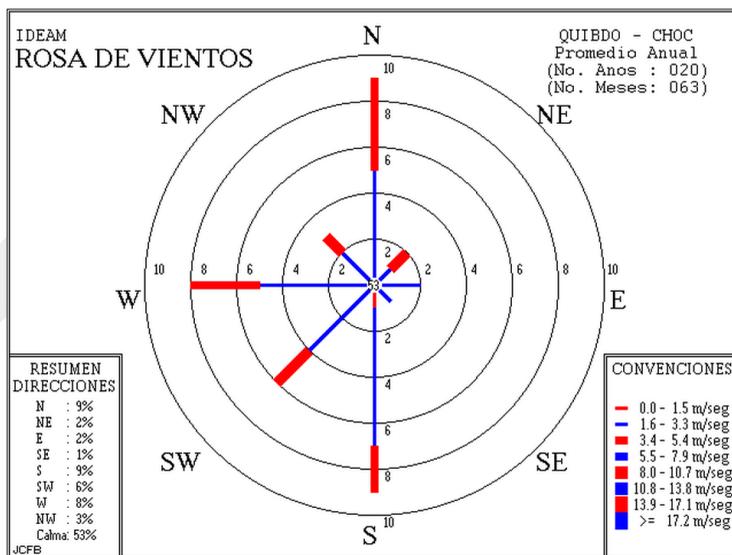


Figura 31. Rosa dos ventos – Quibdó. Fonte: IDEAM (2011)

3.1.1.1 Dias de projeto

As simulações foram feitas para dias de projeto, sendo que nos ambientes de clima quente e úmido as condições climáticas não variam significativamente ao longo do ano. Portanto, conhecendo o que acontece em um dia típico é possível ter uma ideia geral do desempenho da estratégia.

O ângulo de declinação solar apresentado pelo sol na latitude de Quibdó foi o critério básico utilizado para definir esses dias. Assim, foi criado um dia para o solstício de verão, outro para o equinócio de outono e outro para solstício de inverno. Sendo que Quibdó está localizado no hemisfério norte do planeta, as definições do verão e do inverno equivalem à lógica desse hemisfério. Assim, o solstício de verão corresponde ao dia 21 de junho, o equinócio de outono ao dia 21 de Setembro e o solstício de inverno ao dia 21 de dezembro.

Partindo-se das três categorias básicas para cada dia, foi acrescentado o critério da condição de vento. Assim, cada dia foi avaliado em condições com e sem vento. Para as condições com vento foram consideradas as direções norte e sul, sendo que essas são as duas que apresentam a maior probabilidade de ocorrência em Quibdó. Ao fim, foram avaliados nove dias típicos de projeto. Na Tabela 6, apresentam-se os dados que foram utilizados para cada um desses dias.

A informação climática desses dias foi inserida no programa “Energyplus”, versão 7.0, usando o objeto “DesignDay” e “Site:Location” (ENERGYPLUS, 2011). O primeiro objeto precisa ser alimentado no mínimo com os seguintes dados: temperatura máxima de bulbo seco, amplitude térmica diária, temperatura de orvalho (ou alternativamente outras que descrevam a umidade, tais como temperatura de bulbo úmido, umidade absoluta ou entalpia), pressão barométrica, velocidade e direção do vento, clareza do céu, indicador de chuva, mês e dia do mês. Já para o objeto de “Site:Location”, é necessário inserir a latitude, longitude e altitude.

Para criar os valores de temperatura para o resto do dia, o “Energyplus” aplica uma equação que utiliza o valor máximo e a amplitude térmica diária. A equação assume que a temperatura mínima acontece às 5h e a máxima às 15h. Quanto ao valor de umidade, o programa solicita apenas um valor, equivalente ao

momento de máxima temperatura do dia. Para o dia todo, assume-se o mesmo valor de umidade absoluta

Mesmo que o programa ofereça a possibilidade de considerar variações no comportamento dessas variáveis, no caso do presente trabalho não foi feita nenhuma alteração delas sendo que não se tem dados mediante os quais essa tendência possa ser combatida.

A variável “Clareza do céu”, ou “Sky Clearness” no Energyplus, descreve a clareza do céu e condiciona os valores de irradiação solar para cada hora do dia. O “InPutOutPutReference” (ENERGYPLUS, 2011) sugere valor “0” para um dia de inverno, representando um tipo de céu totalmente encoberto. O “Indicador de Chuva”, ou “Rain Indicator” no Energyplus, representa o estado das superfícies em relação à chuva. Caso as superfícies do edifício estejam molhadas, sugere-se adotar valor “1” para esse parâmetro.

3.1.1.1.1 Bases de dados climáticos

Dada a dificuldade de obter os dados oficiais produzidos pelo “IDEAM” com o detalhe requerido no “Energyplus” para configurar os dias de projeto, foi necessário procurar outras alternativas.

Em primeiro lugar, foi feita uma pesquisa nos sites de previsão do clima “Tiempo.com (2012)” e “Tutiempo.net (2012)”, os quais possuem informação com periodicidade horária para vários anos e várias cidades ao redor do mundo. Segundo foi garantido, via email, pelos administradores desses sites, eles utilizam informação liberada pela “Organização Mundial de Meteorologia” – OMM. Essa informação vem dos aeroportos, e o código da estação utilizada para Quibdó é 801440, equivalente ao aeroporto de “El Cádiz”.

Testando as possíveis diferenças entre os dados das duas empresas, não foram encontradas variações nos valores e sim na maneira que a informação é apresentada. Também foi feita uma análise do comportamento geral da temperatura dessas bases de dados com a tendência das normais climatológicas, encontrando-se semelhanças nos valores dessas temperaturas e no momento do ano em que elas acontecem. A vantagem dessa informação, além de ser gratuita, é que disponibiliza uma frequência horária para a temperatura, porém não oferece dados de umidade e, às vezes, alguns horários não possuem os dados correspondentes. Indagando o

“IDEAM” quanto à veracidade e confiabilidade dessa informação, eles não garantiram a confiabilidade desses dados, pois não sabiam como foram obtidos nem o processamento que foi feito.

Em paralelo, foi solicitado um arquivo climático no site do “Energyplus”, através da opção “Real-Time Weather Data” (ENERGYPLUS, 2012), para extrair a informação dos três dias de projeto. Porém, o arquivo recebido apresentava valores incorretos para um dos dias de projeto: no solstício de inverno as temperaturas máximas aconteciam entre as 23:00h e 05:00h e ultrapassavam consideravelmente os valores das normais climatológicas. Tentou-se estabelecer contato novamente com o departamento responsável por produzir esses arquivos no site do “Energyplus”, mas não foi obtida nenhuma resposta a respeito do que estava acontecendo e nem das possíveis alternativas para reparar o erro.

Considerando a informação disponível e a impossibilidade de trabalhar com dados de melhor qualidade, foram adotados os dados dos sites de previsão meteorológica para os dias de projeto correspondentes ao ano de 2011.

Tabela 6. Dias típicos de projeto para simulações

field	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Name	Solstício Verão (vento norte)	Equinócio Outono (vento norte)	Solstício Inverno (vento norte)	Solstício Verão (vento sul)	Equinócio Outono (vento sul)	Solstício Inverno (vento sul)	Solstício Verão (vento)	Equinócio Outono (sem vento)	Solstício Inverno (sem vento)
Max. Dry Bulb Temp	31	30.9	29	31	30.9	29	31	30.9	29
Daily Dry-bulb Temp Range	6	7.5	5	6	7.5	5	6	7.5	5
Humidity Indicating Conditions	24.5	24	23	24.5	24	23	24.5	24	23
Humidity indicating Type	DewPoint	DewPoint	DewPoint	DewPoint	DewPoint	DewPoint	DewPoint	DewPoint	DewPoint
Barometric Pressure [Pa]	100789,92	100789,92	100789,92	100789,92	100789,92	100789,92	100789,92	100789,92	100789,92
Wind Speed	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
Wind Direction	0	0	0	180	180	180	0	0	0
Sky Clearness	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Rain Indicator	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Day of month	21	21	21	21	21	21	21	21	21
month	06	09	12	06	09	12	06	09	12

3.1.2 Modelagem da chaminé

Seguindo o critério encontrado na síntese da bibliografia pesquisada quanto à melhor opção de chaminé a ser utilizada para a latitude de Quibdó, adotou-se uma chaminé solar inclinada localizada na cobertura. A chaminé estava orientada para a fachada sul, no intuito de aumentar a quantidade de irradiação incidente nela. Para definir o tamanho do coletor, tentou-se trabalhar com uma solução que fosse facilmente aplicável em residências de baixa renda. Assim, a área da superfície coletora foi fixada em 1m². Quanto à profundidade da câmara de ar e às dimensões das aberturas de entrada e de saída, experimentou-se adotar valores comumente utilizados na bibliografia para chaminés solares.

Para a face interna das superfícies opacas, adotou-se o material que utilizaram os criadores do modelo de chaminé solar vertical que vem no Energyplus (LEE; STRAND, 2009). Essa informação foi extraída do arquivo “ThermalChimneyTest”, localizado na pasta “ExampleFiles” do diretório de instalação do Energyplus. Segundo a “Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações” (ABNT, 2005), as propriedades desse material coincidem com as do cobre. A absorptância utilizada nesse material equivale a uma cor preta, fazendo com que seja absorvida uma maior quantidade de irradiação solar aumentando a temperatura do ar em contato com essa superfície (Figura 32).

A face externa das superfícies opacas da chaminé foi modelada em madeira de 2,5 cm de espessura, aproveitando a grande oferta que se tem desse material em Quibdó. Usando materiais da região na maior quantidade possível, os custos para construir a chaminé poderiam diminuir. Entre a face de cobre e a de madeira, utilizou-se uma camada de 5 cm de “lã de rocha” para diminuir as perdas de calor do ar da chaminé para o exterior. Para a superfície transparente foi adotado o mesmo vidro utilizado no “ExampleFile”, o qual possui uma alta transmissividade em relação à irradiação solar (valor = 0,9). Na Tabela 7 apresentam-se os valores adotados na modelagem de cada material no Energyplus.

Como será apresentado com maior detalhamento na seção 3.1.6, o modelo de irradiação solar adotado para o presente trabalho no Energyplus, concentra toda a irradiação no piso da zona. Devido a isto, foi necessário mudar o material do piso da chaminé. Caso fosse

mantido o mesmo material utilizado no resto de superfícies, a simulação apresentava erros devido às altas temperaturas que eram atingidas neste elemento. Para tanto foi necessário aumentar a inércia térmica deste componente utilizando uma superfície de concreto de 10 cm.

A chaminé solar possui uma abertura de entrada e outra de saída para estabelecer as ligações com a cozinha e o exterior, respectivamente. As dimensões dessas aberturas são de 1 x 0,13 m cada uma. A abertura de saída está orientada de maneira que possibilite diminuir a quantidade de água que venha a entrar por causa da chuva. Para ligar a chaminé com a cozinha é necessário adicionar um espaço no extremo inferior da chaminé para localizar a abertura de entrada. Além disso, é necessário perfurar a telha e a zona superior da parede da fachada sul da cozinha para estabelecer essa ligação (Figura 33).

Tanto a câmara de ar como o protetor da água da chuva e a extensão no extremo inferior da chaminé foram modelados em uma única zona no Energyplus. Agrupar esses três espaços em uma única zona foi o caminho mais conveniente para modelar a chaminé. Alternativamente, tentou-se modelar a chaminé dividida em três zonas, porém a simulação apresentava muitos erros nas ligações entre elas. Após conferir que a rede de ventilação criada no grupo “AirFlowNetwork” estava bem feita, estabeleceu-se contato com outras pessoas tentando solucionar esses erros. Em primeira instância, foram feitas várias consultas no grupo de suporte do Energyplus no site do “Yahoo”, e posteriormente fez-se contato direto com o departamento de suporte do Energyplus. Segundo comentários da pessoa que atende as solicitações do grupo “AirFlowNetwork” no Energyplus, esses erros desaparecem adotando a versão seguinte à que foi utilizada na presente pesquisa. Porém, no momento de fazer as simulações, essa versão ainda não tinha sido liberada.

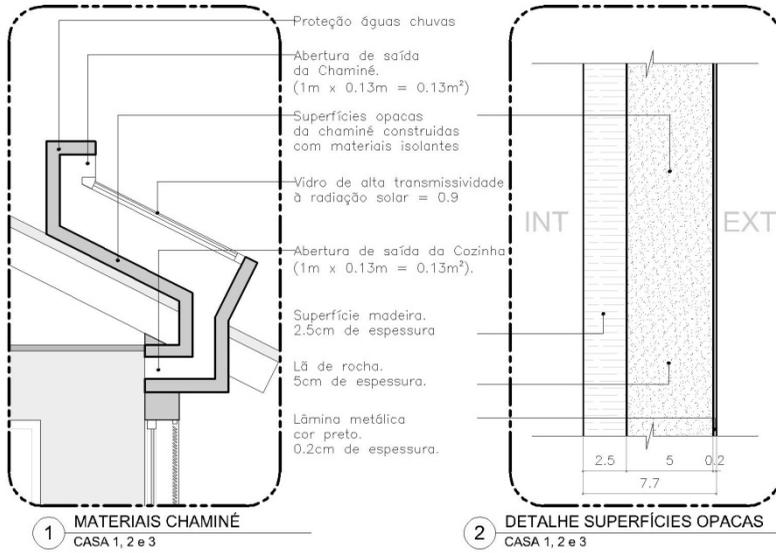


Figura 32. Materiais da chaminé

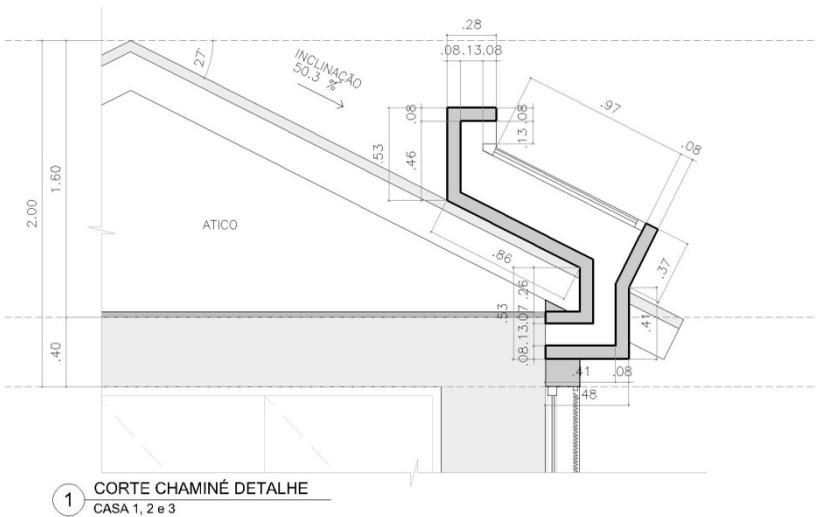


Figura 33. Dimensões da chaminé

Tabela 7. Propriedades dos materiais da Chaminé

Propriedade	Cobre	Lã de Rocha	Madeira
Densidade de massa aparente (kg/m ³)	8900	20	600
Condutividade térmica (W/m.K)	380	0,045	0,15
Calor específico (J/kg.K)	380	750	1340
Absortância	0.85	-	-

3.1.2.1 Modelagem chaminé no Air Flow Network

A seguir apresentam-se as tabelas referentes aos objetos utilizados para modelar a chaminé solar utilizando o grupo “Air Flow Network” (Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11) e a simplificação geométrica da Chaminé no Energyplus (Figura 34)

Tabela 8. Objeto do “AirFlowNetwork: Simulation Control”

Name	Units	Obj 1
AirFlowNetwork Control		MultizoneWithoutDistribution
Wind Pressure Coefficient Type		INPUT
AirFlowNetwork Wind Pressure Coefficient Array Name		30 Graus
Height Selection for Local Wind Speed Calculation		ExternalNode
Maximum Number of Iterations	dimensionless	500
Initialization Type		ZeroNodePressures
Relative Airflow Convergence Tolerance	dimensionless	0,00001
Absolute Airflow Convergence Tolerance	kg/s	0,000001
Convergence Acceleration Limit	dimensionless	-0,5
Azimuth Angle of Long Axis of Building	deg	0
Ratio of Building Width Along Short Axis to Width Along		1

Tabela 9. Objeto do “AirFlowNetwork: MultiZone: Zone”

Name	Units	Obj 1
Ventilation Control Mode		Constant
Minimum Venting Open Factor	dimensionless	0
Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit	DeltaC	0
Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit	DeltaC	6
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit	DeltaJ/kg	0
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit	DeltaJ/kg	300000

Tabela 10. Objeto do “AirFlowNetwork: MultiZone: Surface”

Name	Units	Obj 1	Obj 2
Surface Name		Abertura de saída da cozinha	Abertura de saída da chaminé
Leakage Component Name		Abertura Chaminé	Abertura Chaminé
External Node Name			Nodo da Saída Chaminé
Window/Door Opening Factor	dimensionless	1	1
Ventilation Control Mode		ZoneLevel	ZoneLevel
Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit	DeltaC	100	100
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit	DeltaJ/kg	300000	300000

Tabela 11. Objeto do “AirFlowNetwork: Multizone: Component: DetailedOpening”

Name	Units	Obj 1
Name		Abertura Chaminé
Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed	Kg/s-m	0,00171
Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed	dimensionless	0,59
Type of Rectangler Large Vertical Opening (LVO)		NonPivoted
Number of Sets of Opening Factor Data		2
Opening Factor 1	dimensionless	0
Discharge Coefficient for Opening Factor 1	dimensionless	0,001
Width Factor for Opening Factor 1	dimensionless	0
Height Factor for Opening Factor 1	dimensionless	0
Start Height Factor for Opening Factor 1	dimensionless	0
Opening Factor 2	dimensionless	1
Discharge Coefficient for Opening Factor 2	dimensionless	0,6
Width Factor for Opening Factor 2	dimensionless	0,96
Height Factor for Opening Factor 2	dimensionless	0,99
Start Height Factor for Opening Factor 2	dimensionless	0

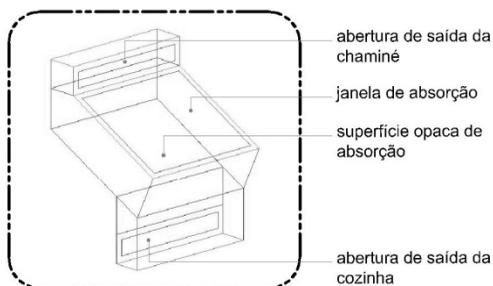


Figura 34. Simplificação geométrica da Chaminé no Energyplus

3.1.2.2 Modelagem das aberturas da chaminé

Para modelar as aberturas da chaminé, foram feitos vários testes das opções disponíveis no Energyplus com o intuito de escolher a melhor alternativa. Assim, determinou-se que o “DetailedOpening” era o objeto que melhor representava o fenômeno físico do movimento do ar em função da diferença de temperatura. Esse objeto só permite trabalhar com aberturas localizadas em planos verticais, motivo pelo qual foi necessário mudar o desenho de chaminé que tinha sido pensado inicialmente. No começo, desejava-se ligar a chaminé com a cozinha através de uma abertura horizontal, entendendo que esta poderia ser a melhor orientação para extrair o ar através da chaminé. Para isto, foi testado o novo objeto que traz a versão 7.0 do Energyplus para modelar aberturas, chamado “Horizontal Opening”, buscando saber se ele representava adequadamente o fenômeno físico. Porém, analisando os resultados obtidos nas simulações feitas com esse objeto, foi detectada uma incoerência: quando as temperaturas da cozinha e da chaminé alcançavam os valores mais elevados em relação ao exterior, apresentavam-se fluxos reversos (Figura 35 e Figura 36). O ar, ao invés de sair para o exterior, voltava para a cozinha, o que corresponde ao comportamento que se tem quando o ar da chaminé apresenta uma temperatura menor do que a da cozinha. Se o ar das camadas superiores estiver mais frio, sua densidade será menor e, por conseguinte, descerá para a zona inferior. Em relação a este comportamento, foram feitas várias consultas com o departamento de suporte do Energyplus, mas ao final não foi possível chegar a uma solução que permitisse utilizar esse tipo de abertura no presente trabalho.

Pela revisão bibliográfica feita, sabia-se que era possível simular chaminés solares localizadas na cobertura através do Energyplus utilizando o objeto “DetailedOpening”. Assim, o desenho foi alterado em função dos estudos anteriores à presente pesquisa e localizou-se a abertura no plano vertical para utilizar esse objeto. Feita essa mudança, os resultados apresentaram o comportamento esperado: quando a temperatura da chaminé era menor do que a do exterior, o fluxo era reverso; caso contrário, o fluxo ia para o exterior (Figura 35 e Figura 37).

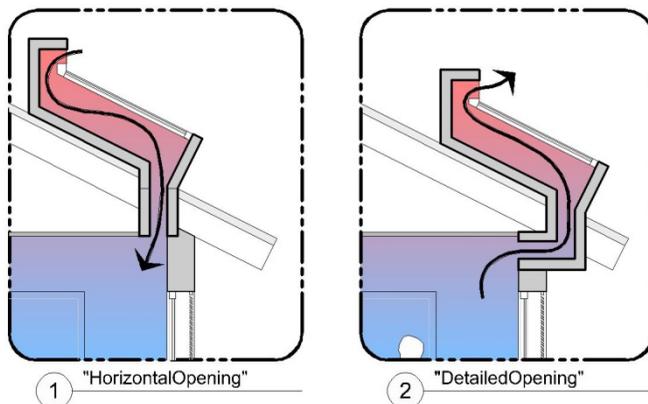


Figura 35. Direção do fluxo no momento de maior temperatura na chaminé dependendo do objeto utilizado para modelar as aberturas no Energyplus

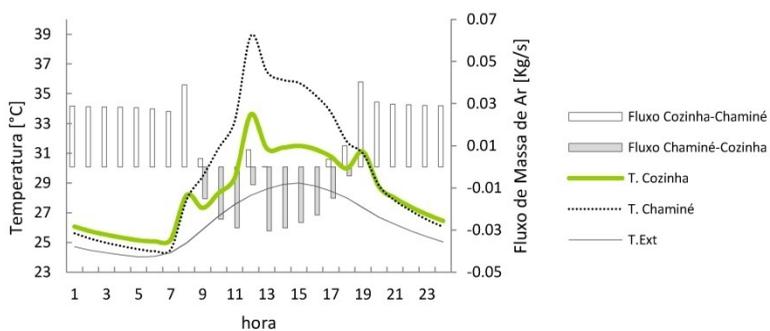


Figura 36. Fluxos reversos – Objeto “HorizontalOpening”

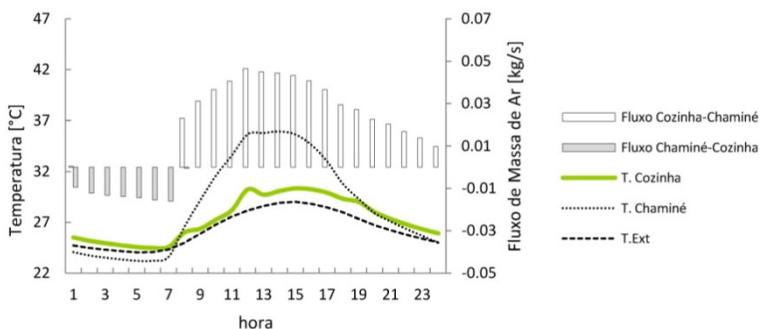


Figura 37. Comportamento desejado na conexão da cozinha com a chaminé – Objeto “DetailedOpening”.

3.1.3 Modelagem das casas

Com o objetivo de verificar qual cozinha apresentava o melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar, foram projetados quatro tipos de casas. Conforme mudava a localização da cozinha, variava a orientação e quantidade de fachadas em contato com o exterior, modificando-se, portanto, as trocas de calor por radiação e convecção entre o interior e o exterior. Os projetos das casas foram definidos em relação a algumas das observações obtidas em pesquisa de campo feita antes do presente trabalho (IPSE, 2012). Nessa pesquisa, foi possível conhecer de perto a realidade das residências de baixa renda localizadas ao longo da Colômbia, em zonas afastadas dos grandes núcleos urbanos. Na caracterização feita das residências existentes, identificaram-se vários padrões de ordem espacial. Entre eles, cabe assinalar o fato de haver um único espaço para os dormitórios. Independente de quantas pessoas havia na família, de modo geral todos dormiam no mesmo espaço. Além dessas observações, incorporaram-se recomendações bioclimáticas para residências construídas nestes climas, utilizando aberturas grandes que favorecessem a ventilação e estivessem protegidas do sol.

As simulações realizadas para a presente dissertação abrangeram quatro tipos de casas. Cada tipo variava em função da quantidade de fachadas que a cozinha tinha para se comunicar com o exterior. Todas as casas atenderam as seguintes condições:

- o programa arquitetônico era o mesmo para todas as casas: um núcleo de Cozinha + Banho (Figura 38), um núcleo de Estar (Figura 39) e um núcleo de Quartos (Figura 40).

- todos os núcleos deviam ter fachada para o norte e sul, garantindo contato direto com o exterior mesmo que estivessem no meio de outros núcleos.

- todas as residências tinham 66,56m² de área construída, com o intuito de que as comparações a serem feitas entre elas não tivessem influência da variável tamanho.

3.1.3.1 Núcleos

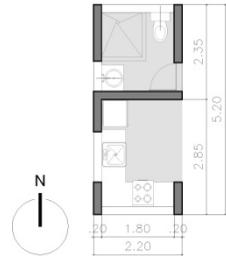
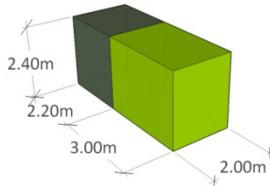


Figura 38. Núcleo Cozinha + Banheiro

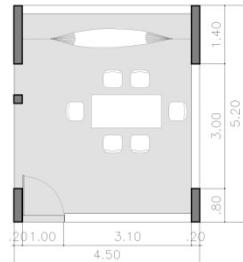
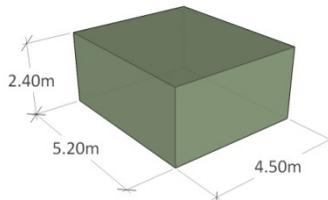


Figura 39. Núcleo Estar

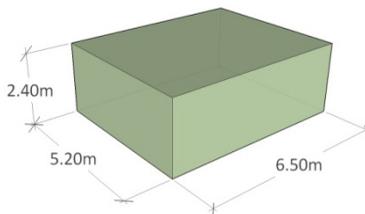


Figura 40. Núcleo Quarto

3.1.3.2 Tipos de casas

Combinando os três núcleos em função das condições fixadas, foram projetados quatro tipos de casas:

CASA 1:

Cozinha:
2 Fachadas +
Cobertura.

1 pavimento.

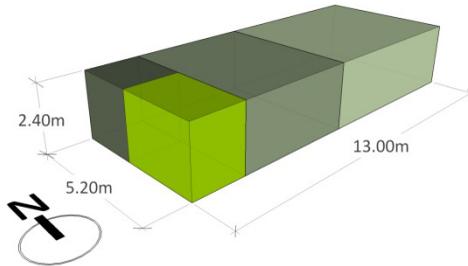


Figura 41. Desenho esquemático Casa 1

CASA 2:

Cozinha:
1 Fachada +
Cobertura.

1 pavimento.

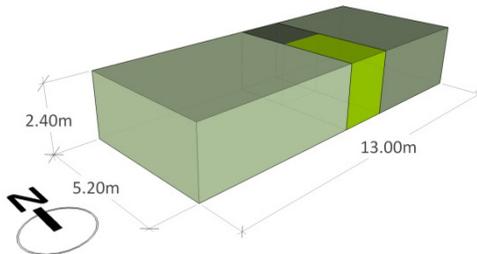


Figura 42. Desenho esquemático Casa 2

CASA 3:

Cozinha:
3 Fachadas +
Cobertura.

1 pavimento.

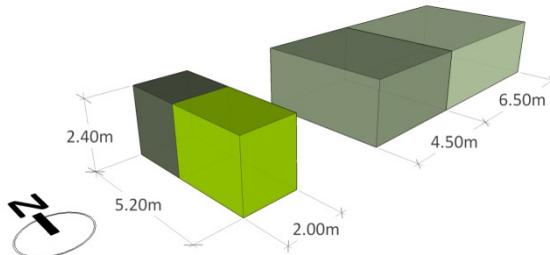


Figura 43. Desenho esquemático Casa 3

CASA 4:

Cozinha:
2 Fachadas.

2 pavimentos.

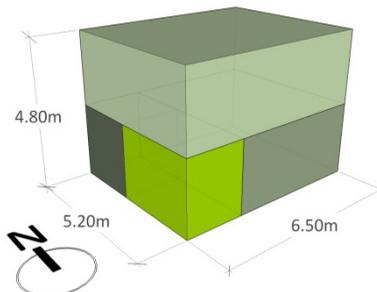


Figura 44. Desenho esquemático Casa 4

3.1.3.3 Zonas térmicas no Energyplus

Os 3 núcleos básicos das casas foram divididos em 4 zonas no programa Energyplus da seguinte maneira: uma zona para a cozinha (6,2m²), outra para o banheiro (4,7m²), outra para a sala de estar (22,4m²) e outra para os quartos (33,3m²). Com o intuito de diminuir os ganhos de calor no interior da residência, as fachadas foram protegidas com beirais localizados no perímetro da cobertura e foi criada uma quinta zona para o Ático (Figura 45).

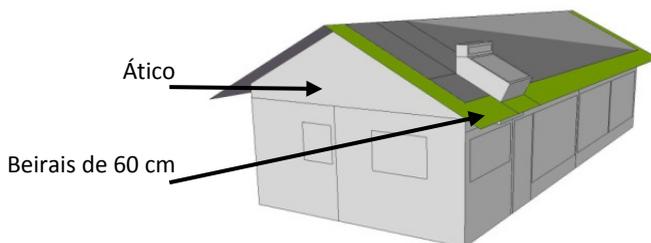


Figura 45. Diminuição do ganho de calor através de beirais e ático

3.1.3.3.1 Casa 1:

A cozinha da Casa 1 (Figura 46) localiza-se no extremo oeste da residência possuindo duas janelas orientadas a sul e oeste.

