

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

ALEXANDRE GOMES DE OLIVEIRA

PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO

Natal
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ALEXANDRE GOMES DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Aldomar Pedrini, Ph.D.

Natal
2006

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila
Mamede

Oliveira, Alexandre Gomes de.

Proposta de método para avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente e úmido / Alexandre Gomes de Oliveira. – Natal [RN], 2006.

200 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

1. Projeto arquitetônico - Dissertação. 2. Desempenho térmico - Dissertação. 3. Residências - Dissertação. I. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 72.011 (043.3)

ALEXANDRE GOMES DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
TÉRMICO DE RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES EM CLIMA QUENTE
E ÚMIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Aldomar Pedrini, Ph.D.

BANCA EXAMINADORA:

Presidente:

Prof. Aldomar Pedrini, Ph.D.

PPGAU/UFRN

Examinadores

:

Prof. Roberto Lamberts, Ph.D.

ECV/UFSC

Profa. Dra. Virgínia Maria Dantas de Araújo

PPGAU/UFRN

À Greyce pela paciência, atenção e participação em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À minha família: pais e irmãos, pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Aldomar Pedrini pelos ensinamentos que me engrandeceram pessoal e profissionalmente, acreditando sempre na realização desse trabalho.

À Prof^a. Virginia Araújo pela motivação e contribuição ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos professores do PPGAU pelos ensinamentos.

Aos amigos do LabCon-UFRN, Sileno Cirne, Glênio Lima, Leonardo Cunha e Renata Matos pela amizade e suporte nos momentos difíceis e, sobretudo, nos de alegria.

Ao Prof. Marcondes Araújo Lima, pelo incentivo à realização do mestrado.

À CAPES pela bolsa de estudo.

À Eletrobrás por financiar os equipamentos que permitiram a realização da pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE QUADROS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUÇÃO	16
1 REVISÃO DA LITERATURA	21
1.1 A decisão arquitetônica e o desempenho térmico	22
1.1.1 Estratégias recomendadas para o clima quente e úmido	24
1.1.2 Panorama brasileiro do consumo de energia em edificações	29
1.2 Conforto térmico	32
1.2.1 Índices de conforto térmico	36
1.2.2 Escolha de um critério de conforto térmico para o clima de Natal-RN	51
1.3 Critérios de avaliação do desempenho térmico e energético	60
1.4 Normas e sistemas de classificação de desempenho térmico e energético	63
1.5 Simulação computacional do desempenho térmico de edificações	67
1.5.1 Variáveis climáticas	69
1.5.2 Variáveis de projeto	75
1.5.3 Variáveis de uso e ocupação	77
1.6 Síntese da revisão da literatura	78
2 MÉTODO	80
2.1 Pré-requisitos para análises	83
2.2 Critério de conforto térmico para avaliação do desempenho térmico	84
2.3 Definição do caso base (CB) e variáveis	87
2.4 Primeira série de simulações: Impacto das variáveis e modelagem dos casos extremos	98
2.4.1 Discussão dos resultados da primeira série de simulações - Quarto	99
2.4.2 Discussão dos resultados da primeira série de simulações - Sala	106
2.4.3 Identificação das variáveis de pior e melhor desempenho	112
2.5 Segunda série de simulações: identificação do espectro de desempenho térmico	113
2.6 Proposta de um sistema de classificação	115
2.7 Aplicação do sistema de classificação e comparação com métodos de avaliação de desempenho térmico existentes	120
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE A	140
APÊNDICE B	164
APÊNDICE C	188

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama da estrutura da dissertação, destacando a caracterização de cada capítulo. _____	20
Figura 2. Estrutura da oferta de energia elétrica no Brasil por fonte em 2002 _____	29
Figura 3. Perfil do consumo de energia elétrica no Brasil em 2003 _____	31
Figura 4. Porcentagem do consumo final de energia do setor residencial em relação ao consumo total entre 1999-2003 _____	32
Figura 5. Carta bioclimática de Olgay, modificada para climas quentes. _____	36
Figura 6. Zona de conforto de Givoni para países quentes em desenvolvimento. _____	37
Figura 7. Efeitos das oportunidades de adaptação: quanto maior a oportunidade de controlar o ambiente – ou as exigências dos ocupantes – menor a probabilidade de estresse térmico (áreas listradas). _____	42
Figura 8. Fluxograma do modelo psicofisiológico da percepção térmica. _____	45
Figura 9. Relação entre a temperatura de conforto e a média mensal da temperatura externa. Os pontos pretos representam as pesquisas realizadas em edificações naturalmente ventiladas e os pontos brancos, as edificações aquecidas ou resfriadas artificialmente. _____	47
Figura 10. Aumento da temperatura de conforto para diferentes velocidades do ar. _____	49
Figura 11. Norma de conforto adaptativo proposta pela ASHRAE Standard 55-2004 para edificações naturalmente ventiladas. _____	50
Figura 12. Índice PMV/PPD mostrando a taxa aceitável de cerca de 10% de pessoas insatisfeitas com valores máximos das seis variáveis de conforto térmico. _____	52
Figura 13. Índice PMV/PPD aplicado com valores limites de desconforto ao calor propostos na zona de conforto de Givoni. _____	54
Figura 14. Temperatura de conforto em edificações naturalmente ventiladas como estimado pelo modelo PMV e medida em estudos em campo. _____	56
Figura 15. Variação da temperatura de conforto para diferentes modelos adaptativos, aplicados ao clima de Natal-RN. _____	57
Figura 16. Diagrama psicrométrico com os parâmetros de conforto térmico determinados para o clima de Natal-RN. _____	58
Figura 17. Modelo adaptativo de Humphreys (1978) para o clima de Natal-RN (arquivo climático TRY de 1954) e os limites de temperatura definidos pela zona de conforto de Araújo (2001). _____	59

Figura 18. Zona de conforto para Natal-RN do modelo adaptativo de Humphreys (1978), com limites inferior e superior de 2.5°C da temperatura de conforto. _____	60
Figura 19. Selo de classificação de desempenho energético de residências 5 Star do estado de Victoria, Austrália. _____	65
Figura 20. Representação esquemática do processo de simulação de desempenho de uma edificação. _____	67
Figura 21. Diagrama do método da pesquisa com caracterização das seis etapas. _____	82
Figura 22. Faixas de conforto para Natal-RN a partir do modelo adaptativo de Humphreys (BRAGER; DEAR, 1998b), com limites para diferentes velocidades do ar. _____	84
Figura 23. Esquema de representação da célula do caso base simulada. _____	87
Figura 24. Diagrama da primeira série de simulações considerando os três tipos de ventilação, às quatro orientações e as 17 variáveis (16 de projeto e a ocupação). _____	98
Figura 25. Códigos para leitura das legendas dos gráficos referentes à primeira série de simulações. _____	99
Figura 26. Gráficos da análise combinatória para as quatro orientações e três tipos de ventilação, para ocupação quarto. _____	100
Figura 27. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para os sistemas de maior transmitância térmica (P1). _____	101
Figura 28. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para os sistemas de maior transmitância térmica (P1). _____	101
Figura 29. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de 0.2 (CB). _____	102
Figura 30. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de 0.2 (CB). _____	102
Figura 31. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para transmitância térmica maior (C1). _____	102
Figura 32. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 250TAH, com ligeira melhoria no desempenho para transmitância térmica maior (C1). _____	102
Figura 33. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de coberta menor de 0.2 (C1). _____	103
Figura 34. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 250TAH, com melhor desempenho para absorvância de coberta menor de 0.2 (C1). _____	103

Figura 35. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Leste e 1TAH, com melhor desempenho para PjF menor de 17% (CB).	104
Figura 36. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para PjF menor de 17% (CB).	104
Figura 37. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Leste e 1TAH, com pequena melhoria no desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.	104
Figura 38. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com pequena melhoria no desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.	104
Figura 39. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com variações mínimas no desempenho térmico para diferentes tipos de sombreamento.	105
Figura 40. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com variações mínimas no desempenho térmico para diferentes tipos de sombreamento.	105
Figura 41. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOc).	105
Figura 42. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOc).	105
Figura 43. Gráficos da análise combinatória para as quatro orientações e três tipos de ventilação, para ocupação sala.	106
Figura 44. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com pequenas diferenças no desempenho para variações na transmitância térmica da parede.	107
Figura 45. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com pequenas diferenças no desempenho para variações na transmitância térmica da parede.	107
Figura 46. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com pequenas diferenças no desempenho para variações na absorvância da parede.	108
Figura 47. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância da parede menor de 0.2 (CB).	108
Figura 48. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com pior desempenho para transmitância de cobertura maior (C1), alcançando cerca de 40°C.	109
Figura 49. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para transmitância de cobertura menor (C2).	109
Figura 50. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de cobertura menor de 0.2 (C1).	109

Figura 51. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de coberta menor de 0.2 (C1).	109
Figura 52. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com desempenho semelhante para CB (17%) e PJF1 (33%) e pior desempenho para PJF2 (33%).	110
Figura 53. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para a PJF do caso base (CB) de 17%.	110
Figura 54. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.	110
Figura 55. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.	110
Figura 56. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com desempenho pouco melhor para S4.	111
Figura 57. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com destaque de melhor desempenho para S4 e pior desempenho para S1 (sem proteção solar).	111
Figura 58. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOc).	112
Figura 59. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOc), porém com menor variação entre casos.	112
Figura 60. Diagrama da segunda série de simulações considerando o pior e melhor caso, combinados aos três tipos de ventilação e às quatro orientações.	114
Figura 61. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 1 TAH para ocupação quarto.	115
Figura 62. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 50 TAH para ocupação quarto.	116
Figura 63. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 250 TAH para ocupação quarto.	116
Figura 64. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 1 TAH para ocupação sala.	117
Figura 65. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 50 TAH para ocupação sala.	117
Figura 66. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 250 TAH para ocupação sala.	118
Figura 67. Valores usados na análise de sensibilidade da transmitância da coberta.	120

Figura 68. Gráfico de frequência de temperaturas mostrando os resultados da análise de sensibilidade da transmitância da cobertura para ocupação sala e demarcação da zona de desconforto ao calor. _____	121
Figura 69. Resultados da contagem de horas de desconforto em porcentagem para os três casos simulados, durante o período de ocupação. _____	122
Figura 70. Resultados de graus-horas de desconforto para os três casos simulados, durante o período de ocupação. _____	123
Figura 71. Resultados avaliados pelo IDTR e conseqüente classificação de cada um dos três casos simulados, em estrelas, durante o período de ocupação, apresentando também sua relação com o Espectro de Desempenho Térmico (EDT). _____	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos parâmetros analisados para modelagem do Pior e Melhor Caso para ocupação quarto. _____	112
Tabela 2. Caracterização dos parâmetros analisados para modelagem do Pior e Melhor Caso para a ocupação sala. _____	113
Tabela 3. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 1 TAH, para ocupação sala e EDT para cada orientação. _____	119
Tabela 4. Sistema de classificação em estrelas com valores de referência para cada desempenho, de acordo com o IDTR. _____	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Estratégias de adaptação humana em resposta ao estímulo térmico. _____	43
Quadro 2. Fontes de incerteza na estimativa de desempenho de edificações. _____	68
Quadro 3. Classificação de maneiras existentes de prover dados meteorológicos. _____	69
Quadro 4. Tipologias quanto à relação de vizinhança de edificações residenciais unifamiliares e caracterização em relação ao grau de exposição solar. _____	75
Quadro 5. Possibilidades de <i>layout</i> em planta baixa de um ambiente residencial de lados iguais utilizando como critério o número de lados do ambiente exposto à radiação solar. _____	76
Quadro 6. Faixas de conforto térmico e pesos. _____	85
Quadro 7. Trocas de ar por hora de infiltração e ventilação natural usados nas simulações. _____	88
Quadro 8. Caracterização do caso base (CB). _____	89
Quadro 9. Cargas internas fixas da ocupação base, iluminação artificial e equipamentos. _____	90
Quadro 10. Rotinas de ocupação - Quarto _____	91
Quadro 11. Rotinas de ocupação - Sala _____	91
Quadro 12. Faixas de referência de transmitância térmica estabelecidas como critério para escolha dos sistemas construtivos de paredes a serem utilizados nas simulações. _____	92
Quadro 13. Faixas de referência de transmitância térmica estabelecidas como critério para escolha dos sistemas construtivos de cobertura a serem utilizados nas simulações. _____	93
Quadro 14. Caracterização da transmitância térmica dos sistemas construtivos de parede (P) escolhidos para serem utilizados nas simulações. _____	93
Quadro 15. Caracterização da transmitância térmica dos sistemas construtivos de cobertura (C) escolhidos para simulações. _____	94
Quadro 16. Valores de absorvância de parede (Ap). _____	95
Quadro 17. Valores de absorvância de cobertura (Ac). _____	95
Quadro 18. Tipologias de janela (J). _____	95
Quadro 19. Valores e caracterização da porcentagem de janela na fachada (PJF). _____	96
Quadro 20. Caracterização dos tipos de sombreamento (S), incluindo o caso base, considerando a orientação e a porcentagem de sombreamento (PS). _____	97

RESUMO

Atualmente, métodos de avaliação do desempenho térmico e energético de edificações têm sido desenvolvidos com o intuito de otimizar o conforto térmico em edificações e reduzir o consumo de energia com sistemas de condicionamento ativo. Entretanto, em países desenvolvidos, os critérios utilizados para avaliar o desempenho térmico e energético de edificações têm demonstrado limitações quando aplicados em edificações naturalmente ventiladas em climas tropicais. A presente pesquisa teve como principal objetivo propor um método para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares no clima quente e úmido, através da simulação computacional. O método foi desenvolvido a fim de gerar um sistema de classificação adequado na avaliação destas edificações, usando como critérios de análise a temperatura interna do ar e um modelo adaptativo de conforto térmico. A pesquisa utilizou o aplicativo VisualDOE 4.1 em duas séries de simulações de um caso base, caracterizado por duas ocupações típicas: quarto e sala. Na primeira série foram realizadas análises de sensibilidade para identificar as variáveis de maior impacto sobre o desempenho térmico dos casos. Além disso, os resultados também permitiram a elaboração de recomendações de projeto para o clima tropical visando melhorias no desempenho térmico de edificações residenciais em situações semelhantes. Os resultados da segunda série de simulações foram utilizados para identificar o chamado Espectro de Desempenho Térmico (EDT) para os dois tipos de ocupação, no qual reflete a variação de desempenho térmico considerando o clima local, tipologia da edificação, materiais construtivos escolhidos e ocupações analisadas. Essa análise serviu de base para o desenvolvimento de um índice nomeado de IDTR - Índice de Desempenho Térmico Resultante, que foi configurado como um sistema de classificação de desempenho térmico. Esse associa o desempenho térmico com o número de horas em que a temperatura interna do ar encontra-se em cada uma das seis faixas de conforto térmico pré-definidas que receberam pesos a fim de ponderar a intensidade de desconforto térmico. A aplicação desse sistema mostrou-se apropriado quando aplicado a um dos casos simulados, apresentando vantagens em relação a outros métodos de avaliação existentes e se tornou uma ferramenta para o entendimento do comportamento térmico de edificações.

Palavras-chave: desempenho térmico, sistema de classificação, simulação, residências.

ABSTRACT

Nowadays, evaluation methods to measure thermal performance of buildings have been developed in order to improve thermal comfort in buildings and reduce the use of energy with active cooling and heating systems. However, in developed countries, the criteria used in rating systems to assess the thermal and energy performance of buildings have demonstrated some limitations when applied to naturally ventilated building in tropical climates. The present research has as its main objective to propose a method to evaluate the thermal performance of low-rise residential buildings in warm humid climates, through computational simulation. The method was developed in order to conceive a suitable rating system for the athermal performance assessment of such buildings using as criteria the indoor air temperature and a thermal comfort adaptive model. The research made use of the software VisualDOE 4.1 in two simulation runs of a base case modeled for two basic types of occupancies: living room and bedroom. In the first simulation run, sensitive analyses were made to identify the variables with the higher impact over the cases' thermal performance. Besides that, the results also allowed the formulation of design recommendations to warm humid climates toward an improvement on the thermal performance of residential building in similar situations. The results of the second simulation run was used to identify the named Thermal Performance Spectrum (TPS) of both occupancies types, which reflect the variations on the thermal performance considering the local climate, building typology, chosen construction material and studied occupancies. This analysis generates an index named IDTR – Thermal Performance Resultant Index, which was configured as a thermal performance rating system. It correlates the thermal performance with the number of hours that the indoor air temperature was on each of the six thermal comfort bands pre-defined that received weights to measure the discomfort intensity. The use of this rating system showed to be appropriated when used in one of the simulated cases, presenting advantages in relation to other evaluation methods and becoming a tool for the understanding of building thermal behavior.

Keywords: thermal performance, rating system, simulation, residential buildings.

INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma preocupação mundial em reduzir o impacto ambiental das edificações, justificado por questões como o aquecimento global e a redução do consumo de energia. Em países desenvolvidos, há inúmeros programas governamentais e não governamentais que através de recomendações, normas e leis procuram orientar o processo de projeto e a construção de edificações nesse sentido.

Por vários motivos, a taxa de emissão de CO₂ e o consumo de energia são os critérios mais adotados nesses programas para avaliação do desempenho térmico das edificações. Nesses países, o uso de tais critérios se justifica primeiramente pela grande parcela da energia gerada em usinas termelétricas, que possuem altas taxas de emissão de gás carbono oriundos da queima de carvão ou de outro combustível fóssil.

Segundo, grande parcela da energia consumida em edificações residenciais está relacionada à manutenção do conforto ambiental, principalmente térmico e luminoso. Por exemplo, nos Estados Unidos, o setor residencial é responsável por 21% do consumo de energia (EIA, 2006), sendo que 48% desta parcela corresponde ao consumo de sistemas de aquecimento ou resfriamento de ar (ENERGY STAR, 2006).

Terceiro, as residências em países desenvolvidos têm um alto índice de saturação¹ de equipamentos de condicionamento de ar devido ao padrão de vida de seus usuários. Conseqüentemente, há uma motivação que os países que mais emitem CO₂ sejam os mais

¹ Refere-se à frequência de aparelhos de ar-condicionado encontrados em residências.

interessados em melhorar o desempenho térmico das edificações e assim consumir menos energia.

Países em desenvolvimento situados em zonas de clima tropical apresentam um cenário diferenciado. A adoção desses critérios nestes países pode ser inapropriado em virtude das peculiaridades de cada região. No caso do Brasil, a emissão de CO₂ decorrente do consumo de energia nas edificações ainda não é tão preocupante, pois quase a totalidade da energia gerada advém de usinas hidrelétricas. Entretanto, o abastecimento de energia tem mostrado suas limitações nos últimos anos e novas usinas termelétricas estão sendo construídas.

Embora o consumo de energia seja um dos principais critérios de avaliação adotado em sistemas de classificação de desempenho térmico de edificações, seu uso é limitado para as condições brasileiras. O primeiro aspecto a considerar é a baixa saturação de equipamentos de ar condicionado devido ao poder aquisitivo da população. Ainda que estes sejam necessários para atender o conforto térmico de muitas edificações, muitas vezes são preteridos em favor de outras prioridades.

Além disso, a operação dos sistemas de condicionamento pode variar muito. No caso de residências unifamiliares, as diferenças de tipologias arquitetônicas, de poder aquisitivo, de hábito dos ocupantes, de rotina de ocupação de um ambiente e de sua operação (abertura de janelas, uso de ventiladores...) podem implicar em situações distintas de desempenho, se este for avaliado pelo consumo energia.

A análise da ocorrência de temperaturas é uma alternativa ao método de classificação anterior, porém implica na escolha ou definição de uma zona de conforto térmico adequada ao clima local e para usuários de edificações condicionadas passivamente, tema de contínua discussão. Segundo Nicol (2002), é um equívoco a adoção de um índice de conforto validado em países de clima temperado e em edificações condicionadas artificialmente como critério para avaliação de edificações naturalmente ventiladas em países em desenvolvimento de

clima tropical. Mesmo que as normas ISO 7730-1994 e ASHRAE Standard 55-2004 sejam empregadas em edificações em países em desenvolvimento e tragam novos estudos – como o caso da norma ASHRAE 55-2004 que inclui um modelo adaptativo de conforto térmico – seu uso apenas se justifica pela escassez de referências mais apropriadas, sendo necessário considerar estudos para avaliar as exigências de conforto térmico de cada região.

Por outro lado, normas de desempenho térmico e energético para edificações são ainda incipientes no Brasil. Em 2005, a ABNT publicou um conjunto de normas dedicadas ao desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares de interesse social. A norma ABNT NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social traz um conjunto de recomendações de projeto para oito zonas bioclimáticas visando o melhor desempenho térmico dessas edificações. Por ser a primeira tentativa de influenciar a tomada de decisões arquitetônicas através de prescrições para a envoltória da edificação, a norma é passível de muitas discussões. As mais pertinentes referem-se à abrangência das zonas bioclimáticas e aos critérios de definição das diretrizes de projeto.

Projetistas também podem contar com programas de simulação térmica para subsidiar questões específicas. Os programas de simulação do desempenho térmico de edificações estão no mercado há mais de duas décadas e continuam evoluindo para se tornarem mais adequados ao uso do arquiteto. Entretanto, as ferramentas voltadas para a análise do comportamento térmico de edificações continuam distantes dos escritórios de arquitetura por demandarem abordagens sistematizadas e conhecimento dos fenômenos físicos, geralmente subestimados, tornando-se muitas vezes apenas ferramentas para testar as hipóteses do projetista.

A presente pesquisa explora a relação entre a decisão arquitetônica e o desempenho térmico de edificações residenciais em clima quente e úmido, com base em simulações computacionais, a fim de aproximar a pesquisa científica da prática. Seu objetivo principal é

propor um método de avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares no clima quente e úmido. Além do objetivo principal destacam-se outros objetivos:

- i. Delinear uma seqüência de abordagens para avaliar decisões arquitetônicas através de simulações térmicas;
- ii. Gerar um método de avaliação do desempenho térmico voltado para a determinação de recomendações projetuais para arquitetos;
- iii. Contribuir para a discussão de métodos que podem subsidiar a elaboração de normas, código de obras e planos diretores, sob o aspecto da eficiência energética e do conforto térmico no ambiente construído.