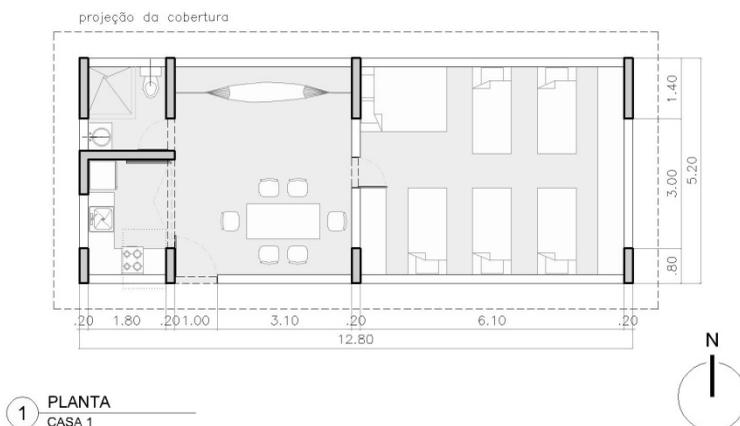
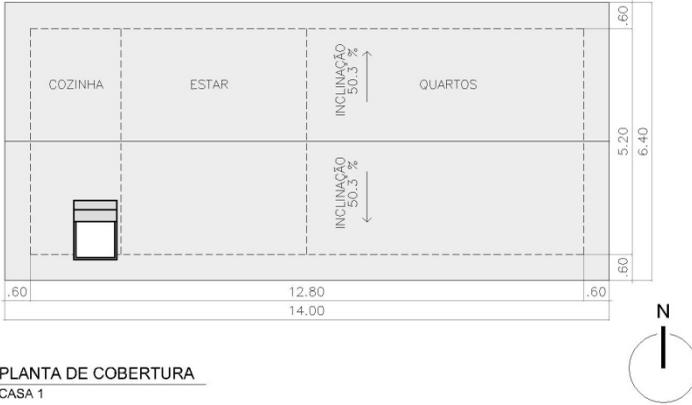


Figura 46. Planta arquitetônica - Casa 1

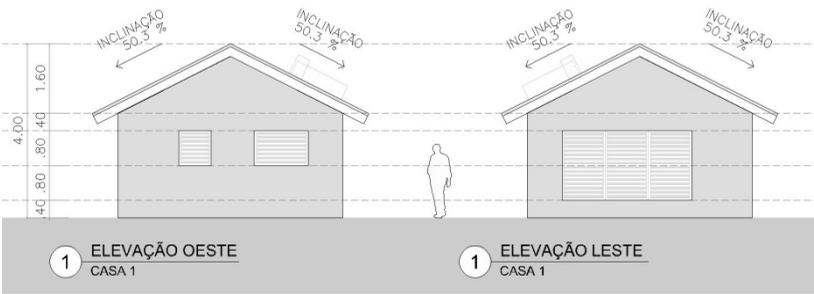


1 PLANTA DE COBERTURA
CASA 1

Figura 47. Planta cobertura - Casa 1

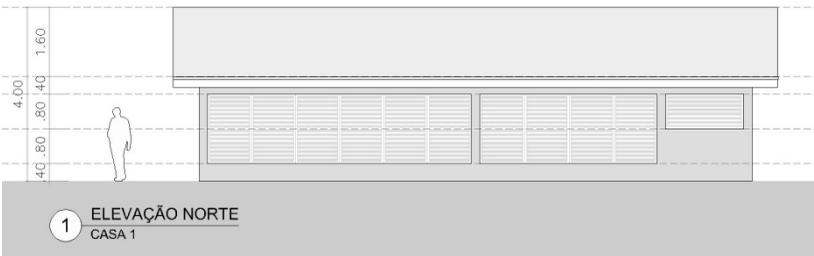


1 ELEVAÇÃO SUL
CASA 1



1 ELEVAÇÃO OESTE
CASA 1

1 ELEVAÇÃO LESTE
CASA 1

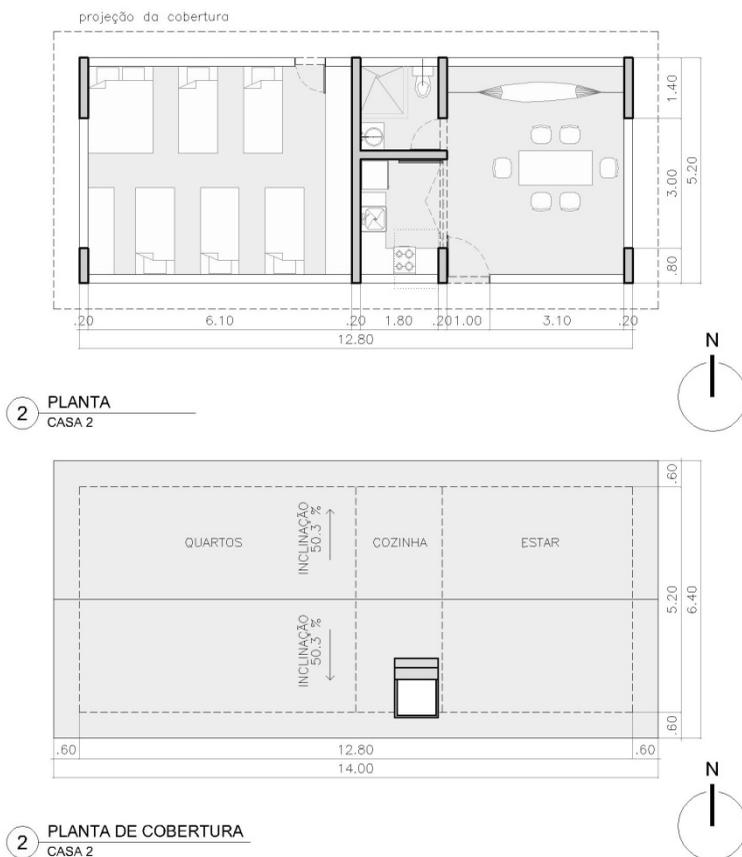


1 ELEVAÇÃO NORTE
CASA 1

Figura 48. Elevações - Casa 1

3.1.3.3.2 Casa 2:

A cozinha da Casa 2 localiza-se no centro da residência e possui somente uma Janela orientada para o sul (Figura 49).



Na Figura 50, apresentam-se as elevações para a Casa 2.

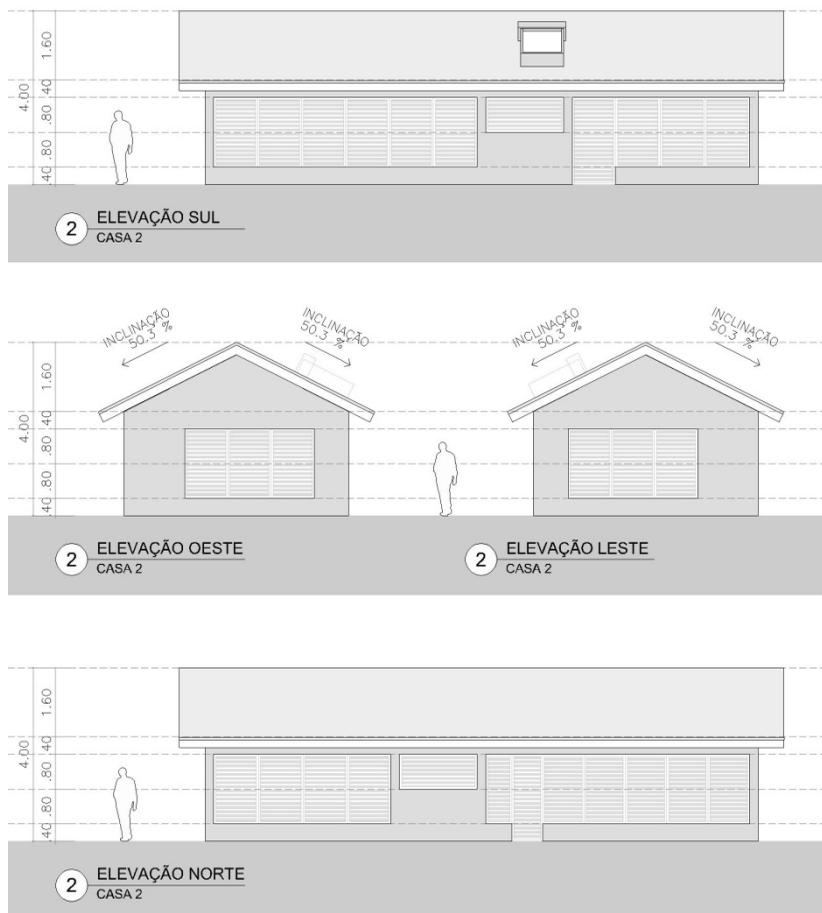


Figura 50. Elevações - Casa 2

3.1.3.3.3 Casa 3:

A cozinha da Casa 3 encontra-se isolada da sala de estar e do quarto, aumentando as possibilidades de contato com o exterior. Possui duas janelas orientadas ao sul e oeste, uma para cada orientação e uma porta orientada para a direção leste (Figura 51).



Na Figura 52, apresentam-se as elevações da Casa 3.

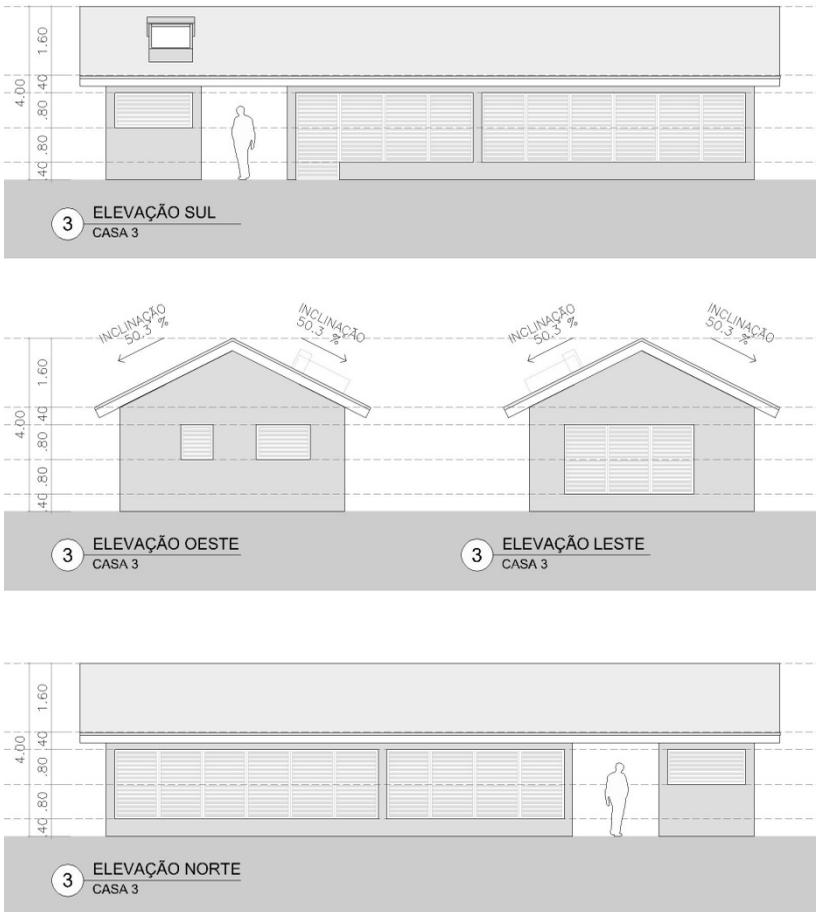


Figura 52. Elevações - Casa 3

3.1.3.3.4 Casa 4:

O quarto da Casa 4 localiza-se no pavimento superior. A cozinha tem a mesma localização que a cozinha da Casa 1, porém com uma zona adicional por cima dela. Deste modo, a cozinha possui uma janela orientada para sul e outra para o oeste (Figura 53).

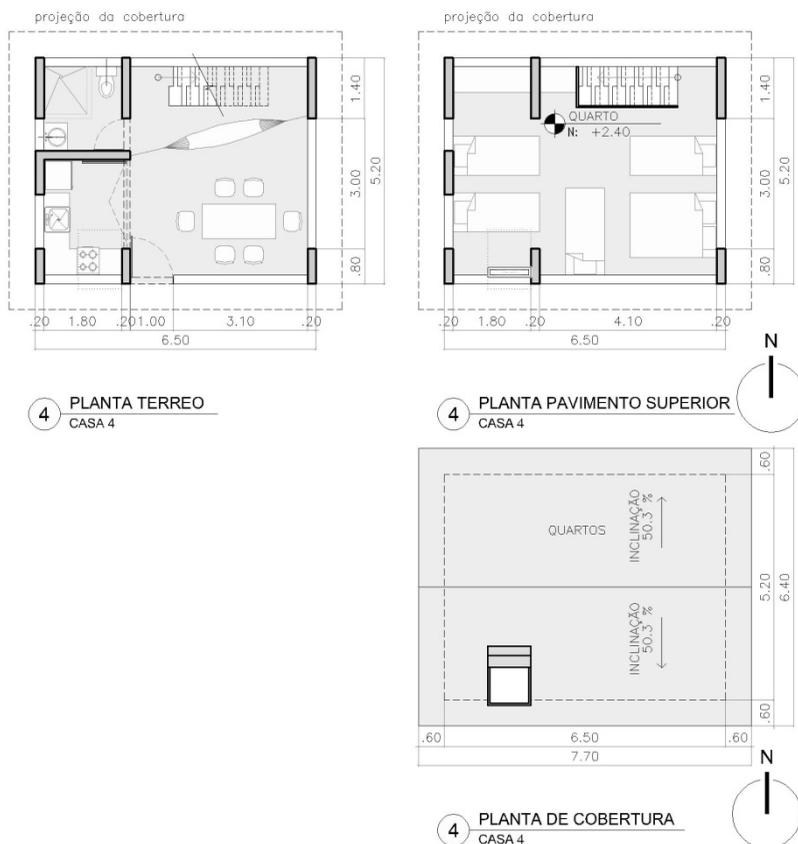


Figura 53. Plantas - Casa 4

Na Figura 54, apresentam-se as elevações da casa 4.

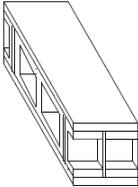


Figura 54. Elevações - Casa 4

3.1.3.4 Materiais

Os materiais da envoltória das edificações foram escolhidos em função das recomendações bioclimáticas para climas quentes e úmidos. Assim, utilizaram-se materiais leves e refletores. Leves para facilitar as perdas de calor nas horas da noite, momento em que se tem a maior ocupação da casa; refletores para diminuir o ganho de calor por conta da irradiação. Com base na norma brasileira de “Desempenho térmico de edificações” (ABNT, 2005), identificou-se quais vedações possuíam essas características. A Tabela 12 apresenta as propriedades dos componentes escolhidos.

Tabela 12. Propriedades da envoltória segundo NBR15220

Componente	Descrição	Transmitância Térmica U [W/(m ² .K)]	Capacidade Térmica Ct [kJ/(m ² .K)]	Atraso Térmico ϕ [horas]
 Parede	Parede de blocos cerâmicos de 2 furos. Dimensões do bloco: 14x29,5x19 cm. Espessura da argamassa de assentamento: 1cm. Espessura da argamassa de emboço: 2,5cm. Espessura total da parede: 19 cm	2,45	203	4
 Cobertura	Cobertura de telha de fibro-cimento, lâmina de alumínio polido e forro de madeira. Espessura de telha: 0,7 cm. Espessura da madeira: 1 cm	1,16	25	2

No entanto, na modelagem desses componentes no Energyplus, não foi possível chegar aos valores exatos de Transmitância. A Tabela 13 apresenta as propriedades dos componentes utilizados nas simulações do trabalho. Porém, mesmo que exista diferença nas transmitâncias da simulação, o valor obtido não sobrepassa o limite estabelecido pela norma para uma vedação “leve” (Tabela 14).

Tabela 13. Propriedades da envoltória obtidas no Energyplus

Componente	Transmitância Térmica	Fator solar	Absortância
	U [W/(m ² .K)]	FS [%]	α
Parede	2,672	4,28	0,4
Cobertura	1,146	3,22	0,7

Tabela 14. Valores de transmitância térmica para cada tipo de vedação externa segundo NBR15220 na Tabela C.2

Vedações externas		Transmitância térmica - U W/m ² .K
Paredes	Leve	U ≤ 3,00
	Leve refletora	U ≤ 3,60
	Pesada	U ≤ 2,20
Coberturas	Leve isolada	U ≤ 2,00
	Leve refletora	U ≤ 2,30.FT
	Pesada	U ≤ 2,00

3.1.3.5 Conexão da chaminé com as cozinhas

Nas cozinhas das Casas “1”, “2” e “3”, a chaminé foi inserida conforme estabelecido na seção prévia referente à modelagem desse elemento (Figura 55). Para a cozinha da “Casa 4”, foi preciso adicionar um duto para ligá-la ao coletor localizado na cobertura (Figura 56). A seção transversal desse ducto é igual à área da abertura de entrada na chaminé (0,13 X 1m) e os materiais são os mesmos utilizados para as superfícies opacas dessa chaminé.

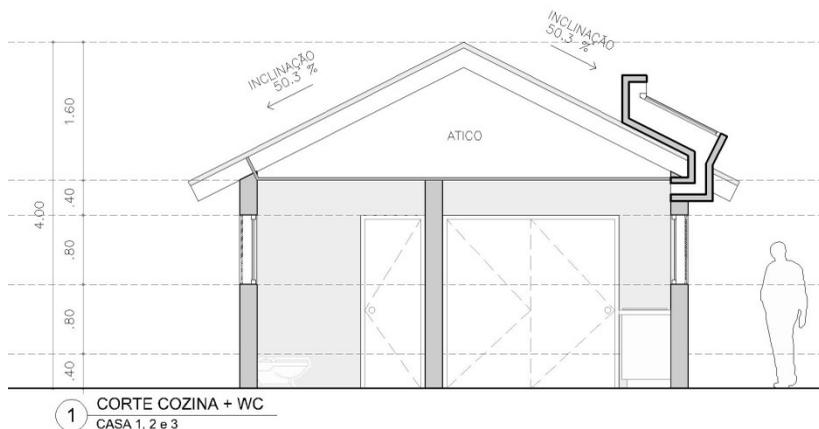


Figura 55. Conexão da chaminé com cozinha das Casas 1, 2 e 3

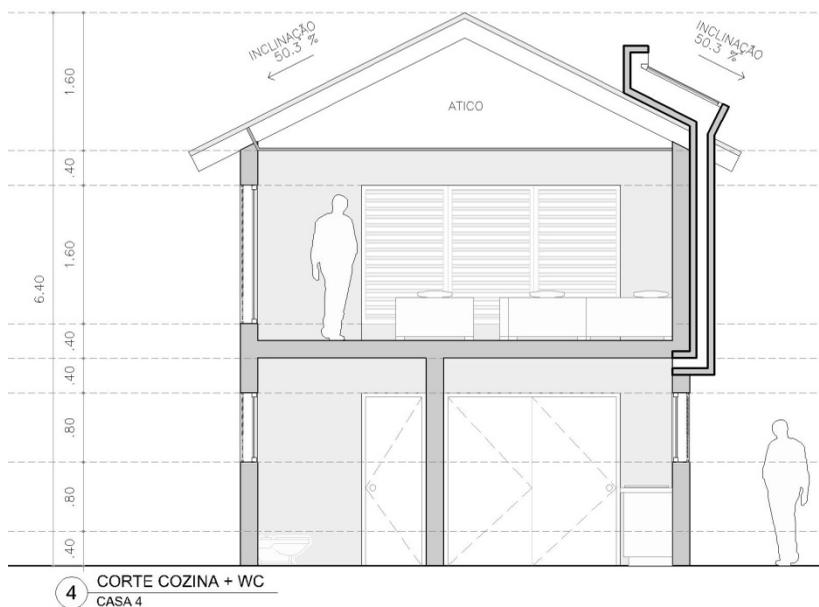


Figura 56. Conexão da chaminé com cozinha da Casa 4

3.1.4 Cargas de resfriamento e padrão de uso

A carga de resfriamento utilizada nas simulações foi gerada por: sete pessoas, uma geladeira, um fogão e um forno a gás, e 5 lâmpadas

fluorescentes. O calor produzido pelas pessoas foi calculado com base nas taxas metabólicas sugeridas pela ASHRAE (2001), na página 8.6-Tabela 4, considerando uma área de pele média de $1,8\text{m}^2$. A cada ambiente corresponde um tipo de atividade, segundo a Tabela 15.

O calor produzido pelo fogão e o forno foram definidos com base na ASHRAE (2001), na página 29.11 - tabela 5. Para o forno foi adotado o elemento "Oven (full-size convection)" e para o fogão o elemento "Range (burners) per 2 burner section". O valor de produção de calor foi de 1670 [W] para o forno e de 1930 [W] para o fogão. Cabe anotar que esses valores são uma estimativa da carga gerada em uma casa pelos equipamentos utilizados na cocção dos alimentos. No entanto, na realidade das residências de baixa renda localizadas em Quibdó, isto pode variar, pois nestas casas costuma-se utilizar lenha e gás para cozinhar. Porém, na ausência de dados que quantifiquem o calor gerado por esse processo, utilizaram-se os valores da ASHRAE.

Para a geladeira, a ASHRAE apresentava valores entre 310 e 690 [W], os quais correspondem a grandes equipamentos típicos do padrão de vida norte-americano. Portanto, adotou-se um valor compatível com a realidade de residências de baixa renda, igual a 70 [W]. Esse valor foi definido considerando que o calor produzido por uma geladeira é igual à sua potência. O valor da potência foi obtido com base no consumo médio mensal de uma geladeira de duas portas, segundo tabela fornecida pelo "Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL" (ELETROBRAS, 2012).

Quanto à iluminação, foram utilizadas lâmpadas fluorescentes de 15 [W], distribuídas da seguinte maneira: 1 lâmpada na cozinha, 2 lâmpadas na sala de estar e 2 lâmpadas no quarto.

O padrão de ocupação da casa variava considerando que os sete ocupantes ficam sempre em casa à noite e ao amanhecer. Quando o dia começa, os ocupantes distribuíam-se entre a cozinha e a sala de estar. De manhã e à tarde ficava uma pessoa sozinha em casa. Na hora do almoço voltavam três das seis pessoas que saíam de manhã. No fim da tarde, voltavam todos os ocupantes e após as vinte horas todos estavam no quarto (Tabela 16). Na Tabela 17 e Tabela 18 é possível verificar o padrão de uso dos equipamentos e da iluminação.

Tabela 15. Taxas metabólicas

<i>Ambiente</i>	<i>Atividade</i>	<i>Taxa metabólica</i> [W/m ²]	<i>Taxa metabólica</i> MET	<i>Calor produzido</i> [W]
Cozinha	Cozinhando	95	1,6	171
Estar	Sentado	60	1	108
Quarto	Dormindo	40	0,7	72

Tabela 16. Padrão de ocupação: Número de ocupantes

<i>Intervalos</i>	<i>Cozinha</i>	<i>Estar</i>	<i>Quarto</i>
00:00 - 07:00	0	0	7
07:00 - 08:00	2	5	0
08:00 - 09:00	1	0	0
09:00 - 11:00	0	1	0
11:00 - 13:00	1	3	0
13:00 - 18:00	0	1	0
18:00 - 20:00	1	6	0
20:00 - 24:00	0	0	7

Tabela 17. Padrão de equipamentos

<i>Intervalos</i>	<i>Fogão</i>	<i>Forno</i>	<i>Geladeira</i>
00:00 - 07:00	0%	0%	100%
07:00 - 07:15	50%	0%	100%
07:15 - 11:00	0%	0%	100%
11:00 - 11:15	0%	100%	100%
11:15 - 11:30	100%	0%	100%
11:30 - 18:00	0%	0%	100%
18:00 - 18:15	50%	0%	100%
18:15 - 24:00	0%	0%	100%

Tabela 18. Padrão de iluminação

<i>Intervalos</i>	<i>Cozinha</i>	<i>Estar</i>	<i>Quarto</i>
00:00 - 07:00	0%	0%	0%
07:00 - 08:00	100%	100%	100%
08:00 - 09:00	100%	0%	0%
09:00 - 11:00	0%	0%	0%
11:00 - 13:00	100%	0%	0%
13:00 - 18:00	0%	0%	0%
18:00 - 20:00	100%	100%	100%
20:00 - 22:00	0%	0%	100%
22:00 - 24:00	0%	0%	0%

3.1.5 Modelagem da ventilação natural

O grupo de objetos “Air Flow Network” do programa Energyplus (2011) foi utilizado para modelar a ventilação dos ambientes nas simulações. Através dele, é possível simular os fluxos de ar produzidos tanto pelo vento como pela diferença de temperaturas.

3.1.5.1 Modelagem das Janelas

O sistema de janelas das residências estava composto por dois tipos de folhas: janelas de vidro com esquadria de madeira e folhas de veneziana em madeira.

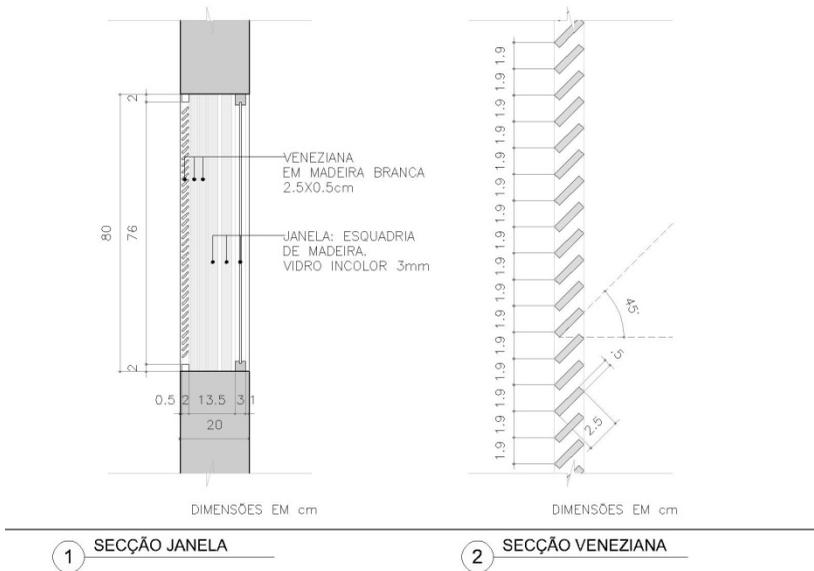


Figura 57. Detalhe da janela

3.1.5.1.1 Tipos de janela

Dependendo da altura do vão existiam dois tipos de janelas: “Tipo 1” para janelas de 1.6m de altura e “Tipo 2” para janelas de 0.8m. As janelas “Tipo 1” foram utilizadas nas aberturas exteriores da sala de estar e do quarto e podiam ter entre seis e oito folhas, dependendo do comprimento do vão. No caso de possuírem 6 folhas, 3 eram de vidro e

3 de veneziana, enquanto as de 8 folhas comportavam 4 de vidro e 4 de veneziana. As janelas do “Tipo 2” foram utilizadas para as aberturas exteriores da cozinha e do banheiro e sempre tinham 4 folhas (2 de vidro e 2 de veneziana).



Figura 58. Janela tipo 1

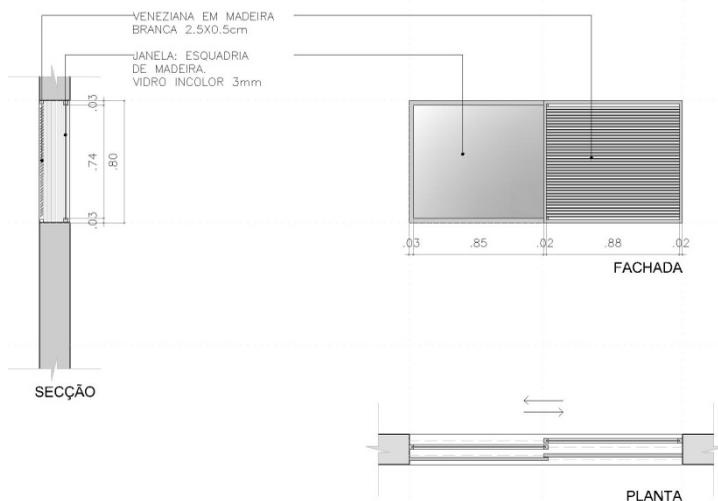


Figura 59. Janela tipo 2

3.1.5.1.2 Modo de abertura das janelas

Foram criados três modos de abertura das janelas, considerando as possibilidades oferecidas pelo sistema de vedação. Desta maneira, pretendia-se estudar a influência que poderia ter o modo de acionamento das janelas no desempenho da cozinha. No “Modo 1”, as venezianas e os vidros estavam abertos, representando uma condição ambiental em que não havia chuva nem irradiação solar direta entrando pela janela (Figura 60). No “Modo 2”, as venezianas eram fechadas para proteger o interior dos ambientes, representando uma condição na qual podia estar entrando irradiação solar direta ou chuva (Figura 61). No “Modo 3”, tanto a veneziana como o vidro estavam fechados, representando uma condição que almejava obter maior proteção em relação ao exterior, fosse por condições ambientais (irradiação, chuva, barulho, poluição) ou de segurança (Figura 62).

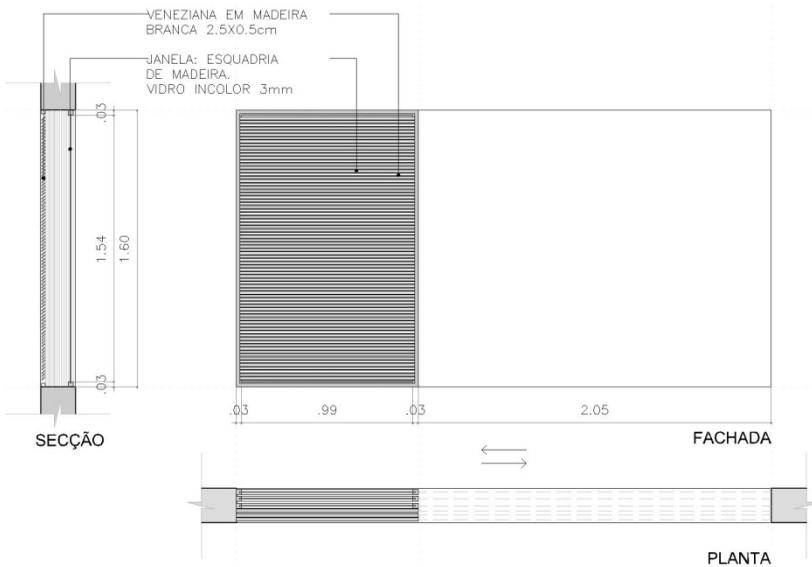


Figura 60. Janela Modo 1: Vidro e veneziana abertos

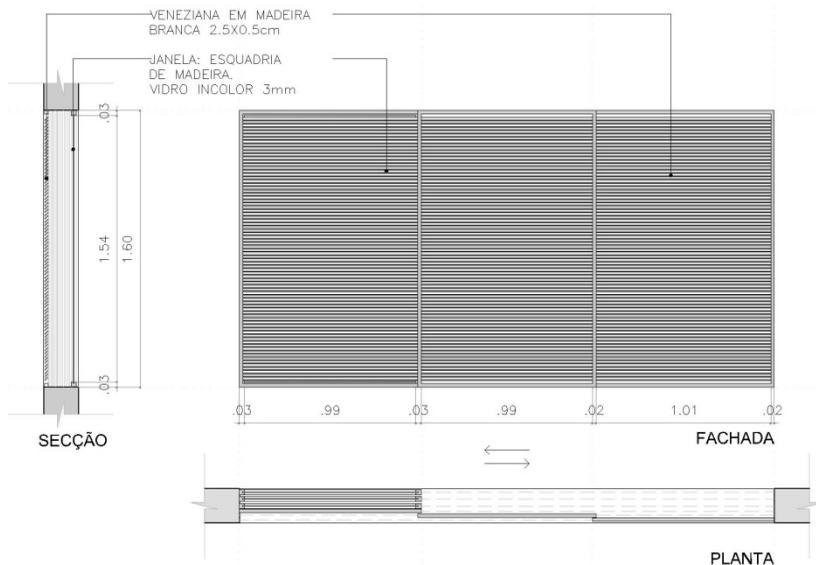


Figura 61. Janela Modo 2: Vidro aberto e veneziana fechada

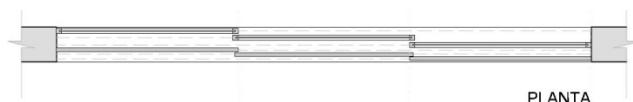


Figura 62. Janela Modo 3: Vidro e veneziana fechados

3.1.5.2 Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão foram obtidos através do programa TNO Cp Generator (2012) (Figura 63). A maioria das coordenadas dos pontos para os quais foram solicitados os coeficientes de pressão localizava-se no centro das aberturas da residência. Os pontos restantes estavam na cobertura, sendo um deles o ponto correspondente à localização da abertura de saída da chaminé (ver Apêndice A). Adotou-se um valor de rugosidade de terreno igual a 0,03, equivalente a um entorno plano sem obstruções. Cabe notar que o modelo utilizado para obter os coeficientes de pressão foi simplificado, levando em conta que esse programa não permite considerar a presença de beirais. Além disso, o fato da chaminé estar localizada por cima da face inclinada da cobertura cria possíveis imprecisões sendo que o modelo utilizado não permite considerar essas particularidades.

Para obter valores mais exatos, são necessários estudos de tuneis de vento, o qual não faz parte de âmbito do presente trabalho.

Para inserir esses coeficientes no Energyplus foi necessário determinar a direção de vento e o valor correspondente para cada direção em cada um dos pontos criados. Isto foi feito utilizando os objetos: “Wind pressure coefficient array” e “Wind pressure coefficient values”, respectivamente.

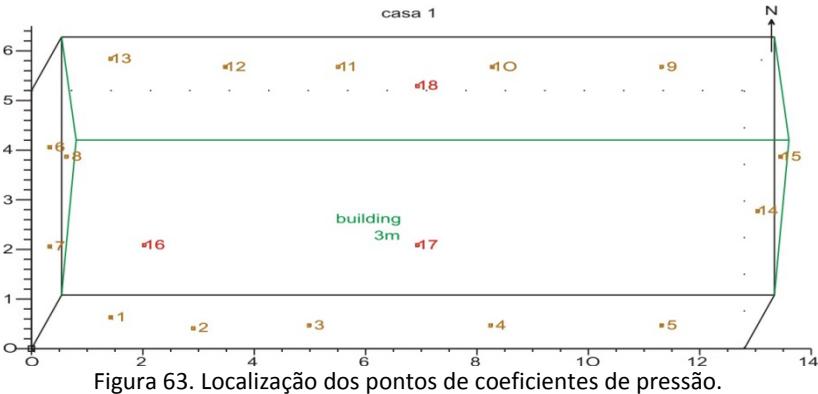


Figura 63. Localização dos pontos de coeficientes de pressão.

3.1.5.3 Coeficientes de descarga

Os coeficientes de descarga foram definidos com base na bibliografia pesquisada, adotando-se um valor de 0,6 quando as janelas estavam abertas (Modo 1), 0,4 quando as venezianas estavam fechadas (Modo 2) e 0,001 quando ambas as venezianas e o vidro estavam fechados (Modo 3). Para a abertura da chaminé, adotou-se o mesmo valor utilizado quando as janelas estavam abertas (Modo 1). Esse valor apresentou-se em concordância com o valor sugerido por Anderson (apud Mathur, 2006) para o cálculo da vazão em chaminés solares, que foi de 0,57.

3.1.5.4 Resumo das janelas

A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** apresenta os valores utilizados nos objetos criados dentro da categoria “Detailed Opening” do Energyplus para considerar as variações das janelas.

Para os campos de “Expoente do fluxo” e “Coeficiente de fluxo”, referentes à infiltração, adotaram-se os valores sugeridos por Liddament (1986). Tendo em vista que os valores de “Coeficiente de fluxo” da fonte primária são apresentados em ($\text{dm}^3/\text{s.m}$), utilizaram-se os valores convertidos por Sorgato (2010) na unidade exigida pelo Energyplus ($\text{kg}/\text{s.m}$).

Adicionalmente, foram modelados dois objetos para as portas, representando um deles a porta exterior e o outro as portas interiores.

Quando a veneziana estava fechada e o vidro aberto (Modo 2), além de mudar o valor do coeficiente de descarga, foi necessário inserir um valor diferente para o campo de “Height Factor”. Na Figura 64, apresenta-se o cálculo feito para tal fim. Esse valor é igual tanto para a janela do “Tipo 1” como para a do “Tipo 2”.

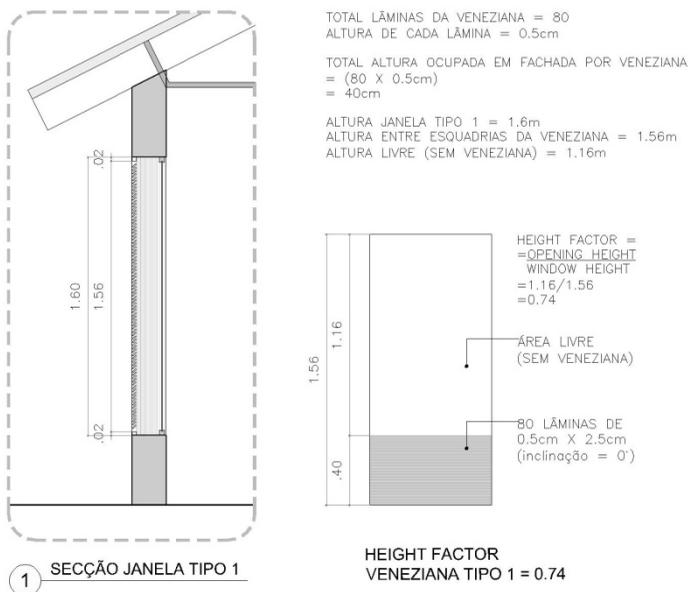


Figura 64. Cálculo do “Height Factor” com veneziana

Tabela 19. Resumo Modelagem janelas na categoria "Detailed Opening

	Janela Tipo 1 (altura = 1,6m)				Janela Tipo 2 (altura = 0,8m)		Porta interior em madeira	Porta exterior em madeira
	6 folhas (3 vidro e 3 veneziana)		8 folhas (4 vidro e 4 veneziana)		4 folhas (2 vidro e 2 veneziana)			
	Modo 1	Modo 2	Modo 1	Modo 2	Modo 1	Modo 2		
Air mass flow coefficient when opening is closed [kg/s.m]	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00204	0,00171
Air mass flow exponent when opening is closed	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,59	0,59
Type o rectangular Large Vertical Opening	NonPivoted	NonPivoted	NonPivoted	NonPivoted	NonPivoted	NonPivoted	NonPivoted	NonPivoted
Number of sets of opening factor data	2	2	2	2	2	2	2	2
Opening factor 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Discharge coefficient for Opening factor 1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Width factor for Opening factor 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Height factor for Opening factor 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Start height factor for Opening factor 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Opening factor 2	1	1	1	1	1	1	1	1
Discharge coefficient for Opening factor 2	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,6
Width factor for Opening factor 2	0,66	0,66	0,49	0,49	0,49	0,49	0,93	0,96
Height factor for Opening factor 2	0,96	0,74	0,96	0,74	0,93	0,74	0,99	0,99
Start height factor for Opening factor 2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0	0

3.1.5.5 Alternativas para modelar as Venezianas

Com o intuito de testar alternativas que permitissem fazer uma modelagem mais adequada das venezianas, tentou-se subdividir o vão coberto pela veneziana em várias janelas pequenas. Desta maneira foi possível obter gráficos que detalhavam melhor o fluxo de ar ao longo da altura do vão, segundo a condição de vento que estivesse sendo simulada. Nas Figura 65 e Figura 66 pode perceber-se claramente como o sentido do fluxo da janela segue a direção do vento norte ou sul respectivamente, e na Figura 67 é possível até mesmo visualizar o plano de altura neutra na janela sob condições sem vento. A veneziana analisada corresponde a uma janela orientada para a fachada sul. Nesses gráficos os valores positivos do eixo “x” representam os fluxos que saem do espaço (sentido norte-sul), enquanto os valores negativos são os fluxos procedentes do exterior (sentido sul-norte).

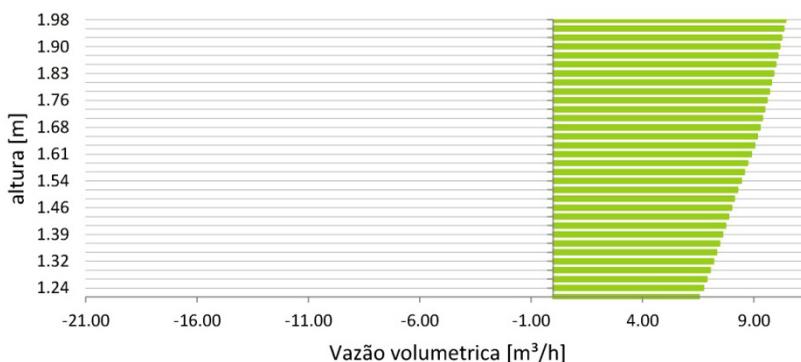


Figura 65. Direção de fluxo – Janela sul – Modo 2 – Vento norte

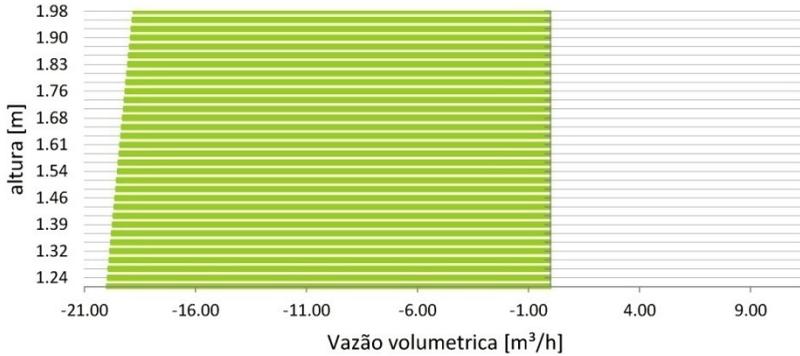


Figura 66. Direção de fluxo – Janela sul – Modo 2 – Vento sul

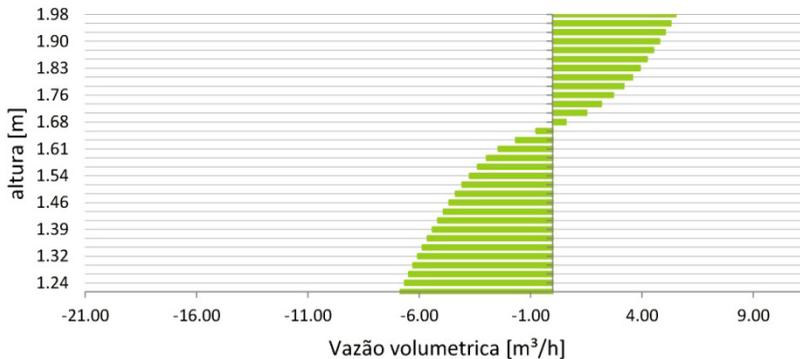


Figura 67. Direção de fluxo – Janela sul – Modo 2 – Sem vento

No entanto os resultados não apresentaram um comportamento lógico em função dos outros dois modos de abertura. Quando feita a simulação através de várias janelas pequenas, o fluxo de ar aumentava consideravelmente, apresentando valores ainda maiores dos obtidos sob o modo no qual a janela estava completamente aberta (Modo 1).

Na Tabela 20 pode perceber-se como sob os coeficientes de descarga de 0,4, 0,5 e 0,6 os fluxos de ar são superiores aos apresentados sob “Modo 1”. Somente quando utilizado o coeficiente de descarga de 0,3 é possível obter fluxos maiores sob “Modo 1”, porém esse valor não é recomendado em nenhuma referência bibliográfica pesquisada. Devido a isto, optou-se por modelar o Modo 2 como explicado nas seções anteriores e não através de várias janelas.

Tabela 20. Temperatura e ACH para os três modos de abertura, variando o Coeficiente de Descarga nas pequenas janelas do Modo 2

Modo aberturas	Vento	Posição do sol	Coeficiente Descarga 0.3			Coeficiente Descarga 0.4			Coeficiente Descarga 0.5			Coeficiente Descarga 0.6		
			Avaliação do efeito da Chamimê Solar sobre a Cozinha (média do dia)	T. Cozinha [°C]	ACH médio	Avaliação do efeito da Chamimê Solar sobre a Cozinha (média do dia)	T. Cozinha [°C]	ACH médio	Avaliação do efeito da Chamimê Solar sobre a Cozinha (média do dia)	T. Cozinha [°C]	ACH médio	Avaliação do efeito da Chamimê Solar sobre a Cozinha (média do dia)	T. Cozinha [°C]	ACH médio
Modo 1 - Tudo aberto	Vento Norte	Sols. Verão	28.4	71.3	71.3	28.4	71.3	71.3	28.4	71.3	71.3	28.4	71.3	
		Equinócio	27.4	72.1	72.1	27.4	72.1	72.1	27.4	72.1	72.1	27.4	72.1	
	Vento Sul	Sols. Inverno	26.9	72.1	72.1	26.9	72.1	72.1	26.9	72.1	72.1	26.9	72.1	
		Sols. Verão	28.2	72.2	72.2	28.2	72.2	72.2	28.2	72.2	72.2	28.2	72.2	
	Sem Vento	Equinócio	27.3	73.3	73.3	27.3	73.3	73.3	27.3	73.3	73.3	27.3	73.3	
		Sols. Inverno	26.8	73.6	73.6	26.8	73.6	73.6	26.8	73.6	73.6	26.8	73.6	
Modo 2 - Veneziana fechada	Vento Norte	Sols. Verão	28.7	41.3	41.3	28.7	41.3	41.3	28.7	41.3	41.3	28.7	41.3	
		Equinócio	27.8	42.6	42.6	27.8	42.6	42.6	27.8	42.6	42.6	27.8	42.6	
		Sols. Inverno	27.3	43.4	43.4	27.3	43.4	43.4	27.3	43.4	43.4	27.3	43.4	
		Sols. Verão	28.3	63.0	75.0	28.1	68.6	88.6	28.1	68.6	88.6	28.1	102.8	
		Equinócio	27.4	64.2	75.8	27.2	75.8	88.7	27.2	75.8	88.7	27.2	102.7	
		Sols. Inverno	26.8	63.4	75.0	26.7	75.0	88.7	26.7	75.0	88.7	26.7	102.9	
	Vento Sul	Sols. Verão	28.2	64.3	74.2	28.1	64.4	84.4	28.1	64.4	84.4	28.0	95.0	
		Equinócio	27.3	65.5	77.2	27.2	75.5	85.6	27.2	75.5	85.6	27.1	96.0	
		Sols. Inverno	26.7	65.1	75.1	26.6	75.1	85.3	26.6	75.1	85.3	26.6	95.8	
		Sols. Verão	28.5	37.6	39.0	28.4	40.3	40.3	28.4	40.3	40.3	28.4	41.5	
		Equinócio	27.6	39.4	40.6	27.5	41.9	43.2	27.5	41.9	43.2	27.5	44.9	
		Sols. Inverno	27.1	38.9	40.3	27.0	41.6	41.6	27.0	41.6	41.6	27.0	42.9	
Modo 3 - Tudo fechado	Vento Norte	Sols. Verão	30.9	0.8	0.8	30.9	0.8	0.8	30.9	0.8	0.8	30.9	0.8	
		Equinócio	30.2	0.8	0.8	30.2	0.8	0.8	30.2	0.8	0.8	30.2	0.8	
	Vento Sul	Sols. Inverno	29.8	0.8	0.8	29.8	0.8	0.8	29.8	0.8	0.8	29.8	0.8	
		Sols. Verão	30.8	0.8	0.8	30.8	0.8	0.8	30.8	0.8	0.8	30.8	0.8	
	Sem Vento	Equinócio	30.2	0.8	0.8	30.2	0.8	0.8	30.2	0.8	0.8	30.2	0.8	
		Sols. Inverno	29.8	0.8	0.8	29.8	0.8	0.8	29.8	0.8	0.8	29.8	0.8	

3.1.6 Modelo de distribuição solar

O programa Energyplus requer que seja definido como é que a irradiação vai atingir o edifício e como ela vai entrar posteriormente na zona através das superfícies envidraçadas. Para isto existem dois tipos de modelos localizados no grupo de objetos "Simulation Parameters - Building", os quais são: "Full Exterior" e "Full Interior And Exterior".

No primeiro deles, toda a irradiação direta que entra na zona é concentrada no piso somente, onde será absorvida dependendo do valor de absorptância que tenha essa superfície. No modelo "Full Interior And Exterior" a irradiação direta que entra na zona é contabilizada de acordo com a localização exata na qual os raios solares incidem, incluindo pisos, paredes e janelas. Nos dois modelos, a parcela de irradiação direta refletida será somada a irradiação difusa, a qual será distribuída uniformemente em todas as superfícies internas.

Quando as superfícies são aquecidas, se fazem as trocas de calor entre elas e o nó do ambiente através da convecção. O nó do ambiente será quem finalmente irá determinar a vazão produzida na chaminé, dependendo do diferencial térmico dele em relação ao resto de nós da rede (Figura 68).

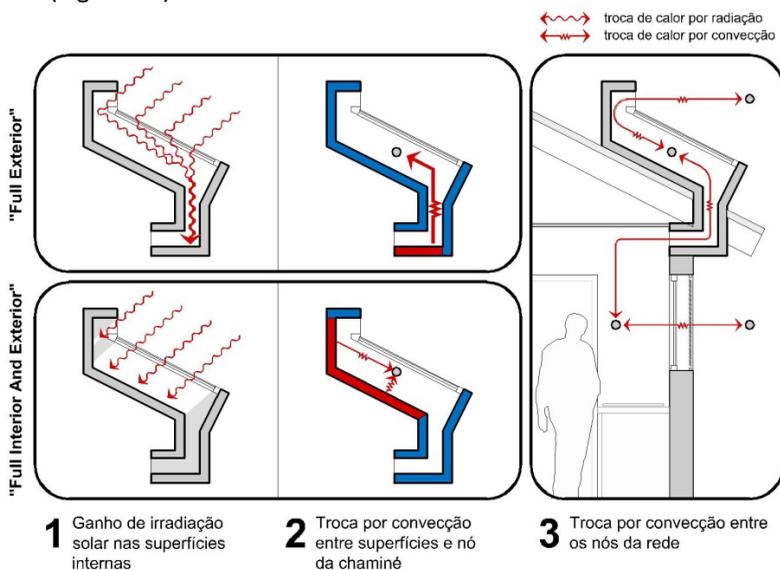


Figura 68. Cálculo de irradiação solar direta segundo o modelo de distribuição solar

Caso queira ser utilizado o modelo “Full Interior And Exterior”, é necessário que a zona seja “convexa”, condição que não aplica para o desenho que se tem na chaminé utilizada no presente trabalho. Uma zona “convexa” é aquela na qual uma linha reta passa através dela interceptando no máximo duas superfícies.

3.1.6.1 Implicações da escolha do modelo de distribuição solar

No intuito de conhecer as diferenças que podia ter um ou outro modelo de distribuição solar nos resultados de vazão na chaminé, se fez um teste com duas chaminés: uma inclinada e outra vertical. O desenho da chaminé do teste foi simplificado em relação aos tipos de chaminés utilizados nas simulações do trabalho, com o intuito de não ter zonas convexas.

As duas chaminés tinham a mesma área de superfície envidraçada equivalente a 4m^2 para absorver irradiação solar. Além disso, a orientação e dimensões das aberturas de entrada e saída eram constantes ($0,16 \times 1\text{m}$) assim como a profundidade da câmara de ar ($0,40\text{m}$). A superfície envidraçada estava orientada para o sul (Figura 69).

Foram feitas simulações para três dias de projeto utilizando tanto o modelo “Full Exterior” quanto o “Full Interior And Exterior”. Assim por cada chaminé foram obtidos dois grupos de resultados diferentes, dependendo do modelo de distribuição solar que estivesse sendo utilizado: Chaminé 1 (“Chaminé inclinada” com “Full Exterior”), Chaminé 2 (“Chaminé inclinada” com “Full Interior And Exterior”), Chaminé 3 (“Chaminé vertical” com “Full Exterior”), Chaminé 4 (“Chaminé vertical” com “Full Interior And Exterior”).

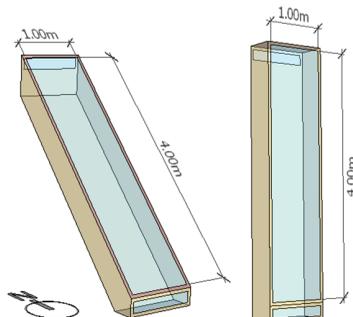


Figura 69. Chaminés utilizadas no teste do modelo de distribuição solar

Encontrou-se que mesmo que o modelo “Full Exterior” fizesse uma simplificação do cálculo da irradiação, as vazões obtidas com ele não apresentavam uma diferença significativa em relação aos valores obtidos utilizando o modelo “Full Interior And Exterior”. Na média para os três dias a diferença máxima entre um e outro modelo na chaminé inclinada foi de 4.4% e para a chaminé vertical foi de 2% (Tabela 21 e Tabela 22).

Tabela 21. Vazão total do dia [m³/dia] dependendo do modelo de distribuição solar

<i>Dia projeto</i>	<i>Chaminé 1</i>	<i>Chaminé 2</i>	<i>Chaminé 3</i>	<i>Chaminé 4</i>
Junho	2347	2393	2402	2411
Setembro	2712	2840	2436	2442
Dezembro	2905	3112	2935	3104

Modelo “Full Exterior”: Chaminé 1 e 3, Modelo “Full Interior And Exterior”: Chaminé 2 e 4.

Tabela 22. Diferença na vazão dependendo do modelo de distribuição solar

<i>Dia projeto</i>	<i>Diferença Chaminé1 e2</i>		<i>Diferença Chaminé3 e4</i>	
	<i>%</i>	<i>m³/dia</i>	<i>%</i>	<i>m³/dia</i>
Junho	1,9	46	0,4	9,2
Setembro	4,5	128	0,2	5,4
Dezembro	6,6	206	5,4	168,9
Média	4,4	127	2	61,2

Mesmo que o modelo “Full Interior And Exterior” permita considerar o fenômeno físico com maior semelhança com o que acontece na realidade, para o cálculo que o Energyplus faz isto não é tão relevante. No Energyplus não interessa tanto qual é a superfície exata que recebe a irradiação direta, e sim a troca total de calor entre todas as superfícies e o nó.

3.2 SIMULAÇÃO

Uma vez configurado o modelo do Energyplus, fizeram-se as simulações dividindo-as em quatro fases e considerando um período de tempo igual a um dia projeto. Cada fase foi definida com o intuito de atingir cada um dos objetivos específicos da pesquisa. Na Tabela 23

apresenta-se um resumo das fases das simulações. Conforme avançavam as fases, adotavam-se as melhores configurações encontradas na fase anterior, com o intuito de obter o melhor comportamento e evitar o processamento excessivo de dados.

3.2.1 Fase 1: Análise dos dias de projeto, a condição de vento e o modo de abertura

Foi feita uma análise dos efeitos produzidos pelas temperaturas dos três dias de projeto estudados, pelas três condições de vento e pelo modo de abertura das janelas sobre o comportamento da cozinha. As três condições de vento foram definidas em função do comportamento típico em Quibdó. Assim, avaliou-se o efeito produzido por ventos procedentes do norte e do sul, além da condição em que não há vento.

A análise do modo de aberturas pretendia determinar o efeito produzido pela mudança na configuração das janelas por parte dos ocupantes.

Para esta fase foi utilizado o modelo da Casa 1, com uma inclinação de chaminé de 26,7° (50% de inclinação). Nas fases seguintes, só foi considerada a condição “sem vento”, onde se apresentam as condições de maior desconforto térmico.

Para as simulações sem vento, mesmo que a geometria mudasse, não foi necessário inserir novos valores dos coeficientes de pressão. Como foi verificado, uma mudança nestes valores não influenciava os resultados, sendo que este coeficiente representa apenas o efeito gerado pelo vento.

3.2.2 Fase 2: Inclinação da chaminé

Nesta fase, analisou-se a influência do grau de inclinação da chaminé no comportamento da cozinha.

A análise foi dividida em duas partes: em primeiro lugar, avaliou-se o aumento do ganho de calor por irradiação em função da mudança do ângulo de inclinação da chaminé. Na segunda parte, avaliou-se o efeito de três inclinações de chaminé sobre o comportamento da cozinha utilizada na fase 1. Duas dessas inclinações equivaliam às melhores quanto ao ganho de calor por irradiação detectado no passo

anterior. A outra inclinação foi obtida com base nas recomendações para chaminés solares, encontradas na bibliografia pesquisada. Nesta inclinação, levava-se em conta não só o ganho de calor por irradiação, mas também a diferença de altura entre as aberturas da chaminé.

3.2.3 Fase 3: Localização da cozinha

Verificou-se qual cozinha apresentava o melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar, levando em consideração as mudanças de localização desse ambiente na planta arquitetônica.

Nesta fase adotaram-se as melhores configurações das fases precedentes sob as condições mais exigentes para atingir conforto térmico. Para isto, foram simulados os três tipos de casas restantes e, posteriormente, foram feitas as comparações respectivas entre as quatro opções avaliadas.

3.2.4 Fase 4: Aumento da área de absorção de irradiação

Nesta fase, avaliou-se o efeito produzido na cozinha quanto à temperatura e ventilação devido ao aumento da área de absorção de irradiação em cinco tipos de chaminé solar. Para obter uma referência do efeito produzido pelas chaminés, incluiu-se uma estratégia que não utilizava chaminés solares. Essas simulações foram feitas utilizando a cozinha que apresentou o melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar, encontrada na fase três.

Tabela 23. Esquema das simulações

Estratégia	Casa	Inclinação	Modo aberturas	Dia de projeto	Vento	Fases	
Chaminé pequena	Casa 1	26.7	Modo 1	Solstício Verão (06/21)	Norte Sul Sem Vento	FASE 1 (Temperaturas dias de desenho, Condição de vento e Modo de aberturas)	
				Equinócio Outono (09/21)	Norte Sul Sem Vento		
				Solstício Inverno (12/21)	Norte Sul Sem Vento		
			Modo 2	Solstício Verão (06/21)	Norte Sul Sem Vento		
				Equinócio Outono (09/21)	Norte Sul Sem Vento		
				Solstício Inverno (12/21)	Norte Sul Sem Vento		
			Modo 3	Solstício Verão (06/21)	Norte Sul Sem Vento		
				Equinócio Outono (09/21)	Norte Sul Sem Vento		
				Solstício Inverno (12/21)	Norte Sul Sem Vento		
		Recomendada pela bibliografia	Modo melhor	3 dias de projeto	Pior condição de vento para atingir conforto térmico		FASE 2 (Inclinação da chaminé)
		Máximo ganho de irradiação em um dia de projeto	=	=	=		
		Máximo ganho médio para o ano inteiro	=	=	=		
		Casa 2	Melhor inclinação	=	Pior dia de projeto para atingir conforto térmico		=
	Casa 3	=	=	=	=		
	Casa 4	=	=	=	=		
1. Sem chaminé	Melhor Casa	=	=	=	=	FASE 4 (Área de absorção de irradiação da chaminé)	
2. Chaminé fase 3	=	=	=	=	=		
3. Chaminé fase 3 + Chaminé vertical	=	=	=	=	=		
4. Chaminé de teto maior + chaminé vertical	=	=	=	=	=		
5. Chaminé de teto maior sem chaminé vertical	=	=	=	=	=		
6. Chaminé vertical só	=	=	=	=	=		

= Valor adotado de síntese previa

Ao interior da Fase 2 se fez uma análise complementar para determinar os ganhos de irradiação solar em função da inclinação da cobertura. Para isto utilizou-se um modelo simplificado:

Não aplica	Volume retangular de cobertura = 1m ²	Foram testados 17 tipos de inclinações	Não aplica	Solstício Verão, Equinócio Outono e Solstício Inverno	Não aplica	FASE 2 (Análise do ganho da irradiação)
------------	--------------------------------------------------	----------------------------------------	------------	-------------------------------------------------------	------------	--------------------------------------------

3.2.5 Avaliação do comportamento da cozinha

Inicialmente, determinou-se que o comportamento da cozinha seria avaliado através das variáveis de “Temperatura de bulbo seco” (°C) e “Quantidade de trocas de ar por hora = ACH”. No entanto, ao longo das análises percebeu-se a necessidade de incluir variáveis adicionais que permitissem fazer análises mais aprofundadas. Para isto, foram incluídas variáveis de “Fluxo volumétrico de ar” (m³/s), “Fluxo de massa de ar” (kg/s) e volume de ar em m³. Nas fases finais, foi incluída a variável de “Temperatura radiante média” e “Temperatura operativa” para obter uma estimativa melhor das condições de conforto. Como os ambientes considerados possuíam baixas velocidades de vento, adotou-se um valor de temperatura operativa como sendo a média entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média.

Devido à pequena variação apresentada entre os valores de temperatura média diária, foi incluída a variável de “Graus Hora de Refrigeração” a partir da fase 2 e as fases subseqüentes. Esta variável mostra melhor as diferenças entre os casos, sendo calculada com base horária e não diária. Para obter os “Graus Hora de Refrigeração” deve-se fazer o somatório das diferenças de temperatura média (T_{méd}) de um espaço, quando esta se encontra acima de uma temperatura base (T_b) (GOULART et al., 1998). Para o presente trabalho a temperatura base (T_b) foi fixada em 26°C. Por tanto, para todos os valores horários de temperatura média que estivessem acima de 26°C foi aplicada a resta (T_{méd} - T_b), somando-se estas diferenças, hora a hora, para todo o dia.

A fim de analisar o ganho de calor por irradiação dependendo da inclinação da chaminé, foi incluída uma variável que permitisse conhecer a quantidade de irradiação incidente na superfície da chaminé. Para isto, utilizou-se a variável “Surface Exterior Solar Incident”, dada pelo Energyplus em (W/m²). Nessa variável, considera-se tanto a irradiação direta como a difusa, provenientes de todas as fontes possíveis - sol, céu, terreno e obstruções.

3.2.5.1 Cálculo de trocas de ar por hora

Conforme eram feitas as análises do comportamento, percebeu-se que o valor dado pelo Energyplus para as “Trocas de ar por hora”

nos relatórios de saída poderia induzir a uma interpretação errada dos resultados. O procedimento utilizado por esse programa para calcular o número de trocas de ar só considera as trocas de ar produzidas pelo ar exterior. Desta maneira, as trocas produzidas pelo ar procedente de outras zonas da residência são desconsideradas. No caso da presente pesquisa, foram detectados fluxos importantes provenientes de outras zonas, que contribuíam para a melhoria do comportamento da cozinha.

Sendo assim, foi necessário calcular as trocas de ar com base em duas variáveis que podem ser solicitadas no relatório de saída do Energyplus: “Volume infiltration” e “Volume mixing”. O “Volume infiltration” faz a conta da quantidade de ar que entra do exterior para a zona da qual foi pedido esse valor. O “Volume mixing”, por sua vez, considera o ar que entra na zona estudada proveniente de outras zonas. Somando esses dois valores, desde que solicitados com uma frequência horária, e dividindo o resultado dessa soma pelo volume da zona é possível obter o valor de “trocas de ar por hora” total.