A pesquisa está contextualizada para o clima da cidade de Natal no Estado do Rio Grande do Norte – RN (Latitude 5°55', Longitude 35°15'), pertencente à Zona Bioclimática Z8, clima quente e úmido, de acordo com a norma da ABNT de Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3, que divide o país em oito zonas bioclimáticas homogêneas quanto ao clima (ABNT, 2005c).

A dissertação está estruturada em três capítulos, além da introdução (Figura 1). O Capítulo 1, 'Revisão da Literatura', apresenta a revisão bibliográfica de temas da arquitetura bioclimática e do desempenho térmico e energético de edificações. Neste são levantadas questões relacionadas ao conforto térmico e à avaliação do desempenho térmico e energético de edificações com uso de simulação computacional.

O Capítulo 2, 'Método', compreende o método da pesquisa que se configura no próprio desenvolvimento desta. Neste são apresentadas as etapas que se configuraram para o desenvolvimento do método proposto de avaliação do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas em clima quente e úmido. A parte final desse capítulo culmina com a

apresentação do método proposto e exemplificação de sua aplicação, comparada a outros métodos de avaliação existentes.

O Capítulo 3, ‘Considerações Finais e Conclusões’, destaca as conclusões da pesquisa, com recomendações de projeto para o clima quente e úmido, formuladas a partir dos resultados das simulações, e considerações sobre o desenvolvimento e aplicação do método. Ainda elucida algumas limitações da pesquisa, provendo, por fim, recomendações de estudos futuros que possam ser desenvolvidos no sentido de aprimorar os resultados aqui encontrados.

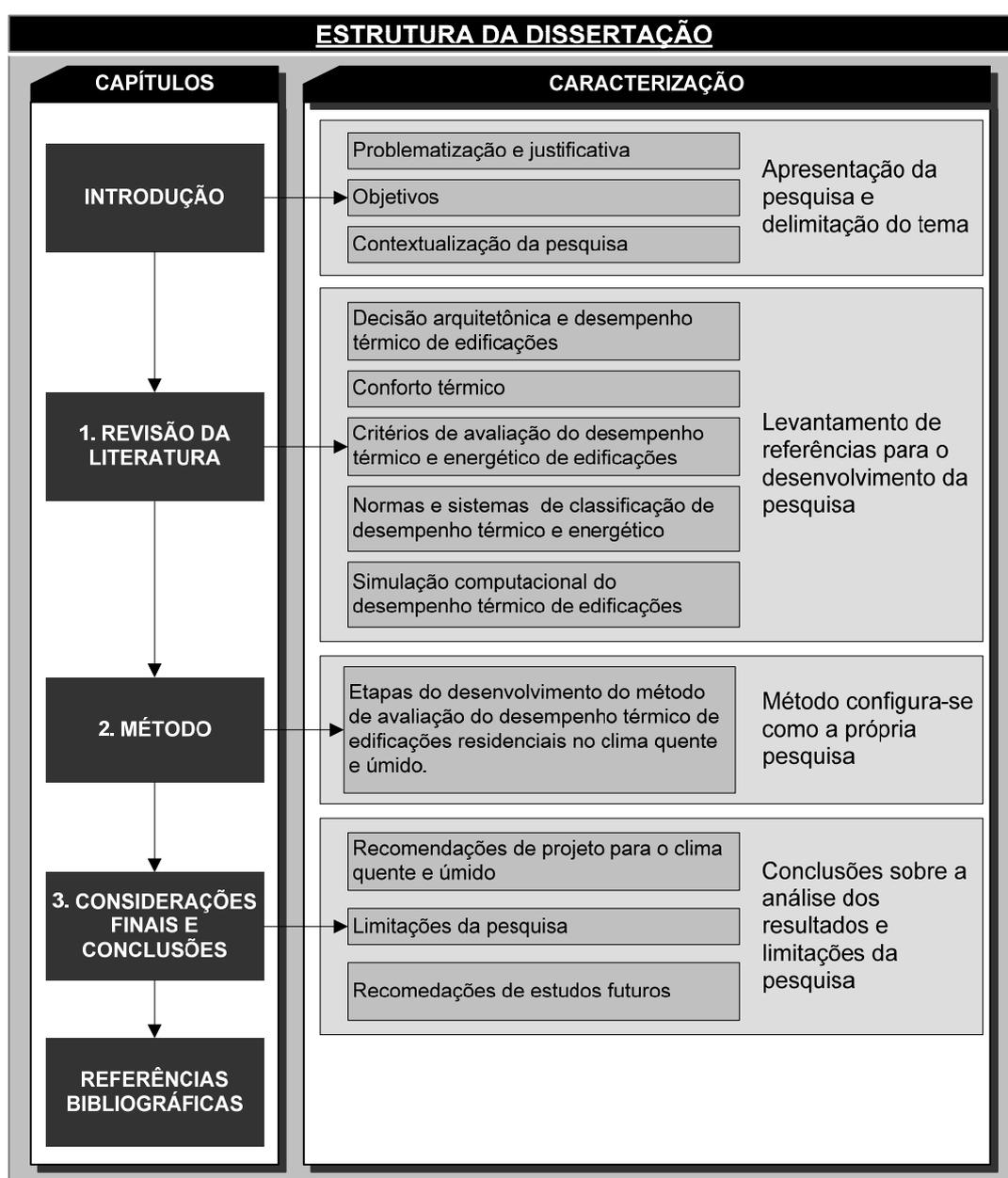


Figura 1. Diagrama da estrutura da dissertação, destacando a caracterização de cada capítulo.

REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura está dividida em cinco itens principais. O primeiro delimita a abordagem da arquitetura bioclimática no âmbito da pesquisa e discute as relações entre a decisão arquitetônica e o desempenho térmico de edificações. São apresentados aspectos da arquitetura tropical e recomendações de projeto voltadas ao conforto térmico dos usuários e a redução do consumo de energia nas edificações. Além disso, é ilustrado um panorama do consumo de energia em edificações no Brasil, considerando a necessidade de edificações mais eficientes do ponto de vista térmico e energético.

O segundo trata de questões relacionadas ao conforto térmico e dos índices de conforto térmico, bem como de seu uso em locais de clima tropical. O terceiro discute os critérios de avaliação do desempenho térmico e energético a fim de propor um que se adeque à avaliação de edificações residenciais naturalmente ventiladas no clima quente e úmido a ser usado na presente pesquisa.

O quarto levanta as principais características de normas e sistemas de classificação energética para edificações residenciais e o impacto da adoção destas em países desenvolvidos. O quinto item destaca os pontos relativos à simulação de desempenho térmico de edificações; seus objetivos, imprecisões e os principais elementos que devem ser considerados na modelagem e simulação térmica de uma edificação. Por fim, o sexto item consiste em uma síntese da revisão da literatura, relevando e discutindo os principais aspectos envolvidos.

A DECISÃO ARQUITETÔNICA E O DESEMPENHO TÉRMICO

O projeto bioclimático, termo cunhado por Olgyay em 1953 como “*Bioclimatic Design*”, define o projeto que considera as condições climáticas do local para controle e manutenção das condições de conforto ambiental do usuário na edificação (OLGYAY, 1963). Segundo Lima (1995, p. 9), “o projeto bioclimático é uma prática tão antiga quanto a própria arquitetura, visando prover através do projeto da edificação, proteção física e conforto fisiológico pela otimização do uso de recursos, do clima e do ambiente natural”.

Para Givoni (1976) o projeto bioclimático deve utilizar a edificação como um filtro para as condições climáticas do local a fim de proporcionar conforto ambiental ao usuário. O uso de sistemas ativos de controle do clima de ambientes internos e a preocupação com o exaurir das fontes não-renováveis de energia, na segunda metade do século XX, levaram a incorporar em seu conceito à busca pela redução do consumo de energia nas edificações.

Ainda que a consideração dessas definições devesse remeter a definição da própria arquitetura, o que se observa é o distanciamento da prática arquitetônica desses aspectos: uma arquitetura consolidada de forma indiferente ao clima e pautada pela inobservância dos aspectos científicos por trás do projeto arquitetônico. De acordo com Lima (1995, p. 10), o projeto bioclimático “é a arte e a ciência de controlar o fluxo de energia (metabolismo, força, energia mecânica, radiação, calor, luz, som, eletricidade, entre outras) através dos materiais que constituem a envoltória da edificação”. Sua realização depende do profundo entendimento do arquiteto das forças e fatores envolvidos nessa relação.

Embora as principais decisões relacionadas com o desempenho da edificação sejam tomadas pelo projetista, a rotina desse profissional tem mostrado negligência para com o desempenho térmico e energético. Como uma das causas, pode-se apontar a falta de entendimento do impacto das decisões sobre os fenômenos físicos que ocorrem entre o clima, a edificação e o seu usuário. Isso implica, muitas vezes, no uso de sistemas ativos de

condicionamento de ar e iluminação para resolver problemas relativos ao conforto térmico e lumínico, sem considerar as conseqüências dessa decisão, como: perda do bem-estar físico e mental, em baixa produtividade, ou até mesmo comprometimento da saúde.

O uso indiscriminado desses sistemas também tem proporcionado uma grande liberdade ao projetista, sem que fosse considerada a adequação climática da edificação. Essa transformação no modo de projetar propiciou o surgimento de novas tipologias arquitetônicas, principalmente nos setores comercial e residencial. Em alguns casos, edificações se tornam completamente dependentes destes.

Segundo Szokolay (1980), a arquitetura tem como sua principal função abrigar o ser humano, atendendo quesitos relacionados à segurança, ao conforto (bem-estar) e a estética. Afirmar ainda que os dois primeiros atributos pertencem a uma classe no qual os critérios para julgamento do produto arquitetônico e do método de projeto usado repousam sobre uma base científica. Contudo, os critérios para julgar uma edificação sob os aspectos formais e estéticos recaem sobre o plano da subjetividade, da incerteza.

Lima (1995, p. 4) corrobora essa idéia afirmando que

[...] muito da literatura arquitetônica parece estar mais preocupada com as impressões visuais do que com seu propósito. Geralmente, a aparência de uma edificação é colocada a frente de sua utilidade e desempenho energético, e a estética fornece 'boas desculpas' para limitações do projeto. Quando tal ênfase é válida, é discutível, para algumas pessoas que sentem a edificação em si mais importante do que sua imagem.

Contudo, é verdade que no processo de projeto coexistem inúmeras variáveis interdependentes nas quais o arquiteto tem que lidar para atender a uma demanda específica de cada cliente ou ocupante da edificação. Segundo Voordt, Vrieling e Wegen (1997, p. 67)

[...] as edificações são o produto final de um longo e complexo processo de tomada de decisões. Em todos os casos está envolvida uma translação de pontos de objetivos socioculturais em formas arquitetônicas espaciais, com concessões limitadas pelo tempo, dinheiro e legislação. As

edificações podem assim ser interpretadas como o reflexo em pedras de ideais, objetivos e considerações sobre como dar suporte às atividades desejadas e ao sentimento de bem-estar de seus usuários e compromissos.

Tal complexidade e exigências não justificam a simplificação do processo de projeto que por vezes acaba gerando uma arquitetura que, segundo Lima (1995, p. 3), se configura como “uma ‘arte da forma’ e seus objetos (edificações) são tomados quase absolutamente como um fenômeno visual”. A origem desse problema, seja na educação do arquiteto ou na própria história da arquitetura, não pertence a esta pesquisa. Entretanto, a avaliação das decisões de projeto e validação das soluções adotadas pode encontrar auxílio dentro de uma metodologia de análise do desempenho térmico e energético na fase de projeto.

Em virtude do processo de projeto requerer que a tomada de decisões seja suportada por informações de diferentes especialidades e de forma adequada ao processo, é preciso estabelecer normas de projeto e recomendações voltadas ao desempenho térmico e energético de edificações e critérios para avaliação do desempenho condizentes com a realidade local e com as exigências ambientais dos usuários. O desenvolvimento de ferramentas de simulação constituídas a partir de pesquisas também poderia contribuir para trazer essa compreensão.

Estratégias recomendadas para o clima quente e úmido

O clima quente e úmido é caracterizado por temperaturas médias acima dos 20°C, altas taxas de umidade relativa, em torno de 70-90% e baixa amplitude térmica diurna, em torno de 5K (SZOKOLAY, 2004). Os locais de clima quente e úmido são encontrados na região tropical, situados geograficamente entre a linha de câncer e de capricórnio, quase sempre próximos à linha do equador.

Segundo Szokolay (2004), este é o clima mais difícil de projetar. As altas taxas de umidade impedem a evaporação do suor da pele minimizando seus efeitos de resfriamento do corpo. Regiões próximas à Linha do Equador também acabam por sofrer o acúmulo de grande quantidade de calor pela cobertura em virtude da passagem do sol próximo ao zênite (SZOKOLAY, 2004). Problemas relacionados às chuvas intensas concentradas em pequenos períodos do ano e, mesmo, a entrada de insetos nas edificações são outras questões que interferem no conforto de seus usuários.

A prática da arquitetura nos trópicos – arquitetura tropical – tem sido sempre acompanhada por diferentes trabalhos que procuram trazer recomendações de projeto a fim de incrementar o bem-estar físico e mental de ocupantes de edificações situadas nessa região. As exigências de conforto para esse clima são diversas. Bay (2001) afirma que três aspectos devem ser considerados na identificação de uma arquitetura tropical:

- O conforto climático e as conveniências quanto às exigências sócio-culturais: reflete os aspectos relacionados ao estilo de vida das pessoas, ao uso dos espaços, à segurança e ao significado simbólico das formas arquitetônicas tradicionais;
- A escolha de materiais e meios de construção: considera a aplicação de materiais e meios de construção suscetíveis à rigidez dos fenômenos decorrentes das condições climáticas, como tempestades, enchentes, elementos biológicos (fungos), vegetação, intensa radiação solar.
- Expressão regional: resultado dos outros dois e se refere às considerações climáticas de conforto, às exigências sócio-culturais e a escolha de materiais e meios de construção;

O controle ambiental é o mecanismo que busca atender as exigências citadas no sentido de uma arquitetura tropical. Esse representa o “o controle requerido por vários

fatores pela imediata necessidade de conveniência e conforto psicológico dos ocupantes da edificação, gerado ou relacionado às condições climáticas” (BAY, 2001, p. 17).

Esse controle é medido através da adequação climática do projeto que acontece pela incorporação de recomendações de projeto ou pelo uso de simulação computacional. No clima quente e úmido, o controle ambiental recai, de acordo com Bay (2001), sobre o percurso do sol e a radiação solar; iluminação natural e ofuscamento; a temperatura e suas alterações; precipitação (chuva); umidade; ventilação; ruído e poluição do ar.

Com base nesses aspectos, recomendações de projeto podem ser elaboradas a fim de efetivar esse controle. De acordo com Szokolay (2004), em edificações climatizadas passivamente, o melhor projeto que se pode obter é aquele em que a temperatura interna não fique maior do que a temperatura externa, o que pode ser conseguido através ventilação natural como estratégia de resfriamento para remover o excesso de calor.

Contudo, deve ser evitado também o ganho excessivo de calor. Para isso, Koenigsberger et al. (1974) sugerem que:

- as aberturas devem estar preferencialmente nas fachadas Norte e Sul;
- o uso de elementos de sombreamento deve ser feito tanto para os planos opacos quanto transparentes, no entanto, nas aberturas esse sombreamento deve ter uma maior abrangência no sentido de proteger não apenas da radiação direta mais também da radiação difusa, intensa nessa região;
- a orientação da edificação deve possibilitar a exposição das fachadas menores para Leste e Oeste, diminuindo assim a área exposta á radiação solar. Essa recomendação pode entrar em conflito com a orientação para os ventos e deve ser alvo de um estudo detalhado para se saber qual a preferencial;
- as cobertas devem ter áticos ventilados, isolamento térmico e superfícies reflexivas.

Segundo Szokolay (2004), além da redução dos ganhos de calor, a única estratégia passiva possível é o efeito psicofisiológico de resfriamento provocado pelo movimento do ar. Em decorrência das pequenas diferenças de temperatura durante o dia, o princípio de massa térmica de resfriamento não se torna eficiente nesse tipo de clima, sendo aconselhável a construção de edificações com matérias de baixa capacidade térmica, usando-se materiais “leves”.

Seja pelo potencial de uso da ventilação natural em quase todo território nacional ou por falta de legislação específica, a ventilação assistida por sistemas mecânicos não é difundida em residências no Brasil. Alguns sistemas ainda são encontrados para aplicação em edificações comerciais. O relatório *Energy efficient ventilation in dwellings – a guide for specifiers* (ENERGY SAVING TRUST, 2006) descreve vários sistemas de ventilação mecânica para residências.

Segundo Szokolay (2004), seja qual for o tipo de ventilação, seus principais objetivos são:

- suprir ar fresco, removendo odores e contaminantes, como o CO₂;
- promover transferência de calor através de movimentos convectivos, com ganhos ou perdas internas de calor dependendo do sentido do fluxo de calor;
- proporcionar o resfriamento fisiológico dos ocupantes através do aumento da dissipação do suor da pele.

Em todos os tipos de ventilação está sempre presente uma parcela não controlável, chamada de infiltração. Esta corresponde ao ar que penetra no ambiente por frestas, fendas e fissuras em sistemas de vedação (paredes e coberta), de tubulações e aberturas, quando fechadas, não sendo controlada pelo usuário da edificação. Em edificações condicionadas

artificialmente, a infiltração pode ser a maior responsável pelas perdas e ganhos de calor, influenciando assim o consumo de energia. A infiltração de ar é função da permeabilidade da edificação e da diferença de pressão em torno da envoltória em virtude da diferença de temperatura do ar interno e externo e das forças provocadas pelo vento (CHAN; PRICE; GADGIL, 2004).

O uso da ventilação natural como estratégia de resfriamento passivo em projetos de casas está condicionada principalmente pelo clima local e pelas características do entorno. Em zonas urbanas, o projeto de casas com ventilação natural adequada é comprometido pela influência do entorno sobre os padrões de vento e de velocidade interna do ar. A poluição do ar e distúrbios provocados por ruídos são alguns dos fatores que também desencorajam o uso da ventilação natural em residências. Em zonas suburbanas, há um maior potencial de aproveitamento dos ventos dominantes em virtude do menor adensamento e desobstrução (TANTASAVASDI; SREBRIC; CHEN, 2001).

Ainda segundo Tantasavasdi, Srebric e Chen (2001), o projeto de aberturas com dimensões apropriadas para o aproveitamento da ventilação natural ainda traz como obstáculos a entrada de insetos, a perda de privacidade e o aumento potencial de riscos relacionados à segurança, problemas comuns em países em desenvolvimento de clima quente e úmido. Em climas tropicais, o uso de grandes aberturas ainda pode ter como desvantagem a maior exposição dos ambientes à penetração da radiação solar e incidência de chuvas nos ambientes internos.

Outro ponto que compromete a ventilação natural em casas – e está além do controle do arquiteto – é o não entendimento por parte dos ocupantes dos conceitos relacionados à ventilação, evidenciado pela pós-construção de paredes que dividem os espaços internos, obstruindo a passagem dos ventos, e operação inadequada das aberturas da edificação. Tantasavasdi, Srebric e Chen (2001) afirmam, além disso, que estratégias de resfriamento

passivo são comumente ignoradas no projeto de casas novas, entretanto, sendo possíveis de serem aplicadas caso sejam fornecidos conhecimentos fundamentais e recomendações aos usuários no sentido de tornar essas estratégias eficazes. Em virtude do crescimento da conscientização para aspectos relacionados à sustentabilidade, como a redução da emissão de CO₂ e a conservação de energia nas edificações, projetistas têm sido levados a repensar o uso da ventilação natural e de estratégias para otimizá-la.

Panorama brasileiro do consumo de energia em edificações

De acordo com Balanço Energético Nacional - BEN 2003 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2003), a estrutura de oferta de energia elétrica no Brasil caracteriza-se por uma maior participação do setor hidrelétrico, com 72,9% da oferta total de energia (Figura 2). A alta participação do setor hidrelétrico faz com que o Brasil tenha uma baixa taxa de emissão de CO₂, oriundos principalmente da utilização de combustíveis fósseis, comparado à média mundial.

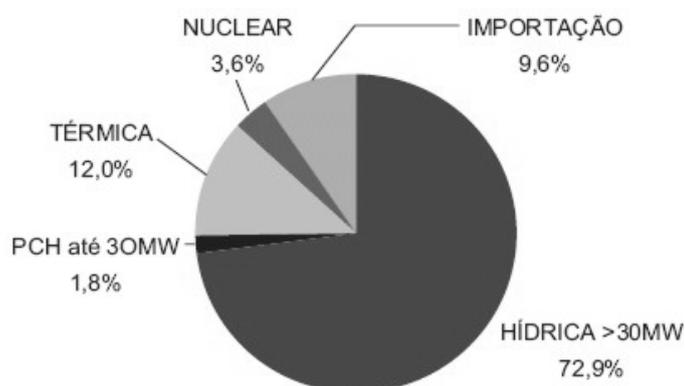


Figura 2. Estrutura da oferta de energia elétrica no Brasil por fonte em 2002

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2003).

O Brasil ainda destaca-se por sua irrisória participação na emissão de CO₂ oriunda do consumo de energia em residências comparado as taxas médias de países desenvolvidos.

Dados do Energy Saving Trust (2006) apontam que na Grã-Bretanha o consumo de energia em casas representa cerca 27% da emissão de CO₂, enquanto que nos Estados Unidos essa taxa chega a 20% (ENERGY STAR, 2006).

A parcela de energia gerada em termelétricas brasileiras (12%) ainda representa uma pequena parcela em relação à produção total de energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2003). Contudo, as diretrizes políticas do setor elétrico brasileiro estão voltadas a um aumento na geração de energia através de termelétricas com conseqüente aumento na emissão de gás CO₂ à atmosfera, agravando assim o aquecimento global.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2003 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2003), o setor elétrico brasileiro tende a aumentar sua Oferta Interna de Energia (OIE) assemelhando-se a matriz energética mundial onde há uma maior participação do gás natural e uma redução do setor hidrelétrico. Por outro lado, há uma tendência no aumento de incentivos à participação das fontes renováveis de energia.