3.2.5.2 Avaliação do conforto

Para avaliar o conforto foi adotado o método adaptativo do Standard 55-2010 da ASHRAE, dada a sua conveniência para avaliar a resposta térmica das pessoas que habitam edifícios ventilados naturalmente. Além disso, esse método permite obter uma estimativa do conforto sem que seja necessário especificar um valor para a velocidade do vento ao redor das pessoas, variável que não foi possível determinar no presente trabalho dadas as limitações do Energyplus.

3.2.5.3 Ponderação do comportamento

Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados nas tabelas elaboradas para tal fim, foi criada uma escala de avaliação de dez pontos. A escala ia desde a nota “0” até “10”, sendo “0” o pior valor da variável que estivesse sendo avaliada e “10” o melhor. Com base no diferencial entre o melhor valor e o pior, criaram-se dez intervalos separados por mudanças percentuais de 10% em relação a esse diferencial.

O critério para definir a melhor nota dependia da variável que estivesse sendo avaliada. Assim, a nota “10” para a temperatura era

atingida pelo menor valor desta variável, enquanto que para as “trocas de ar por hora” isto acontecia com o valor superior (Figura 70).

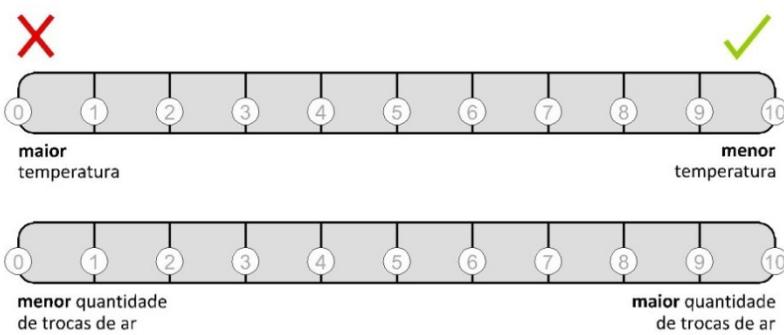
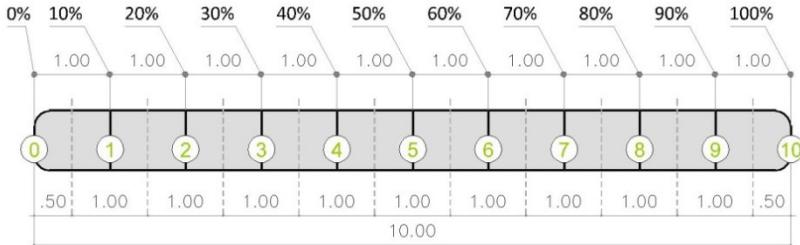


Figura 70. Intervalos de avaliação

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados deste trabalho em função das 4 fases de simulação. Em primeiro lugar são apresentados os efeitos produzidos pelos dias de projeto, a condição de vento e o modo de aberturas sobre o comportamento da cozinha (fase 1). A seguir analisou-se a influência do grau de inclinação da chaminé no comportamento da cozinha (fase 2). Finalmente verificou-se qual cozinha apresentava o melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar (fase 3) e avaliou-se a melhoria que seria possível obter com o aumento da área de absorção de irradiação na chaminé solar (fase 4).

4.1 FASE 1: DIAS DE PROJETO, CONDIÇÃO DE VENTO E MODO DE ABERTURA

Nesta fase, analisou-se o comportamento da cozinha considerando as temperaturas obtidas dependendo dos dias de projeto utilizados, a quantidade de trocas de ar por hora, a fonte da qual vinha o ar que entrava na cozinha, o balanço do fluxo apresentado na cozinha e a direção dos fluxos nas aberturas da cozinha.

4.1.1 Dias de projeto

4.1.1.1 Temperatura nos dias de projeto

Mesmo que a temperatura apresente um comportamento semelhante ao longo do ano todo em Quibdó, a informação adotada para cada dia de projeto permite apreciar diferenças segundo o dia que estivesse sendo analisado. Assim, entre os três dias de projeto utilizados, o solstício de inverno foi o que apresentou as temperaturas mais baixas entre as 09:00 e 23:00 horas. No solstício de verão, ocorreram as maiores temperaturas sempre. Em média, a temperatura do solstício de verão foi de 27,8 [°C], no “Equinócio” foi de 26,9 [°C] e no solstício de inverno foi de 26,3 [°C] (Figura 71). A localização de Quibdó perto da linha do Equador faz com que a diferença entre as temperaturas para os diferentes dias de projeto utilizados seja muito pequena. A diferença média entre o verão e o inverno é de 1,5 °C.

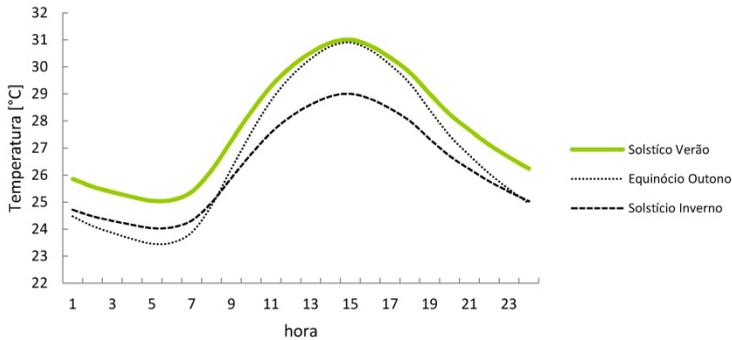


Figura 71. Temperatura dias de projeto

4.1.1.2 Irradiação em cada dia de projeto

Os valores de irradiação difusa foram maiores do que os valores da irradiação direta, devido que as condições climáticas sob as quais foram feitas as simulações equivaliam a um céu com nuvens (objeto “Sky Clearness” = 0,5). Caso o valor desse objeto fosse de 1, equivalente a um dia sem nuvens, os valores de irradiação direta seriam superiores dos da irradiação difusa. No “Solstício de Inverno” apresentaram-se os maiores valores para a irradiação direta e os menores para a irradiação difusa. Os maiores valores de irradiação difusa foram atingidos no “Equinócio de Outono” (Figura 72).

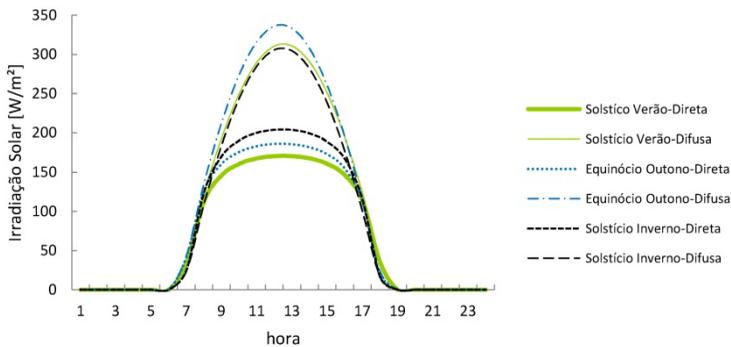


Figura 72. Irradiação em cada dia de projeto

4.1.1.3 Temperatura da cozinha

Fazendo uma análise dos 27 casos simulados, encontrou-se que o solstício de inverno foi o dia que apresentou as cozinhas com as temperaturas menores. Esse comportamento está em concordância com as temperaturas de cada dia de projeto, considerando que no inverno se apresentam as menores temperaturas (Tabela 25).

No intuito de ter uma referência do que acontecia quando a cozinha não utilizava chaminé, foi simulado um caso que não utilizasse esta estratégia de condicionamento (ver linha “Sem chaminé nem vento” na Tabela 25). Pelo identificado, a presença da chaminé não apresenta nenhuma influencia nos valores médios diários de temperatura.

O comportamento da temperatura interna apresentou pequenas variações em função da condição de vento. Sob influência do “Vento sul” foi obtida a menor temperatura média para todas as simulações (28,7 °C), seguida pela temperatura obtida com o “Vento norte” (28,8 °C). Já para a condição “Sem vento”, a temperatura foi de 29 °C (Tabela 24).

Sob a configuração “Modo 1 + Vento sul + Solstício inverno” foi atingido o menor valor de temperatura média, equivalente a 26,8 °C. Para a condição em que não havia vento, a menor temperatura foi de 27,3°C, sendo atingida sob o mesmo modo de abertura e dia de projeto encontrado para as condições em que o vento estava presente.

A temperatura média da cozinha sempre foi menor do que a temperatura média da chaminé e maior do que a temperatura média do exterior e da sala de estar (Tabela 26).

Tabela 24. Temperatura média para as 3 condições de vento

Condição de Vento	T. Média [°C]
Vento Norte	28,5
Vento Sul	28,4
Sem Vento	28,7

Tabela 25. Temperaturas - Fase 1

Modo aberturas	Condição de Vento	Posição do sol	T. Cozinha (média do dia)	
			[°C]	Nota (menor valor)
Modo 1 - Tudo aberto	Vento Norte	Sols. Verão	28,4	6
		Equinócio	27,4	8
		Sols. Inverno	26,9	10
	Vento Sul	Sols. Verão	28,2	6
		Equinócio	27,3	9
		Sols. Inverno	26,8	10
	Sem Vento	Sols. Verão	28,7	5
		Equinócio	27,8	8
		Sols. Inverno	27,3	9
	Sem Chaminé nem Vento	Sols. Verão	28,7	5
		Equinócio	27,8	8
		Sols. Inverno	27,3	9
Modo 2 - Veneziana fechada	Vento Norte	Sols. Verão	28,3	6
		Equinócio	27,5	8
		Sols. Inverno	26,9	10
	Vento Sul	Sols. Verão	28,2	6
		Equinócio	27,4	9
		Sols. Inverno	26,8	10
	Sem Vento	Sols. Verão	28,6	6
		Equinócio	27,7	8
		Sols. Inverno	27,2	9
Modo 3 - Tudo fechado	Vento Norte	Sols. Verão	30,9	0
		Equinócio	30,2	2
		Sols. Inverno	29,8	3
	Vento Sul	Sols. Verão	30,8	0
		Equinócio	30,2	2
		Sols. Inverno	29,8	3
	Sem Vento	Sols. Verão	30,8	0
		Equinócio	30,2	2
		Sols. Inverno	29,8	3

Tabela 26. Diferenciais de Temperatura

Modo aberturas	Condição de Vento	Posição do sol	Temperatura média [°C]			
			T. Exterior	T. Cozinha	T. Chaminé	T. Estar
Modo 1 - Tudo aberto	Vento Norte	Sols. Verão	27,8	28,4	29,2	28,0
		Equinócio	26,9	27,4	28,7	27,1
		Sols. Inverno	26,3	26,9	28,3	26,5
	Vento Sul	Sols. Verão	27,8	28,2	29,2	28,0
		Equinócio	26,9	27,3	28,7	27,0
		Sols. Inverno	26,3	26,8	28,3	26,5
	Sem Vento	Sols. Verão	27,8	28,7	29,6	28,4
		Equinócio	26,9	27,8	29,2	27,4
		Sols. Inverno	26,3	27,3	28,7	26,9
	Sem Chaminé nem Vento	Sols. Verão	27,8	28,7	-	28,4
		Equinócio	26,9	27,8	-	27,4
		Sols. Inverno	26,3	27,3	-	26,9
Modo 2 - Veneziana fechada	Vento Norte	Sols. Verão	27,8	28,3	29,2	28,0
		Equinócio	26,9	27,5	28,7	27,1
		Sols. Inverno	26,3	26,9	28,3	26,6
	Vento Sul	Sols. Verão	27,8	28,2	29,2	27,9
		Equinócio	26,9	27,4	28,7	27,0
		Sols. Inverno	26,3	26,8	28,3	26,5
	Sem Vento	Sols. Verão	27,8	28,6	29,5	28,3
		Equinócio	26,9	27,7	29,2	27,3
		Sols. Inverno	26,3	27,2	28,6	26,8
Modo 3 - Tudo fechado	Vento Norte	Sols. Verão	27,8	30,9	32,0	28,5
		Equinócio	26,9	30,2	32,3	27,5
		Sols. Inverno	26,3	29,8	32,1	27,1
	Vento Sul	Sols. Verão	27,8	30,8	32,0	28,5
		Equinócio	26,9	30,2	32,2	27,5
		Sols. Inverno	26,3	29,8	32,1	27,1
	Sem Vento	Sols. Verão	27,8	30,8	31,9	28,5
		Equinócio	26,9	30,2	32,2	27,6
		Sols. Inverno	26,3	29,8	32,0	27,1

Para entender melhor como se comportavam a chaminé, a sala de estar e o exterior ao longo do dia, foram criados gráficos nos quais estão plotados os valores das temperaturas.

Nesta seção, são apresentados somente os comportamentos típicos, identificados entre todas as simulações feitas para a primeira fase. O apêndice B1 apresenta o comportamento de todas as simulações, caso queira-se fazer uma análise detalhada de cada uma delas.

4.1.1.4 Comportamento típico da temperatura

Para os três modos de aberturas e as três condições de vento apresentou-se sempre o seguinte comportamento:

A maior diferença entre a temperatura da chaminé e da cozinha em relação ao exterior aconteceu às 12:00 horas, a maior diferença entre a temperatura da chaminé em relação à cozinha ocorreu às 13:00 horas e a temperatura máxima do exterior foi atingida às 15:00 horas.

Mesmo com uma média de temperatura maior do que a sala de estar, a cozinha chegava a atingir uma temperatura inferior às 11h da manhã, em certas ocasiões.

Apesar de a chaminé estar mais quente que o exterior, em média, às 07:00 horas ela sempre era mais fria. Às vezes isto acontecia antes deste horário, sendo este comportamento mais claramente identificável quando não havia vento e no “Modo 3”.

Mesmo tendo uma média de temperatura superior à cozinha, a chaminé ficava com temperatura inferior entre as 19:00 e 08:00h. Dependendo da condição do vento, como no caso do vento sul e norte, isto ocorria por um período menor. Essa diferença de temperatura poderia acontecer no período compreendido entre 23:00 e 07:00h, porém, com valores pouco consideráveis (inferiores a 0,5°C).

Nos momentos em que se estava cozinhando, a temperatura da cozinha aumentava devido às cargas internas de pessoas e equipamentos. Quando as aberturas da casa estavam fechadas e a chaminé aberta (Modo 3), os picos produzidos pelas cargas internas aumentavam.

A análise anterior pode ser conferida através da Figura 73, Figura 74 e Figura 75.

4.1.1.4.1 Modo 1 e 2 + Vento Norte e sul

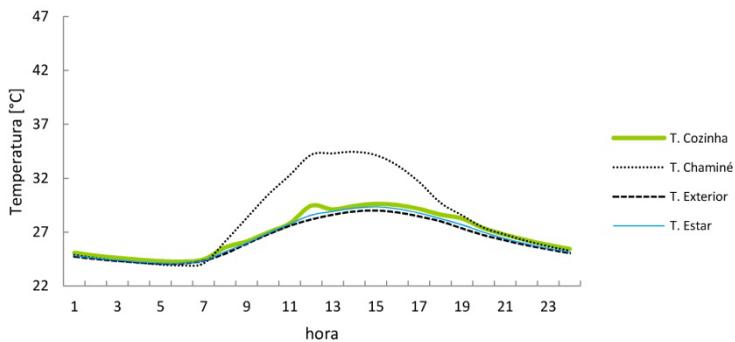


Figura 73. Temperatura – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento Norte e sul

4.1.1.4.2 Modo 1 e 2 + Sem vento

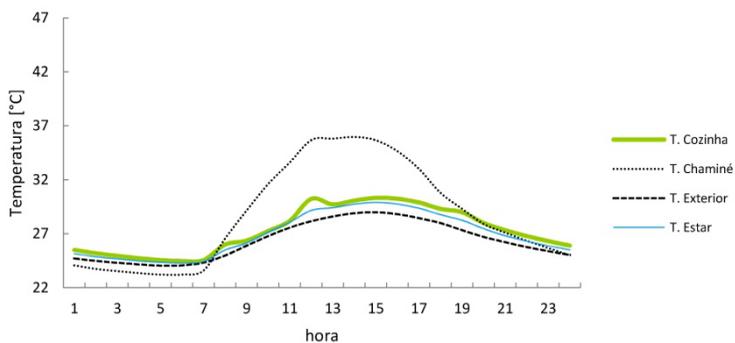


Figura 74. Temperatura – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento

4.1.1.4.3 Modo 3

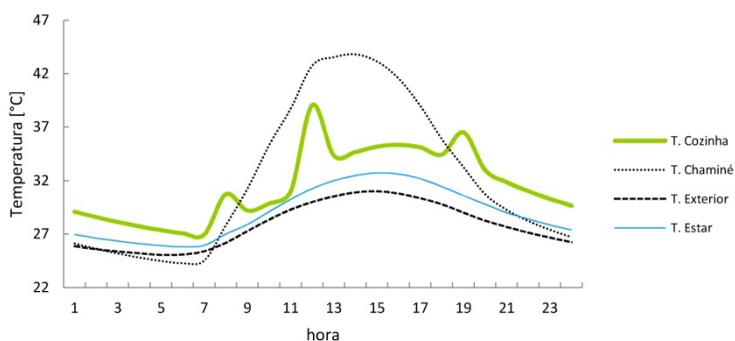


Figura 75. Temperatura - Comportamento típico Modo 3

4.1.2 Trocas de ar na cozinha

Em média, encontrou-se que as direções de vento sul e norte permitiam obter a maior quantidade de trocas de ar por hora (ACH). A diferença no valor de trocas entre as correntes de ar em ambas as direções apresentavam uma diferença mínima equivalente a 1,9%, sendo que sob a influência do vento sul atingia-se 42,8 trocas e com vento norte 42. Já para a condição “Sem vento”, as trocas diminuía uma porcentagem de 37,4% em relação à condição de vento sul, obtendo-se um valor de 26,8 (Tabela 27).

Para conhecer o efeito gerado pela chaminé, foi simulado um caso que não utilizasse esta estratégia de condicionamento. Pelo identificado, a chaminé tem uma pequena influencia nos valores médios diários de trocas de ar por hora. Dependendo do dia de projeto, a chaminé aumentava as renovações no espaço da seguinte maneira: Solstício verão = 0,3 ACH, equinócio = 0,7 ACH e solstício inverno = 0,4 ACH a mais (Tabela 28).

Uma análise mais detalhada de cada um dos 27 casos simulados (Tabela 28) permite detectar que o valor máximo atingido foi de 73,6 trocas. Isto aconteceu no “Modo 1 + Vento sul + Solstício inverno”. Quando não havia vento, o valor máximo de trocas de ar por hora era de 43,4 e isso ocorria no “Modo 1 + Solstício de inverno”.

A queda considerável das trocas de ar à medida que as aberturas iam sendo fechadas confirma que a modelagem feita dos três modos de abertura estava representando adequadamente a influência que tinha o vento sobre os espaços interiores. Quando as aberturas da casa estavam fechadas (Modo 3), o vento não influía significativamente no comportamento das trocas de ar. Assim, apresentavam-se valores semelhantes para todas as condições de vento avaliadas sob este modo.

Tabela 27. Média das trocas de ar por hora (ACH) para as 3 condições de vento

Condição de vento	ACH Médio
Vento Norte	42,0
Vento Sul	42,8
Sem Vento	26,8

Tabela 28. Trocas de ar por hora (ACH) - Fase 1

Modo aberturas	Condição de Vento	Posição do sol	Vazão Cozinha	
			ACH (média do dia)	Nota
Modo 1 - Tudo aberto	Vento Norte	Sols. Verão	71,3	10
		Equinócio	72,1	10
		Sols. Inverno	72,1	10
	Vento Sul	Sols. Verão	72,2	10
		Equinócio	73,3	10
		Sols. Inverno	73,6	10
	Sem Vento	Sols. Verão	41,3	6
		Equinócio	42,6	6
		Sols. Inverno	43,4	6
	Sem Chaminé nem Vento	Sols. Verão	41,0	6
		Equinócio	41,9	6
		Sols. Inverno	43,0	6
Modo 2 - Veneziana fechada	Vento Norte	Sols. Verão	52,8	7
		Equinócio	53,9	7
		Sols. Inverno	53,5	7
	Vento Sul	Sols. Verão	54,0	7
		Equinócio	55,1	7
		Sols. Inverno	54,8	7
	Sem Vento	Sols. Verão	36,3	5
		Equinócio	38,1	5
		Sols. Inverno	37,5	5
Modo 3 - Tudo fechado	Vento Norte	Sols. Verão	0,8	0
		Equinócio	0,8	0
		Sols. Inverno	0,8	0
	Vento Sul	Sols. Verão	0,8	0
		Equinócio	0,8	0
		Sols. Inverno	0,8	0
	Sem Vento	Sols. Verão	0,8	0
		Equinócio	0,8	0
		Sols. Inverno	0,8	0

4.1.2.1 Considerações do cálculo das trocas de ar

Como apontado na metodologia, o valor de trocas de ar foi calculado com base nas variáveis “volume infiltration” e “volume mixing”, sendo que o cálculo de trocas que se faz nesse programa desconsidera os fluxos vindos de outras zonas. A Tabela 29 apresenta as diferenças entre o valor adotado para as análises de comportamento, calculadas a partir das duas variáveis (coluna esquerda), e o valor oferecido pelo Energyplus (coluna direita). Nota-se como para todas as condições de vento, o número de trocas aumenta consideravelmente caso sejam considerados os fluxos totais da zona. Pelo contrário, caso seja utilizado o valor padrão que o Energyplus apresenta, o potencial da condição de vento norte seria subestimado ao mesmo tempo em que seria superestimada a condição sem vento.

Tabela 29. Diferenças das trocas de ar (ACH) dependendo do método utilizado

Condição de vento	ACH Médio Total	ACH Médio Energyplus
Vento Norte	42	0,1
Vento Sul	42,8	18,1
Sem Vento	26,8	4,8

No intuito de conferir se o método adotado para calcular a quantidade de renovações de ar por hora (ACH) estava certo, se fez uma análise detalhada das vazões obtidas em um dos dias de projeto. Para isto foi adotado o dia de projeto equivalente ao solstício de verão sob condições de vento norte.

Em primeiro lugar se fez uma somatória dos fluxos que estavam entrando e saindo por cada uma das quatro aberturas da cozinha (Figura 76). As vazões obtidas no Energyplus em $[m^3/s]$ foram convertidas em $[m^3/h]$ multiplicando o valor original por 3600s. Através disto foi possível verificar que os cálculos de vazão feitos pelo programa se encontravam em balanço, isto é: o que entra é igual ao que sai. Mesmo que existam diferenças em cada intervalo, essas diferenças não são significativas sendo que a maior magnitude é de $0,02 [m^3/h]$ (Tabela 30)

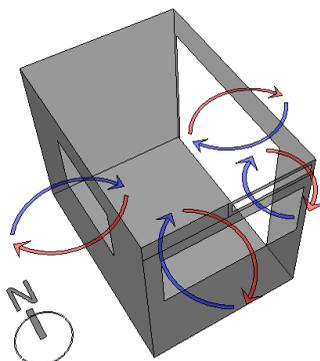


Figura 76. Esquema fluxos entrando (azul) e fluxos saindo (vermelho)

Tabela 30. Comparação entre somatória de fluxos entrando e saindo

<i>Hora</i>	<i>Somatória de fluxos [m³/h]</i>		<i>Diferença de fluxos Σ entrando - Σ saindo</i>
	<i>Entrando</i>	<i>Saindo</i>	
1	1051,25	1051,23	0,02
2	1037,99	1037,98	0,01
3	1020,78	1020,76	0,02
4	1009,64	1009,63	0,01
5	1001,67	1001,66	0,01
6	978,56	978,55	0,01
7	973,65	973,63	0,01
8	1105,31	1105,29	0,02
9	985,22	985,21	0,01
10	991,10	991,08	0,02
11	996,38	996,36	0,02
12	1288,03	1288,01	0,01
13	1013,16	1013,15	0,01
14	1000,28	1000,27	0,02
15	1012,87	1012,86	0,02
16	1055,86	1055,85	0,01
17	1079,09	1079,08	0,01
18	1086,16	1086,14	0,02
19	1200,33	1200,32	0,01
20	1130,71	1130,70	0,01
21	1117,60	1117,59	0,01
22	1093,41	1093,39	0,01
23	1076,29	1076,28	0,01
24	1062,43	1062,42	0,01

As vazões obtidas fazendo a somatória dos fluxos entrando ou saindo, foram comparadas com as vazões obtidas através da soma das variáveis de “volume mixing” e “volume infiltration”. Encontrou-se que as diferenças entre ambos os métodos eram muito pequenas, motivo pelo qual se garantiu que o cálculo de trocas de ar por hora (ACH) feito com base na somatória das variáveis “volume mixing” e “volume infiltration” estava certo (Tabela 31).

Tabela 31. Comparação entre somatória de fluxos entrando e somatória de “volume mixing” e “volume infiltration”

<i>Hora</i>	<i>Somatória de fluxos entrando [m³/h]</i>	<i>Somatória de “mixing” + “infiltration” [m³/h]</i>	<i>Diferença de fluxos (Mixing + Infiltration) - Σ entrando [m³/h]</i>
1	1051,25	1053,25	2,00
2	1037,99	1039,78	1,79
3	1020,78	1022,38	1,60
4	1009,64	1011,12	1,49
5	1001,67	1003,02	1,35
6	978,56	979,54	0,97
7	973,65	974,83	1,18
8	1105,31	1109,98	4,67
9	985,22	987,61	2,39
10	991,10	993,19	2,10
11	996,38	998,50	2,12
12	1288,03	1296,52	8,49
13	1013,16	1014,93	1,77
14	1000,28	1001,75	1,46
15	1012,87	1015,41	2,54
16	1055,86	1059,64	3,78
17	1079,09	1083,47	4,38
18	1086,16	1090,70	4,54
19	1200,33	1207,05	6,72
20	1130,71	1135,29	4,58
21	1117,60	1120,48	2,88
22	1093,41	1095,93	2,52
23	1076,29	1078,56	2,26
24	1062,43	1064,57	2,14

4.1.3 Fonte do ar que entra na cozinha

Para entender melhor o que acontecia em cada condição de vento, foi analisada a quantidade de ar que entrava na cozinha e a fonte da qual vinha esse ar. Assim, foi possível descobrir que o valor que o Energyplus atribuía para as trocas de ar não representava adequadamente o comportamento da ventilação.

Sendo assim, foram criados gráficos que contêm os dados de volume do ar que entra na cozinha em m^3 e a temperatura das diferentes zonas ao longo do dia. O volume foi representado através de dois tipos de barras verticais: uma para o ar que vem do exterior e outra para o que vem da sala de estar. A temperatura foi representada através de quatro tipos de linhas, sendo cada linha a temperatura de uma zona determinada: cozinha, chaminé, sala de estar ou exterior

Nesta seção, são apresentados somente os comportamentos típicos identificados em todas as simulações feitas para a primeira fase. O apêndice B5 apresenta o comportamento de todas as simulações, permitindo que se faça uma análise detalhada de cada uma delas.

4.1.3.1 Vento norte – Modo 1 e 2

Sob essa configuração, a maior parte do ar que entrava na cozinha vinha da sala de estar (Figura 77). Por vezes, havia fluxos vindos do exterior, porém sua magnitude era tão baixa que esses fluxos nem apareciam no gráfico.

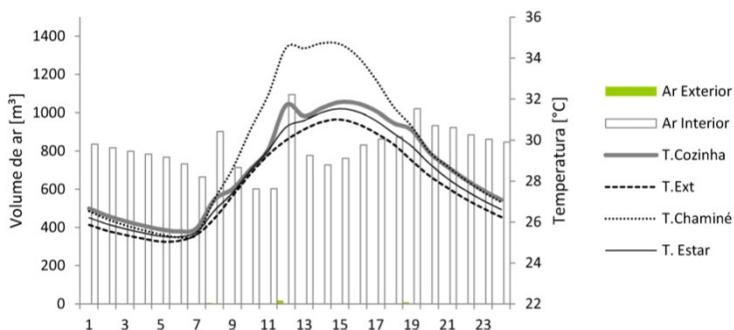


Figura 77. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento norte

4.1.3.2 Vento sul – Modo 1 e 2

Para essa configuração, os fluxos vinham tanto do exterior quanto da sala de estar em uma proporção semelhante. Na Figura 78, é possível observar como a quantidade de ar que vinha do interior da casa aumentava quando aconteciam os picos de temperatura. Esses picos potencializavam o efeito chaminé e eram produzidos pelo aumento das cargas de resfriamento quando se estava cozinhando.

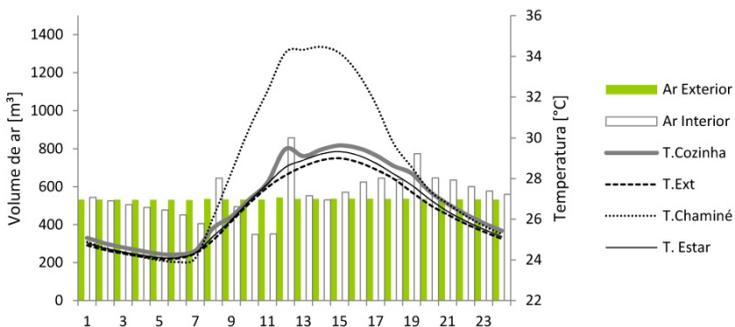


Figura 78. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento sul

4.1.3.3 Sem vento – Modo 1 e 2

Nesta configuração, o ar vinha tanto do exterior quanto do estar. Porém, a quantidade que vinha do exterior diminuía em relação à condição encontrada quando havia vento sul (Figura 79). Caso fosse utilizado o parâmetro de “Trocas de ar por hora” que o Energyplus oferecia, mesmo que essa quantidade diminuísse, a condição “Sem vento” atingia um desempenho superior do que quando havia vento norte (Tabela 29).

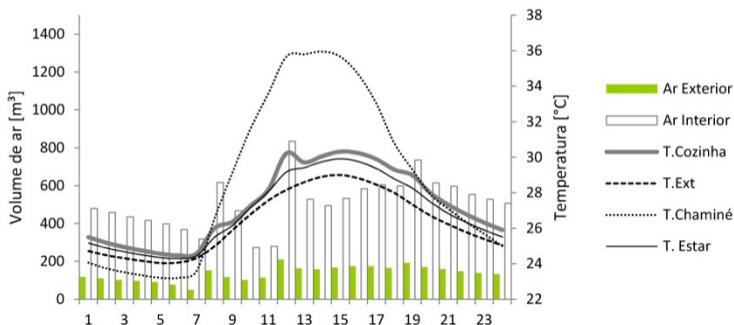


Figura 79. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento

4.1.3.4 Modo 3

Os fluxos vindos do exterior eram insignificantes, a maioria deles vinha do estar (Figura 80). Salienta-se que a magnitude da quantidade de ar que entrava sob “Modo 3” era significativamente menor do que o que entrava sob os outros modos. O valor máximo de m³ para esse gráfico (eixo vertical esquerdo) foi fixado em 18m³ para possibilitar a visualização do que estava ocorrendo. Desta maneira foi possível fazer comparações do comportamento em relação às outras configurações, as quais utilizavam um valor máximo de 1400m³ para esse mesmo eixo.

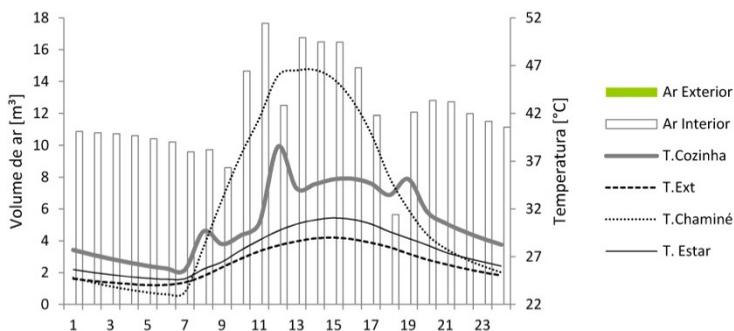


Figura 80. Fonte do ar - Comportamento típico Modo 3 – Com e Sem Vento

4.1.4 Balanço de fluxo

Com o intuito de explicar melhor as evidências encontradas na análise da fonte do ar, foi feito o balanço de fluxo para a cozinha em cada caso simulado. Através destes balanços, foi possível verificar que

o objeto “Detailed Opening” era o mais adequado para modelar a abertura de saída da cozinha para a chaminé, ao invés de usar o “Horizontal Opening”.

O balanço foi feito em cada abertura, considerando o ar que saía e o que entrava em cada intervalo. A quantidade de ar que entrava era subtraída da quantidade que saía. Um resultado negativo representava uma condição na qual entrava mais ar do que o que a quantidade de ar que estava saindo. De modo contrário, um resultado positivo indicava que a quantidade de ar que saía era maior do que a que entrava (Equação 3).

$$\text{Balanço do fluxo} = (\text{Fluxo que sai}) - (\text{Fluxo que entra})$$

Equação 3. Balanço de fluxo em cada abertura

Os gráficos possuem quatro barras verticais, representando o balanço do fluxo para cada uma das aberturas da cozinha. Estas aberturas eram a janela da fachada sul, a janela da fachada oeste, a porta que ligava a cozinha com o estar e a abertura de saída da cozinha para a chaminé (Figura 81). Adicionalmente, apresenta-se o comportamento das temperaturas da cozinha, da chaminé, do estar e do exterior através de quatro curvas.

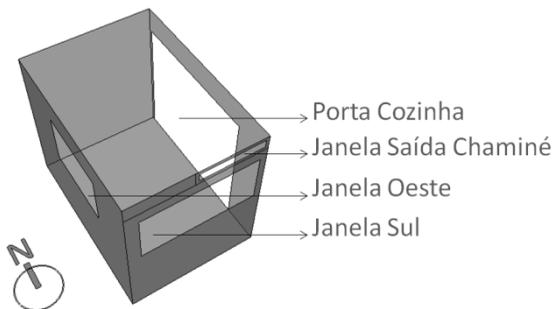


Figura 81. Desenho aberturas da cozinha

A análise do fluxo de ar foi cruzada com os valores inseridos para os coeficientes de pressão em cada abertura (Figura 82). Concluiu-se que quando o balanço de fluxo era negativo, os coeficientes de pressão eram positivos (ar estava sendo insuflado) e quando o balanço era

positivo, os coeficientes de pressão eram negativos (ar da cozinha era sugado).

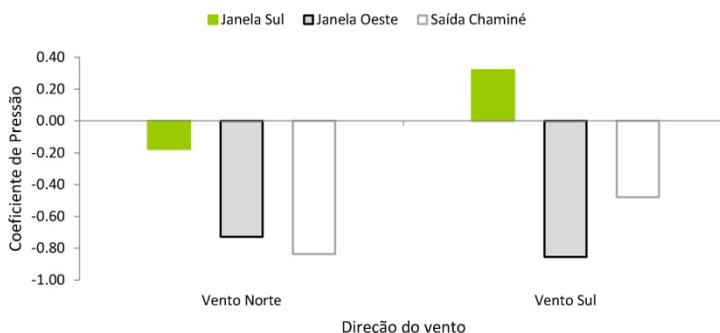


Figura 82. Coeficientes de pressão nas aberturas da cozinha

A seguir, apresenta-se a análise feita a partir dos gráficos do comportamento típico, dependendo do modo de abertura e da condição do vento. Uma análise mais detalhada pode ser feita através do apêndice B6, no qual estão contidos todos os gráficos de balanço, com base no qual foram detectados os comportamentos típicos.

4.1.4.1 Modo 1 e 2 – Vento sul

No comportamento típico para esta configuração, o ar entrava pela janela sul e a porta da cozinha, sendo maior o fluxo que entrava pela janela sul. Quanto à saída, o ar saía pela janela oeste e pela chaminé, sendo maior a proporção do ar que saía pela janela oeste (Figura 83).

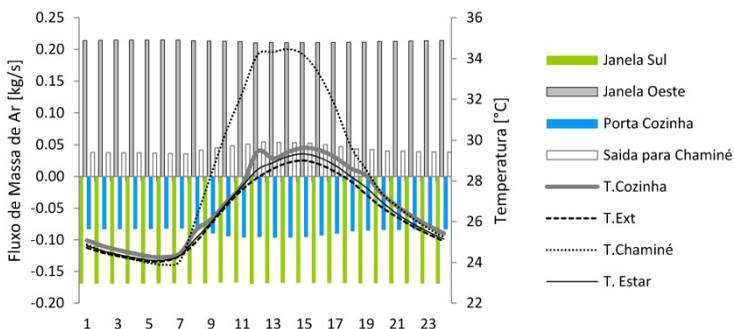


Figura 83. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 1 e 2 - Vento sul

4.1.4.2 Modo 1 e 2 – Vento norte

O ar entrava pela porta da cozinha procedente do estar e saía predominantemente pela janela oeste. Em menor proporção saía pela chaminé e janela sul (Figura 84)

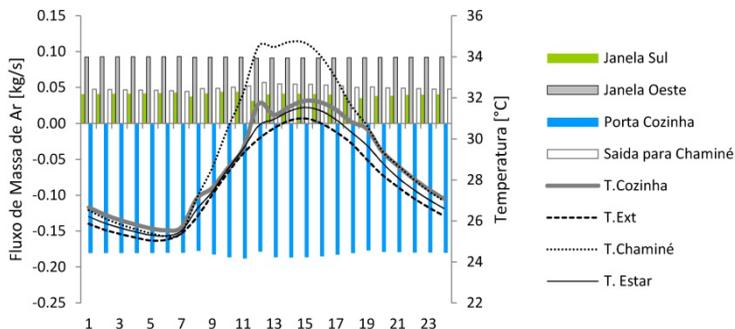


Figura 84. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 1 e 2 - Vento norte

4.1.4.3 Modo 1 e 2 – Sem vento

De madrugada, o ar entrava só pela chaminé e saía predominantemente pela porta da cozinha. No resto do dia e à noite, o comportamento se invertia: o ar entrava predominantemente pela porta da cozinha e saía pela chaminé. Em menor proporção, entrava ar pelas janelas sul e oeste (Figura 85)

Através deste gráfico, foi possível conferir que o fenômeno da diferença de temperatura estava sendo representado adequadamente. Quando a chaminé atingia temperaturas maiores do que o exterior, os fluxos através dela saíam para o exterior. De modo contrário, quando a chaminé apresentava uma temperatura inferior do que aquela do exterior apresentava-se o fenômeno dos fluxos reversos.

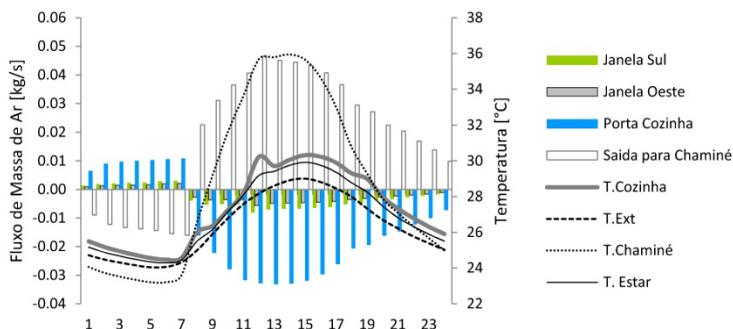


Figura 85. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento

4.1.4.4 Modo 3 – Todas as condições de vento

Para todas as condições de vento sob “Modo 3”, o ar entrava predominantemente pela porta da cozinha. Em menor proporção, entrava pelas janelas sul e oeste. Quanto à saída, o ar saía predominantemente pela chaminé. Às vezes, para as condições de “Vento sul” e “Sem vento” pequenos fluxos de ar saíam através das outras aberturas no começo da manhã (Figura 86).

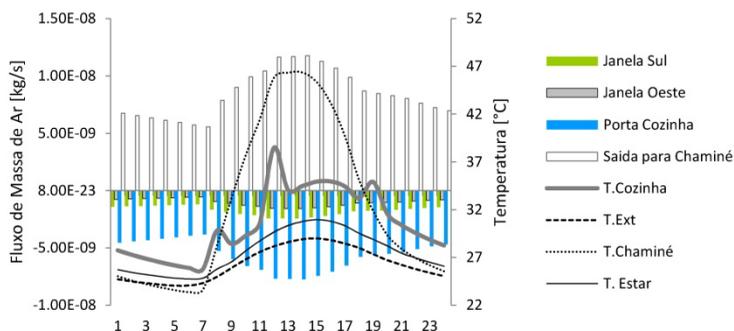


Figura 86. Balanço de fluxo – Comportamento típico Modo 3 – Todas as condições de vento

4.1.5 Direção do fluxo na chaminé

Foram produzidos gráficos para analisar o que estava ocorrendo na chaminé quanto à direção do fluxo. Nesses gráficos, apresentam-se tanto os fluxos que saem como os que entram em cada intervalo.

Porém, não se faz um balanço do fluxo descontando o que entra do que sai, como foi feito nos gráficos anteriores. Um valor positivo para o eixo Y, lado direito, representa o fluxo que sai da chaminé, enquanto que um valor negativo indica o fluxo que volta da chaminé para a cozinha.

Em primeiro lugar, fez-se uma análise da abertura que liga a cozinha com a chaminé. Depois, analisou-se o que acontecia na saída da chaminé para o exterior.

Da mesma forma como se fez nas análises prévias, nesta seção apresentam-se somente os comportamentos típicos detectados entre todas as simulações efetuadas. Os resultados de cada simulação podem ser verificados no apêndice B2.

4.1.5.1 Modo 1 e 2 – Vento norte e sul

Sob esta configuração, os fluxos na saída da cozinha para a chaminé sempre circulavam em sentido “cozinha-chaminé” (Figura 87).

A presença do vento favorecia a extração de ar através da chaminé. Os valores negativos dos coeficientes de pressão para a abertura de saída da chaminé permitiam que isso acontecesse. Quando havia vento, mesmo que a chaminé estivesse com uma temperatura inferior em relação ao exterior no começo da manhã, o ar sempre era extraído.

A presença simultânea do vento e a diferença de temperatura aumentavam a quantidade de ar que era extraída.

Ao meio dia, momento em que ocorriam os maiores diferenciais de temperatura da cozinha em relação ao exterior, o efeito chaminé aumentava e os fluxos extraídos da cozinha eram maiores. Esse aumento no diferencial acontecia devido ao aumento nos ganhos de calor por irradiação e nas cargas de resfriamento que ocorriam neste período.

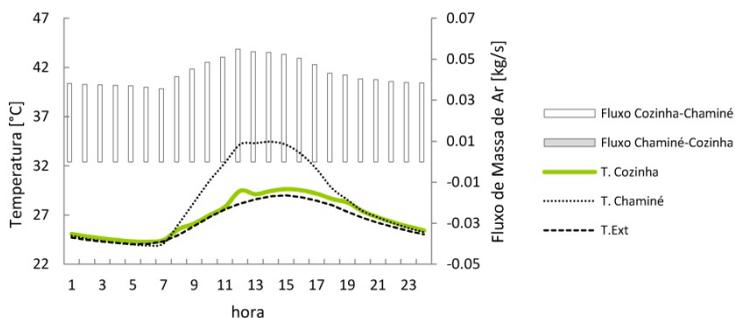


Figura 87. Conexão entre cozinha e chaminé – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento norte e sul

4.1.5.2 Modo 1 e 2 – Sem vento

Sob esta configuração, o fluxo era invertido de madrugada até às 7h, fazendo com que o ar circulasse em sentido “chaminé-cozinha”. Ao longo do dia e à noite o fluxo sempre estava em sentido “cozinha-chaminé” (Figura 88).

Quando não havia vento, o comportamento era oposto ao que se apresentava quando tinha vento. A diferença de temperatura da chaminé em relação ao exterior era o fator que determinava a direção do fluxo. Quando a chaminé apresentava uma temperatura inferior à do exterior, o ar entrava pela chaminé (fluxos reversos); quando a temperatura era superior à do exterior, o ar saía. Através desta evidência, foi possível verificar novamente a adequabilidade da modelagem feita para representar o fenômeno da diferença de temperaturas.

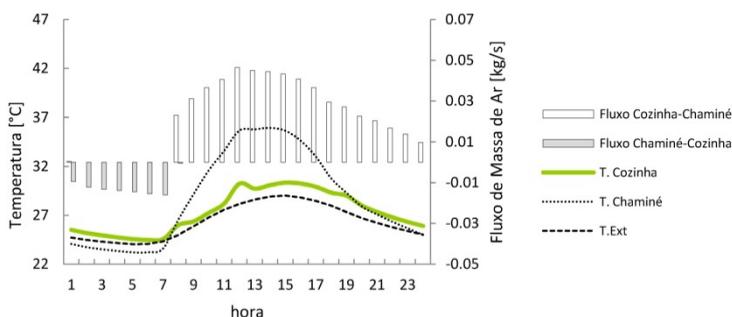


Figura 88. Conexão entre cozinha e chaminé –

Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento

4.1.5.3 Modo 3 – Todas as condições de vento

No “Modo 3” existiam fluxos nos dois sentidos permanentemente: “cozinha-chaminé” e “chaminé-cozinha”. O comportamento destes dois fluxos resultou em perfis semelhantes (Figura 89).

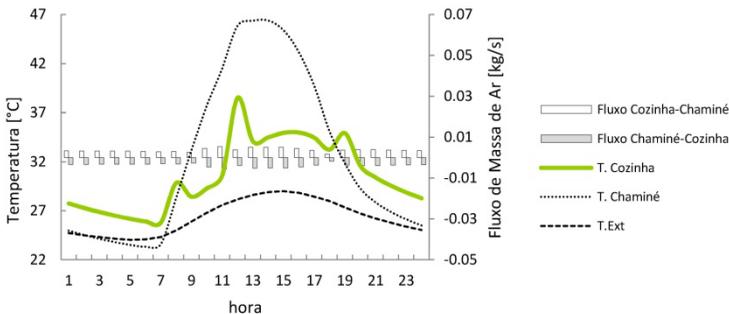


Figura 89. Conexão entre cozinha e chaminé – Comportamento típico Modo 3 – Todas as condições de vento

4.1.5.3.1 Direção do fluxo na saída da chaminé

Foi feita uma análise do comportamento apresentado pelo ar na abertura de saída da chaminé. Detectou-se que a análise feita na seção anterior para a conexão entre a cozinha e chaminé servia para explicar o que acontecia nesta parte da chaminé. Os valores de vazão são quase iguais, sendo que no modo 3 ocorrem as maiores diferenças. Porém, essas diferenças têm uma magnitude máxima de 0,0037 (kg/s).

No apêndice B3, encontram-se os gráficos detalhados do comportamento da abertura de saída da chaminé.

4.1.6 Direção de fluxo entre cozinha e sala de estar

Quando consideradas somente as “trocas de ar por hora”, as direções de vento norte e sul apresentavam comportamentos semelhantes. No entanto, analisando a direção dos fluxos de ar que aconteciam na porta que ligava a cozinha com o estar, apareceram

diferenças entre eles. Com base nestas diferenças, foi possível determinar qual direção de vento era melhor. Um valor positivo para o eixo Y, lado direito, representa o fluxo que sai da cozinha para a sala de estar, enquanto que um valor negativo indica o fluxo que vem do estar para a cozinha.

A seguir apresentam-se os gráficos dos comportamentos típicos encontrados. No apêndice B4 encontram-se os gráficos da direção de fluxo entre a cozinha e o estar para todas as simulações

4.1.6.1 Modo 1 e 2 – Vento norte

Sob esta configuração, os fluxos de ar em sentido “estar-cozinha” eram significativamente maiores do que os fluxos que saíam da cozinha para a sala de estar.

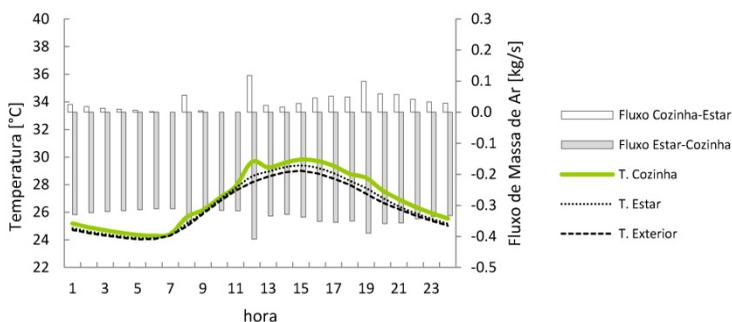


Figura 90. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento norte

4.1.6.2 Modo 1 e 2 – Vento sul

Para esta configuração, os fluxos de ar em sentido “cozinha-estar” aumentavam, mas mesmo assim continuavam sendo maiores os fluxos em sentido “estar-cozinha”.

Essa direção apresentou-se menos desejável do que a direção de vento norte. Com vento sul, uma maior quantidade de ar poluído era transferida da cozinha para o interior da casa.

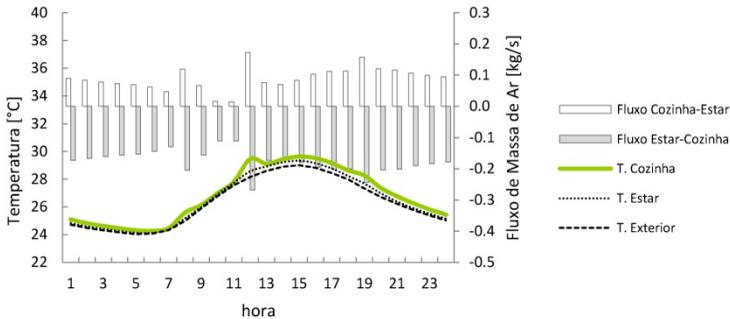


Figura 91. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Vento sul

4.1.6.3 Modo 1 e 2 – Sem vento

Sob esta configuração, os fluxos nos dois sentidos eram inversamente proporcionais: quanto mais ar saía da cozinha para a sala de estar, mais ar entrava do estar para a cozinha.

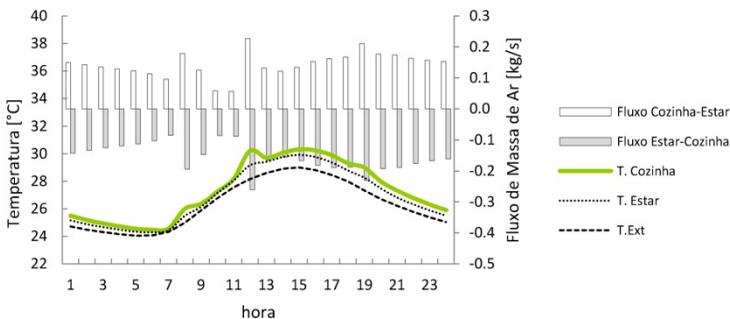


Figura 92. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 1 e 2 – Sem vento

4.1.6.4 Modo 3 – Vento norte e sul

Sob esta configuração, os fluxos de ar sempre estavam em sentido “estar-cozinha”, possibilitando o maior isolamento da cozinha. Porém, a magnitude dos fluxos era significativamente baixa em relação aos modos 1 e 2 (escala de valores do eixo vertical direito é menor).

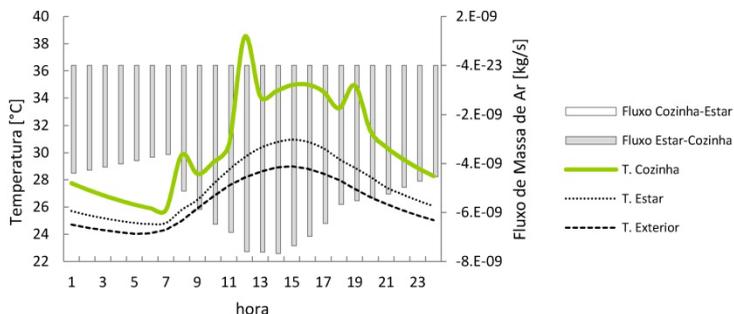


Figura 93. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 3 – Vento norte e sul

4.1.6.5 Modo 3 – Sem vento

Sob esta configuração, os fluxos de ar em sentido “estar-cozinha” aconteciam na maior parte do tempo. Só de madrugada é que ocorriam fluxos da cozinha para a sala de estar.

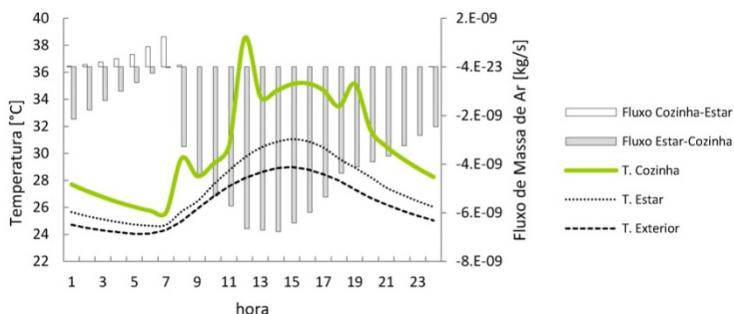


Figura 94. Conexão entre cozinha e estar – Comportamento típico Modo 3 – Sem vento

4.1.6.6 Magnitude do isolamento do ar da cozinha

Com o intuito de estabelecer quantitativamente o isolamento do ar que podia ser atingido na cozinha, foi construída uma tabela com os valores médios dos fluxos apresentados segundo o modo e a condição de vento.

Nessa tabela, faz-se a conta dos fluxos médios que saíam da cozinha para a sala de estar através da porta e vice-versa. Na última

coluna, é feito o balanço de fluxo, subtraindo os fluxos que saíam dos que entravam (fluxos entrando – fluxos saindo) (Tabela 32).

Com base nessa tabela, foi construída uma segunda tabela apresentando a média para cada condição de vento (Tabela 33). Assim, foi possível concluir que o maior isolamento entre a cozinha e o estar era obtido sob vento norte. Nessa condição de vento apresentavam-se os maiores fluxos em sentido “estar-cozinha”, ou seja, se tinha a maior Δ (fluxos entrando – saindo).

Tabela 32. Média dos fluxos na porta da cozinha – Para cada modo e condição de vento

Modo aberturas	Vento	média fluxos na porta da Cozinha		
		saindo da Cozinha [kg/s]	entrando na Cozinha [kg/s]	Δ fluxos (entram - saem) [kg/s]
Modo 1 - Tudo aberto	Vento Norte	0,0	0,3	0,3
	Vento Sul	0,1	0,2	0,1
	Sem Vento	0,1	0,2	0,1
	Sem chaminé nem vento	0,1	0,2	0,1
Modo 2 - Veneziana fechada	Vento Norte	0,1	0,2	0,2
	Vento Sul	0,1	0,2	0,1
	Sem Vento	0,1	0,1	0,0
Modo 3 - Tudo fechado	Vento Norte	0	0,0	0,0
	Vento Sul	0	0,0	0,0
	Sem Vento	0	0,0	0,0

Tabela 33. Média dos fluxos na porta da cozinha – Para cada condição de vento

Condição de Vento	Média Δ fluxos (entram - saem) [kg/s]
Vento Norte	0,2
Vento Sul	0,1
Sem Vento	0,0

4.2 FASE 2: INCLINAÇÃO DA CHAMINÉ

Nesta fase, analisou-se a influência do grau de inclinação de chaminé no comportamento da cozinha em condições sem vento. Em primeiro lugar, foi feita uma análise da variação do ganho de calor por irradiação, dependendo do grau de inclinação da chaminé e o ângulo de altitude solar dos três dias de projeto. Posteriormente, foram testados três tipos de inclinações de chaminé ligadas na cozinha da fase 1, considerando os melhores resultados dos ganhos de calor por irradiação e as recomendações encontradas na revisão bibliográfica. Para esta etapa foi considerada somente a condição “sem vento”, devido a existirem ali as maiores exigências para o conforto.

4.2.1 Ganho de calor por irradiação em função da inclinação

Na análise do ganho de calor por irradiação, utilizaram-se 17 coberturas, mudando o ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal em cada uma delas (Figura 95). A superfície da cobertura era de 1m^2 e os ângulos de inclinação variavam entre 0° e 45° . Utilizou-se os três dias de projeto adotados na fase prévia, os quais variavam em função dos valores extremos e médios do ângulo de declinação solar.

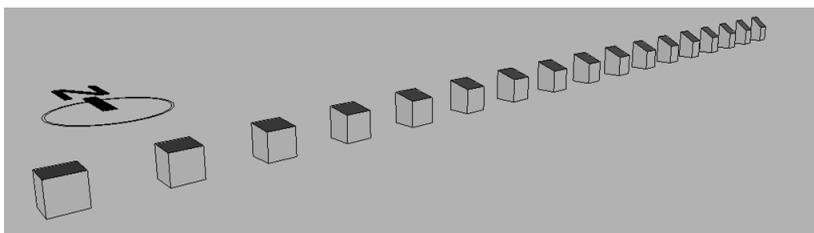


Figura 95. Modelos utilizados para avaliar ganho de calor por irradiação

As maiores diferenças nos ganhos de calor por irradiação conforme a inclinação era modificada aconteceram no solstício de verão. Por sua vez, as menores diferenças aconteceram no solstício de inverno. No equinócio, detectou-se um comportamento que reflete uma média entre os dois anteriores (Figura 96 e Apêndice C).

Os maiores ganhos de calor por irradiação no total do dia aconteceram no solstício de inverno. No solstício de verão, obtiveram-se os menores ganhos em todas as horas. Os maiores ganhos para

baixas inclinações (0° - $16,9^{\circ}$) aconteceram no equinócio; para inclinações maiores, ($19,7^{\circ}$ - 45°) isto ocorreu no solstício de inverno. Ao calcular a média para os três dias de projeto, detectou-se que o maior ganho foi obtido sob a inclinação de $8,4^{\circ}$ (Tabela 34). Nesse cálculo, o equinócio foi considerado duas vezes, pois ao longo do ano existem dois equinócios.

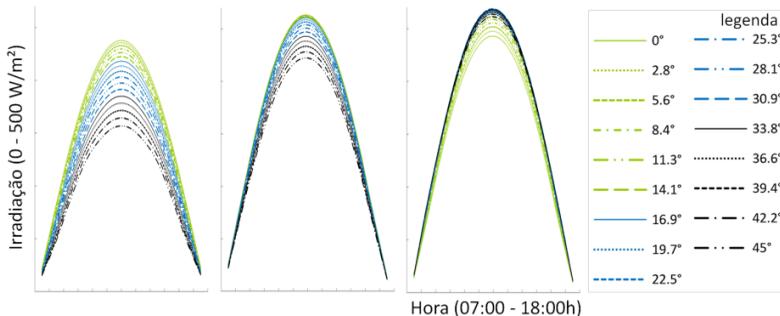


Figura 96. Ganho de calor por irradiação dependendo da inclinação da chaminé para cada dia de projeto. Esquerda: Verão, Centro: Equinócio, Direita: Inverno

Tabela 34. Ganho de calor por Irradiação para cada dia de projeto

Ângulo	Irradiação média para cada dia [W/m ²]			
	S. Verão	Equinócio	S. Inverno	Média anual (*)
0°	<u>148,06</u>	159,26	143,92	152,62
2,8°	146,32	159,74	146,83	153,16
5,6°	144,33	<u>159,95</u>	149,49	153,43
8,4°	142,12	159,89	151,91	<u>153,45</u>
11,3°	139,67	159,55	154,06	153,21
14,1°	137,00	158,95	155,95	152,71
16,9°	134,11	158,08	157,57	151,96
19,7°	131,02	156,93	158,92	150,95
22,5°	127,72	155,53	160,00	149,69
25,3°	124,23	153,86	160,80	148,19
28,1°	120,58	151,94	161,32	146,44
30,9°	116,76	149,76	<u>161,56</u>	144,46
33,8°	112,78	147,34	161,52	142,24
36,6°	108,68	144,67	161,19	139,80
39,4°	104,44	141,77	160,59	137,14
42,2°	100,12	138,64	159,71	134,28
45°	95,68	135,29	158,55	131,20
Total	51206,63	62187,64	63933,45	

(*) = Considera os dois equinócios do ano

4.2.1.1 Ganho de calor por irradiação - Solstício de verão

Para o solstício de verão, os maiores ganhos de calor por irradiação aconteceram nas menores inclinações. Quando a inclinação era maior, o ganho diminuía. O maior ganho de calor por irradiação foi obtido quando a superfície não tinha nenhuma inclinação.

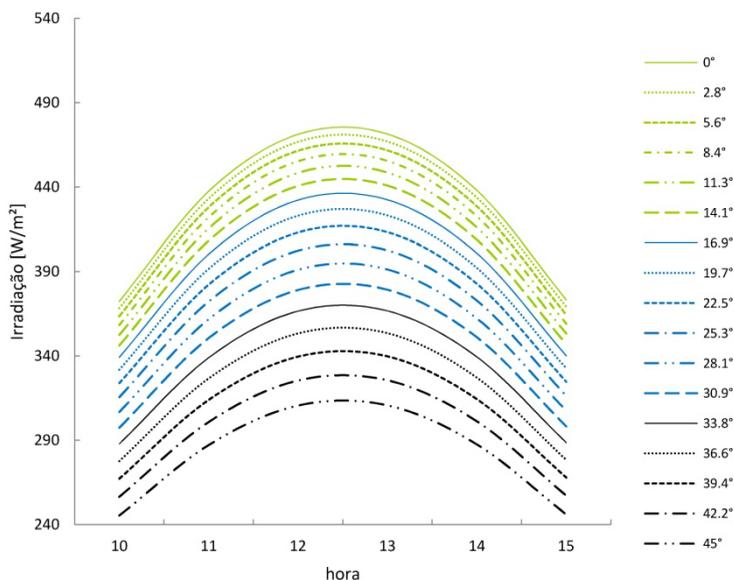


Figura 97. Ganho de calor por irradiação – Solstício de verão (10:00-15:00h)

4.2.1.2 Ganho de calor por irradiação - Equinócio

Na maioria das inclinações sob o equinócio, houve a mesma tendência do solstício de verão: quando a inclinação era maior, o ganho diminuía (Figura 98). Porém, nas inclinações menores (entre 0° - 8,4°) o comportamento era invertido: quanto maior a inclinação maior era o ganho (Figura 99). A inclinação que permitiu obter o maior ganho de calor por irradiação foi de 8,4°.

Para este dia de projeto, a irradiação apresentava um comportamento desigual: antes do meio dia os ganhos de calor por irradiação eram maiores em relação àqueles apresentados durante a tarde. Essa assimetria pode ser explicada devido que foi adotado o

sistema horário do local (GMT: Greenwich Mean Time), ao invés da hora solar.