O consumo final de eletricidade no Brasil chegou a 321,6 TWh, em 2002, e foi 2.9 vezes superior ao de 1970 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2003). Estes dados constataam o processo de crescimento de demanda de energia que o país passou nos últimos trinta anos, demonstrando a necessidade de medidas que promovam o uso eficiente desta.

A manutenção desse perfil de crescimento do consumo de energia no Brasil já tem como resultado programas de racionamento de energia elétrica e a tendência de elevação tarifária desta. Outro problema reside na demanda pela ampliação da rede de produção e distribuição de energia, com a construção de novas hidrelétricas, termelétricas ou usinas nucleares implicando em maiores gastos para o governo, em detrimento de outros investimentos, além de uma série de impactos ambientais.

O prognóstico que se configura remete à eficiência energética das edificações que cada vez mais é alvo de programas federais do governo brasileiro que visam minimizar o

desperdício e reduzir o consumo de energia nestas. Tais programas também contribuem para a redução na emissão de gases de efeito estufa à atmosfera, diminuindo os impactos ambientais provocados por estes como a poluição atmosférica e o aquecimento global. Além do que, evitaria os períodos de racionamento vividos na última década e não prejudicaria o crescimento econômico do país.

O perfil do consumo elétrico no Brasil divide-se em quatro grandes grupos: industrial, residencial, comercial e outros. Este último representa o setor rural, iluminação pública, órgãos do governo, entre outros. O setor industrial tem a maior taxa de consumo com 44% do consumo total de energia elétrica no país (Figura 3), seguindo-se o residencial com 25%, o comercial com 16% e outros com 15% (PROCEL, 2003).

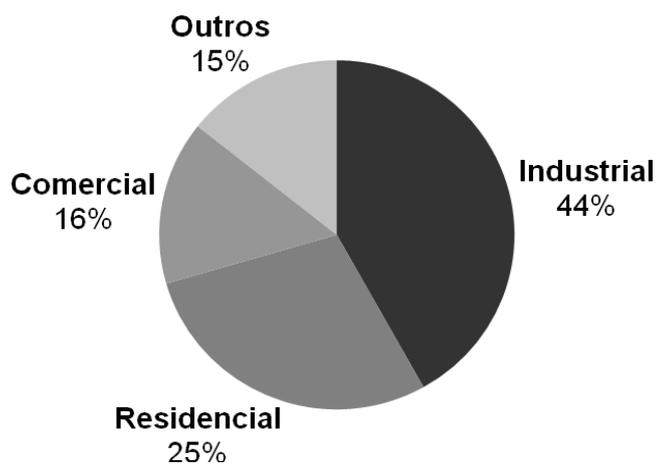


Figura 3. Perfil do consumo de energia elétrica no Brasil em 2003
Fonte: PROCEL (2003).

Apesar de uma tendência crescente no consumo final de energia nos últimos vinte e cinco anos em todos os setores, mesmo nos períodos de crise energética, houve uma regressão no consumo residencial entre os anos de 1999 e 2002 (Figura 4). Esse dado é contrário às expectativas do setor elétrico que esperavam uma elevação no consumo após o programa de racionamento de 2001. Credita-se tal situação aos reajustes salariais abaixo dos índices de inflação, ao aumento das tarifas de energia, às altas taxas de juros e retração

da economia que inibem o poder de compra de bens duráveis dos consumidores, bem como aos hábitos de conservação de energia adquiridos em períodos de racionamento (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2003).

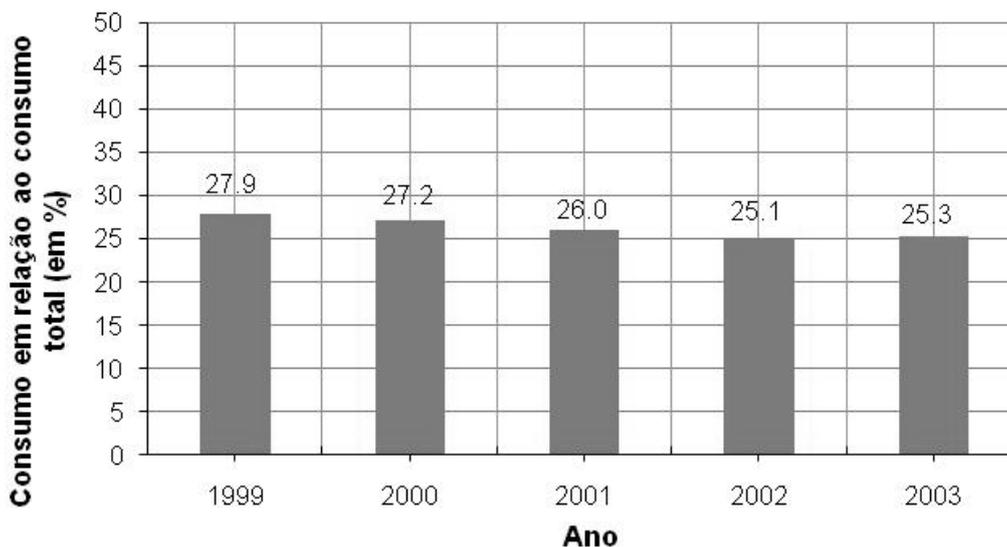


Figura 4. Porcentagem do consumo final de energia do setor residencial em relação ao consumo total entre 1999-2003

Fonte: PROCEL (2003).

Por outro lado, segundo o PROCEL (2003), o consumo de energia em edificações brasileiras representa cerca de 42% do consumo total, decorrentes da soma das taxas dos setores residencial e comercial. Dados de 1994 mostraram que as edificações residenciais, responsáveis por 25% desse consumo, são caracterizadas por um uso final de equipamentos de condicionamento de ar de cerca de 7% do consumo total, considerando uma saturação de apenas 6%.

CONFORTO TÉRMICO

De acordo com a American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (2004a, p. 4), “conforto térmico é uma condição mental que

expressa satisfação com o ambiente térmico”. A avaliação dessa condição é subjetiva e depende tanto de fatores físicos e fisiológicos quanto psicológicos.

Em climas tropicais, as condições ambientais tendem a expor o corpo a uma situação de estresse térmico em que este ganha calor. Para manter o equilíbrio térmico, o corpo se utiliza de mecanismos termoreguladores para dissipar essa energia e compensar esses ganhos. Os mecanismos de ajuste da temperatura interna do corpo podem ocorrer em um pequeno espaço de tempo ou à longo prazo. No primeiro caso, o ajuste é de ordem fisiológica e, em climas quentes, é caracterizado pela vasodilatação que incrementa o fluxo de sangue e a dissipação de calor, e pela transpiração que propicia o resfriamento evaporativo do corpo através da evaporação do suor sobre a pele (SZOKOLAY, 2004).

À longo prazo, de poucos dias até seis meses, pode haver ajustes cardiovasculares e endócrinos, como o aumento do volume de sangue, promovendo a eficiência da vasodilatação e dos mecanismos de sudação, e mesmo a redefinição quanto às preferências térmicas (SZOKOLAY, 2004). Esses mecanismos são associados à aclimação e envolvem ajustes psicológicos e fisiológicos que ocorrem sempre que o corpo é exposto a condições adversas de estresse térmico. O termo aclimação inclui o que pode ser definido como uma situação na qual o corpo se habitua as condições ambientais na qual está exposto. Como resultado, tem-se a diminuição da sensação de desconforto térmico com aumento do desempenho para o trabalho e da sensação de bem-estar (AULICIEMS; SZOKOLAY, 1997).

As trocas de calor do corpo com o entorno são influenciadas por fatores ambientais, pessoais, entre outros. Os fatores ambientais são: a temperatura do ar, radiação, umidade e movimento do ar. A temperatura do ar é a variável ambiental que tem maior influência sobre o conforto térmico, pois determina a dissipação de calor por convecção. De acordo

com Szokolay e Docherty (1999), a temperatura é a variável que melhor consegue reapresentar as condições de conforto para temperatura de bulbo seco de até 27°C.

Entretanto, Araújo (2001) identificou uma maior sensibilidade de pessoas em relação à velocidade do ar, no clima quente e úmido de Natal-RN. O vento é responsável por acelerar as trocas por convecção e promover o resfriamento evaporativo do corpo (SZOKOLAY, 2004). Dependendo do tipo de atividade exercida em um ambiente, o movimento do ar pode ser prejudicial, levando a restrição das velocidades do ar no ambiente interno em detrimento de sua aplicação para controle das condições de conforto térmico. Velocidades acima de 5 m/s são quase sempre consideradas desconfortáveis para qualquer tipo de atividade exercida (CHEN, 2004).

A umidade do ar tem um papel de menor influência sobre o conforto térmico. De acordo com Szokolay (2004), a umidade relativa entre 30% e 65% umidade não tem efeito sobre o conforto térmico, porém altas umidades podem dificultar o efeito de resfriamento evaporativo provocado pelo movimento do ar e baixas umidades podem gerar problemas de outra ordem como ressecamento de mucosas e da pele, gerando desconforto físico. Segundo Givoni (1992), em níveis baixos e médios, a umidade não afeta o conforto térmico de pessoas sedentárias usando roupas com baixa resistência térmica.

Os efeitos da radiação sobre as trocas de calor do corpo podem ser expressos em termos de temperatura radiante média (TRM), medida através do termômetro de globo. A influência da TRM sobre o corpo depende da vestimenta e é influenciada pela velocidade do ar. Para uma velocidade do ar igual a zero, a TRM pode ser considerada igual à temperatura de globo (SZOKOLAY, 2004).

Os principais fatores pessoais que influenciam o conforto térmico são: a atividade ou taxa metabólica e a vestimenta. A primeira representa a quantidade de calor produzida por uma pessoa adulta por unidade de área da superfície da pele, sendo expressa em met. Para

uma pessoa em estado sedentário (sentada e tranqüila) o valor de 1 met é equivalente a 58W/m². Para esse cálculo é admitida a área de superfície de pele para uma homem adulto com cerca de 1.8m², portanto, ajustes de ordem sistemática podem ocorrer em virtude de diferença geográficas e étnicas (ASHRAE, 2001b).

A produção de calor do corpo acontece através do metabolismo basal e muscular. Embora, seja adotado 100W como valor médio de calor produzido por uma pessoa, este varia de pessoa para pessoa, com o tipo de atividade exercida e com as condições nas quais está sendo exercida. A ISO 8996 – *Ergonomics: determination of metabolic production* fornece seis métodos para o cálculo da taxa metabólica com diferentes níveis de precisão. O mais adotado é a utilização de dados tabelados onde são apresentados os valores para taxa metabólica de acordo com a atividade exercida (HAVENITH; HOLMER; PARSONS, 2002). Os outros, de maior precisão, necessitam de medições fisiológicas com pessoas e se baseiam principalmente em relacionar a taxa metabólica com a taxa de oxigênio inspirado por dióxido de carbono produzido ou de batimentos do coração (ASHRAE, 2001b).

A vestimenta é caracterizada como um isolamento térmico do corpo, sendo sua resistência térmica expressa na unidade clo. A resistência térmica de 1 clo é igual a 0.155 m².K/W (ABNT, 2005a). O isolamento térmico da vestimenta afeta principalmente às trocas de calor por convecção e evaporação. A estimativa da resistência da vestimenta poder ser feita através de medições em manequins, onde é medida a quantidade de calor que passa através da vestimenta ou por consulta em tabelas conforme o seu tipo, ou mesmo, fazendo uma associação cumulativa dos valores das diferentes peças de roupa.

A vestimenta é um importante mecanismo de ajuste da temperatura do corpo quando não há restrições a alteração das peças em favor da adaptação ao ambiente térmico (SZOKOLAY, 2004). Em função dos métodos adotados para estimar a resistência térmica de vestimentas, esta pode apresentar uma incerteza de até 25% para mais ou para menos,

sendo ainda influenciada por fatores como o isolamento de cadeiras e o ato de caminhar (ASHRAE. 2001b). Outros fatores, secundários, também podem afetar o conforto térmico, como: o estado de saúde, idade, gênero, dieta alimentar, ingestão de bebidas, a forma do corpo, a taxa de gordura corporal e a aclimatação (SZOKOLAY, 2004).

Índices de conforto térmico

Há cerca de cem anos pesquisadores desenvolvem índices de conforto térmico que tentam estabelecer as condições ambientais nas quais a maioria das pessoas estaria em estado de conforto térmico. Alguns desses índices apresentam representações gráficas que correlacionam parâmetros ambientais demarcando zonas de conforto térmico em cartas bioclimáticas ou em gráficos psicrométricos.

Essas zonas definem uma faixa de condições climáticas na qual a maioria das pessoas não sentiria desconforto térmico (GIVONI, 1992). Victor Olgyay (1963) foi o primeiro a propor uma zona de conforto quando apresentou sua carta bioclimática onde correlaciona a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa, a velocidade do ar e a radiação térmica (Figura 5).

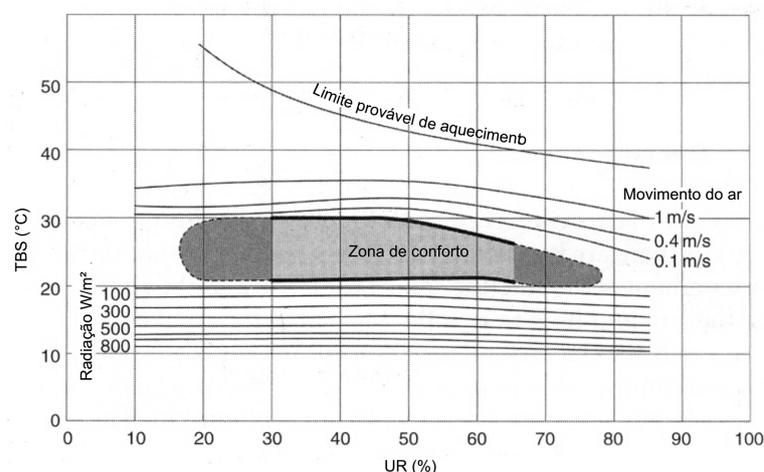


Figura 5. Carta bioclimática de Olgyay, modificada para climas quentes.

Fonte: Adaptado de Szokolay (2004).

A partir de pesquisas realizadas em Israel, EUA e Europa, considerando as expectativas de temperatura interna em edificações sem ar-condicionado, Givoni (1992) empregou a carta psicrométrica a fim de ilustrar as zonas de conforto para países desenvolvidos e países quentes em desenvolvimento. A sua proposta inclui zonas de estratégias bioclimáticas para expandir os limites da zona de conforto térmico, como: ventilação, massa térmica, resfriamento evaporativo e aquecimento solar passivo, calculadas para atender o conforto em uma residência hipotética.

Os limites adotados na zona de conforto para países desenvolvidos, com ar parado e pessoas em atividade sedentária, são de 18 a 25°C no inverno e 20 a 27°C no verão para temperatura de bulbo seco (TBS). Quanto à umidade absoluta, os limites são fixados entre 4g/kg e 12g/kg para umidade relativa em torno de 50% e aumenta até 15 g/kg para umidade relativa em torno de 80%. Givoni (1992) propôs que para países quentes em desenvolvimento o limite superior da zona de conforto possa ser estendido em 2°C na TBS e em 2g/kg de umidade absoluta (Figura 6).

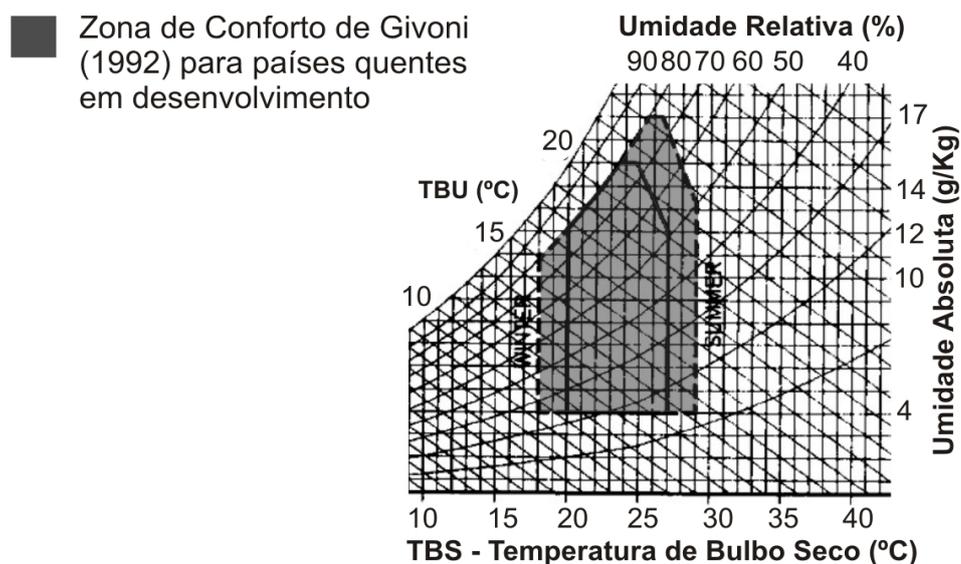


Figura 6. Zona de conforto de Givoni para países quentes em desenvolvimento.

Fonte: Adaptado de Givoni (1992).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento desses índices foi baseado em duas vertentes: no modelo de balanço térmico e na abordagem adaptativa. Os índices baseados no modelo de balanço térmico foram desenvolvidos através de pesquisas laboratoriais em ambientes fechados, climaticamente estáveis, procurando explicar a sensação térmica das pessoas com o uso de modelos térmicos do corpo humano que representam empiricamente as trocas de calor entre o corpo e o entorno.

O índice PMV/PPD de Fanger, apresentado em 1972, é o mais difundido entre aqueles baseados no modelo de balanço térmico. Este representa uma equação que correlaciona a sensação térmica com quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade) e duas variáveis pessoais (vestimenta e atividade metabólica). A estimativa de conforto térmico é feita através dos parâmetros Voto Médio Estimado (PMV) e Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD) (FANGER; TOFTUM, 2002).

Segundo Fanger e Toftum (2002), a grande vantagem desse índice é a flexibilidade e a abrangência das principais variáveis que influenciam a sensação térmica, além de apresentar bons resultados quando aplicado em edificações climatizadas artificialmente tanto em clima quente quanto frio. Embora este índice continue sendo o mais utilizado entre pesquisadores e projetistas, e adotado em normas de conforto térmico como a norma internacional ISO 7730-1994² e a norma norte-americana ASHRAE Standard 55-2004 seu uso tem sido questionado cada vez mais.

A norma ASHRAE Standard 55-2004 (2004) especifica condições ambientais para espaços internos e fatores pessoais que produzam uma aceitabilidade de 80% ou mais de seus ocupantes quanto às condições térmicas desse ambiente, considerando suas atividades e vestimentas. As exigências de conforto térmico são definidas a partir dos principais

² ISO 7730-1994 – Moderate Thermal Environments. Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort.

fatores que o influenciam. Apesar de reconhecer a existência de outros fatores, são consideradas a taxa metabólica, a resistência da vestimenta, a temperatura do ar, a temperatura radiante, a velocidade do ar e a umidade do ar. Embora estes variem com o tempo, a norma orienta-se ao conforto térmico em condições ambientais uniformes.

Essas condições ambientais foram levantadas a partir de pesquisas em laboratório onde a análise estatística dos dados coletados permitiu determinar a porcentagem de pessoas em atividade leve, ou seja, em estado sedentário, típico de escritório, que estariam em estado de conforto térmico. Nessa condição é definida uma faixa de atividade metabólica entre 1.0 met e 1.3 met e um isolamento térmico da vestimenta entre 0.5 e 1.0 clo (ASHRAE, 2004b).

Portanto, a norma apresenta uma limitação na abrangência de uso, devendo ser aplicada apenas nesses casos. Em relação às residências, uma primeira limitação seria a inaplicabilidade a uma pessoa dormindo ou em repouso absoluto.

A norma estabelece um limite máximo para taxa de umidade de 12 g/kg que corresponde a 1.910 kPa de vapor de pressão ou uma temperatura de saturação de 16.8°C (ASHRAE, 2004b). Não foi fixado um limite inferior de umidade, uma vez que a norma não é direcionada aos aspectos ambientais não térmicos como qualidade do ar ou outros fatores como ressecamento de mucosas, irritação da pele e dos olhos e geração de eletricidade estática que, mesmo assim, podem afetar o conforto térmico e a saúde.

A velocidade do ar é abordada como um fator que pode provocar um aumento no limite superior de temperatura da zona de conforto através do resfriamento fisiológico. De acordo com a norma, a elevação da velocidade do ar para compensar um aumento na temperatura do ar e na temperatura radiante média não deve ser maior do que 3°C acima do valor limite da zona de conforto. A velocidade do ar foi limitada em 0.8 m/s em virtude dos efeitos provocados pelos ventos em velocidades superiores.

A ASHRAE Standard 55-2004 não especifica que as edificações tenham sistema de condicionamento de ar artificial, porém as condições de conforto exigidas requerem o uso de tais equipamentos, mesmo em climas amenos. Situação que implica em custos energéticos para manutenção das condições ambientais exigidas, além dos prejuízos ambientais associados a esse tipo de uso final de energia (DEAR; BRAGER, 2002).

No entanto, as exigências de conforto térmico para edificações naturalmente ventiladas diferem das condicionadas artificialmente. Em sua última versão de 2004, ASHRAE Standard 55 incorporou um modelo adaptativo de conforto térmico (ACS – Adaptive Comfort Standard) como alternativa para ambientes naturalmente ventilados. A norma estabelece condições limites para uso dessa abordagem dentro de uma faixa de temperatura interna do ar entre 10-33 °C.

A norma internacional ISO 7730-1994³ estima as condições de conforto térmico em ambientes internos. A sua aplicação tem sido extremamente contestável em virtude de sua abrangência (uma norma internacional não pode considerar as especificidades culturais e ambientais de cada país) e pelo uso do modelo PMV/PPD de Fanger (DEAR; BRAGER, 2002).