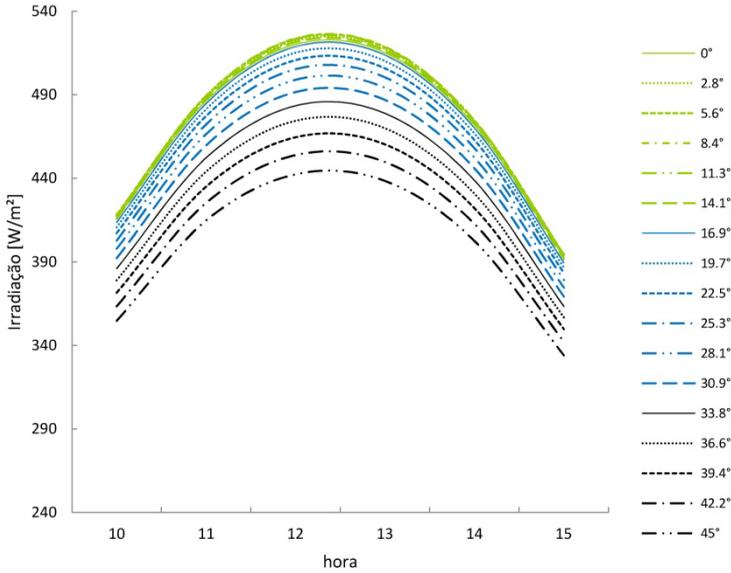


Figura 98. Ganho de calor por irradiação – Equinócio (10:00-15:00h)

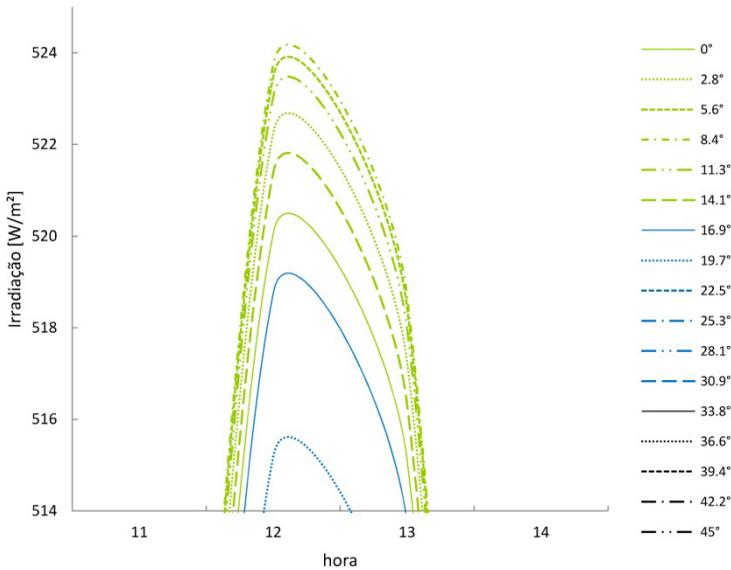


Figura 99. Ganho de calor por irradiação – Equinócio (11:00-14:00h)

4.2.1.3 Ganho de calor por irradiação - Solstício de inverno

Para este dia de projeto, também se apresentaram as duas tendências que aconteceram no equinócio. Para inclinações entre $33,8^\circ$ - 45° : Quanto maior fosse a inclinação o ganho diminuía. Para inclinações entre 0° - $30,9^\circ$: Quanto maior fosse a inclinação, maior era o ganho. A inclinação que permitia obter o maior ganho de calor por irradiação ficava entre $28,1^\circ$ - $30,9^\circ$.

No solstício de inverno também se apresentou um comportamento desigual nos ganhos de calor por irradiação.

As inclinações: ($14,1^\circ$ - 45°), ($16,9^\circ$ - $42,2^\circ$), ($19,7^\circ$ - $39,4^\circ$), ($22,5^\circ$ - $36,6^\circ$), ($25,3^\circ$ - $33,8^\circ$), ($28,1^\circ$ - $30,9^\circ$) tiveram comportamentos semelhantes (Figura 100).

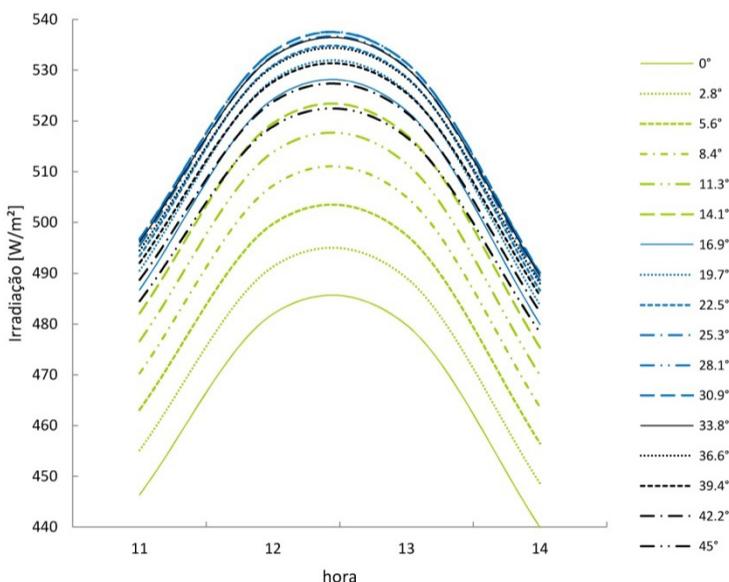


Figura 100. Ganho de calor por irradiação – Solstício de inverno (11:00-14:00h)

4.2.2 Comportamento da cozinha em função da inclinação da chaminé

Para avaliar o efeito do ângulo de inclinação da chaminé sobre o comportamento da cozinha, foram testados três valores de inclinação

sobre a cozinha da casa utilizada na fase anterior. Um desses valores foi obtido na revisão bibliográfica e os dois restantes basearam-se na análise feita do ganho de calor por irradiação.

Segundo a bibliografia pesquisada, o ganho de calor por irradiação não é o único fator que influencia o desempenho de uma chaminé solar. Além disto, deve-se levar em conta o efeito de aumentar ou diminuir a distância vertical entre a abertura de entrada e saída da chaminé.

Considerando estes aspectos, as três inclinações utilizadas foram: 50° , $29,4^\circ$ e $8,4^\circ$. A inclinação de 50° era o valor ótimo considerando a distância entre as aberturas e o ganho de calor por irradiação para a latitude de Quibdó equivalente a $5,7^\circ$ - Norte. A inclinação de $29,5^\circ$ era aquela que permitia obter o máximo ganho de calor por irradiação em um dia de projeto. Esse valor era atingido no dia de projeto equivalente ao inverno. Finalmente, foi testada a inclinação de $8,4^\circ$ que permitia atingir o máximo ganho médio para os três dias de projeto (Tabela 34).

Com o intuito de manter a abertura de saída localizada no plano vertical (condição básica para simulação no Energyplus), era preciso fazer alterações nas dimensões da chaminé conforme mudava a sua inclinação. Para localizar a chaminé de $8,4^\circ$ sobre a cobertura, foi preciso alterar o comprimento do canal que ligava a chaminé com a cozinha. Portanto, o volume entre as chaminés sofreu variações, com o intuito de manter intactas as especificações do projeto arquitetônico. As áreas da cobertura de vidro e da superfície absorvente de irradiação mantiveram-se iguais para todas as inclinações (Figura 101).

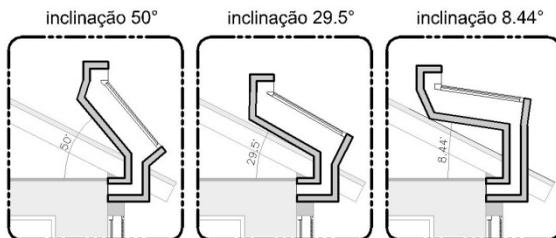


Figura 101. Inclinações avaliadas

4.2.2.1 Análise do comportamento

O somatório dos “Graus hora de resfriamento” não apresentou variações entre as diferentes inclinações. Essa variável só mudou nos dias de projeto, devido às diferentes condições ambientais de cada um destes dias como foi identificado na fase prévia. As trocas de ar por hora apresentavam variações entre as diferentes inclinações, porém a magnitude da diferença era muito pequena. A melhor inclinação, portanto, foi aquela com valor igual a 50° (Tabela 35). Na média para os três dias de desenho (Tabela 36), a inclinação de 50° gerava 0,5 trocas a mais em relação à pior inclinação equivalente a 8,4°.

Tabela 35. Comportamento da cozinha em função da mudança na inclinação da chaminé

Inclinação da chaminé	Posição do sol	T. Cozinha		Vazão Cozinha		Nota total / dia	Nota total / Inclinação
		Graus Hora de Refrigeração	nota	ACH médio	nota		
50°	Sols. Verão	66	0	41,4	1	0,5	5,3
	Equinócio	52	5	42,7	6	5,5	
	Sols. Inverno	38,9	10	43,6	10	10	
29.5°	Sols. Verão	65,9	0	41,2	0	0	4,8
	Equinócio	52	5	42,3	5	5	
	Sols. Inverno	38,9	10	43,3	9	9,5	
8.4°	Sols. Verão	65,9	0	41,1	0	0	4,5
	Equinócio	52	5	42,1	4	4,5	
	Sols. Inverno	38,9	10	43,1	8	9	

Tabela 36. Comportamento da cozinha em função da mudança na inclinação da chaminé – média entre os três dias de desenho

Casa	Modo aberturas	Inclinação da Chaminé	Vento	Graus Hora de Refrigeração	ACH médio Cozinha
Casa 1	Modo 1	50°	Sem Vento	52,3	42,6
		29,5°	=	52,3	42,2
		8,4°	=	52,3	42,1

4.2.2.1.1 Gráficos das trocas de ar por hora e temperatura

A quantidade de trocas de ar apresentou as maiores diferenças entre as três inclinações no começo do dia. Para o resto do dia, essa variável teve um comportamento semelhante. A temperatura, como foi identificado nas tabelas, teve um comportamento igual para as três inclinações.

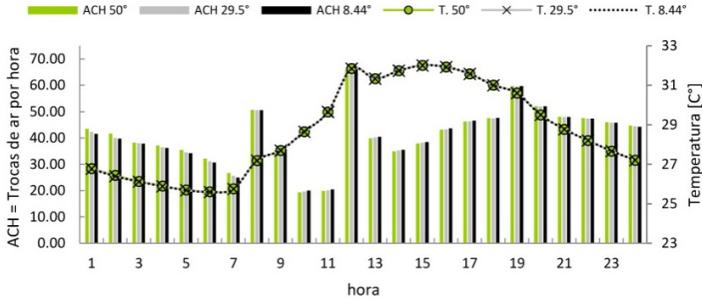


Figura 102. Trocas de ar e temperatura VS Inclinação – Solstício de verão

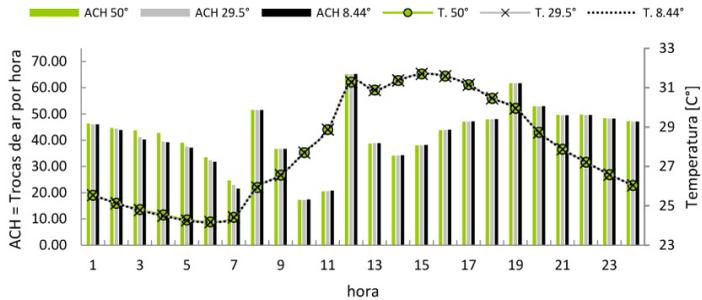


Figura 103. Trocas de ar e temperatura VS Inclinação – Equinócio

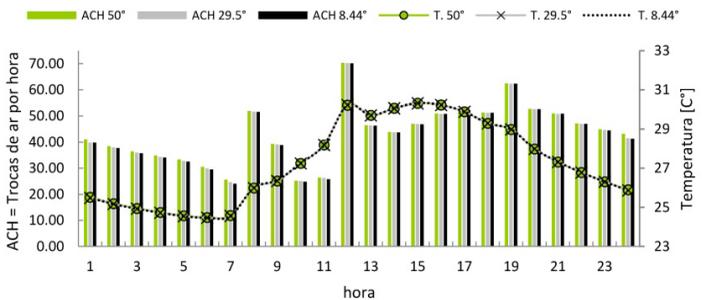


Figura 104. Trocas de ar e temperatura – Solstício de inverno

4.2.2.1.2 Fluxos reversos

Todas as inclinações apresentaram as mesmas tendências detectadas na fase anterior quanto aos fluxos reversos: quando a temperatura da chaminé ficava por baixo daquela do exterior (Figura 105), tinham-se fluxos reversos (Figura 106).

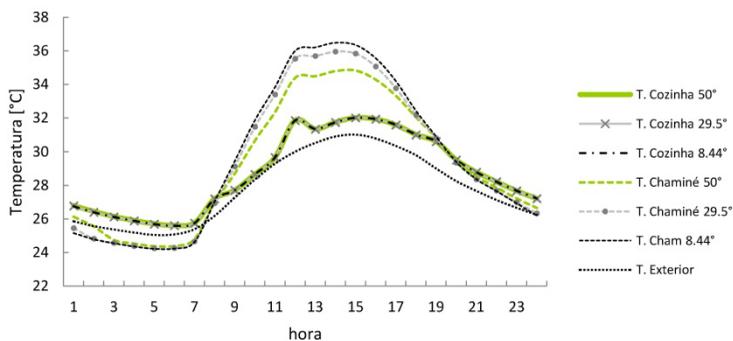


Figura 105. Comportamento típico das temperaturas da chaminé e cozinha para as três inclinações

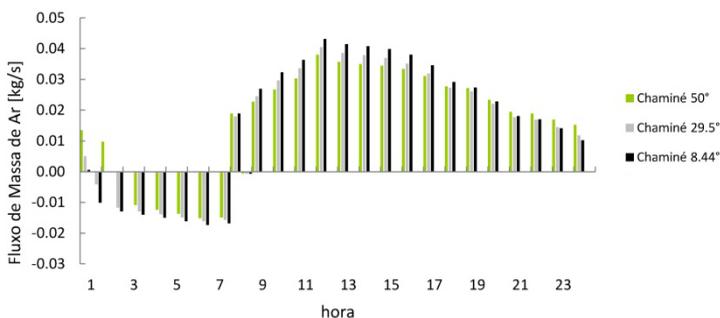


Figura 106. Comportamento típico do fluxo entre a cozinha e chaminé para as três inclinações

4.2.3 Critérios a serem adotados nas fases seguintes

Considerando que a variação no ângulo de inclinação da chaminé só teve influência na quantidade de trocas de ar por hora, nas fases seguintes foi adotada a inclinação sob a qual podia ser atingido o melhor valor para essa variável. Assim, foi adotada a inclinação de 50°, a qual coincidia com a inclinação sugerida pela bibliografia pesquisada.

4.3 FASE 3: LOCALIZAÇÃO DA COZINHA

Nesta fase, verificou-se em que localização na planta arquitetônica a cozinha apresentava melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar.

Conforme variava a localização da cozinha, as orientações e a quantidade de área das fachadas em contato com o exterior desse espaço mudavam. Por causa destas mudanças, as trocas por radiação e convecção eram modificadas. Para considerar as variações geradas quanto à radiação, foram adicionadas as variáveis de “Temperatura radiante média” e “Temperatura operativa” na análise. Para fazer o cálculo dos “Graus hora de resfriamento” utilizou-se o valor da Temperatura Operativa.

Os parâmetros adotados nesta fase foram escolhidos com base na análise feita nas outras fases. Dois desses parâmetros foram adotados com o interesse de trabalhar sob as condições mais difíceis para atingir conforto térmico: Sem vento + Solstício verão. Os dois parâmetros restantes foram adotados em função do melhor comportamento encontrado: Modo de aberturas 1 (tudo aberto) + Inclinação de chaminé 50°.

4.3.1 Implicações da mudança na localização da cozinha

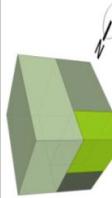
Na Tabela 37 é possível observar como a variação na localização da cozinha mudava a orientação e a quantidade de fachadas em contato com o exterior desse espaço.

A cozinha que tinha maior contato com o exterior era a da casa 3, tanto em superfícies opacas como em aberturas. As fachadas dessa cozinha tinham 37,4% de área a mais do que as cozinhas 1 e 4, e 74,7% a mais do que a cozinha 2.

Todas as cozinhas tinham fachada sob a orientação sul. Todas as cozinhas, exceto a cozinha 2, tinham fachada sob a orientação oeste. A cozinha 3 era única que tinha fachada sob a orientação leste. Nesta fachada, estava localizada a maior abertura de todas as cozinhas, representada pela porta de cozinha. Com exceção da cozinha 4, o restante das cozinhas tinha contato direto com o ático. Nessa cozinha, os espaços que ficavam abaixo do quarto da casa 4 recebiam uma

quantidade diferente de calor devido à transmissão de irradiação através das paredes e aberturas do quarto.

Tabela 37. Superfícies opacas e aberturas da Cozinha em contato com o exterior

Casa	Resumo Cozinha	Área Superfícies [m ²]		Orientação e área S. Opacas				Orientação e área Abertura				
		Opacas	Abert.	Total	Nor	Les	Sul	Oes	Nor	Les	Sul	Oes
Casa 1	 2 Fachadas + Cobertura. 1 pavimento	9,4	2,4	11,9	-	-	3,4 m ²	6,1 m ²	-	-	1,4 m ²	1m ²
Casa 2	 1 Fachada + Cobertura. 1 pavimento.	3,4	1,4	4,8	-	-	3,4 m ²	-	-	-	1,4 m ²	-
Casa 3	 3 Fachadas + Cobertura. 1 pavimento.	11,9	7,0	19	-	2,5 m ² *	3,4 m ²	6,1 m ²	-	4,6 m ² *	1,4 m ²	1m ²
Casa 4	 2 Fachadas. 2 pavimentos.	9,4	2,4	11,9	-	-	3,4 m ²	6,1 m ²	-	-	1,4 m ²	1m ²

* = Fachada em contato com exterior sem irradiação solar direta

4.3.2 Comportamento das cozinhas em função da sua localização

Na média diária, as variações na magnitude da temperatura segundo a localização da cozinha eram muito pequenas. Para a temperatura radiante média, obteve-se um diferencial de 0,3°C entre a melhor e a pior cozinha, e para a temperatura do ar e a temperatura operativa o diferencial foi de 0,4°C (Tabela 38). O maior contato da cozinha 3 com o exterior fez com que ela apresentasse as menores temperaturas. Isto aconteceu porque o exterior sempre teve uma temperatura inferior comparando-se a todas as cozinhas.

Na Figura 107, percebe-se como algumas cozinhas eram melhores do que outras dependendo da hora do dia, quando avaliada a temperatura radiante média. A cozinha 4 foi a que tinha o melhor desempenho quanto a essa temperatura ao meio dia. Para o período compreendido entre a noite e a madrugada, a melhor cozinha era a 3.

Já para temperatura do ar, o comportamento foi quase igual ao longo do dia para a cozinha 1, 2 e 4. Somente na cozinha 3 foi possível ver as maiores diferenças (Figura 108).

Após o meio dia, a temperatura radiante média continuava aumentando enquanto a temperatura do ar apresentava uma leve queda graças à renovação do ar. À tarde, a temperatura radiante média atingiu valores superiores aos valores da temperatura do ar. Isto pode haver ocorrido pelo armazenamento de calor nas superfícies da cozinha.

Com o intuito de fazer uma avaliação que integrasse essas duas temperaturas, foi incluída a temperatura operativa (Figura 109). O comportamento dessa temperatura foi semelhante ao comportamento apresentado pela temperatura radiante média: a melhor cozinha no meio dia foi a 4 e a melhor para o resto do dia foi a 3.

Tabela 38. Média diária de temperatura em função da localização da cozinha

Cozinha	T radiante média	T. do Ar	T. Operativa
Cozinha 1	29,4	28,7	29,1
Cozinha 2	29,4	28,7	29,1
Cozinha 3	29,1	28,3	28,7
Cozinha 4	29,5	28,7	29,1

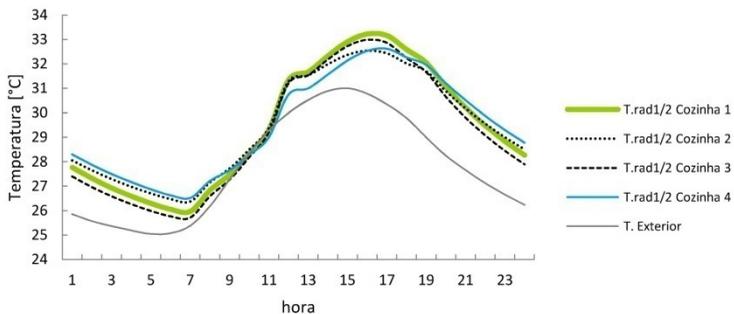


Figura 107. Temperatura radiante média das 4 cozinhas

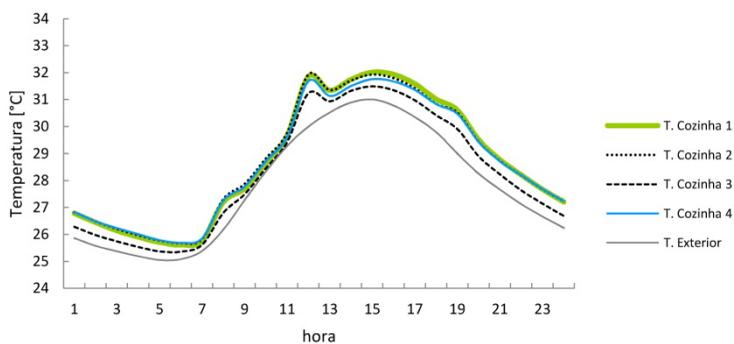


Figura 108. Temperatura do ar das 4 Cozinhas

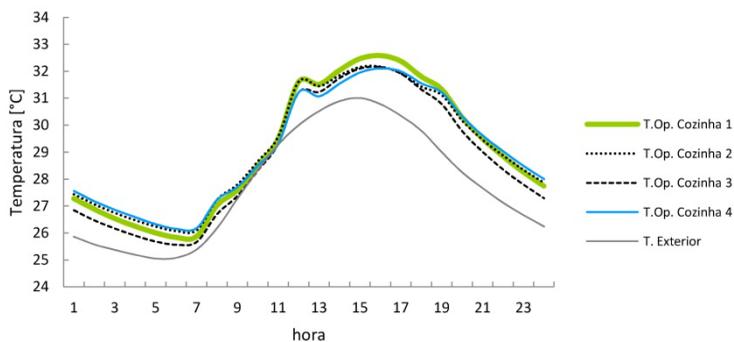


Figura 109. Temperatura operativa das 4 cozinhas

As análises da quantidade de “trocas de ar por hora”, foram feitas em conjunto com os “graus hora de resfriamento” de cada cozinha. Na Tabela 39, percebe-se que a cozinha 3 foi novamente a

melhor cozinha. A cozinha 2 apresentou o pior comportamento, devido ao fato de que essa era a cozinha que tinha o menor contato com o exterior.

Na cozinha que tinha a melhor localização, foi possível diminuir os “graus hora de resfriamento” em 7,9 e aumentar as “trocas de ar por hora” em 3,7 em relação à cozinha com pior localização.

Tabela 39. Média diária de “graus hora de refrigeração” e “trocas de ar por hora” em função da localização da cozinha

Cozinha	T. Operativa		Trocas de ar por hora	
	Graus Hora de Refrigeração	nota	ACH médio	nota
Cozinha 1	73,8	0	41,4	1
Cozinha 2	73,8	0	40,9	0
Cozinha 3	65,9	10	44,6	10
Cozinha 4	73,7	0	43,4	7

Na Figura 110, percebe-se que nos horários compreendidos entre 1-7h, 10-11h e 21-24h a maior quantidade de trocas de ar por hora foi atingida pela cozinha 4. Entre 8-9h e 12-20h, as maiores trocas de ar foram atingidas pela cozinha 3.

Tal como identificado nas fases prévias, o aumento das cargas internas nos momentos em que se estava cozinhando aumentavam a quantidade de trocas de ar. A maior temperatura atingida pela cozinha nestes momentos fazia com que o fluxo gerado através da diferença de temperatura fosse maior.

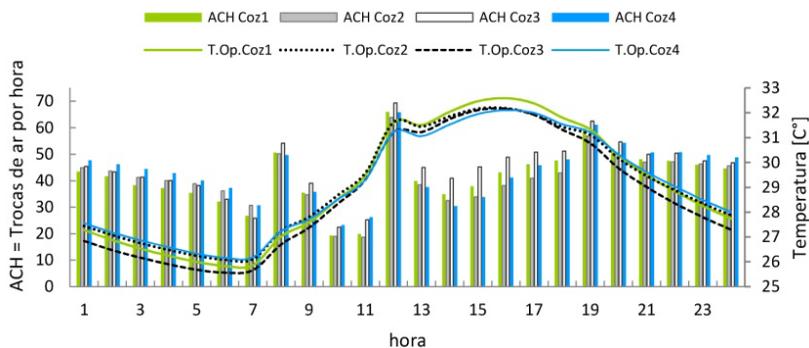


Figura 110. Trocas de ar por hora e Temperatura operativa das 4 cozinhas

Mesmo que a cozinha 3 ofereça, em média, o melhor desempenho quanto os “graus hora de resfriamento” e as “trocas de ar por hora”, conclui-se que essa superioridade não era atingida graças à chaminé. O contato da porta da cozinha 3 com o exterior fazia com que as trocas aumentassem através da ventilação por diferença de temperatura por meio dessa abertura e não da chaminé (Figura 111). De forma contrária, na cozinha 4 a maior distância vertical entre a abertura de entrada e saída da chaminé fazia com que os fluxos aumentassem através da chaminé (Figura 112). Os valores positivos nas figuras representam os fluxos que saem da cozinha através da abertura em questão; os negativos, por sua vez, os que entram na cozinha.

Sendo que o objetivo específico desta fase era verificar qual cozinha apresentava o melhor comportamento devido ao uso da chaminé solar, escolheu-se a cozinha 4 como a melhor das quatro opções.

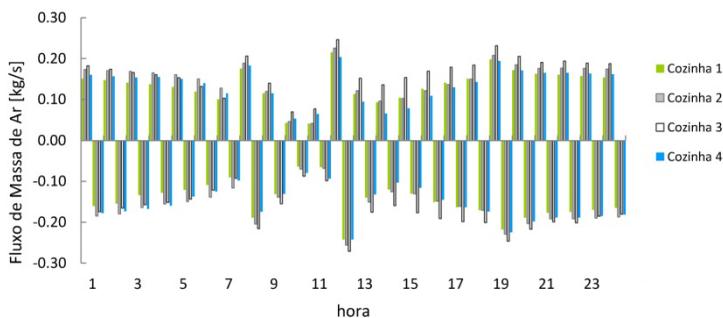


Figura 111. Fluxo de ar entre cozinha e sala de estar das 4 cozinhas

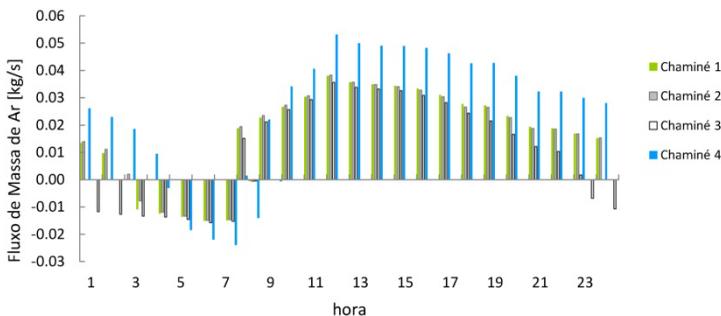


Figura 112. Fluxo de ar na conexão entre cozinha e chaminé

4.4 FASE 4: AUMENTO DA ÁREA DE ABSORÇÃO DE IRRADIAÇÃO

Com o intuito de avaliar a melhoria possível de ser obtida quanto à temperatura e a ventilação, devido ao aumento da área de absorção de irradiação na chaminé solar, foram simuladas seis estratégias de ventilação por diferença de temperatura em condições sem vento. Essas estratégias foram aplicadas sobre a cozinha da casa 4, sendo que ali foi encontrado o melhor comportamento desse espaço graças ao uso de uma chaminé solar.

O melhor resultado obtido quanto a essas duas variáveis foi avaliado através do modelo de conforto adaptativo do Standard 55 da ASHRAE (2010).

A Figura 113 apresenta as estratégias simuladas e detalha as variações entre elas. A estratégia 1 não utilizava chaminés solares, servindo de base para determinar as melhorias obtidas com o uso de chaminés. As estratégias 2, 3, 4 e 5 utilizavam chaminés inclinadas, enquanto a estratégia 6 consistia em uma chaminé vertical. Nas chaminés inclinadas, adotou-se o melhor valor de inclinação encontrado na fase 2, igual a 50°. Nas estratégias 2, 3 e 4 a área de absorção aumentava devido ao aumento da chaminé inclinada e a inclusão de chaminés verticais.

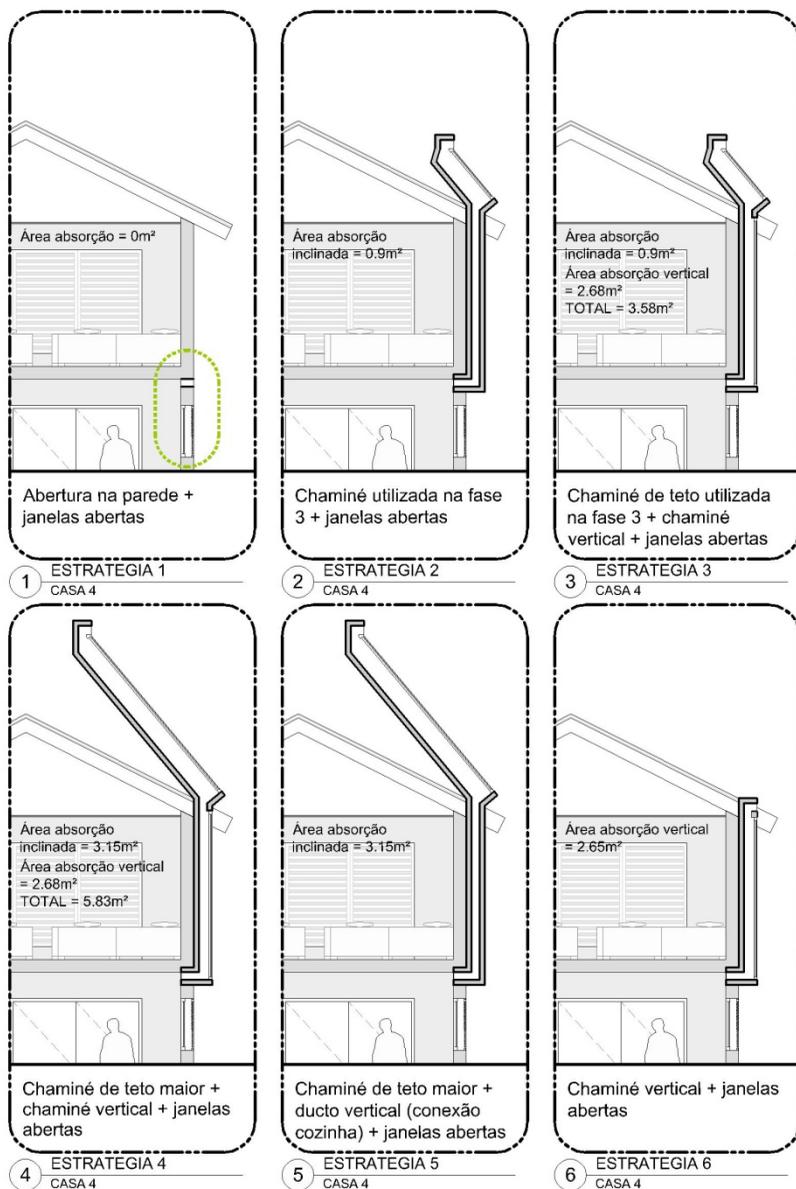


Figura 113. Estratégias avaliadas na fase 4

4.4.1 Avaliação para todas as horas do dia

Conforme mudava a estratégia utilizada, os valores de “graus hora de resfriamento” apresentaram pouca variação entre eles (Figura 114). Quanto às “trocas de ar por hora”, aconteceram maiores variações, porém a magnitude da variação foi muito pequena. A melhoria entre a pior e a melhor estratégia na quantidade de “graus hora de resfriamento” foi de 1,4 o equivalente a 1,9%. A melhoria quanto às “trocas de ar por hora” foi de somente 1.6 trocas a mais (3,7%) (Tabela 40). A chaminé vertical (estratégia 6) permitiu atingir melhor desempenho em comparação com as chaminés inclinadas no que se refere às trocas de ar.