Inclinados a aprimorar o índice PMV/PPD, Fanger e Toftum (2002) desenvolveram um fator de correção para seu modelo, passando a denominá-lo de modelo reformulado do PMV. Seus autores argumentam que as diferenças encontradas entre a sensação térmica em uma situação real e a estimada pelo índice ocorrem em função das expectativas de seus ocupantes. Normalmente estes têm vivido em ambientes internos e externos quentes através de gerações e, por isso, estariam mais adaptados a ambientes com temperaturas mais elevadas.

³ ISO 7730-1994 – Moderate Thermal Environments. Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Condition for Thermal Comfort.

Fanger e Toftum (2002) ainda explicam as imprecisões do índice PMV através de dois aspectos principais: o fator de expectativa (e) e a taxa de metabolismo (m). O primeiro é indicado para compensar a capacidade de adaptação desenvolvida pelas pessoas que passam a julgar menos desconfortáveis ambientes com temperaturas mais elevadas. O valor do fator de expectativa pode variar de 0,5 a 1,0 e deve ser multiplicado pelo PMV. O fator de expectativa será de 0,5 para climas quentes durante todo o ano, sem ou com poucas edificações condicionadas artificialmente na região; de 0,7 se existirem muitas edificações climatizadas artificialmente e 1,0 para edificações com ar condicionado. Quanto mais baixa a expectativa maior é a aceitação em ambientes mais quentes.

Com relação à taxa de metabolismo, acredita-se que os indivíduos em climas quentes tendem a realizar suas atividades em menor intensidade como forma de adequar-se às condições ambientais, diminuindo, assim, a produção de calor. Fanger e Toftum (2002) apontam que o modelo atual é bem flexível, podendo estimar a temperatura de neutralidade entre 10-35°C, dependendo das outras cinco variáveis, e que o modelo apresenta bons resultados mesmo sob as pequenas variações comuns em ambientes internos.

A abordagem dos modelos adaptativos é fundamentada em pesquisas realizadas em campo com pessoas em situação real de ocupação no ambiente construído e relaciona a sensação térmica com a temperatura externa média mensal. Esses modelos foram idealizados a partir do reconhecimento de fatores de adaptação, resultado da tendência natural que as pessoas têm de se adaptar às alterações ambientais.

Os fatores de adaptação referem-se às possibilidades de adaptação que uma pessoa tem em resposta aos estímulos provocados pelo estresse térmico na qual está exposta. Nicol e Humphreys (2002, p. 564) definem o princípio da adaptação: “se uma mudança ocorre de tal forma a produzir desconforto, as pessoas reagem de forma a restaurar seu conforto”. A Figura 7 ilustra a flexibilidade dos modelos adaptativos em contraposição aos

modelos atuais existentes que se colocam de forma estável no sentido de estabelecer os limites da zona de conforto térmico. Quanto maiores as oportunidades de adaptação ou de controlar o ambiente, menor será a exposição do usuário da edificação ao estresse térmico.

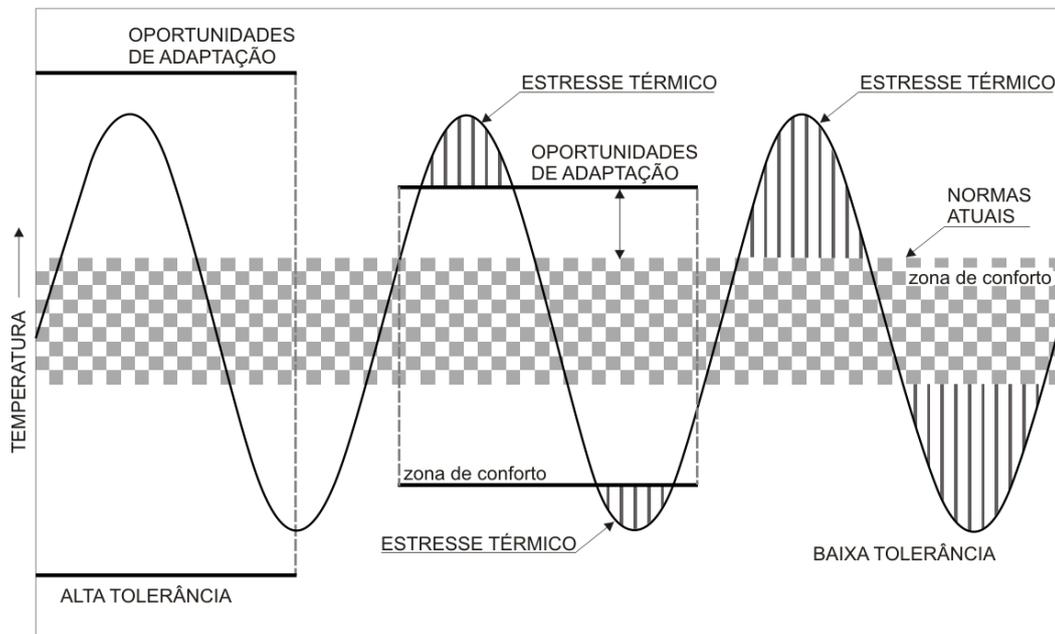


Figura 7. Efeitos das oportunidades de adaptação: quanto maior a oportunidade de controlar o ambiente – ou as exigências dos ocupantes – menor a probabilidade de estresse térmico (áreas listradas).

Fonte: Adaptado de Nicol e Humphreys (2005).

Segundo Dear e Brager (1998), as discrepâncias entre o observado e o estimado por índices baseados em modelos de balanço térmico em edificações naturalmente ventiladas são decorrentes da inobservância dos fatores de adaptação. Nicol (2004) observa que o balanço térmico em ambientes condicionados passivamente é mais complexo, pois seus ocupantes podem interagir com a edificação ou com o ambiente através de diferentes oportunidades de adaptação, como abrir uma janela, fechar uma cortina, trocar as roupas, mudar a atividade, a postura, ligar um ventilador, entre outros.

Essa interação permitiria alcançar a temperatura de conforto térmico e, por isso, deveria ser considerada no índice PMV de Fanger ou em qualquer outro índice de conforto

térmico. Nicol e Humphreys (2002, p. 564) corroboram essa idéia ao afirmarem que “a temperatura de conforto é resultado da interação entre as pessoas e a edificação e o ambiente na qual ela está ocupando”. E concluem afirmando que “quanto maiores as possibilidades de adaptação ao ambiente e o ambiente às suas necessidades, menos provável será sentir desconforto” (NICOL; HUMPHREYS, 2002, p. 564).

Dear e Brager (1998) resumem a adaptação térmica a três categorias: ajustes comportamentais, fisiológicos e psicológicos. No Quadro 1, são apresentadas as principais estratégias de adaptação em resposta ao estímulo térmico (AULICIEMS; SZOKOLAY, 1997).

Quadro 1. Estratégias de adaptação humana em resposta ao estímulo térmico.

i.	Ajustes fisiológicos, variando da menor alteração vasomotora a maiores respostas de sudção e metabolismo
ii.	Aclimatação, tanto pelos mecanismos fisiológicos quanto psicológicos no período de exposição ao estímulo térmico
iii.	Ganho de energia através de alimentos e alterações na dieta
iv.	Alterações metabólicas através do rearranjo das atividades, seleção e encurtamento de atividades específicas e de sua continuidade
v.	Migração, tanto temporária quanto permanente de uma condição particular de estresse
vi.	Interposição tanto da vestimenta quanto da envoltória da edificação entre a fonte de estresse e o organismo
vii.	Geração externa de energia para aquecimento ou resfriamento do espaço

Fonte: Auliciems e Szokolay (1997).

Segundo Darmawan (1999), a estratégia que mais prevalece como resposta ao estímulo térmico, por conveniência, é a alteração da vestimenta. Em estudo realizado em locais de trabalho no Paquistão, Nicol e Humphreys (2002) constataram que os métodos mais adotados pelas pessoas estudadas no controle do conforto térmico eram a troca da vestimenta e o movimento do ar, através do uso de ventiladores.

Os modelos adaptativos de conforto térmico são representados por equações lineares que descrevem a temperatura interna de projeto ou uma variação aceitável para as condições climáticas de um determinado lugar, podendo ainda considerar o sistema de

condicionamento artificial da edificação (MUI; CHAN, 2003). Em termos conceituais, os modelos adaptativos procuram estimar uma temperatura onde o menor estresse térmico é relatado pelos usuários ao experimentarem diferentes temperaturas do ar, por um período de aproximadamente um mês, vestindo roupas de suas escolhas e realizando atividades sedentárias (AULICIEMS; SZOKOLAY, 1997).

Partindo dessa abordagem, diversos modelos adaptativos foram desenvolvidos através de estudos realizados em uma vasta quantidade de países, tanto em edificações naturalmente ventiladas quanto condicionadas artificialmente. As equações formuladas por seus autores associam a temperatura de conforto diretamente com a temperatura externa média mensal. Isso se deve à grande correlação encontrada entre a temperatura de conforto e a temperatura externa média e a variação da temperatura do ar na qual as pessoas estão em conforto com a temperatura externa média (NICOL, 2004).

A escolha da temperatura média mensal como referência também é justificado por critérios de simplicidade. Dear e Brager (2002) afirmam que ainda é um problema encontrar uma forma de melhor caracterizar o clima externo e que a escolha por dados diários poderia ser mais representativa para estimar a temperatura de conforto através dos modelos adaptativos. Contudo, a facilidade de obtenção dos dados de temperatura média externa em estações climáticas ou meteorológicas e o costume de engenheiros e pesquisadores com esses dados tornam seu emprego mais prático, principalmente quando considerado o uso por profissionais de projeto. No entanto, há uma redução na precisão quando se tenta simplificar os modelos e sua aplicação por um maior número de pessoas (DEAR; BRAGER, 2002).

Atualmente, diversos modelos baseados na abordagem adaptativa têm sido desenvolvidos e publicados a partir de estudos realizados tanto em países de clima temperado quanto países tropicais. Para cada modelo são sugeridas faixas de temperatura

que devem ser adicionadas ou subtraídas aos valores mensais encontrados para a temperatura de conforto de acordo as oportunidades de adaptação (vestimenta, metabolismo, ventilação, entre outros) ou de acordo com a porcentagem de aceitabilidade dos usuários às condições de estresse térmico. Em seguida, trataremos dos principais modelos encontrados na literatura científica.

Modelo adaptativo de Auliciems

Em 1981, Auliciems apresentou o modelo psicofisiológico da percepção térmica que representa a base dos modelos adaptativos (SZOKOLAY, 2004). Esse modelo é resultado de correlações de dados obtidos em edificações climatizadas e naturalmente ventiladas. Considera tanto as respostas fisiológicas para parâmetros internos, medidos através de instrumentos, quanto a expectativa dos ocupantes, baseadas em determinantes climáticos e culturais.

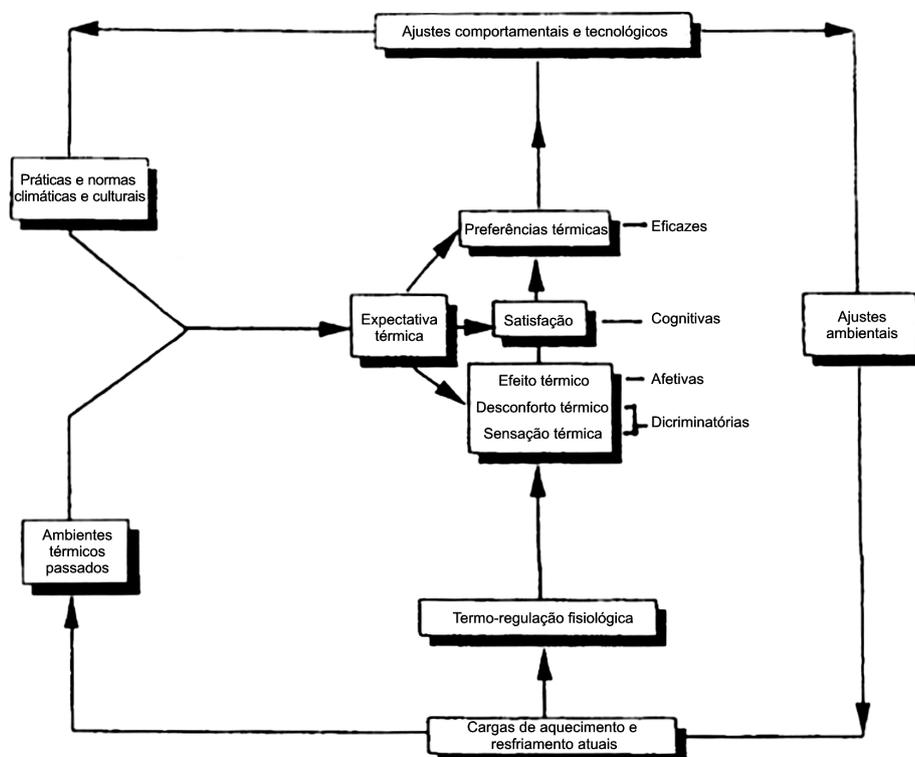


Figura 8. Fluxograma do modelo psicofisiológico da percepção térmica.

Fonte: Adaptado de Szokolay (2004).

Neste modelo, apresentado na Figura 8, a preferência térmica é resultado das respostas fisiológicas às condições ambientais do entorno e da expectativa, baseada em aspectos culturais como experiências passadas (AULICIEMS; SZOKOLAY, 1997). O modelo representado na Eq. 1 expressa a temperatura de conforto como temperatura de neutralidade (T_n), variando em função da temperatura média mensal externa (T_{em}) (AULICIEMS; SZOKOLAY, 1997).

$$T_n = 0.31T_{em} + 17.6$$

Eq. 1

A faixa de conforto térmico, em virtude do movimento do ar, é definida na Eq. 2, em que dT é a temperatura em °C que deve ser somada a temperatura de neutralidade para definir a zona de conforto. De acordo com Szokolay e Docherty (1999), a equação deve ser usada para velocidades do ar de até 1.5 m/s, sendo esse limite definido pelos efeitos perturbadores que o movimento do ar pode trazer em velocidades superiores.

$$dT = 6(v-0.2) - (v-0.2)^2$$

Eq. 2

Modelos adaptativos de Humphreys e Nicol

Estudos realizados por Humphreys têm gerado diversos modelos adaptativos que correlacionam a temperatura de conforto (T_c) com a temperatura média mensal externa (T_{em}), ambos em °C. A partir de dados de pesquisas de campo em diversos países, Humphreys (1978; apud NICOL, 2004)⁴ apresentou um modelo para edificações naturalmente ventiladas (Eq. 3) caracterizado por uma estreita relação linear entre a temperatura de conforto (T_c) e a temperatura média mensal externa (T_{em}) (Figura 9). A

⁴ HUMPRHEYS, M. A.. Outdoor temperatures and comfort indoors. **Building Research and Practice (J CIB)**. v. 6 (2), p. 92-105, 1978.

pesquisa também resultou em modelos para edificações climatizadas artificialmente (Eq. 4) e com sistema híbrido de condicionamento (Eq. 5) (DEAR; BRAGER, 1998b).

$$T_c = 0.534T_{em} + 11.9$$

Eq. 3

$$T_c = 23.9 + 0.925(T_{em} - 22) \exp(-((T_{em} - 22) / (24\sqrt{2}))^2)$$

Eq. 4

$$T_c = 0.48T_i + 0.14T_{em} + 9.22$$

Eq. 5

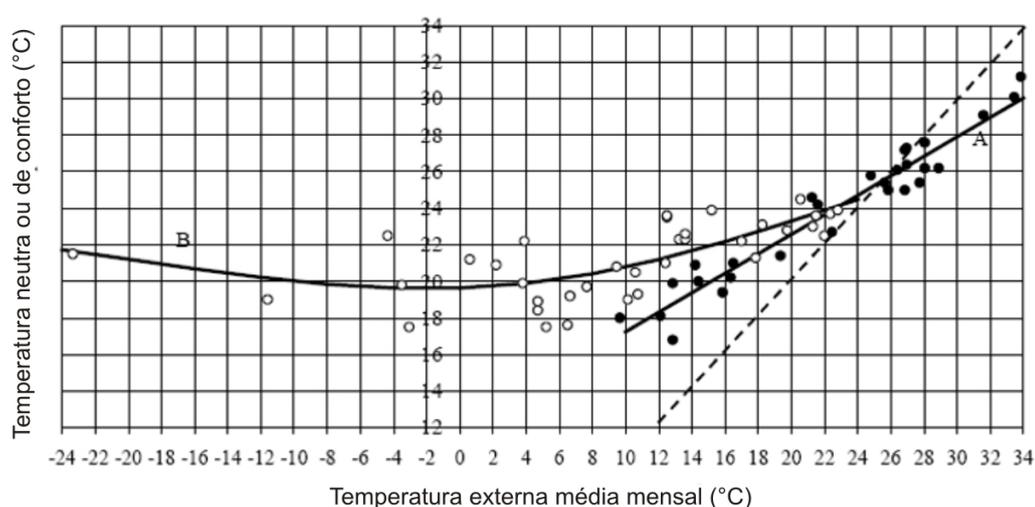


Figura 9. Relação entre a temperatura de conforto e a média mensal da temperatura externa. Os pontos pretos representam as pesquisas realizadas em edificações naturalmente ventiladas e os pontos brancos, as edificações aquecidas ou resfriadas artificialmente.

Fonte: Nicol e Humphreys (2002).

Embora haja referência ao modelo de Humphreys de 1978 no artigo *Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings* (NICOL, 2004), o modelo de Humphreys para edificações naturalmente ventiladas apresentado não corresponde ao da Eq. 1. Portanto, houve um equívoco por parte do autor ao apresentar o modelo da Eq. 6 desenvolvido por Nicol e Humphreys (1995; apud BRAGER; DEAR, 1998b)⁵ a partir de pesquisas na Grã-Bretanha em ambientes de escritório.

⁵ NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. An adaptive guideline for UK office temperatures. In: NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A.; SYKES, O.; ROAF, S. (Ed.). **Standards for thermal comfort: indoor temperatures for the 21st**. London: E & FN Spon, 1995.

Nesta pesquisa, a correlação encontrada entre a temperatura de conforto e a temperatura média mensal externa pode ser expressa através na Eq. 6. A equação apresentada associa a temperatura de conforto a um índice da temperatura externa média (T_{emi}) que é definido pela combinação da temperatura externa e um peso exponencial dado a temperatura externa média das semanas precedentes.

$$T_c = 0.534T_{emi} + 12.9$$

Eq. 6

Estudos realizados por Nicol e Humphreys (2002) utilizando dados de pesquisas divulgados em 1998 pela ASHRAE foram traduzidos no modelo de conforto adaptativo da Eq. 7. A nova correlação encontrada é praticamente a mesma da resultante do projeto ASHRAE RP-884. Atualmente, esse modelo tem sido usado na avaliação de residências na Europa e Ásia como critério de conforto térmico. Outros modelos têm sido desenvolvidos por Humphreys e Nicol, através de projetos relacionados ao conforto térmico de usuários de edificações comerciais naturalmente ventiladas (NICOL; HUMPHREYS, 2005).

$$T_c = 0.54T_{em} + 13.5$$

Eq. 7

Nicol e Humphreys (2002) recomendam que a faixa de conforto deva variar de ± 2 °C da temperatura de conforto quando não for possível utilizar-se de mecanismos de adaptação como troca de vestimenta, alteração do metabolismo ou fazer uso do movimento do ar. De acordo com Nicol (2004), a zona de conforto ótima em que a temperatura é amplamente aceitável pode variar entre 2 e 3 °C.

Em climas tropicais, onde o uso de movimento do ar pode ser uma importante aliada ao controle das condições de conforto térmico, Nicol (2004) sugere a adoção da Eq. 8, que resulta na temperatura que deve ser somada a temperatura de conforto, para estabelecer a

faixa de conforto de acordo com velocidades de ar superiores a 0.1 m/s. A Figura 10 apresenta graficamente a variação da temperatura do ar que deve ser somada a temperatura de conforto para velocidade entre 0.1 e 1 m/s, de acordo com a Eq. 8.

$$dT = 7 - (50 / (4 + 10v^{0.5}))$$

Eq. 8

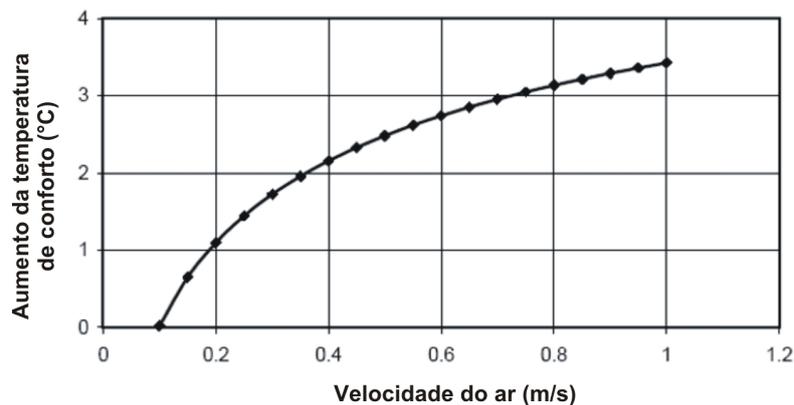


Figura 10. Aumento da temperatura de conforto para diferentes velocidades do ar.

Fonte: Nicol (2004).

Modelo adaptativo de Dear e Brager para ASHRAE Standard 55-2004

Em sua última revisão, a norma norte-americana de conforto térmico ASHRAE Standard 55-2004 incorporou a abordagem adaptativa como critério de avaliação do desempenho térmico de edificações a partir das pesquisas realizadas pelo Projeto ASHRAE RP-884. Este é representado pela Eq. 9 (DEAR; BRAGER, 2002).

$$T_c = 0.31T_{em} + 17.8$$

Eq. 9

Os limites de conforto para edificações naturalmente ventiladas são definidos por $T_c \pm 2,5^\circ\text{C}$ para 90% de pessoas satisfeitas e $T_c \pm 3,5^\circ\text{C}$, para 80%. Denominada de Adaptive

Comfort Standard (ACS), o modelo é aplicável a temperaturas entre 10-33 °C (Figura 11) e em espaços definidos pelas seguintes condições (DEAR; BRAGER, 2002):

- condicionados naturalmente, onde as condições térmicas são controladas principalmente pela abertura e fechamento de janelas;
- podem ter aquecimento artificial, mas não se aplica quando este estiver em funcionamento;
- não podem ter sistemas mecânicos de resfriamento;
- podem ter sistemas de ventilação mecânica, porém sem condicionamento de ar;
- os ocupantes devem estar em atividade sedentária (1-1.4 met) e estarem livres para adaptar a vestimenta e as condições térmicas entre o interior e o exterior.