Detectou-se que as estratégias tinham comportamentos diferentes dependendo da hora do dia. Nas horas com ganho de calor por irradiação, as melhores estratégias eram aquelas com maior área de absorção de irradiação - estratégias 3, 4 e 5. No entanto, no fim da noite e na madrugada, as melhores estratégias eram aquelas com menor área de coletor - estratégias 1, 2, 3 e 6 (Figura 115).

Ao meio dia, as estratégias com maior área de absorção apresentavam uma quantidade significativa de fluxos saindo da cozinha. Porém, essas mesmas estratégias apresentavam a maior quantidade de fluxos reversos no fim da noite e na madrugada (Figura 116). Isto pode ser explicado pelo aumento na quantidade de vidro nas estratégias com maior área de absorção. Considerando que o vidro permite perder calor rapidamente nas horas da noite, as superfícies das chaminés com maior quantidade de vidro ficam com temperaturas menores do que o resto. Assim, o ar contido na chaminé se esfria e atinge uma temperatura menor do que o ar da cozinha, produzindo fluxos reversos.

Na média do dia (Tabela 40), percebeu-se que o aumento da área de absorção melhorava o desempenho das trocas de ar até um determinado limite. No entanto, passado esse limite, quanto maior fosse essa área, menor se tornava o desempenho, que diminuía. Assim, da estratégia 1 para 2 e 3 houve uma melhoria, mas da estratégia 3 para a 4 o desempenho das trocas de ar caiu.

Tabela 40. Média diária de “Graus hora de refrigeração” e “Trocas de ar por hora” na cozinha em função de cada estratégia

Estratégia	T. Operativa		Vazão	
	Graus Hora de Refrigeração	nota	ACH médio	nota
1 = Só abertura (sem chaminé)	74,4	0	42,2	0
2 = Chaminé fase 3	73,7	5	43,4	8
3 = Chaminé fase 3 + Chaminé vertical	73,7	5	43,7	9
4 = Chaminé maior + Chaminé vertical	73	10	42,9	4
5 = Chaminé maior + ducto vertical	73,1	9	43	5
6 = Chaminé vertical só	74	2	43,8	10

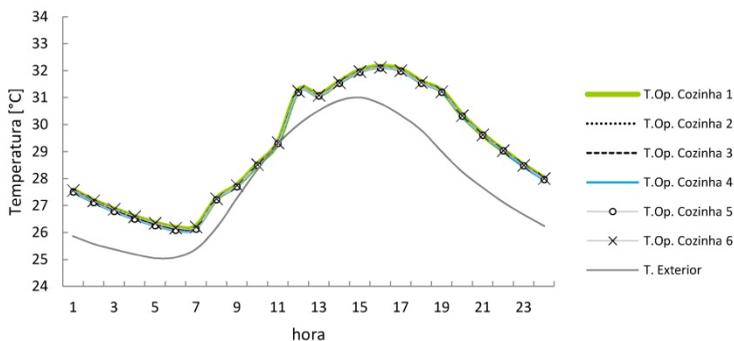


Figura 114. Temperatura operativa na cozinha em função da estratégia

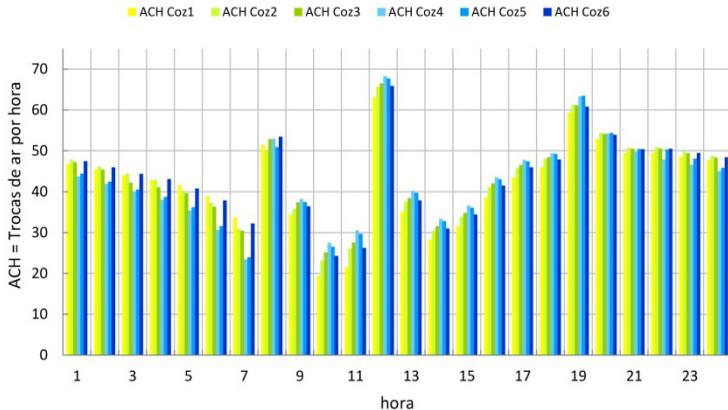


Figura 115. Trocas de ar por hora na cozinha em função da estratégia

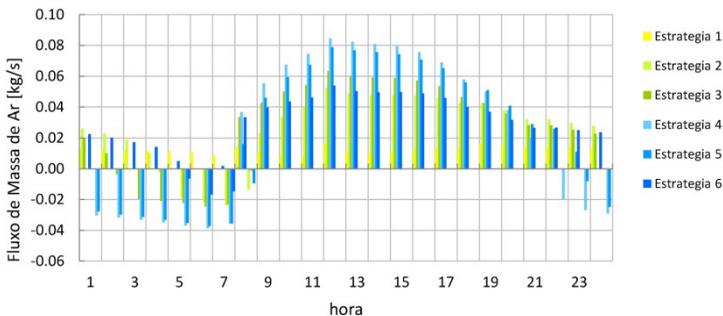


Figura 116. Fluxo na conexão entre a cozinha e cada estratégia

4.4.2 Avaliação para o período de ocupação

Percebeu-se que uma avaliação feita para o dia inteiro poderia não ser adequada, pois as estratégias têm comportamentos diferentes dependendo da hora do dia. Além disso, a cozinha não estava habitada durante todo o dia. Assim, foi feita uma análise do desempenho de cada estratégia para o período no qual a cozinha era utilizada, ou seja, o período compreendido entre 07:00 e 20:00h.

Nessa análise, a estratégia que tinha a maior área de absorção de irradiação foi considerada a melhor: a estratégia 4 (Tabela 41). Essa estratégia apresentou 3,6 trocas a mais do que a pior estratégia (8,3% de melhoria). Quanto os “graus hora de resfriamento” a melhor estratégia foi a 5 (0,7 menos do que a pior estratégia = 1,2% melhoria)

Tabela 41. Média no período de 07:00 às 20:00h de “Graus hora de refrigeração” e “Trocas de ar por hora” na cozinha em função de cada estratégia

Estratégia	T. Operativa		Vazão	
	Graus Hora de Refrigeração	nota	ACH médio	nota
1 = Só abertura (sem chaminé)	58.4	0	39.9	0
2 = Chaminé fase 3	57.9	8	41.7	5
3 = Chaminé fase 3 + Chaminé vertical	58	7	42.6	8
4 = Chaminé maior + Chaminé vertical	57.8	9	43.5	10
5 = Chaminé maior + ducto vertical	57.7	10	43.0	9
6 = Chaminé vertical só	58.1	4	42.3	7

O melhor desempenho obtido na cozinha utilizada no presente trabalho - equivalente a 3,6 trocas acima da estratégia base (1) sob um volume de espaço de $14,9\text{m}^3$ e utilizando duas chaminés solares com área total de absorção de $5,8\text{m}^2$ - apresenta divergências com algumas das conclusões feitas por outros trabalhos. O motivo dessa diferença pode ser explicado pelo período de tempo considerado na avaliação da estratégia. Estudos como o de Mathur et al. (2006) ou o de Neves e Roriz (2011), mesmo trabalhando com chaminés menores e equivalentes a 1m^2 , apresentam resultados melhores devido à ênfase dada ao período de maior irradiação. No primeiro conseguiram-se até 5,6 trocas de ar por hora sob um espaço de 27m^3 , e no segundo foram atingidas até 11,3 trocas sob um espaço de $32,4\text{m}^3$. Para o estudo de Mathur et al (2006) assumiu-se um valor de $700\text{ (W/m}^2\text{)}$; já Neves e Roriz (2011) consideraram um valor de $727\text{ (W/m}^2\text{)}$ equivalente à irradiação incidente em uma chaminé inclinada em 45° às 12 horas em Belém, PA.

4.4.3 Avaliação de conforto

O uso do método adaptativo para um ambiente ventilado naturalmente, proposto pela ASHRAE (2010), possibilitou a avaliação do conforto térmico atingido para a melhor cozinha. A vantagem desse método, além de oferecer estimativas mais adequadas para a realidade dos ambientes que foram considerados neste trabalho, encontra-se na possibilidade de calcular o nível de conforto sem que seja necessário inserir os valores de velocidade.

No entanto, foi necessário fazer uma alteração da taxa metabólica considerada ao longo do trabalho para as pessoas que ocupavam a cozinha, equivalente a 1,6 MET. Quando utilizado esse método, o valor máximo para essa variável não pode ser superior a 1,3 MET, o que equivale a pessoas em atividade de repouso.

A localização do ponto resultante da combinação entre o valor de temperatura operativa da cozinha (30,1 °C) com o da temperatura média do ar para o mês de Junho (26,6 °C) indica que mesmo diminuindo a taxa metabólica é impossível atingir conforto térmico sob essas condições (Figura 117). Esse ponto encontra-se por fora da faixa de conforto dos 80% de aceitabilidade.

O método adaptativo utilizado permite, se desejado, considerar a melhoria induzida através da velocidade do ar. Porém, como o Energyplus não permite calcular dados de velocidade de vento na zona ocupada pelas pessoas, não foi possível fazer essa avaliação.

Assim, considerando que a taxa metabólica é maior para a atividade desempenhada, conclui-se que é impossível obter conforto térmico na cozinha de melhor desempenho quando considerada a média da temperatura operativa do período em que ela esta ocupada.

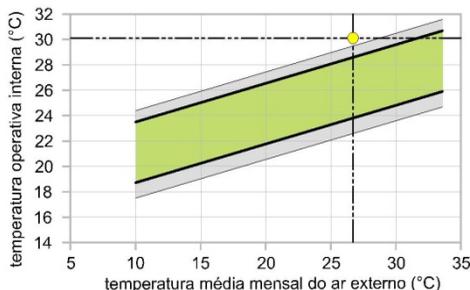


Figura 117. Avaliação conforto adaptativo – ASHRAE Standard 55-2010

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre esse trabalho. Também faz-se as considerações finais sobre o trabalho, apontando as limitações do mesmo e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Dia de projeto, condição de vento e modo de abertura

O comportamento da ventilação na cozinha depende da condição do vento, mas no caso da temperatura, a variável que determina seu desempenho são os valores de temperatura externa de cada dia de projeto. A ventilação apresenta poucas mudanças dependendo da temperatura do dia de projeto, enquanto que a temperatura varia pouco entre as condições de vento.

Devido às maiores temperaturas apresentadas durante o solstício de verão, é mais difícil obter conforto térmico na cozinha neste período.

Os outros dois dias de projeto, mesmo apresentando temperaturas menores, não são muito diferentes devido à semelhança nas condições climáticas ao longo do ano próprias de um clima quente e úmido de uma região localizada em uma latitude equatorial. No entanto, o foco do trabalho foi na análise da pior condição, visando conhecer o melhor comportamento da chaminé nas condições mais exigentes.

A presença do vento, sem importar a sua direção, permite melhorar o comportamento da chaminé. Os coeficientes de pressão negativos apresentados na cobertura da casa, sempre que existe vento, evitam que haja fluxos reversos mesmo que a temperatura da chaminé às vezes seja menor do que a do exterior ou da cozinha. Porém, é necessário considerar que o método adotado para calcular esses coeficientes na presente pesquisa, possui uma margem de erro muito grande, e os valores reais podem variar consideravelmente. Uma variação nestes valores poderia produzir a anulação do efeito chaminé por parte do vento.

A direção de vento que permite obter as menores temperaturas e a maior quantidade de trocas de ar por hora é a direção sul. Nessa

direção, a renovação de ar é feita com ar procedente do exterior, que tem uma temperatura menor do que o resto das zonas da casa. A temperatura média da direção sul é de 28,7°C englobando 43,6 trocas de ar por hora.

A direção de vento norte, mesmo que produza um desempenho inferior na cozinha, apresenta um comportamento semelhante do obtido com o vento sul. Nessa direção de vento, o ar vem predominantemente da sala de estar. Mesmo que a temperatura desta sala não seja tão baixa quanto que à do exterior, ela é menor do que a temperatura da cozinha. Sob a influência do vento norte, é possível alcançar uma temperatura média de 28,5°C ($\Delta T=0,1^\circ\text{C}$) e 42 trocas de ar por hora ($\Delta\text{ACH}=0,8$). Para condições “sem vento”, a temperatura média é de 28,7°C ($\Delta T=0,3^\circ\text{C}$) ocorrendo 26,8 trocas de ar por hora ($\Delta\text{ACH}=16$). Os diferenciais apresentados equivalem aos valores do vento norte em relação ao vento sul.

No entanto, quando consideradas somente as “trocas de ar por hora”, não se considera a quantidade de ar poluído que pode estar sendo espalhada da cozinha para o resto da casa. Assim, o vento norte, mesmo tendo um desempenho ligeiramente inferior ao vento sul, é a direção de vento mais conveniente por causa do maior isolamento que é obtido na cozinha.

Quando não existe vento no “Modo 1 e 2”, a diferença de temperatura da chaminé em relação ao exterior condiciona a direção do fluxo. Assim, de madrugada existem fluxos reversos, momento em que a chaminé tem uma temperatura menor que o exterior.

Poderia ser desejável ter fluxos reversos de madrugada, desde que se garantisse que o ar que entra através da chaminé possuísse uma composição química aceitável. Nesse horário, o ar da chaminé tem uma temperatura menor do que a da cozinha, permitindo esfriar as superfícies da cozinha antes da saída do sol. Para garantir a qualidade de ar que vem dessa zona, poderia ser feita uma manutenção das superfícies da chaminé ao final do dia.

Caso não se deseje fazer a manutenção das superfícies da chaminé no final do dia, poderia explorar-se a possibilidade de utilizar as chaminés em zonas da casa diferentes da Cozinha que não gerem tanta poluição. Tal poderia ser o caso dos quartos. Sendo que esses espaços são habitados em maior medida nas horas da noite, os fluxos

reversos dessas horas poderiam aumentar o conforto nas horas de sono.

Os melhores resultados são obtidos quando a cozinha possui maior contato com o exterior, isto é, quando as janelas estão no modo de abertura máximo (Modo 1). Conseqüentemente, o pior desempenho na cozinha acontece quando a casa fica fechada (Modo 3). Nesta condição, os fluxos reversos acontecem ao longo de todo o dia, fazendo com que o ar poluído que sai através da chaminé volte para a cozinha. Além disso, o ar da chaminé sob esse modo de aberturas atinge temperaturas de até 13,1 (°C) a mais em relação à temperatura da cozinha, elevando a temperatura deste ambiente.

A melhor cozinha, no que diz respeito à temperatura, coincide com a melhor cozinha no que se refere às trocas de ar por hora, tanto quando há vento ou não. A combinação de parâmetros que permite obter o melhor comportamento é: “Modo 1 + Vento sul + Solstício inverno”. Nessa combinação, a temperatura média do dia é de 26,8 (°C) e o valor médio de trocas de ar por hora é de 73,6. Quando não há vento, a menor temperatura média e maior quantidade de trocas de ar por hora acontecem na combinação “Modo 1 + Solstício inverno”. Nessa configuração, a temperatura média é de 27,3 (°C) e o valor médio de trocas de ar por hora é 43,4.

Deve-se ter precaução no momento de avaliar a ventilação considerando somente o parâmetro de “Trocas de ar por hora” produzido pelo programa “Energyplus”. Neste programa, esse parâmetro só considera as trocas produzidas pelo ar exterior, desconsiderando os fluxos que vem de outras zonas. Em alguns casos, pode ser desejável ter fluxos de outras zonas dependendo da temperatura e qualidade do ar dessas zonas.

O objeto “Horizontal Opening”, incorporado na versão 7.0 do programa de simulação “Energyplus”, não representou adequadamente o fenômeno da diferença de temperatura para as aberturas com que se estava trabalhando na presente pesquisa. Caso haja intenção de trabalhar com este objeto, é necessário avaliar a direção que está tendo o fluxo de ar na abertura horizontal e fazer um balanço de fluxo para garantir que o fenômeno apresente um comportamento lógico.

5.1.2 Inclinação da chaminé

Confirma-se a evidência encontrada na revisão bibliográfica, segundo a qual se estabelece que a inclinação sob a qual é atingido um maior ganho de calor por irradiação não permite obter um melhor desempenho da chaminé. A inclinação sob a qual foi atingido o maior ganho de calor por irradiação na média para o ano todo equivalia àquela apresentada nos equinócios, igual a $8,4^\circ$. Porém, sendo que essa era a inclinação que incorporava a menor distância vertical entre a abertura de entrada e saída da chaminé, foi sob estas condições que se obteve o menor desempenho da cozinha. Portanto, a inclinação de 50° é a inclinação mais adequada para ser usada em uma chaminé solar localizada na latitude de Quibdó.

A variação no ângulo de inclinação da chaminé não influencia o comportamento da temperatura da cozinha. Pelo contrário, o parâmetro de “trocas de ar por hora” atingiu valores diferentes dependendo da inclinação que estivesse sendo adotada. Porém, as diferenças obtidas nesta variável têm uma magnitude muito pequena.

5.1.3 Localização da cozinha

Mesmo que a cozinha 3 seja aquela sob a qual foi atingido o melhor comportamento quanto os “graus hora de resfriamento” e as “trocas de ar por hora”, isto aconteceu devido ao maior contato com o exterior desse espaço através da porta. Por sua vez, a cozinha 4, mesmo que apresente um comportamento ligeiramente inferior, possui a melhor localização que pode ter uma cozinha para melhorar o seu comportamento graças ao uso de uma chaminé solar. Nessa cozinha, o aumento da distância vertical entre a abertura de entrada e saída da chaminé permite que sejam obtidas essas melhorias no comportamento.

5.1.4 Aumento da área de absorção de irradiação

O aumento da área de absorção de irradiação na chaminé solar sempre produz melhorias no comportamento das trocas de ar quando considerado somente o período no qual a cozinha é utilizada.

Quando considerado o dia inteiro, o aumento nessa área nem sempre produz melhores resultados. Maior área de absorção de irradiação implica maior quantidade de superfície envidraçada, o que favorece a perda de calor na chaminé nas horas da noite. Quando o ar da chaminé atinge temperaturas mais baixas do que as da cozinha, os fluxos reversos são incrementados e as trocas de ar diminuem

As melhorias no comportamento da ventilação na cozinha derivadas do aumento na área de absorção não são significativas. Em um dia inteiro, ocorrem 1,6 trocas de ar a mais entre a melhor e a pior estratégia. Quando considerado somente o período no qual a cozinha é utilizada, são atingidas 3,6 trocas de ar a mais.

A temperatura apresenta melhorias muito pequenas quando se aumenta a área de absorção. Os “graus hora de resfriamento” diminuem em 1,4 para o análise do dia inteiro e em 0,7 para o período de ocupação.

A diferença encontrada entre os resultados do presente trabalho, em relação às conclusões de outras pesquisas, sugere que a chaminé, mesmo que não seja uma estratégia suficiente para o dia todo, pode ser efetiva se considerado o momento de maior irradiação. Para o resto de momentos do dia será necessário procurar por outras estratégias.

Mesmo que uma chaminé seja efetiva para o momento de maior irradiação, equivalente ao meio dia, é importante considerar os efeitos provenientes dessa estratégia para o restante do dia. De maneira especial se deve tomar cuidado com os fluxos reversos apresentados de madrugada. Caso esses fluxos não sejam desejados, deve se considerar uma estratégia para fechar a chaminé.

Para a avaliação do conforto com a melhor das cozinhas, no período em que esse espaço estava ocupado, percebeu-se a necessidade de complementar as simulações do Energyplus com estudos de CFD. Através destes últimos é possível conhecer a temperatura, velocidade e direção de fluxo do ar que circula ao redor das pessoas. Assim, seria possível estimar com maior precisão e detalhe o conforto.

5.1.5 Geral

A partir das simulações realizadas no presente estudo, identificou-se que usar chaminés solares como única estratégia de condicionamento, não produziu melhorias significativas na temperatura e a ventilação de cozinhas residenciais localizadas no clima quente e úmido de Quibdó.

Caso seja desejado obter comportamentos superiores quanto essas duas variáveis, é necessário incluir outras estratégias. Preferivelmente, essas estratégias devem apresentar melhores desempenhos para os momentos em que o ganho de calor por irradiação na chaminé é baixo ou nem sequer existe.

Por outro lado, o uso da simulação computacional demonstrou-se útil por permitir prever o comportamento térmico de uma estratégia de condicionamento. Antecipar o comportamento de uma estratégia por meio de simulação permite poupar o tempo e o dinheiro que seria necessário investir, caso essa estratégia fosse avaliada em um edifício real.

No entanto, constata-se a importância de se ter senso crítico no decorrer das simulações. Os resultados obtidos com essa ferramenta devem ser avaliados em função do comportamento lógico dos fenômenos físicos estudados, requerendo um domínio dos mesmos por parte de quem faz as simulações. Assim, é necessário adquirir conhecimentos que não fazem parte do currículo básico na formação dos arquitetos. Ressalta-se o engano que pode representar o fato de achar que pelo simples fato de obter dados através da simulação, já é suficiente para analisar e concluir sobre o problema que esteja sendo estudado.

Além disso, caso se deseje aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos com simulação computacional é necessário calibrar o modelo utilizado em função de outros modelos ou de medições reais.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.2.1 Limitações do trabalho

Os resultados do presente trabalho foram obtidos com base em um modelo de simulação que não foi calibrado. Caso haja interesse em

validar os dados produzidos, é necessário utilizar outros modelos de ventilação. Idealmente, esses modelos deverão ser protótipos inseridos no ambiente real para o qual foi feita a presente pesquisa. Alternativamente, alguns dos modelos analíticos ou empíricos da bibliografia referente às chaminés solares podem ser utilizados.

Os coeficientes de descarga e pressão têm grande influência no comportamento da ventilação. Neste trabalho adotaram-se recomendações da bibliografia para o coeficiente de descarga, e um programa que permitiu fazer uma estimativa geral dos coeficientes de pressão, o que pode induzir a uma grande margem de erro. Por este motivo, é necessário estimar esses coeficientes através de estudos de túnel de vento, com o intuito de obter valores mais adequados para as chaminés utilizadas na presente pesquisa.

O modelo de rede utilizado na presente pesquisa só permite fazer avaliações gerais da cozinha, desconsiderando possíveis particularidades no interior deste espaço. Além disso, ele não permite calcular a velocidade do ar sobre as pessoas, e sem essa variável é impossível fazer avaliações mais completas do conforto térmico que pode ser atingido através da ventilação natural.

Como o Energyplus considera uma “zona térmica” como um espaço próximo a um cubo, a modelagem de um duto como uma zona térmica (como foi feito no presente trabalho para a chaminé) pode estar trazendo erros para a simulação.

A ferramenta indicada para fazer avaliações com maiores detalhes está representada pelos modelos de CFD. No decorrer do trabalho feito nesta dissertação, houve um treinamento de dois meses para fazer simulações com o programa ANSYS-CFX. No entanto, as dificuldades apresentadas para configurar, verificar e analisar os resultados produzidos através do Energyplus acabaram tomando o tempo que estava destinado para fazer as simulações com o modelo de CFD.

5.2.2 Sugestões para trabalhos futuros

. Validar as vazões obtidas no modelo do Energyplus, com base nos resultados de outros tipos de modelos.

. Analisar os efeitos produzidos pelo aperfeiçoamento das outras variáveis da chaminé: largura, profundidade da câmara de ar, dimensões e orientação das aberturas.

. Avaliar o efeito que pode ser atingido caso sejam utilizadas outras estratégias passivas de condicionamento em conjunto com as chaminés solares.

. Avaliar a capacidade que pode ter a chaminé para diminuir os níveis de poluição do ar.

. Estimar os coeficientes de pressão através de estudos com tuneis de vento, caso se deseje analisar o desempenho da chaminé sob condições com vento.

. Dadas as limitações do Energyplus para detalhar o comportamento das diferentes variáveis ambientais ao interior de um ambiente, sugere-se incorporar resultados provenientes do uso de modelos de CFD.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ALLARD, Francis; SANTAMOURIS, Matheos. **Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook**. London: James And James, 1998.

ARCE, J. et al. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. **Renewable Energy**, Volume 34, Issue 12, p.2928-2934, 2009.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: American Society Of Heating, Refrigerating And Airconditioning Engineers, Inc., 2010.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **2001 ASHRAE Handbook - Fundamentals**. Atlanta, 2001.

BALAGUE, Alberto Casals. **El arte, la vida y el oficio de arquitecto**. Madrid: Alianza Editorial, 2002.

BANSAL, N. K. et al. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. **Building And Environment**, Volume 40, Issue 10, p.1302-1308, 2005.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à Ventilação Natural**. 2 ed. rev. e ampl. Edufal. Maceió, AL, 2006

CAVALCANTI, Fernando Sá; RORIZ, Maurício. Elaboração de um modelo simplificado para estimar a vazão do ar em ambientes dotados de chaminé solar. In: ENCAC, 11., 2011, Buzios, Rj. Anais. Búzios, Rj: Encac, 2011. Topico 4-37, p. 1 - 10. Disponível em: <<http://encacrio2011.com/about/>>. Acesso em: 01 nov. 2011.

CAVALCANTI, Fernando Sá; RORIZ, Maurício. Ventilação natural em espaços internos a partir da utilização de chaminé solar. In: ENCAC, 11., 2011, Búzios, Rj. Anais. Búzios, Rj: Encac, 2011. Tópico 4-55, p. 1 - 9. Disponível em: <<http://encacrio2011.com/about/>>. Acesso em: 01 nov. 2011.

CHEN, Qingyan et al. Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment. **Building And Environment**, Volume 45, Issue 2, p.296-303, 2010.

CHEN, Qingyan. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. **Energy And Buildings**, Volume 36, Issue 12, p.1197-1209, 2004.

CHEN, Qingyan. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building And Environment**, Volume 44, Issue 4, p.848-858, 2009.

CHEN, Qingyan; ALLOCCA, Camille; GLICKSMAN, Leon R.. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy And Buildings**, Volume 35, Issue 8, p.785-795, 2003.

CHEN, Z. D. et al. An experimental investigation of a solar chimney model for uniform wall heat flux. **Building And Environment**, Volume 38, Issue 7, p.893-906, 2003.

CHUNGLOO, S.; LIMMEECHOKCHAI, B. Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. **Building And Environment**, Volume 42, Issue 9, p.3341-3351, 2007.

CLEZAR, Carlos A.; NOGUEIRA, Antonio Carlos R.. **Ventilação industrial**. 2. ed. Florianópolis: Ufsc, 2009. 240 p. (Série didática).

DE VECCHI, Renata. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. 2011. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Ufsc,

Florianópolis, 2011. Disponível em:
<<http://www.labeee.ufsc.br/node/290>>. Acesso em 31 maio. 2012

DIMOUDI, A.. Solar chimneys in Buildings – The state of the art. **Advances In Building Energy Research**, Volume 3, p.21-44, 2009.

ELETOBRAS (Brasil). Procel. **Eletrodomésticos**. Disponível em:
<<http://www.eletobras.com/ELB/main.asp?TeamID=%7B32B00ABC-E2F7-46E6-A325-1C929B14269F%7D>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference Manual** – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. 2011. Disponível em:
www.energyplus.gov.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference** – The Reference to EnergyPlus Calculations. 2011. Disponível em: www.energyplus.gov.

ENERGYPLUS. **Real-Time Weather Data**. Disponível em:
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_download.cfm. Acesso em: 31 jan. 2012

ENERGYPLUS. **Energy Simulation Software Helpdesk**. Disponível em:
<http://energyplus.helpserve.com/>. Acesso em: 30 mar. 2012

ENERGYPLUS. **Energy Plus Support** – Yahoo Groups. Disponível em:
http://tech.groups.yahoo.com/group/EnergyPlus_Support/. Acesso em: 30 mar. 2012

GONZÁLEZ, Eduardo. **Sobre el Enfriamiento Pasivo de Edificaciones**: Proyectos en desarrollo en el IFAD-LUZ. II Taller de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar: Avances en Ciencia y Tecnología 14-18 de octubre de 2002. Guadalajara, Jalisco, México.. Disponível em:
<http://www.riraas.net/documentacion/CD_05/Sobre%20el%20EPE-proyectos%20en%20desarrollo.pdf>. Acesso em: 18 out. 2011.

GOULART, Solange V. G. et al. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/ufsc, 1998. 345 p.

HE, Jiang et al. A solar cooling project for hot and humid climate. **Solar Energy**, Volume 71, Issue 2, p.135-145, 2001.

KHANAL, Rakesh; LEI, Chengwang. Solar chimney – A passive strategy for natural ventilation. **Energy And Buildings**, Volume 43, Issue 8, p.1811-1819, 2011.

KHEDARI, J.; BOONSRI, B.; HIRUNLABH, J. Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. **Energy And Buildings**, Volume 44, Issue 1, p.89-93, 2000.

KHEDARI, J.; HIRUNLABH, J.; BUNNAG, T. Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new habitations. **Renewable Energy**, Volume 8, Issues 1-4, p.335-338, 1996.

IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. **Atlas Climatológico de Colombia**. Imprenta Nacional de Colombia, 2005. 220p.

IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. **Regimen Anual de Viento**. Disponível em: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>. Acesso em: 05 Dezembro. 2011.

IPSE. INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS. **Diseño e implementación de Prototipos de espacios bioclimáticos** habitables en algunas localidades de las zonas no interconectadas como programa de uso racional y eficiente de la energía. Disponível em: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/viviendas-bioclimaticas-mejoran-calidad-de-vida.html>>. Acesso em: 29 abr. 2012. Disponível em: <http://historico.agenciadenoticias.unal.edu.co/matices/ediciones/23/1.html>>. Acesso em: 29 abr. 2012.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Universidade Federal de Santa Catarina. **Programa Computacional Analysis Bio**, Versão: 2.2. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-bio>>. Acesso em Jan. 2012.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Universidade Federal de Santa Catarina. **Programa Computacional Analysis Sol-ar**, Versão: 6.2. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>>. Acesso em Set. 2012.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R.. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: Pw Editores, 1997. 192 p.

LEE, K. H.; STRAND, R. K. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. **Energy And Buildings**, Volume 41, Issue 6, p.615-621, 2009.

LIDDAMENT, Martin W. **A Guide to Energy Efficient Ventilation**. Great Britain: Iea - Aivc, 1996.

LIDDAMENT, Martin W. **Air infiltration calculation techniques: an applications guide**. Bracknell: Aivc, 1986.