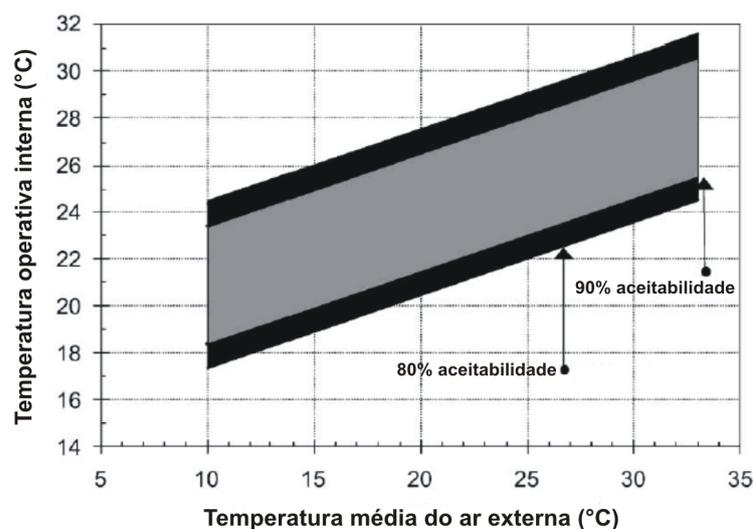


Figura 11. Norma de conforto adaptativo proposta pela ASHRAE Standard 55-2004 para edificações naturalmente ventiladas.

Fonte: Dear e Brager (2002).

Modelo adaptativo de Nicol e Roaf

Nicol e Roaf (1996) desenvolveram um modelo adaptativo através de pesquisas em campo durante o inverno e verão em ambientes de escritório em cinco zonas climáticas no

Paquistão. O estudo sugere que a temperatura de conforto para o Paquistão pode ser expressa, semelhantemente aos outros modelos, através da Eq. 10.

$$T_c = 0.38T_{em} + 17.0$$

Eq. 10

Escolha de um critério de conforto térmico para o clima de Natal-RN

A escolha de um critério de conforto térmico relaciona-se ao tipo de índice e sua aplicação a determinado tipo de clima e uso da edificação. Essa escolha se restringe atualmente a opção pelos índices baseados em modelos de balanço térmico e aos modelos adaptativos supracitados.

O modelo PMV de Fanger é o que possui maior restrição quanto a sua aplicação em edificações naturalmente ventiladas em climas tropicais. Hoje, existe o consenso entre pesquisadores de que as condições de conforto térmico estimadas por normas como a ISO 7730 e ASHRAE Standard 55-2004⁶, que de forma total ou parcial se baseiam no modelo de Fanger, não se aplicam adequadamente para regiões de clima tropical.

De acordo com Nicol (2004), arquitetos e engenheiros acabam se defrontando com limitações de normas internacionais, como a ISO 7730, que superestima a resposta dos ocupantes na escala da ASHRAE em altas temperaturas e a subestima em baixas temperaturas. Assim, tem-se como resultado a estimativa de desconforto de pessoas que em estudos no campo estariam em conforto, negligenciando faixas de temperaturas em que as pessoas poderiam estar em conforto (NICOL, 2004).

⁶ A ASHRAE Standard 55-2004, em sua última versão, já apresenta uma alternativa ao modelo PMV/PPD de Fanger através do modelo adaptativo denominado Adaptive Comfort Standard (ACS).

Segundo Williamson, Coldicutt e Riordan (1995; apud AULICIEMS; SZOKOLAY, 1997)⁷, o índice de Fanger superestima a sensação de conforto para o calor, principalmente em climas quentes. As imprecisões na determinação dos valores da taxa metabólica e da resistência da vestimenta, em função do clima e de aspectos culturais, bem como na subjetividade envolvida nos outros fatores pessoais também conferem maior fragilidade aos índices de avaliação de conforto térmico que se utilizam desses parâmetros.

Outra crítica que incide sobre esse modelo é a discutível limitação da temperatura de conforto em 30°C e da velocidade interna do ar em 1m/s, condições ambientais comuns em edificações naturalmente ventiladas em países de clima tropical (NICOL, 2004). Por exemplo, a Figura 12 ilustra uma condição de temperatura do ar igual à temperatura radiante média de cerca de 30°C, umidade relativa de 70%, velocidade do ar de 1m/s, taxa metabólica de 1 met e resistência térmica da vestimenta de 0.3 clo, o índice PMV alcança seu limite de 0.5, com cerca de 10% de pessoas insatisfeitas (COMFORTCALC, 2006).

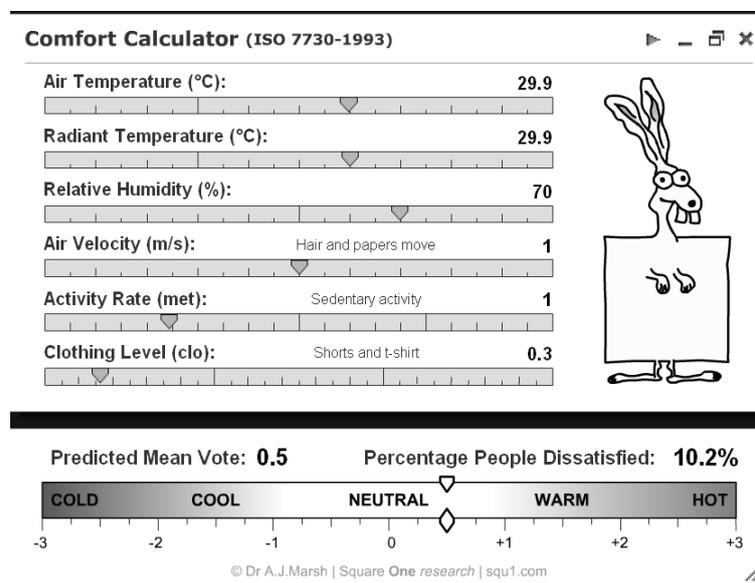


Figura 12. Índice PMV/PPD mostrando a taxa aceitável de cerca de 10% de pessoas insatisfeitas com valores máximos das seis variáveis de conforto térmico.

Fonte: ComfortCalc (2006).

⁷ WILLIAMSON, T. J.; COLDICUTT, S.; RIORDAN, P. Comfort, preferences or design data. In: NICOL, J. F; HUMPHREYS, M. A; SYKES, O.; ROAF, S. (Ed.). **Standards for thermal comfort: indoor air temperature standards for the 21st century**. London: E. & F. N. Spon / Chapman & Hall, 1995. Comfort, preferences or design data, p.50-58.

Qualquer pequena variação para mais na temperatura radiante, comum em casos de ocupação diurna em edificações naturalmente ventiladas, ou na umidade relativa, comum em locais de clima quente e úmido, ou mesmo na atividade metabólica, extrapola os limites aceitáveis de conforto térmico para esse índice. Segundo Dear e Brager (1998, p. 3), isso acontece porque “o índice PMV estima com precisão a temperatura de conforto para a maioria das edificações condicionadas artificialmente, porém falha significativamente em edificações naturalmente ventiladas”.

Parte do problema está na necessidade desse modelo, baseado em dados de pesquisas realizadas nos anos sessenta, incorporar os vários estudos sobre o tema que vêm sendo desenvolvidos desde então (NICOL, 2002). Apesar dos ajustes feitos no modelo PMV, este ainda não se encontra disseminado em pesquisas científicas associadas ao desempenho térmico de residências.

A zona de conforto de Givoni (1992) foi vastamente difundida e utilizada para estabelecer critérios de conforto térmico e diretrizes para projetos bioclimáticos, principalmente em países quentes em desenvolvimento como o Brasil. Atualmente, é adotada na norma de desempenho térmico de edificações da ABNT (2005c).

Apesar da zona de conforto de Givoni sugerir condições de conforto térmico para edificações naturalmente ventiladas em climas tropicais e permitir ajustes da faixa de conforto em função de diferentes estratégias de projeto, sua limitação encontra-se na invariabilidade das condições de conforto aceitáveis ao longo do ano. Givoni (1992) afirma que a aclimação e a expectativa quanto ao conforto devem ser abordadas no desenvolvimento de diagramas de conforto e de recomendações de projeto quando aplicados a climas quentes de países em desenvolvimento.

No entanto, a demarcação da zona de Givoni, baseada na temperatura interna e estimada através de cálculos de modelos em regime estático, não reconhece as

oportunidades de adaptação dos ocupantes e fatores contextuais como o próprio clima, condições estas que regem os modelos adaptativos. Um modelo que representa o equilíbrio térmico como o balanço de calor em um dado ponto no tempo não irá representar completamente o conforto térmico em uma situação real, principalmente em edificações naturalmente ventiladas em climas tropicais (NICOL, 2004).

Conforme Nicol e Humphreys (2002), a opção por limites de conforto variáveis não promove o desconforto, mas sim interfere significativamente na redução do consumo de energia. Se a temperatura interna de edificações naturalmente ventiladas tende a acompanhar as variações da temperatura externa, então uma temperatura de conforto constante vai contra o uso de ventilação natural.

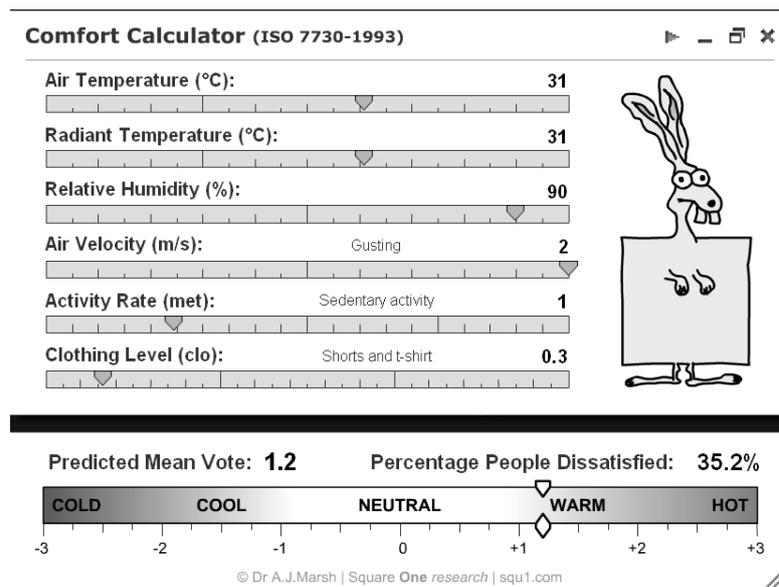


Figura 13. Índice PMV/PPD aplicado com valores limites de desconforto ao calor propostos na zona de conforto de Givoni.

Fonte: ComfortCalc (2006).

Uma análise comparativa das condições ambientais confortáveis termicamente propostas por Givoni para países quentes em desenvolvimento com o índice PMV/PPD mostra novamente a extrapolação dos limites de conforto para este índice, com cerca de 35% de pessoas insatisfeitas (Figura 13). Nesse caso, seria necessário uma redução na

umidade relativa para cerca de 40% ou da temperatura do ar e radiante média para cerca de 30°C para que os limites de desconforto ao calor da zona de conforto de Givoni atendam às exigências de conforto estabelecidas pelo índice PMV/PPD de Fanger.

Nesse sentido, a escolha por um índice baseado na abordagem adaptativa se ajustaria melhor às condições climáticas encontradas em residências naturalmente ventiladas. Uma das vantagens em relação ao modelo PMV é a sua simplicidade, pois enquanto neste modelo devem ser estimados os valores médios dos níveis de clo e met, nos modelos adaptativos a relação entre estas variáveis e o clima já está incorporada (DEAR; BRAGER, 2002).

As principais críticas aos modelos adaptativos recaem sobre a qualidade dos dados coletados e a desconsideração das quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante, umidade e velocidade do ar) e das duas variáveis pessoais (vestimenta e metabolismo) (FANGER; TOFTUM, 2002).

Contudo, Nicol e Humphreys (2002) destacam que a temperatura de conforto é função mais do que da temperatura externa e que outras variáveis, como a umidade e o movimento do ar poderiam ser incorporadas. E ainda avaliam que as reações de adaptação provocadas pelo clima, como troca de peças da vestimenta, interação com sistemas de controle do ambiente da edificação e mudança da atividade metabólica, que dependem da temperatura externa, fazem com que apenas esta seja considerada em situações reais de ocupação.

O impacto dessas ações é evidenciado pelos estudos em campo que demonstram as diferenças observadas em relação ao conforto térmico estimado pelo modelo PMV/PPD e o observado em pesquisas em campo, em situações reais de ocupação, que justificam as correlações entre a temperatura de conforto e a temperatura externa média (Figura 14).

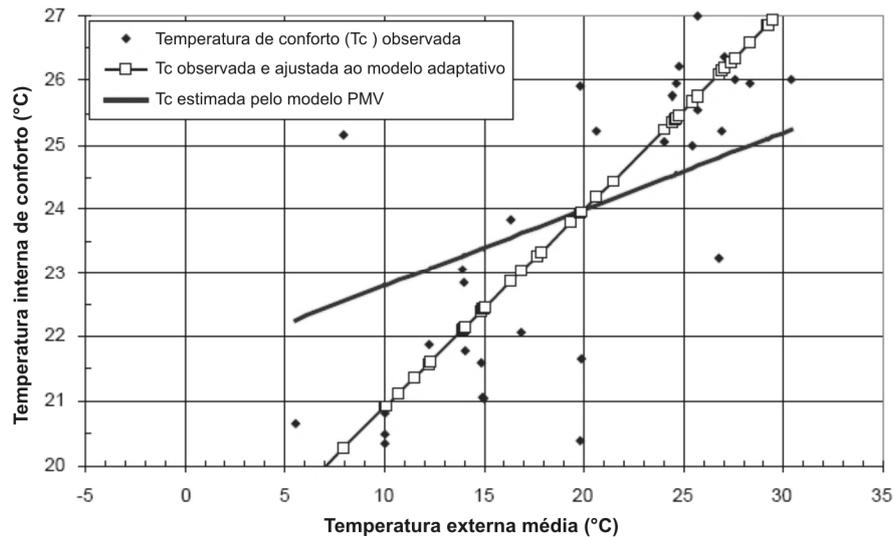


Figura 14. Temperatura de conforto em edificações naturalmente ventiladas como estimado pelo modelo PMV e medida em estudos em campo.

Fonte: Nicol (2004).

Segundo Nicol e Humphreys (2002), como a adaptação ocorre ou pela mudança das condições para se obter conforto ou pela alteração da temperatura de conforto para atender as condições existentes; a faixa de condições considerada confortável depende tanto das características da edificação quanto das oportunidades de adaptação individual do ocupante. Portanto, a aplicação dos modelos adaptativos se adequaria melhor às condições de residências naturalmente ventiladas em climas tropicais em virtude das maiores oportunidades de adaptação que esse tipo de uso pode oferecer, permitindo ao ocupante de utilizar-se, em qualquer período de ocupação, das estratégias de adaptação, como:

- diminuição da resistência da roupa com a troca de peças de vestimenta;
- uso do movimento do ar através da operação de aberturas (janelas, portas, entre outros) e uso de ventiladores de teto e de mesa;
- alteração da atividade metabólica, através da mudança na atividade desenvolvida, de sua intensidade ou pela ingestão de alimentos e/ou bebidas;

Escolha de um modelo adaptativo

Uma comparação entre os modelos adaptativos apresentados anteriormente, aplicados ao clima de Natal-RN através do arquivo climático TRY (Test Reference Year), mostra uma diferença de até 2.2°C da temperatura de conforto entre modelos em alguns meses (Figura 15). As diferenças se justificam pelas variações de situações encontradas nas pesquisas de cada modelo em particular. Não é objetivo dessa pesquisa investigar o impacto da escolha de um ou de outro modelo, porém foi necessário a escolha de um destes como critério para avaliação do desempenho térmico nas simulações.

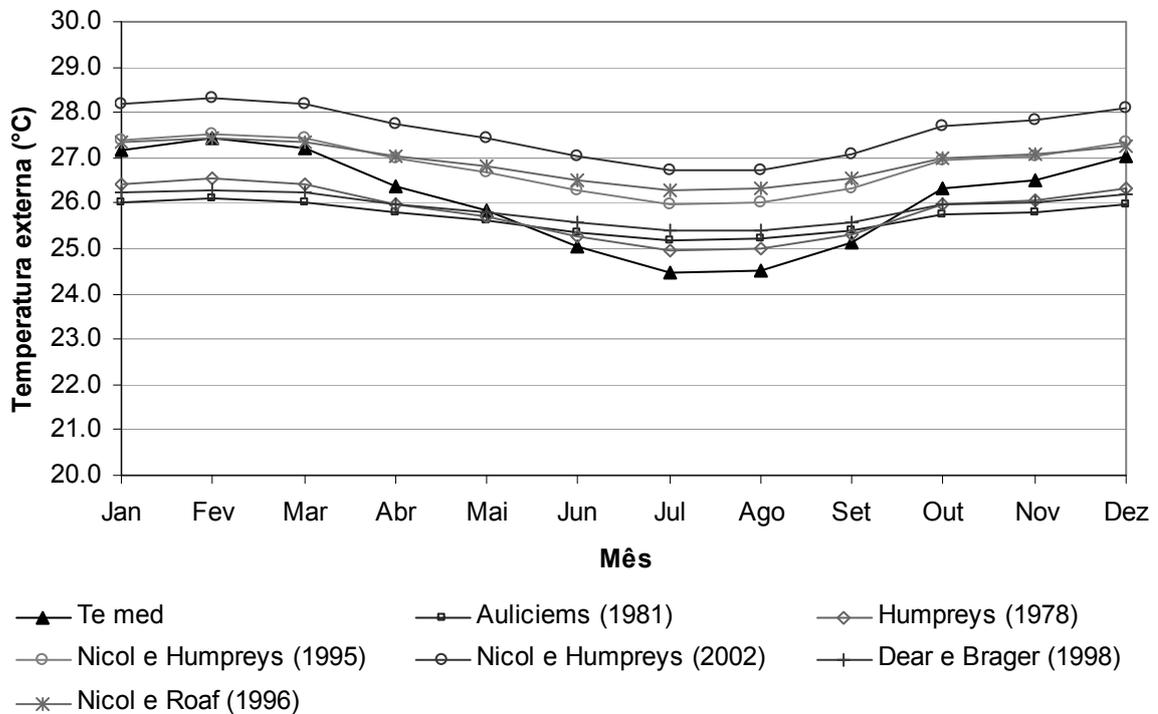


Figura 15. Variação da temperatura de conforto para diferentes modelos adaptativos, aplicados ao clima de Natal-RN.

Assim, foram usados dois critérios para a escolha de um modelo adaptativo de conforto térmico. O primeiro tem como referência o próprio clima e parte da seguinte premissa: se a temperatura de conforto tende a acompanhar as oscilações da temperatura externa, então um modelo que melhor representar essas oscilações será mais adequado aos

propósitos da pesquisa. Nesse caso, o modelo de Humphreys, de 1995, e o modelo de Nicol e Roaf, de 1996, seriam os mais apropriados.

O segundo baseia-se em um estudo de conforto térmico realizado por Araújo (2001). Neste foi determinado uma zona de conforto térmico para o clima de Natal-RN com limites de temperatura de bulbo seco entre 25,1°C e 28,1°C e de 69% e 92% para umidade relativa (Figura 16). Esta zona considera a velocidade do ar, que não foi controlada devido às limitações experimentais, dentro de uma variação entre 0,12 e 0,83m/s.

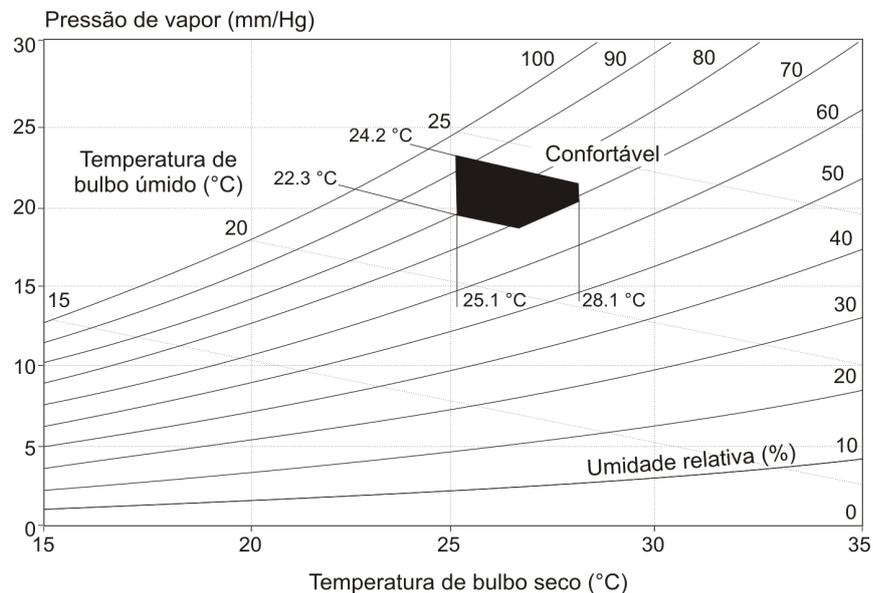


Figura 16. Diagrama psicrométrico com os parâmetros de conforto térmico determinados para o clima de Natal-RN.

Fonte: Araújo (2001).

Os resultados da pesquisa sugerem o uso do índice de conforto térmico de Koenigsberger et al. (1974) para o clima de Natal-RN, dependendo da proposta de análise, pois é o que mais se aproxima das condições encontradas (ARAÚJO, 2001). Embora o estudo tenha sido conduzido com alunos em escolas, realizando atividade sedentária e em salas de aula naturalmente ventiladas, os resultados encontrados para condições de temperatura do ar obtidos com o modelo de Humphreys, de 1978, estão praticamente

dentro da faixa de conforto de Araújo (2001), como mostrado na Figura 17. Assim, esse modelo seria o que melhor se adequaria à avaliação de edificações naturalmente ventiladas em Natal-RN.

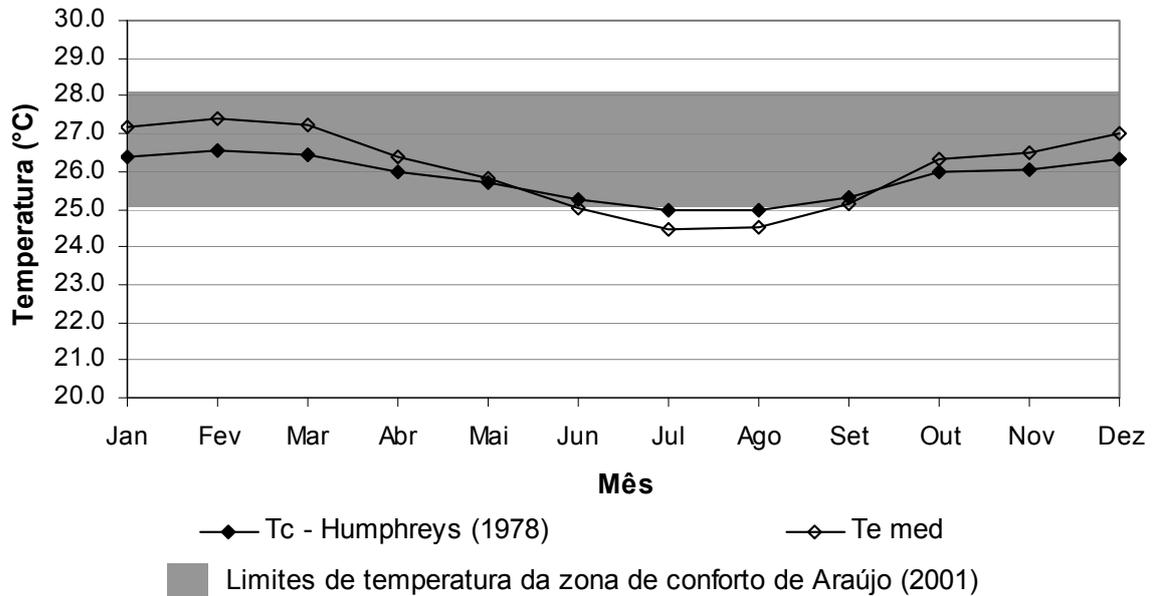


Figura 17. Modelo adaptativo de Humphreys (1978) para o clima de Natal-RN (arquivo climático TRY de 1954) e os limites de temperatura definidos pela zona de conforto de Araújo (2001).

Para o modelo adaptativo de conforto de Humphreys, Nicol (2004) sugere uma amplitude entre 2-3°C para estabelecer a zona de conforto. Com isso, ficou definida uma faixa de $\pm 2.5^\circ\text{C}$ da temperatura de conforto para delimitar a zona de conforto de Natal-RN, de acordo com o modelo (Figura 18), que considera apenas os ajustes de vestimenta e na atividade metabólica como mecanismos de adaptação ao ambiente.

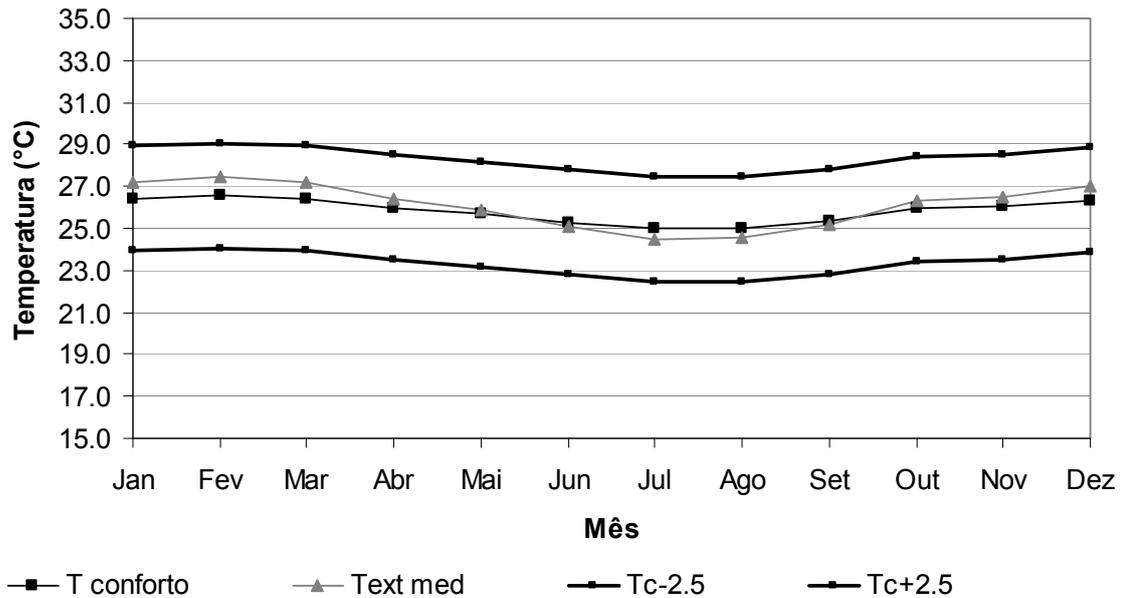


Figura 18. Zona de conforto para Natal-RN do modelo adaptativo de Humphreys (1978), com limites inferior e superior de 2.5°C da temperatura de conforto.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

A avaliação do desempenho térmico de edificações prescinde da definição de um ou mais critérios de desempenho. A escolha desses critérios no projeto e operação de edificações é importante não só no sentido de tornar a edificação confortável termicamente para seus ocupantes como implica na forma como a energia será utilizada, com influência sobre a sustentabilidade (NICOL; HUMPHREYS, 2002).

Um dos maiores obstáculos para avaliar o desempenho térmico é a definição de critérios baseados na predição de conforto térmico em edificações situadas nos trópicos com condições naturais de condicionamento (sem uso de ar condicionado). Em virtude dos poucos critérios específicos existentes, pesquisas e ferramentas de simulação buscam geralmente adotar o consumo de energia da edificação e a temperatura interna do ar como critérios do desempenho térmico e energético.

Consumo de energia

O critério de consumo de energia é baseado no cálculo do consumo de energia da edificação, o qual pode ser muito influenciado pelas cargas térmicas de resfriamento ou de aquecimento. Frequentemente, o consumo de energia é normalizado pela área da edificação, para permitir a comparação do desempenho entre edificações de tamanhos diferentes.

As vantagens desse critério estão principalmente no reduzido número de variáveis a serem manipuladas: consumo de energia mensal ou carga térmica de resfriamento mensal, por exemplo. Embora a análise do consumo de energia em edificações esteja diretamente relacionada ao seu desempenho térmico, sua aplicação é limitada quando são analisadas edificações naturalmente ventiladas onde o consumo de energia é atribuído em sua maior parte aos eletrodomésticos.

Temperatura interna do ar

O uso da temperatura interna do ar como critério está voltado para avaliação do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas. Sua aplicação apóia-se em diferentes técnicas de análise dos dados de temperatura, destacando-se:

- Contagem das horas totais de desconforto (HD): expressa o número total de horas com temperatura interna fora de zona de conforto;
- Porcentagem de horas totais de desconforto (PD): expressa a frequência percentual de horas totais com temperatura interna fora de zona de conforto;
- Graus-hora de desconforto (GH): representa a contagem em graus das diferenças entre a temperatura interna e a temperatura de conforto, em todas as horas do ano;
- Distribuição de temperatura (DT): através de uma análise estatística, expressa a frequência de ocorrência de temperaturas no ano, de forma absoluta ou relativa.

Na simulação do comportamento térmico de edificações, o uso de dados climáticos horários e de uma destas técnicas implica no manejo de uma grande quantidade de dados resultantes das simulações. Isto resulta em uma desvantagem que caracteriza cada uma dessas técnicas como meio de análise dos dados para identificação de um ambiente ou edificação com maior ou menor desempenho.

A contagem de horas totais de desconforto (HD) ou seu correspondente em termos percentuais (PD) têm como desvantagem não identificar a intensidade de desconforto térmico de um ambiente. Dois ambientes com o mesmo número de horas totais ou de percentuais de horas de desconforto podem ter desempenhos diferentes, considerando suas diferenças quanto à faixa ou abrangência de temperatura acima do limite da temperatura de conforto, para o caso de desconforto ao calor, por exemplo.

A contagem de graus-horas de desconforto (GH) é geralmente usada para estimar a energia requerida para resfriamento ou aquecimento através de sistemas de condicionamento de ar artificial. Seu cálculo é definido pela soma hora a hora durante o ano das diferenças entre a temperatura interna e a temperatura limite de conforto ($T_i - T_{lc}$). Este consegue trazer informações acerca da intensidade ou nível de desconforto, porém essa intensidade pode ser ofuscada pela distribuição dos diferentes níveis de temperatura do ar ao longo do ano, sendo possível que dois ambientes com iguais graus-horas de desconforto, porém com uma distribuição sazonal de desconforto diferente em parte do ano.

Para locais de clima quente úmido, onde as variações de temperatura são pequenas, isto pode não ser um problema. Outra questão, porém de caráter subjetivo, encontra-se na própria dificuldade de interpretação da quantificação de graus-hora de desconforto.

De forma gráfica, a distribuição de temperatura (DT) é a técnica que permite maior rapidez na leitura dos dados com a informação da intensidade de desconforto e dos

extremos de temperatura no ambiente. No entanto, tal técnica dificulta a quantificação desse desconforto sendo, às vezes, necessário o uso de uma das demais técnicas para realizar essa tarefa.

NORMAS E SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

As normas buscam restringir práticas inadequadas de projeto que resultem na construção e operação de edificações com baixo desempenho térmico e energético. De regra, normas de eficiência energética e desempenho térmico de projeto de novas residências baseiam-se no método prescritivo para estabelecer exigências mínimas quanto às propriedades termofísicas dos componentes da envoltória e eficiência energética de sistemas de condicionamento de ar e aquecimento de água.

Os Estados Unidos, Austrália e alguns países da Comunidade Européia possuem as mais exigentes normas de eficiência energética e desempenho térmico de edificações. Apesar do grau de desenvolvimento dessas normas nestes países, em pesquisa realizada em 57 países de diversos continentes, foi constatado que até 1994 em 13 países, incluindo o Brasil, não havia normas de eficiência energética para edificações (1994). Essa situação permanece até hoje, sendo ainda incipiente estudos para estabelecer critérios e prescrições de projeto para normas do desempenho térmico e energético de edificações.

Nos Estados Unidos, a ASHRAE Standard 90.2-2004⁸ é uma das mais referenciadas, trazendo inclusive o zoneamento climático para distintas localidades internacionais, estabelecendo as exigências mínimas de eficiência energética para o projeto de novas edificações e reformas de residências de até três pavimentos. Sua aplicação abrange a

⁸ ASHRAE Standard 90.2-2004 – Energy Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings.

envoltória da edificação, sistemas e equipamentos de condicionamento de ar, aquecimento de água e ainda fornece opções alternativas de projeto voltadas à eficiência energética. Essa também determina diferentes métodos de aplicação como o prescritivo, de desempenho e ainda outro baseado no custo anual de energia (ASHRAE, 2004a).

Em 2005, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR-15220, a primeira norma relacionada ao desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares. Esta é dividida em cinco partes que abordam basicamente os métodos para o cálculo de diversas propriedades termofísicas de elementos e componentes da edificação, o zoneamento bioclimático brasileiro com as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, bem como dois métodos para medição da resistência térmica e condutividade térmica de materiais construtivos. Assim como outras normas internacionais e norte-americanas, a parte 3 da NBR-15220 é uma norma prescritiva com diretrizes construtivas para habitações de interesse social e está voltada apenas para os elementos da envoltória da edificação, tratando-a de forma isolada, sem considerar o entorno e sua influência direta sobre a ventilação e o sombreamento desta.

As normas baseadas em métodos de desempenho são quase sempre associadas à programas ou sistemas de classificação de desempenho térmico de edificações. Nesse caso, o projeto arquitetônico é submetido à avaliação em programas computacionais ou ferramentas de simulação de edificações que classificam o desempenho de acordo com uma escala pré-estabelecida e avaliam a conformidade com a norma, pela exigência mínima de classificação. Esses sistemas são primordialmente suportados por políticas governamentais voltadas à redução do consumo de energia em edificações e diminuição dos impactos ambientais locais e globais. Normalmente fazem uso de um banco de dados, planilhas eletrônicas ou aplicativos, para caracterização da edificação e conseqüente obtenção de uma classificação.

A classificação pode ser feita de diferentes maneiras e através de distintos critérios. A forma mais difundida é através da atribuição de um selo ou certificado de desempenho com uma pontuação em estrelas, semelhante aos programas de classificação de desempenho energético de aparelhos elétricos. Para o caso do uso de estrelas, a pontuação varia entre 1 e 5 estrelas, em que 5 estrelas indica o melhor desempenho ou a mínima necessidade de uso de sistemas de condicionamento artificial para manutenção das condições de conforto ambiental.

Existem outras formas de classificação como a atribuição de valores, de letras e/ou utilização de símbolos gráficos, como barras, que indicam a magnitude do desempenho da edificação. Esses sistemas também associam o consumo de energia com a emissão de gases de efeito estufa à atmosfera por pessoa, por exemplo. O tipo e método de classificação dependem do tipo de uso da edificação (residencial, comercial, entre outros).

A Austrália tem uma das mais evoluídas políticas de desenvolvimento de sistemas de classificação de desempenho de edificação. Existem sistemas de âmbito nacional e estadual. Alguns destes são utilizados por estados que ainda não desenvolveram seus próprios sistemas ou são adotados como parte de sistemas nacionais. A Figura 19 exemplifica um selo de classificação de desempenho de residências adotado no sistema de classificação 5 Star do estado de Victoria, Austrália, para uma avaliação de 5 estrelas.



Figura 19. Selo de classificação de desempenho energético de residências 5 Star do estado de Victoria, Austrália.

Fonte: Sustainability Victoria (2005).

Os sistemas de classificação australianos são voltados tanto para edificações existentes quanto novas edificações, na fase de projeto. A maior parte desses sistemas concentra-se em avaliar o consumo energético das edificações residenciais e comerciais e sua influência sobre a emissão de gases de efeito estufa à atmosfera.

Os benefícios do uso de um sistema de classificação são diversos, como manutenção da qualidade ambiental das edificações, redução de custos do proprietário com operação e manutenção dos sistemas de condicionamento artificial, valorização do imóvel, entre outros. Entretanto, apesar desses sistemas e normas eliminarem as “piores práticas”, nem sempre estes conseguem estimular o direcionamento do projeto à obtenção dos melhores resultados de desempenho (AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE, 2005).

Atualmente, novos sistemas têm sido desenvolvidos adotando-se critérios múltiplos de desempenho com uma tendência em incorporar critérios dentro do escopo ambiental e da sustentabilidade. O objetivo é indicar os impactos ambientais das edificações por seus ocupantes, comparadas às outras durante sua operação, e engloba o uso de energia, de gases refrigerantes (gases de efeito estufa e o potencial de depleção da camada de ozônio), de água, correntes de água de chuva e poluição, esgoto, diversidade paisagística, transporte, qualidade interna do ar, satisfação do ocupante (conforto térmico), lixo e materiais tóxicos. Alguns sistemas, como o australiano National Australian Built Environment Rating System (NABERS) classifica o desempenho da edificação construída quanto ao conforto térmico através de técnicas de avaliação pós-ocupação (APO), com a realização de questionários com seus ocupantes.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A simulação do desempenho térmico e energético é realizada através de programas computacionais que reproduzem os fenômenos físicos de uma edificação virtual modelada. Nos últimos quarenta anos, diversas ferramentas de simulação de edificações foram desenvolvidas com intuito de auxiliar arquitetos na fase de projeto. Algumas dão suporte à normas de desempenho, estabelecendo uma classificação às edificações de acordo com seu desempenho.

O uso de *softwares* para simulação de desempenho térmico e energético em edificações ainda não está difundido em decorrência de diversos obstáculos, como o custo elevado, a complexidade de uso, o tempo que as análises exigem e a inadequação ao processo de projeto, principalmente, na sua fase inicial. Nesta são tomadas as decisões que terão maior influência sobre o desempenho energético da edificação.

A simulação de edificações ainda se apresenta como uma abstração da realidade com uma grande variedade de incertezas. Estas também emergem das diversas variáveis envolvidas no processo, desde a fase de modelagem até a obtenção e análise dos dados gerados (Figura 20) (WIT, 1997).

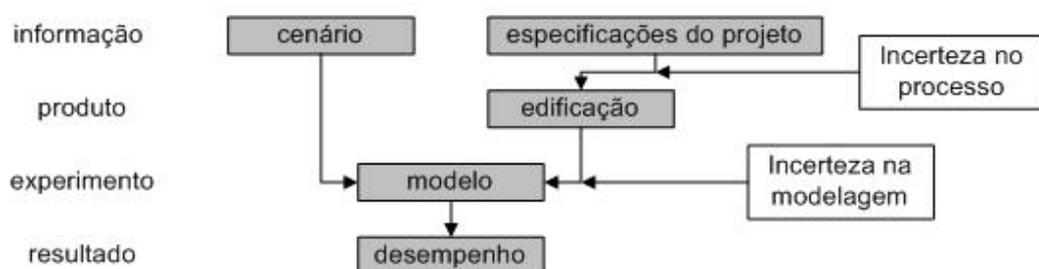


Figura 20. Representação esquemática do processo de simulação de desempenho de uma edificação.

Fonte: Wit (1997).

Mesmo para a análise de apenas um critério, por exemplo, do conforto térmico, as decisões projetuais tomadas por especialistas, a partir de predições determinísticas, apresentam-se como absolutas, sem qualquer incerteza, embora estas possam surgir a partir de muitas fontes (Quadro 2) (WIT, 1997).

Quadro 2. Fontes de incerteza na estimativa de desempenho de edificações.

-
- 1 As edificações não são construídas exatamente como especificadas.
 - 2 No momento em que é preciso uma estimativa do desempenho, o projeto geralmente ainda não está completo. As decisões projetuais futuras ainda não são conhecidas, portanto, existe uma incerteza na estimativa do desempenho.
 - 3 A complexidade dos fenômenos físicos a serem modelados necessita de suposições e simplificações nas quais conferem incerteza ao modelo.
-

Fonte: Wit (1997).

A maioria das ferramentas de simulação é similar na abordagem e geralmente usam um modelo detalhado pelo usuário. Na avaliação do desempenho térmico e energético de residências, a diversidade de parâmetros que influenciam o comportamento térmico dos ambientes e que devem ser considerados na modelagem da edificação pode ser agrupada em três categorias:

1. Variáveis climáticas: relacionadas aos aspectos do clima local (temperatura do ar externa, velocidade dos ventos, radiação solar, entre outros);
2. Variáveis de projeto: relacionadas ao projeto arquitetônico e construção da edificação (geometria, *layout* da planta, propriedades termofísicas dos componentes dos sistemas construtivos, entre outros);
3. Variáveis de uso e ocupação: relacionadas ao comportamento dos usuários e operação da edificação (rotinas, cargas térmicas internas, operação de janelas, uso de equipamentos elétricos, entre outros).

A análise desses fatores pode contribuir para um entendimento da complexidade dos parâmetros associados ao projeto de residências que devem ser considerados no

desenvolvimento de métodos para avaliação de desempenho térmico e energético de residências, de recomendações de projeto e das relações com a decisão de projeto. Outro aspecto é a identificação das limitações e imprecisões associada a cada grupo.

Variáveis climáticas

A simulação computacional utiliza-se de dados climáticos. Segundo Adelard et al. (2000), a evolução de métodos computadorizados para determinação de ambientes humanos artificiais foi o que propiciou o desenvolvimento dos métodos de apresentação de dados climáticos. Nas últimas décadas, diversos métodos foram desenvolvidos a partir de dados coletados em estações meteorológicas e classificados de acordo com o tipo de informação que apresentam e com sua utilidade. Esses métodos geraram diferentes tipos de arquivos climáticos com variações na qualidade dos dados, na resolução e na adequação aos aplicativos de simulação térmica e energética (Quadro 3).

Quadro 3. Classificação de maneiras existentes de prover dados meteorológicos.

Designação	Utilização	Vantagens e inconveniências
- Dados "Bin" - Graus-dia	- Avaliação de consumo de energia com aquecimento e resfriamento	- Volume insuficiente de informações - Fácil de usar
- MY (Multiple Years)	- Consumo energético da edificação e avaliação térmica	- Melhor precisão - Ótimo tempo de cálculo - Grande volume de informações
- TMY (Typical Meteorological Year) - TRY (Test Reference Year)	- Idem	- Boa precisão da demanda média de energia - Possibilidade de escolha de um ano não-adaptado considerando as sensibilidades da edificação
- Dias representativos e seqüências - Anos curtos de referência	- Dimensionamento de sistemas solares e AC	- Ganho de tempo - Possibilidade de sub- ou superestimar o dimensionamento de sistemas
- Geradores de dados climáticos	- Fornecem dados não-existentes - Dimensionamento de sistemas e a avaliação de demanda de energia	- Dificuldades de modelar as variáveis climáticas

Fonte: Adelard et. al (2000).

No entanto, no Brasil, são escassos dados meteorológicos de qualidade para uso na avaliação horária do desempenho térmico e energético de edificações. Atualmente, apenas dois tipos de dados climáticos para aplicativos de simulação estão disponíveis: o TRY (Typical Reference Year) e o TMY (Typical Meteorological Year). Em ambos, os dados medidos são de décadas passadas, o que confere a estes uma defasagem em representar as mudanças climáticas dos centros urbanos nos últimos anos.