LIU, Pei-chun; LIN, Hsien-te; CHOU, Jung-hua. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model. **Building And Environment**, Volume 44, Issue 9, p. 1970-1979, 2009.

MATHUR, J. et al. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. **Solar Energy**, Volume 80, Issue 8, p.927-935, 2006.

MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. **Energy And Buildings**, Volume 38, Issue 10, p.1156-1163, 2006.

MATHUR, J.; ANUPMA; MATHUR, S.. Experimental investigation on four different types of solar chimneys. **Advances In Energy Research**, p.151-156, 2006.

MIYAZAKI, T.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T. The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under Japanese climate. **Renewable Energy**, Volume 31, Issue 7, p.987-1010, 2006.

NARANJO, Alejandro; LAMBERTS, Roberto; VERSAGE, Rogerio. Ventilação mediante uma chaminé solar em ambiente localizado em clima quente, úmido e sem vento. ENCAC, 11, Búzios, Rj, Trabalho #54 CD-ROM, 2011.

NEVES, Leticia O.; RORIZ, Maurício. Análise teórica do uso de chaminés solares para incrementar a ventilação natural em edificações. In: ENCAC, 11., 2011, Buzios, Rj. Anais... . Búzios, Rj: Encac, 2011. Tópico 4-13, p. 1 - 10. Disponível em: <<http://encacrio2011.com/about/>>. Acesso em: 01 nov. 2011.

NOUANÉGUÉ, H. F.; BILGEN, E. Heat transfer by convection, conduction and radiation in solar chimney systems for ventilation of dwellings. **International Journal Of Heat And Fluid Flow**, Volume 30, p.150-157, 2009.

NUGROHO, A. M.; HAMDAN, M.. The development of solar chimney prototype for stack ventilation in Malaysia's single storey terraced house. **Architecture & Environment**, Volume 5, Issue 2, p.81-92, 2006.

ONG, K. S.; CHOW, C. C. Performance of a solar chimney. **Solar Energy**, Volume 74, Issue 1, p.1-17, 2003.

SAKONIDOU, E. P. et al. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. **Solar Energy**, Volume 82, Issue 1, p.80-94, 2008.

SANTAMOURIS, Matheos; WOUTERS, Peter. **Building Ventilation: The State of the Art**. London: Earthscan, 2006.

SANTAMOURIS, Matheos (Ed.). **Advances in Passive Cooling**. Earthscan, 2007.

SORGATO, Marcio José. **DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES VENTILADAS NATURALMENTE**. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Ufsc, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/node/280>>. Acesso em: 15 out. 2010.

TIEMPO.COM. **Datos Históricos: Clima en Quibdo**. Disponível em: <<http://clima.tiempo.com/clima-en-quibdo+el+carano-801440-1970-Febrero.html>>. Acesso em: 20 jan. 2012.

TNO Building Research. **Cp Generator**. Disponível em: <<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

TRUJILLO, Jorge Hernán Salazar; ARROYAVE, Rafael Hernan Atehortua. **Construcción de normativas urbanísticas**: para el ahorro energetico en climas tropicales. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2002.

TUTIEMPO.NET. **Climatic mean values: Climate Quibdo**. Disponível em: <http://www.tutiempo.net/en/Climate/Quibdo_El_Carano/10-2011/801440.htm>. Acesso em: 20 jan. 2012.

TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Wind Pressure Database**. Disponível em: <<http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>>. Acesso em: 5 fev. 2012.

YUSSOF, W. F. et al. Enhancement of stack ventilation in a hot and humid climate using a combination of roof solar collect & vertical stack. **Building And Environment**, Volume 45, Issue 10, p.2296-2308, 2010.

ZISKIND, G.; DUBOVSKY, V.; LETAN, R. Ventilation by natural convection of a one-story building. **Energy And Buildings**, Volume 34, p.91-102, 2002

APÊNDICES

APÊNDICE A – Coeficientes de Pressão Casa 1

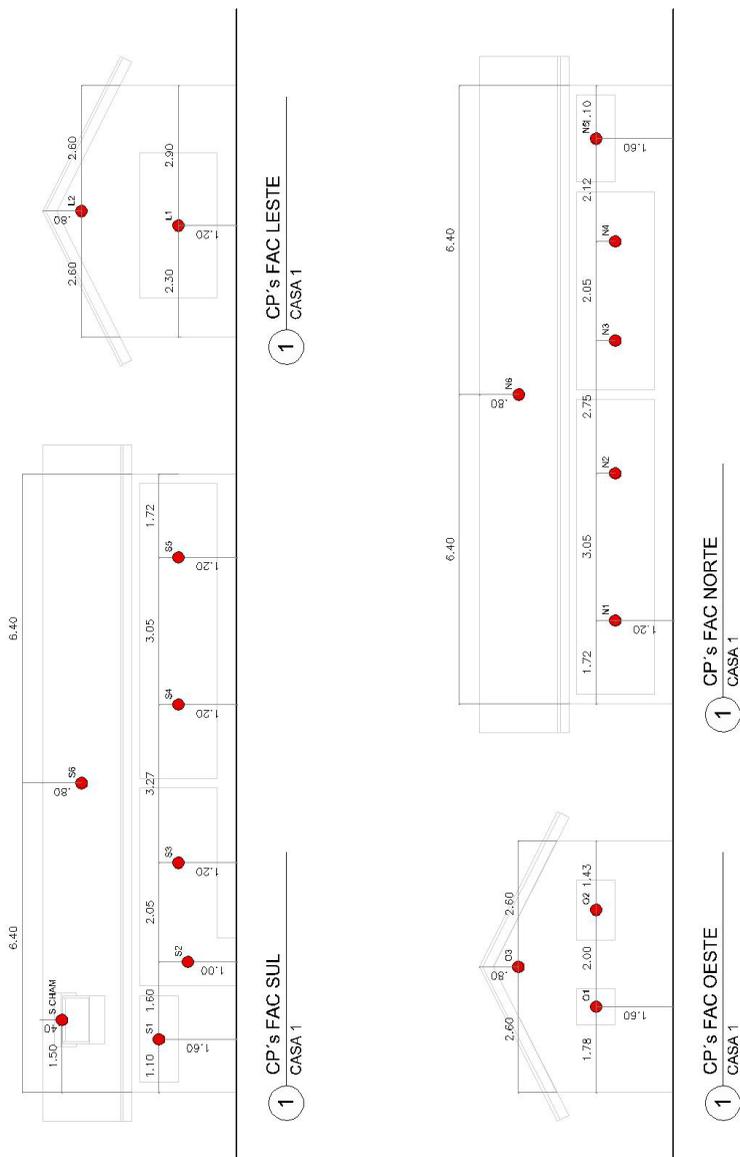


Figura A1. Coordenadas pontos dos Coeficientes de Pressão - Casa 1

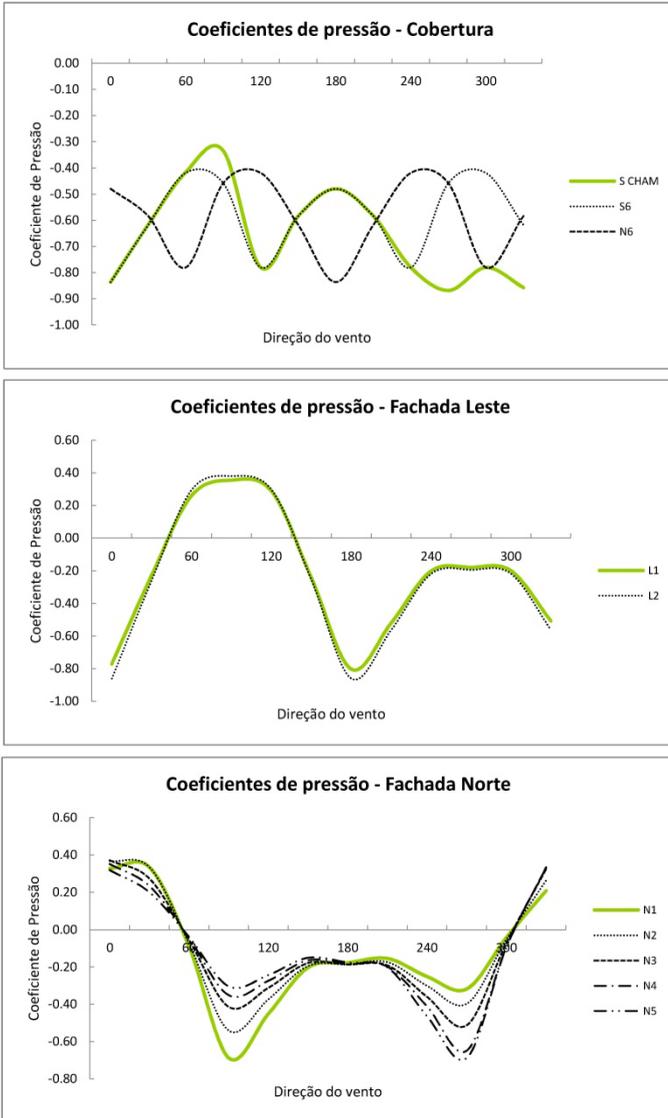


Figura A2. Coeficientes de Pressão – Casa 1

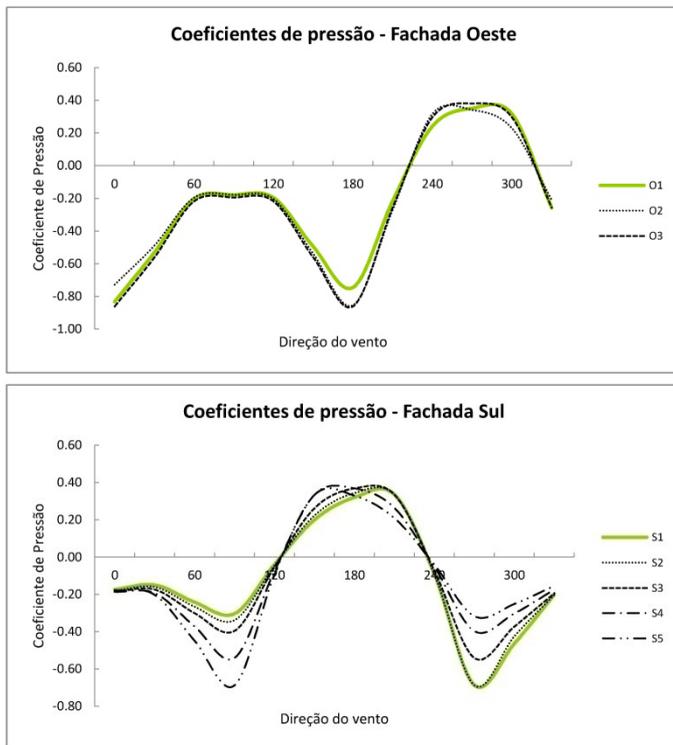


Figura A2 (continuação). Coeficiente de Pressão – Casa 1

APÊNDICE B1 – Comportamento detalhado “Temperaturas” - Casa 1

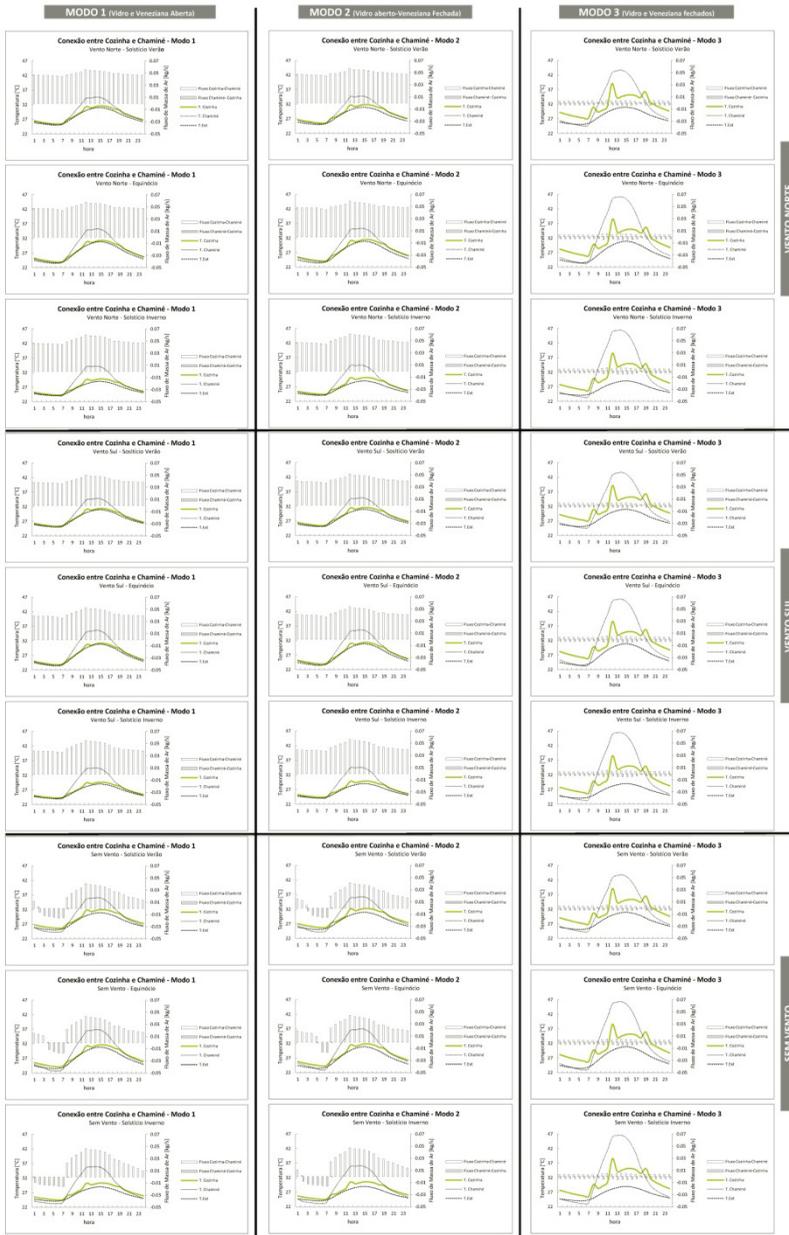


VENTO NORTE

VENTO SUL

SEM VENTO

APÊNDICE B2 – Comportamento detalhado “Conexão entre Cozinha e Chaminé” - Casa 1

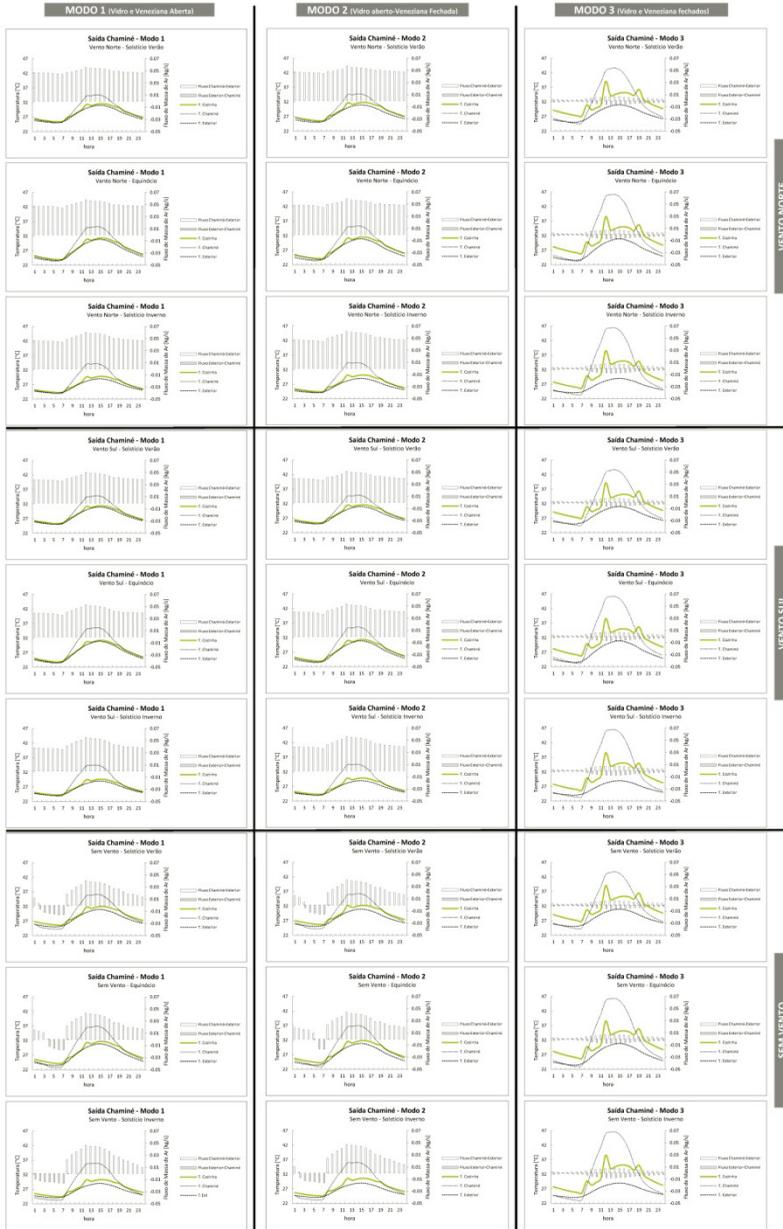


VENTO NORTE

VENTO SUL

SEM VENTO

APÊNDICE B3 – Comportamento detalhado na “Saída da Chaminé” - Casa 1

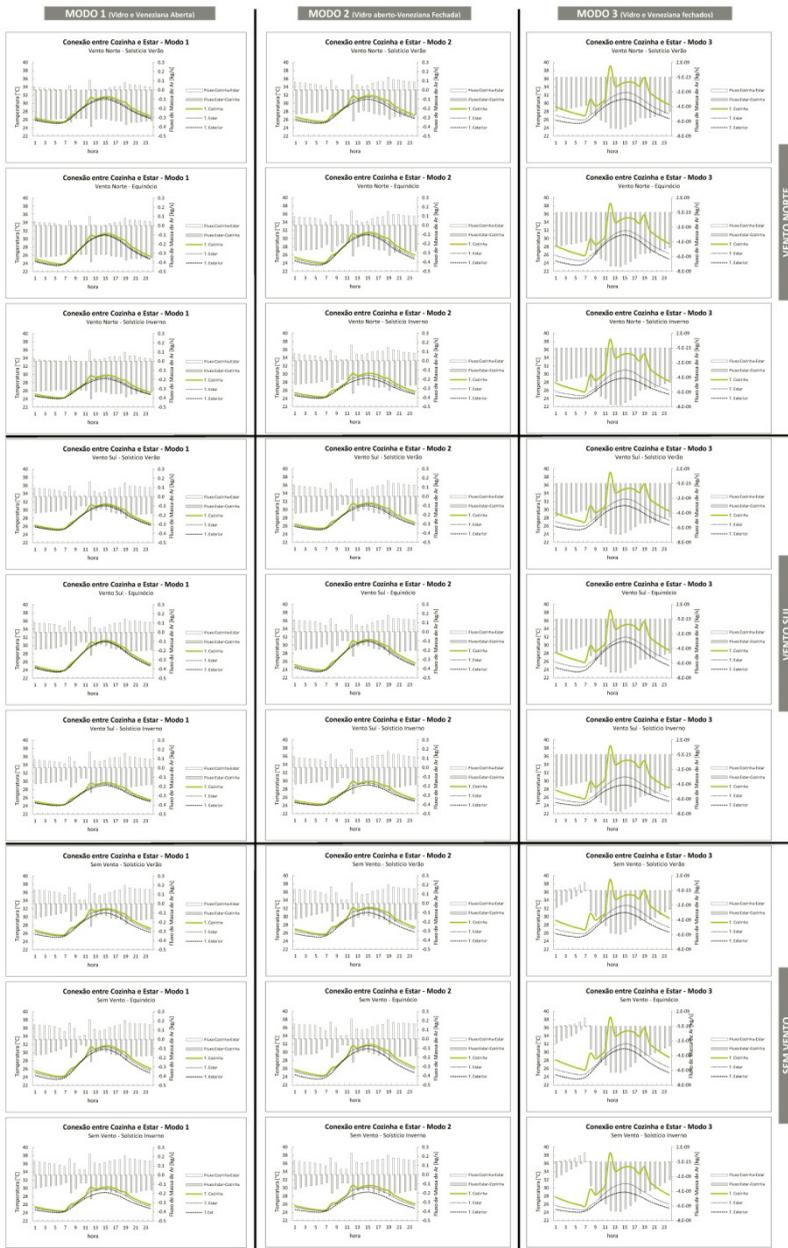


VENTO NORTE

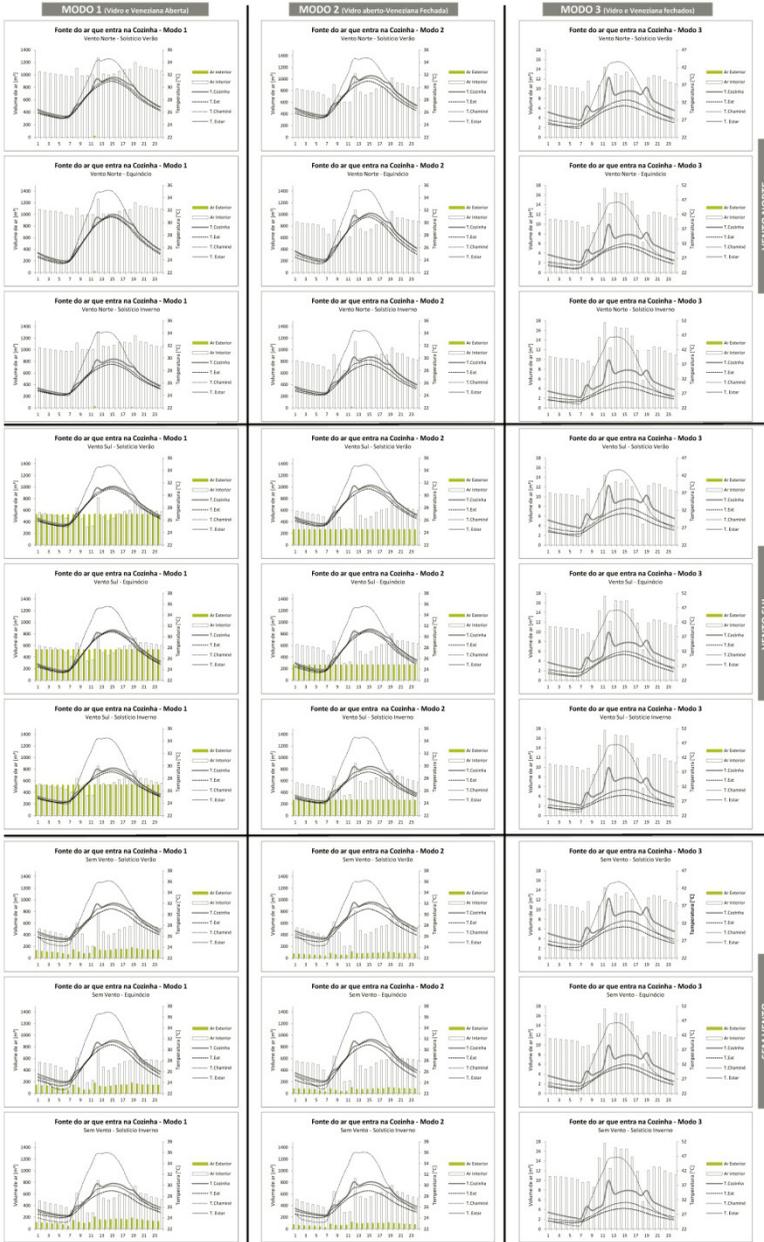
VENTO SUL

SEM VENTO

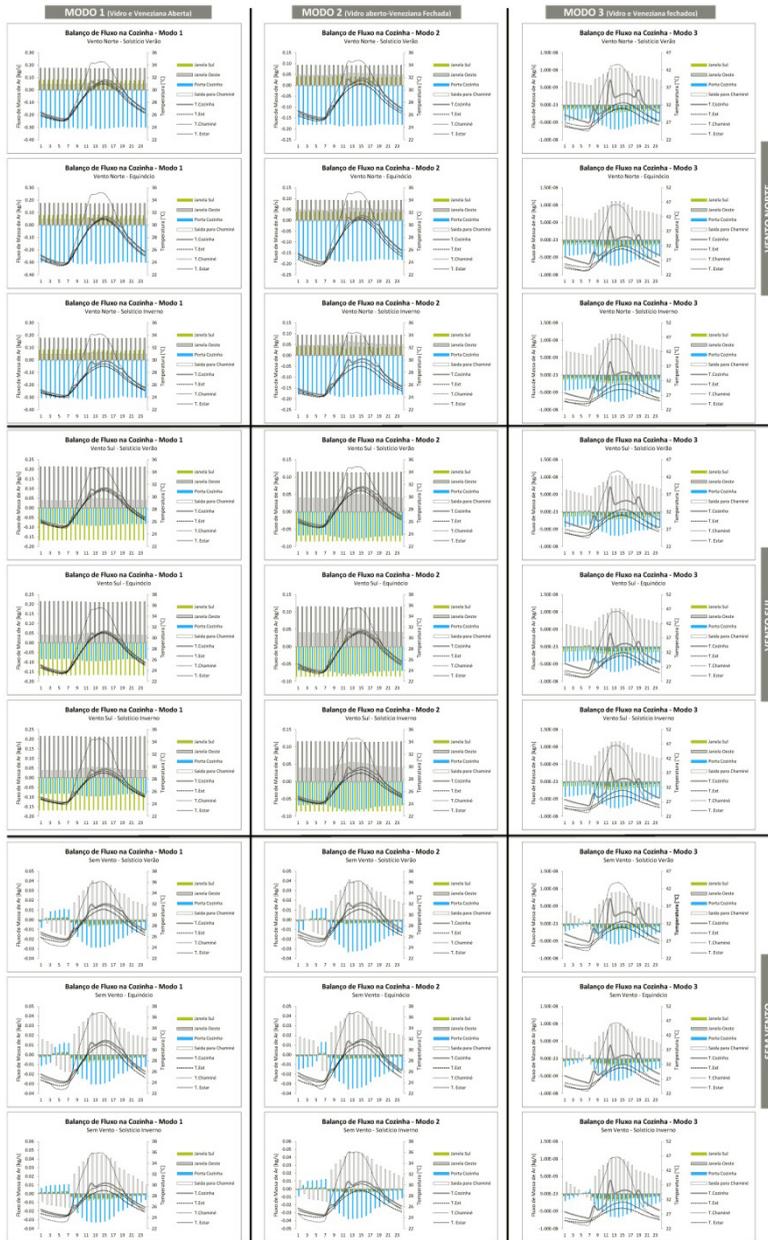
APÊNDICE B4 – Comportamento detalhado na “Conexão entre Cozinha e Estar” - Casa 1



APÊNDICE B5 – Comportamento detalhado “Fonte do ar que entra na Cozinha” - Casa 1



APÊNDICE B6 – Comportamento detalhado “Balanço de fluxo na Cozinha” - Casa 1

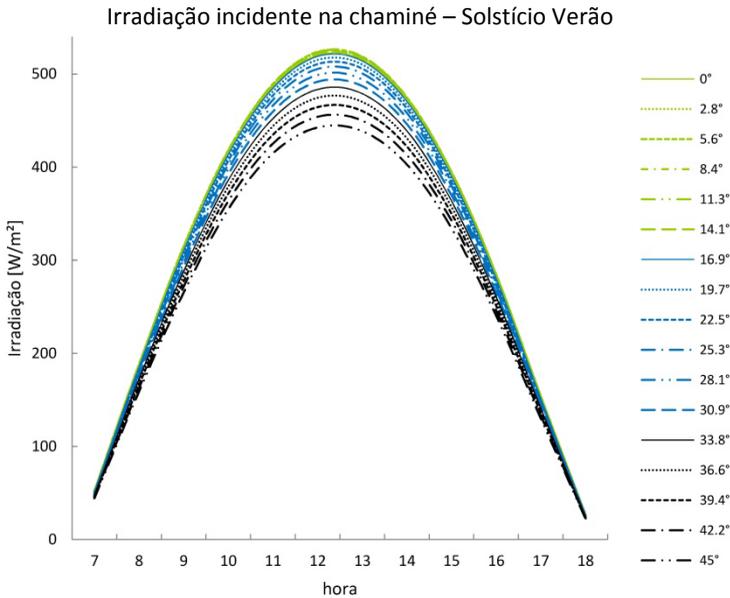
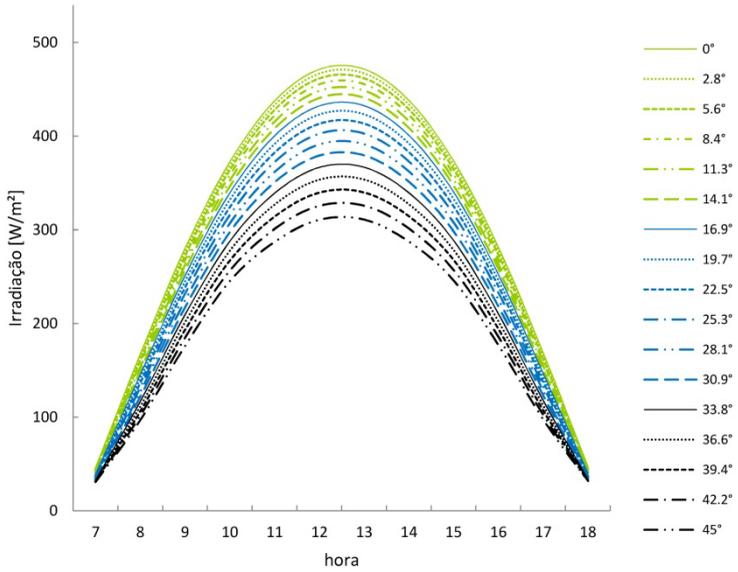


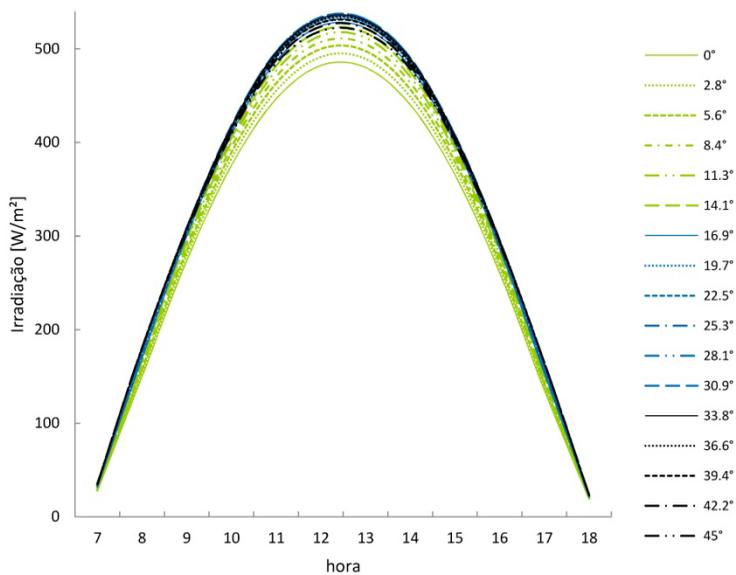
VENTO NORTE

VENTO SUL

SEM VENTO

APÊNDICE C – Ganho de calor por irradiação dependendo da inclinação da chaminé para cada dia de desenho





Irradiação incidente na chaminé – Solstício Inverno