Outros aspectos a considerar são relativos aos dados de radiação solar e as medições de temperatura, umidade e ventilação nas estações meteorológicas que têm grande influência sobre a resposta térmica de um ambiente simulado. Por exemplo, para a maior parte das cidades brasileiras, os arquivos climáticos usados em programas de simulação de desempenho energético usam dados de radiação solar direta e difusa horizontais e de radiação direta normal estimados por métodos que os derivam da radiação global horizontal, calculados a partir dos índices de cobertura de nuvens obtidos nas estações meteorológicas de diversas cidades brasileiras, em virtude da escassez de estações que meçam radiação solar direta e difusa no Brasil (LAMBERTS; CARLO, 2005).

E dados de temperatura, umidade e ventilação são quase sempre obtidos em estações no perímetro das cidades, em aeroportos, por exemplo, o que pode gerar diferenças quando considerado a altitude em que as estações encontram-se, geralmente a 10m de altura, e as diferenças para as condições climáticas encontradas no meio urbano adensado.

Na simulação de desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas, os dados relativos à ventilação e sua modelagem em simulações merecem um destaque em separado em virtude do aprimoramento das técnicas nos últimos anos e das grandes imprecisões e limitações que existem quando considerada a velocidade, direção e pressão dos ventos no entorno e no interior do ambiente simulado. Estes aspectos são abordados no item seguinte.

Ventilação natural

Mesmo em países desenvolvidos, como os Estados Unidos, que possui uma vasta quantidade de dados meteorológicos e produzem os mais diversos tipos de arquivos climáticos, o projeto de edificações orientado ao aproveitamento da ventilação natural é complexo e muitas vezes seus resultados são imprevisíveis. Geralmente, as abordagens usadas em projetos convencionais de edificações ignoram as oportunidades de inovação quanto à utilização dos ventos de forma a reduzir o custo de operação da edificação e prover maior qualidade do ar e níveis aceitáveis de conforto térmico (CHEN, 2002).

Segundo Chen (2002), na maior parte dos casos, durante o processo de projeto, os arquitetos se utilizam das chamadas setas inteligentes para desenhar o fluxo de ar nos ambientes a partir da direção predominante dos ventos, obtida com a rosa-dos-ventos. No entanto, a estimativa dos padrões de vento no ambiente real é muito mais complexa e na maior parte dos casos depende de conhecimentos específicos em mecânica dos fluidos.

No sentido de auxiliar os arquitetos a projetarem edificações com maior desempenho quanto à ventilação natural, modelos analíticos e empíricos foram desenvolvidos com objetivo de estimar o comportamento dos ventos e o conforto térmico dos usuários nas edificações. Muitos desses modelos são generalizações expressas por equações algébricas ou tabelas e quase sempre possuem grande margem de incerteza quando aplicadas a edificações complexas (CHEN, 2002). Como resultado, outros métodos foram desenvolvidos objetivando trabalhar com casos específicos e com maior precisão. Entre estes estão o método do túnel de vento e os métodos numéricos baseados em simulação computacional.

A análise do fluxo de vento em uma edificação utilizando túneis de vento exige a construção de uma maquete em escala da edificação a ser estudada e/ou do entorno construído. Através da rotação da maquete, da mudança de velocidade e sentido dos ventos

pode-se analisar o fluxo de ar e sua velocidade. Em alguns casos o ar pode ser substituído por outros fluidos como água e gases refrigerantes de alta densidade.

Olgyay (1963) fez uso desse método para definir padrões de comportamento da ventilação em ambientes internos para diferentes arranjos de aberturas a fim de formular recomendações para arquitetos. Atualmente, estudos em túneis de vento têm se restringido à grandes projetos de engenharia e análises do fluxo de ar no ambiente externo. Entre os maiores obstáculos para o uso desse método estão a inadequação à prática do arquiteto em virtude do tempo necessário para as análises e os custos associados a estas.

Os métodos numéricos tiveram sua aplicação diversificada com a incorporação destes em aplicativos de simulação computacional. Basicamente, esses aplicativos estimam a ventilação natural a partir de três diferentes métodos:

- Método das Taxas de Renovação de Ar;
- Método de Zonas Nodais;
- Método baseado em CFD (Computational Fluid Dynamics).

O método das Taxas de Renovação de Ar baseia-se em estimar a taxa do volume de ar repostado em determinado ambiente em uma hora. A modelagem da ventilação natural em aplicativos como o Ecotect e o VisualDOE é feita através da taxa de renovação de ar em que a ventilação natural é representada pela taxa de ventilação pelas aberturas somada a taxa de infiltração que podem ser expressas em (ENERGY SAVING TRUST, 2006):

- Número de vezes em que o volume de ar de um ambiente é repostado em uma hora (trocas de ar por hora – TAH), ou;
- Taxa de ar repostado em volume e tempo, em litros por segundo (l/s) ou metros cúbicos por segundo (m³/s).

A estimativa das taxas de renovação de ar para edificações é complexa e quase sempre imprecisa. Para o cálculo da taxa de infiltração, essa estimativa é feita através de métodos experimentais que consistem em avaliar as trocas de ar em edificações existentes, ambientes ou componentes das edificações (portas, janelas, cobertas, dutos, entre outros). Existem diferentes métodos para o cálculo da infiltração, sendo os mais utilizados os que utilizam traçadores de gases que detectam o movimento de ar em determinado período de tempo, observando-se, assim o decremento de determinado gás inserido no ambiente (hidrogênio, hélio, monóxido de carbono, metano, entre outros) e a técnica de ventiladores pressurizados que são colocados em uma abertura no ambiente analisado para, então, ser medida a pressão do ar interna e estimar as trocas de ar (MCWILLIAMS, 2002).

Comumente, estes métodos são utilizados em países desenvolvidos de clima frio onde a aquisição de dados precisos relativos às taxas de infiltração serve de base para o uso de estratégias para reduzi-la, gerando um grande impacto sobre a eficiência energética de edificações climatizadas artificialmente. As taxas de infiltração também servem como parâmetro para se avaliar a qualidade de ar interno dos ambientes.

O Brasil não possui norma específica para taxas máximas de infiltração ar. De acordo com Akutsu e Vittorino (1999), a taxa de infiltração de ar típica de residências no Brasil é de 1 TAH. Nos Estados Unidos, estas são estimadas em torno de 0.3-2.0 TAH (SHERMAN; DICKERHOFF, 1998). Garde et al. (2001) distinguem três valores médios das taxas de fluxo de ar em trocas de ar por hora, de acordo com sua função:

- Taxa de fluxo fraco (1-2 TAH): preservação das condições de higiene pela troca de ar interno;
- Taxa de fluxo moderado (40 TAH): dissipação dos ganhos internos de calor e resfriamento da envoltória da edificação;

- Taxa de fluxo alto (acima de 100 TAH): melhoria do conforto térmico dos ocupantes pelo aumento da transferência de calor no nível da pele.

O método de zonas nodais baseia-se em estimar o fluxo de ar entre zonas a partir da distribuição externa da pressão causada pelo vento e seu efeito de elevação por diferença de temperatura, usando a equação de Bernoulli para calcular o fluxo de ar entre zonas (CHEN, 2004). Aplicativos como o COMIS e o ESP-r fazem uso de variações desse método para estimar a infiltração e as taxas de renovação de ar em ambientes internos.

As desvantagens desse método estão na complexidade em definir a distribuição da pressão que depende da velocidade e direção dos ventos, da forma e tamanho da edificação, bem como do tamanho e localização das aberturas em seu interior, conferindo imprecisão ao método, e da incapacidade de determinar o conforto térmico uma vez que não é fornecida a velocidade do vento (CHEN, 2004).

O método baseado em CFD (Computational Fluid Dynamics) é usado para estimar o fluxo de ar interno e externo a partir de equações de conservação de massa, momento, energia, turbulência, entre outras (CHEN, 2004). Atualmente, diversos aplicativos computacionais como o PHOENICS e o CFX são desenvolvidos e utilizados em pesquisas para estimar os padrões de comportamento do vento nas edificações a partir desse método.

A maior parte dos aspectos analisados concentra-se sobre a distribuição da pressão, da velocidade do ar, temperatura do ar, umidade do ar, dispersão de contaminantes e turbulência. Apesar de representarem uma tendência em pesquisas e em projetos de grandes escritórios internacionais, como Renzo Piano Building Workshop, Foster and Partners, T.R. Hamzah & Yeang, entre outros, o método baseado em CFD também possui as desvantagens de imprecisões e requer conhecimentos em mecânica dos fluidos e computadores com alta capacidade de processamento (CHEN, 2004).

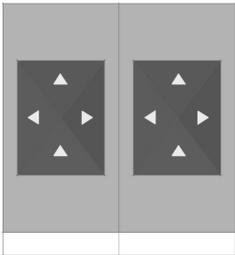
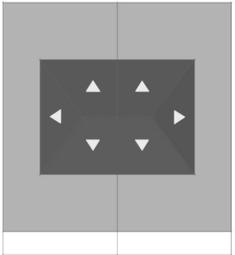
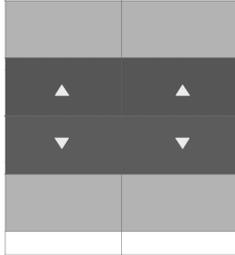
Variáveis de projeto

As variáveis de projeto podem ser definidas como as características da edificação a serem modeladas para a simulação. Estas definem a envoltória da edificação que pode ser entendida como o conjunto de componentes que limitam o ambiente interior do exterior.

È na envoltória que as decisões arquitetônicas têm maior impacto sobre o desempenho térmico, pois através desta o fluxo de calor pode ser controlado, regulando-se a sua perda ou ganho. No entanto, o desempenho térmico também é influenciado por outras variáveis como localização do lote e caracterização do entorno; orientação, adensamento, tipo de sombreamento, vegetação e outros elementos que podem afetar as propriedades dos ventos no entorno e/ou a exposição solar da edificação. Muitas vezes esses aspectos não podem ser alvos da decisão arquitetônica, mas devem ser considerados na avaliação de desempenho térmico nas simulações.

O Quadro 4 apresenta a configuração básica das principais tipologias de residências unifamiliares quanto à locação no lote. Observa-se que a consideração do tipo de arranjo de cada modelo pode implicar em diferentes tipos de sombreamento e exposição solar dos ambientes, em virtude principalmente da orientação e das adjacências com muros do lote e outras edificações, com influência direta sobre o desempenho térmico.

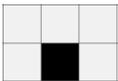
Quadro 4. Tipologias quanto à relação de vizinhança de edificações residenciais unifamiliares e caracterização em relação ao grau de exposição solar.

Isolada	Mista	Geminada
Sem adjacências com os limites do lote	Pelo menos uma fachada adjacente ao limite do lote	Pelo menos duas fachadas adjacentes ao limites do lote
		
Máxima exposição solar	Média exposição solar	Mínima exposição solar

Outras propriedades relativas ao desempenho térmico de ambientes referem-se ao tratamento da envoltória, em termos de materiais e componentes, e de sua configuração formal marcada pela forma da planta baixa que geralmente é caracterizada pela relação entre área de superfície e volume. Essa relação indica que um aumento da área de superfície de um ambiente implica em uma quantidade maior de área exposta, de fachada ou coberta, aos elementos do clima como radiação solar, ventilação e iluminação natural.

Uma simplificação das possibilidades de arranjo de um ambiente residencial em planta pode ser visto no Quadro 5. Neste, a configuração do ambiente tem como critério a exposição da fachada de um ambiente de planta baixa quadrada. A representatividade desses modelos é limitada já que a diversidade de tipologias de residências e as possibilidades de arranjo dos ambientes em planta baixa (*layout*) são inúmeras.

Quadro 5. Possibilidades de *layout* em planta baixa de um ambiente residencial de lados iguais utilizando como critério o número de lados do ambiente exposto à radiação solar.

Número de lados de um ambiente expostos aos elementos do clima				
Nenhum	Um	Dois	Três	Quatro
				

Quanto ao uso de materiais construtivos nos fechamentos, os componentes da envoltória se diferenciam em função de seu comportamento em relação à radiação solar de onda curta incidente e dividem-se basicamente em fechamentos opacos e fechamentos transparentes e aberturas.

Os fechamentos opacos são definidos como elementos que obstruem a passagem de radiação solar de onda curta. Os mais comuns são paredes, divisórias, pisos, forros, coberta, etc. Os fechamentos transparentes e aberturas são definidos como elementos que

permitem uma conexão física e visual com o exterior, permitindo a passagem de radiação solar, principalmente de onda curta. Isto acontece pela presença de abertura que possibilitam a passagem do ar ou por peças envidraçadas e translúcidas, como janelas de vidro, aberturas zenitais, clarabóias de chapas de policarbonato, entre outros.

Os fechamentos transparentes podem ser fixos ou operacionais de forma a permitir a passagem do vento e/ou acesso dos usuários da edificação, como portas, por exemplo. De forma total ou parcial as aberturas permitem a passagem de radiação solar ao interior, que por sua vez é responsável pela iluminação natural e grande parte dos ganhos de calor no interior das edificações. Em climas tropicais, as aberturas são responsáveis pela maior parte dos ganhos de calor no ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

Variáveis de uso e ocupação

Do ponto de vista da análise térmica e energética de edificações, o tipo de uso pode ser entendido como a caracterização de um ambiente ou zona através da atividade na qual foi destinado, considerando a sua densidade de ocupação, de iluminação artificial e de equipamento eletro-eletrônico. Essas densidades são expressas em W/m^2 e representam a quantidade de calor dissipada no ambiente.

A caracterização da rotina de ocupação e das densidades de iluminação artificial e equipamentos são quase sempre feitos em termos de taxas percentuais horárias durante as 24 horas do dia, do total de pessoas que ocupam o ambiente ou do total da potência instalada, respectivamente. No entanto, a variabilidade no uso dos ambientes, do tipo de ocupação (cargas térmicas internas) e a escassez de dados relativos às rotinas de ocupação em residências unifamiliares levam à suposições na declaração desses dados em ferramentas de simulação, muitas vezes de forma hipotética ou aleatória. Isso se deve

principalmente ao reduzido número de estudos que procuram modelar a ocupação de residências, tendo como principal dificuldade as variações no número de pessoas e nas atividades que exercem nos ambientes.

SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura teve como objetivo delimitar as questões relacionadas à influência do arquiteto sobre o desempenho térmico e energético de edificações e discutir as questões relacionadas ao conforto térmico em espaços internos. Foram levantados os meios de otimizar o desempenho térmico através de normas, recomendações de projeto e pelo desenvolvimento de sistemas de classificação de desempenho térmico que, com auxílio da simulação computacional, objetivam as melhores práticas de projeto, visando o desempenho térmico e a eficiência energética de residências no clima quente e úmido.

O impacto da decisão projetual sobre o desempenho térmico e a importância da temática na arquitetura foi destacado, assim como se apresentou um panorama do consumo de energia em edificações residenciais no Brasil. Estes demonstram a influência dos profissionais relacionados à construção sobre o uso da energia em edificações e o bem-estar ambiental dos usuários, sendo necessário a reversão desse prognóstico de contínuo aumento de consumo de energia para condicionamento térmico a partir do estímulo à projetos de edificações com melhor desempenho térmico.

Os benefícios de uma residência adequada ao clima também estão associados à redução dos custos com aquisição, instalação, operação e manutenção de sistemas de condicionamento artificial, bem como a melhoria do conforto ambiental, onde não há ruído e a qualidade do ar é similar ao do exterior, se comparado com os sistemas convencionais de ar condicionado de janela.

A temática do conforto térmico se apresentou como uma das mais complexas. Apesar da diversidade de índices e zonas de conforto térmico e de argumentos que pudessem servir de base para adoção de um destes na pesquisa, foi possível identificar um modelo adaptativo que melhor serviu aos propósitos das análises dos dados de simulação de ambientes naturalmente ventilados em clima quente e úmido. De forma semelhante foi possível compreender melhor os critérios de avaliação de conforto térmico existentes, analisando-se sua aplicabilidade e limitações.

Logo, foram consideradas as normas e sistemas de classificação de desempenho térmico e energético a partir de sua caracterização e do entendimento de suas vantagens e desvantagens. No entanto, nenhum sistema de classificação ou norma de desempenho foi encontrado na literatura que se referisse à classificação do desempenho térmico da edificação na fase de projeto adotando como critério a temperatura interna do ar.

Por fim, tratou-se das questões relacionadas à simulação computacional de desempenho térmico de edificações. As limitações e fontes de erro que podem se originar de estudos a partir de simulações computacionais foram apresentadas, bem como foram discutidas questões relevantes quanto às variáveis (os obstáculos á obtenção dos dados, possibilidades, imprecisões, entre outros) que devem ser consideradas na modelagem de edificações em simulações térmicas.

MÉTODO

O método da pesquisa compreende seis etapas que se configuram como a própria pesquisa. Conforme diagrama da Figura 21, esse partiu da determinação dos pré-requisitos necessários para iniciar as simulações e realizar as análises. Esta primeira etapa consistiu basicamente da definição do objeto de estudo e dos recursos a serem utilizados, como abordagens e escolha da ferramenta de pesquisa.

Na segunda etapa foram definidas faixas de conforto térmico, usando como critério apenas a temperatura interna do ar e um modelo adaptativo de conforto térmico. Em virtude da adoção de um modelo adaptativo para avaliação do conforto térmico, outras variáveis ambientais de conforto térmico, como umidade do ar e temperatura radiante média, não foram consideradas na avaliação.

A terceira etapa consistiu na definição e modelagem de dois casos base, diferenciados por dois tipos de ocupação: quarto e sala. Nesta etapa também foram definidas e caracterizadas as variáveis de projeto, seus parâmetros e as características fixas adotadas.

Na quarta etapa foi realizada a primeira série de simulações onde ocorreu uma análise de sensibilidade das variáveis selecionadas na etapa anterior. Os resultados da primeira série de simulações foram discutidos e analisados de forma qualitativa, sem quantificar, de forma a atender os objetivos dessa etapa. Nessa análise, as variáveis mais influentes no desempenho térmico das células foram identificadas para os dois tipos de ocupação.

Na quinta etapa foi realizada uma segunda série de simulações. Nesta foram simulados combinações de variáveis, escolhidas a partir das análises da quarta etapa, a fim de caracterizar os casos com o melhor e o pior desempenho e identificar uma faixa de desempenho térmico que contemple a maioria das combinações possíveis. Essa faixa foi denominada de Espectro de Desempenho de Térmico (EDT).

Na sexta etapa foram discutidas formas de destacar a influência das variáveis no desempenho térmico da edificação, assim como foi proposto um sistema de classificação do desempenho térmico de edificações residenciais no clima quente e úmido. Esse sistema é baseado na contagem das horas em faixas de conforto delimitadas pela influência da velocidade do ar, a partir da atribuição de pesos a cada faixa, destacando a decisão projetual na avaliação.

Essas etapas definem o escopo da pesquisa, estabelecendo as etapas seguidas no processo de desenvolvimento do método de avaliação proposto e identificado como IDTR – Índice de Desempenho Térmico Resultante (Figura 21). Por fim, nesse capítulo, o último item apresenta uma aplicação desse sistema, discutindo as vantagens em relação a outros métodos de avaliação do desempenho térmico existentes.

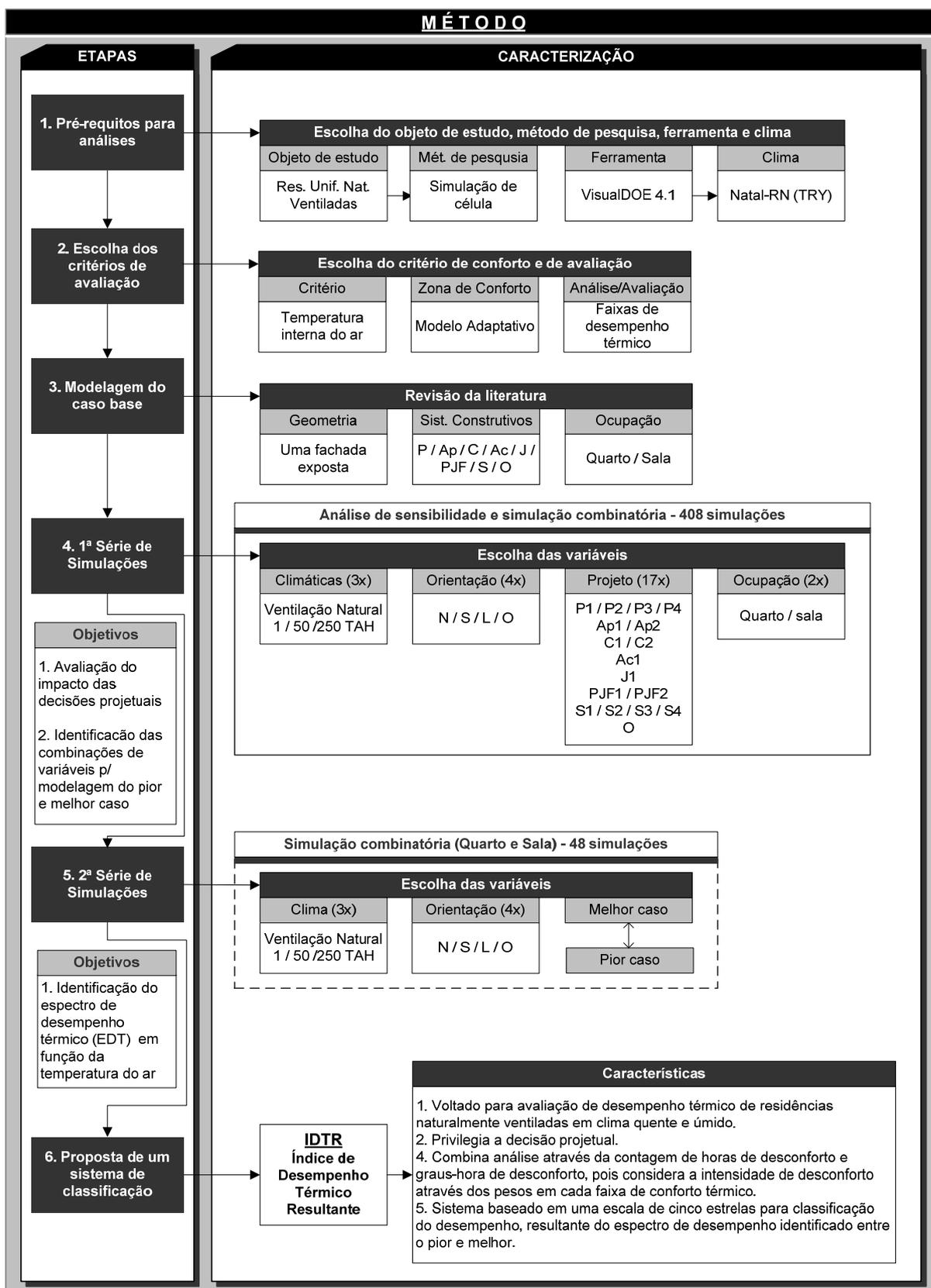


Figura 21. Diagrama do método da pesquisa com caracterização das seis etapas.

PRÉ-REQUISITOS PARA ANÁLISES

As residências unifamiliares naturalmente ventiladas no clima quente úmido foram definidas como objeto de estudo da pesquisa. Essas são caracterizadas por edificações de um pavimento, isoladas no lote. O estudo foi contextualizado para o clima quente úmido de Natal-RN e emprega o arquivo climático tipo TRY (LAMBERTS; CARLO, 2005).

A pesquisa utilizou o VisualDOE 4.1 (VISUALDOE, 2005) como ferramenta de simulação e avaliação do desempenho térmico dos casos. Esse programa é uma interface gráfica para o programa DOE-2.1E, desenvolvido pelo Lawrence Berkelay National Laboratoty (LBNL) (SIMULATION RESEARCH GROUP, 2000). O DOE-2.1E é um programa reconhecido mundialmente pela sua contribuição às pesquisas, mas que está sendo substituído pelo programa EnergyPlus (CRAWLEY et al., 2001) que reúne o melhor do DOE2.1E e do Blast e que contém ainda outros programas como o COMIS.

Apesar disso, optou-se pelo DOE-2.1E por vários motivos. O primeiro é a necessidade de uma interface gráfica para a modelagem, que é o VisualDOE. Através dela, é possível modelar todos os componentes de uma edificação, como elementos da envoltória, sistemas de iluminação artificial, iluminação natural, aquecimento de água, sistemas de condicionamento de ar, num curto período de tempo (CRAWLEY et al., 2001). Além do mais, destaca-se sua flexibilidade de derivar modelos e executar muitas simulações em blocos. Em comparação, as interfaces gráficas para o EnergyPlus são recentes e ainda estão sendo desenvolvidas.

A segunda justificativa é a cultura de uso, pois o VisualDOE e o DOE-2.1E vem sendo utilizados desde 1995 e 1993, respectivamente, no Brasil, e por isso são programas de melhor domínio. A terceira é a disponibilidade legal do programa, que foi adquirido pelo LabCon-UFRN através de recursos do convênio com a Eletrobrás. Frequentemente são testados vários programas em versões demonstrativas, porém uma pesquisa requer uma versão oficial e o suporte do fabricante. É importante considerar que qualquer aquisição de programas implica

na obtenção de recursos, através da submissão de projetos de pesquisas, o qual é um processo incerto e geralmente longo.

CRITÉRIO DE CONFORTO TÉRMICO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Para simulação dos modelos representativos de edificações residenciais naturalmente ventiladas, a temperatura interna do ar foi escolhida como critério de conforto térmico para avaliação do desempenho térmico dos casos. Na análise dos dados de temperatura interna do ar resultantes das simulações adotou-se a frequência das temperaturas como técnica de análise desses dados.

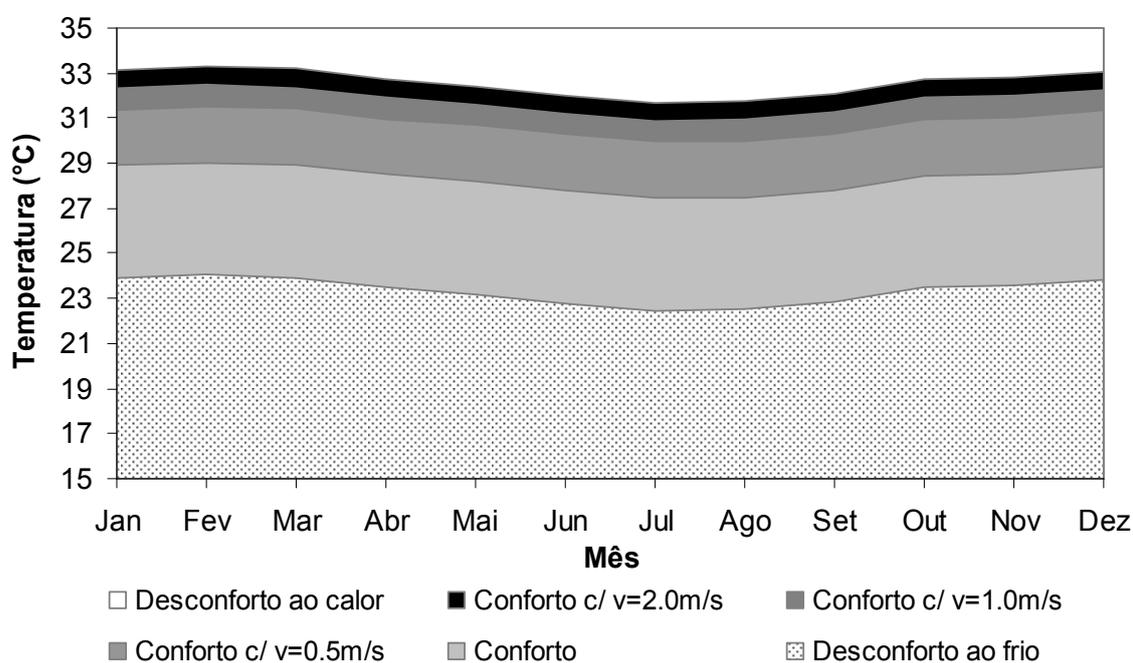


Figura 22. Faixas de conforto para Natal-RN a partir do modelo adaptativo de Humphreys (BRAGER; DEAR, 1998b), com limites para diferentes velocidades do ar.

A quantificação da ocorrência de temperaturas foi realizada considerando diferentes faixas de temperaturas que foram definidas a partir do modelo adaptativo de conforto térmico

de Humphreys (BRAGER; DEAR, 1998b) e da equação de ajuste da temperatura de conforto (Eq. 8) em função da velocidade do ar, sugerida por Nicol (2004). Para isso, foram adotadas as velocidades do ar de 0.5, 1.0 e 2.0 m/s que geraram as faixas de conforto térmico apresentadas na Figura 22.

Dear e Brager (2002) sugerem que um peso pode ser atribuído a essas faixas como indexador da duração e intensidade da temperatura fora da zona de conforto adaptativa, servindo como uma ferramenta útil de classificação de desempenho térmico. Essa abordagem foi adotada com intuito de avaliar o desempenho térmico de um ambiente em que a amplitude e frequências das temperaturas internas, fora da zona de conforto, fossem consideradas.

Portanto, para cada faixa foi atribuído um peso para proporcionar a percepção da intensidade de desconforto na medida em que as temperaturas se elevam (Quadro 6). O objetivo também foi ponderar a intensidade das temperaturas, considerando a velocidade do ar como fator de ajuste. Destaca-se que os pesos podem ser alterados para diferentes condições de disponibilidade de vento, ajustando o método para situações distintas.

Quadro 6. Faixas de conforto térmico e pesos.

Faixa	Caracterização da faixa	Peso
F 1	Desconforto ao frio	1
F 2	Conforto	1
F 3	Conforto c/ v=0.5m/s	0.75
F 4	Conforto c/ v=1.0m/s	0.5
F 5	Conforto c/ v=2.0m/s	0.25
F 6	Desconforto ao calor	0

A atribuição desses pesos ocorreu de forma hipotética, em que cada faixa de conforto térmico recebeu um peso correspondente com uma variação de 0.25. A faixa de desconforto ao frio recebeu peso 1 porque não foram consideradas temperaturas no clima de Natal-RN (mesmo que ocorram com baixa frequência temperaturas médias entre 18-23 °C) que

puddessem ser tomadas como períodos de desconforto térmico ao frio. Além do mais, nessa faixa as possibilidades de adaptação que os usuários podem encontrar permitem ajustes metabólicos e da vestimenta de forma a atender as condições de conforto térmico.

O desconforto ao calor, com temperaturas superiores a 33°C em média, recebeu peso nulo que corresponde a não computação das horas nessa faixa. Dessa forma, tais condições estariam sendo desconsideradas pelas dificuldades em se manter em estado de conforto térmico, mesmo através da ventilação natural. Para a precisão na atribuição dos pesos seria necessário o aprofundamento com pesquisas em campo para identificar as faixas de desempenho para cada região, associando esse desempenho, por exemplo, com as soluções arquitetônicas ou com as velocidades médias do ar do clima em estudo.

Assim, foi definido um índice denominado de Índice de Desempenho Térmico Resultante (IDTR) que é resultado da soma das horas em que ocorreram temperaturas em cada faixa de conforto (frequência de temperatura - F_n), multiplicado pelo peso de cada faixa, que devem ser divididos pelas horas totais de ocupação e multiplicados por cem para obter o valor final em porcentagem, como expresso na Eq. 11. Nessa contagem são consideradas apenas as horas durante o período de ocupação, totalizadas em 3285 e 5475 horas para a ocupação típica de quarto e sala, respectivamente.

$$\text{IDTR (\%)} = \frac{\sum [(F_1 \times 1) + (F_2 \times 1) + (F_3 \times 0.75) + (F_4 \times 0.5) + (F_5 \times 0.25) + (F_6 \times 0)]}{\text{Horas de ocupação}} \times 100$$

Eq. 11

Temperatura média dos meses que delimitam cada faixa de conforto térmico:

F1: Frequência de horas em que ocorreram temperaturas menores do que 23.3°C

F2: Frequência de horas em que ocorreram temperaturas entre 23.3 e 28.3°C

F3: Frequência de horas em que ocorreram temperaturas entre 28.3 e 30.8°C

F4: Frequência de horas em que ocorreram temperaturas entre 30.8 e 31.8°C

F5: Frequência de horas em que ocorreram temperaturas entre 31.8 e 32.6°C

F6: Frequência de horas em que ocorreram temperaturas maiores do que 32.6°C

DEFINIÇÃO DO CASO BASE (CB) E VARIÁVEIS

A técnica de simulação adotada foi a da modelagem de uma única célula, em lugar de toda a edificação, que representa um ambiente de uma residência e é caracterizada pela envoltória e ocupação. Para uma mesma tipologia de célula, foram analisadas duas ocupações típicas: quarto e sala.

O método de avaliação de células representativas de ambientes ou zonas da edificação é mais adequado aos propósitos de pesquisa porque é a forma mais flexível para representar o maior número de configurações espaciais possíveis. A escolha de células também se deve pela simplificação dos modelos, onde a inclusão de detalhes como zoneamento dos ambientes poderia levar a incertezas em virtude das imprecisões na caracterização da transferência de calor entre ambientes (PURDY; BEAUSOLEIL-MORRISON, 2001).

A célula do caso base tem lados de igual dimensão (3m) e uma janela. A orientação da abertura caracteriza a orientação da célula nas simulações. Na modelagem, as outras três paredes onde não há abertura foram consideradas adiabáticas, sem trocas de calor com o exterior. Esse tipo de configuração corresponde a um ambiente com uma fachada exposta, em que as outras paredes estariam supostamente adjacentes a outros ambientes (Figura 23).

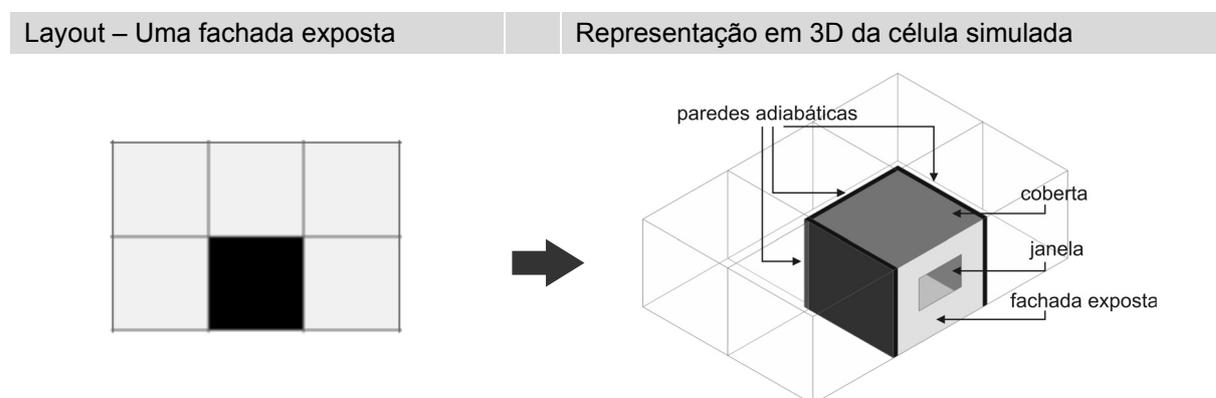


Figura 23. Esquema de representação da célula do caso base simulada.

A técnica de simulação quanto à combinação e análise das variáveis simuladas adota a Análise de Sensibilidade Diferencial (ASD) (LOMAS; EPPEL, 1992) e uma análise combinatória que correlaciona as variáveis de projeto a uma variável climática (ventilação natural) e as quatro orientações. A ASD permite uma análise direta da sensibilidade de cada variável sobre os resultados da simulação. Assim, um modelo representativo (caso base) tem uma de suas variáveis alterada a cada simulação, permanecendo as outras como encontradas para, então, ser analisado o impacto no desempenho térmico pela alteração dessa única variável (PURDY; BEAUSOLEIL-MORRISON, 2001).

Para análise combinatória o caso base foi simulado para quatro orientações (Norte, Sul, Leste e Oeste) e três tipos de ventilação natural, baseados na taxas de renovação do ar e indicadas em termos de trocas de ar hora (TAH). A definição desses valores ocorreu através da revisão bibliográfica e de uma análise de sensibilidade exploratória da ventilação natural através de simulações no VisualDOE 4.1 (Quadro 7).

Quadro 7. Trocas de ar por hora de infiltração e ventilação natural usados nas simulações.

Tipo	Infiltração (TAH)	Ventilação Natural (TAH)
V1	5% da Ventilação Natural	1
V50	5% da Ventilação Natural	50
V250	5% da Ventilação Natural	250

Caracterização do caso base (CB)

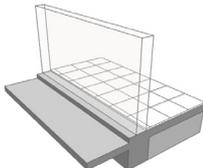
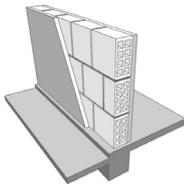
Através do estudo de Barbosa e Lamberts (2002), os seguintes sistemas construtivos e elementos da envoltória, representativos de residências no Brasil, foram usados na modelagem do caso base:

- Volumetria (dimensões em planta e pé-esquerdo);
- Transmitância térmica de piso;
- Transmitância térmica de parede e coberta;

- Absortância de parede e de coberta;
- Caracterização da abertura: tipo de fechamento, transmitância térmica, fator solar, transmissão de luz visível;
- Tipo de sombreamento.

Esses foram caracterizados através dos parâmetros apresentados no Quadro 8:

Quadro 8. Caracterização do caso base (CB).

Caso Base (CB)		
Dimensões	Área de piso	Volume
3m x 3m x 3m	9 m ²	27 m ³
Piso		
	Piso cerâmico e solo	
	Transmitância térmica (U)	1.39 W/m ² .K
Paredes		
	Parede de tijolos 8 furos quadrados na menor dimensão	
	Transmitância térmica (U)	2.49 W/m ² .K
	Absortância (α)	0.20
Coberta		
	Cobertura de telha de barro com forro de laje mista	
	Transmitância térmica (U)	1.92 W/m ² .K
	Absortância (α)	0.70
Abertura		
	Janela com vidro simples claro de 3mm	
	Dimensões / Peitoril	1.50m x 1.00m / 1.00m
	Transmitância térmica (U)	5.91
	Fator solar (FS)	0.86
	Transmissão visível (TV)	0.90
	PJF	17%
	Sombreamento	Beiral de 60cm

Caracterização da ocupação e parâmetros fixos

Na simulação de desempenho térmico de edificações devem ser considerados o uso e ocupação de cada ambiente. O uso corresponde ao tipo de atividade que ocorre na edificação, como residencial, comercial, escritório, hospitalar, entre outros. A forma de ocupação está associada às características da rotina de atividades no ambiente, como tempo de permanência, densidade de ocupação, uso ou não de condicionamento de ar artificial, iluminação artificial e equipamentos elétricos, bem como por suas respectivas densidades de cargas térmicas.

A modelagem considerou uma ocupação base para quarto e sala e uma variação sem ocupação (O) ou cargas internas para a análise de sensibilidade. A densidade de ocupação de pessoas considera o número de pessoas presentes no ambiente e as cargas térmicas sensível e latente, sendo adotados os valores padrões fornecidos pelo VisualDOE 4.1 de 66,4 W/pessoa de calor sensível e de 55,7 W/pessoa de calor latente (ASHRAE, 2001a). A densidade de iluminação considerou o uso de lâmpadas fluorescentes compactas de 15W. Para o quarto não foram consideradas cargas de equipamentos, enquanto que para a sala foi considerado o uso de um aparelho de TV de 20' com potência média de 90W (Quadro 9) (PROCEL, 2005).

Quadro 9. Cargas internas fixas da ocupação base, iluminação artificial e equipamentos.

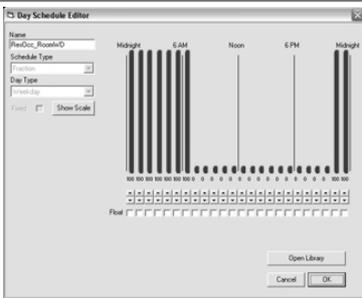
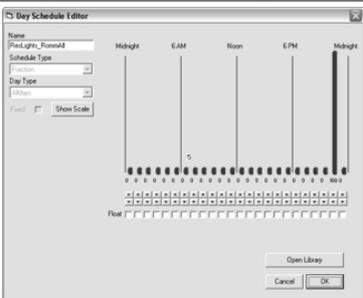
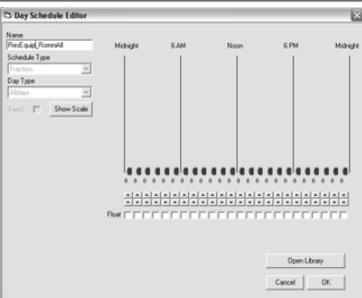
Tipo de carga interna	Quantidade	Carga térmica total (W)	Densidade
Pessoas	2	224.2	4.5 m ² /pessoa
Iluminação	2	30	3.33 W/m ²
Equipamentos	0 (quarto) 1 (sala)	0 (quarto) 90 W (sala)	0 (quarto) 10 W/m ² (sala)

A rotina de ocupação não tem a pretensão de ser representativa porque foi estimada com base em observações e na intenção de análise. Isto é, não há amostragens de campo para subsidiar essa modelagem. As variações para esses dois tipos de ocupação são inúmeras e dependem de fatores sócio-culturais, de poder aquisitivo e hábitos dos ocupantes, sendo estas, portanto, uma representação do que poderia ser cada uma desses ambientes. Para uma

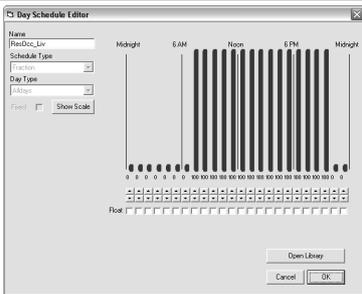
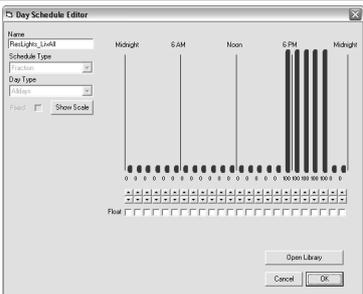
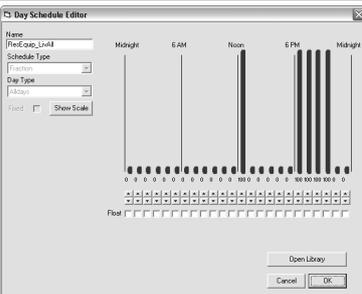
determinação mais fidedigna da ocupação de ambientes residenciais seria preciso pesquisas sistemáticas de campo.

Assim, foram consideradas rotinas para a ocupação do tipo quarto e sala (Quadro 10 e Quadro 11) que visaram enfatizar a influência da arquitetura, ao invés da eficiência de equipamentos, e a influência da ocupação sobre o desempenho térmico da edificação.

Quadro 10. Rotinas de ocupação - Quarto

Ocupantes	Iluminação artificial	Equipamentos
Todos os dias 100% - 22:00-07:00h	Todos os dias 100% - 23:00h	Todos os dias 0%
		

Quadro 11. Rotinas de ocupação - Sala

Ocupantes	Iluminação artificial	Equipamentos (TV 20")
Todos os dias 100% - 08:00-22:00h	Todos os dias 100% - 17:00-22:00h	Todos os dias 100% - 13:00h / 18:00-22:00h
		

A escolha dos tipos de ocupação quarto e sala ocorreu em virtude de serem os ambientes de maior tempo de permanência em residências e pela opção por uma ocupação noturna, típica de um quarto, e por uma ocupação diurna, típica de sala. De tal modo, o impacto das perdas de calor no período noturno e o ganho de cargas térmicas de radiação solar durante o dia seriam destacados para cada caso, respectivamente.

Variáveis de projeto

A escolha das variáveis de projeto a serem simuladas teve como critérios: a viabilidade de execução em função da quantidade de simulações necessárias; a influência das variáveis sobre o desempenho térmico, amparada pela revisão bibliográfica e a importância para o projetista. Assim, foram definidas as seguintes variáveis:

- Transmitância térmica de parede (P);
- Absortância de parede (Ap);
- Transmitância térmica de cobertura (C);
- Absortância de cobertura (Ac);
- Tipo de janela (J);
- Porcentagem de janela na fachada (PJF);
- Tipo de sombreamento (S);

Os valores de transmitância térmica de parede (P) e de cobertura (C) foram definidos a partir da análise de faixas de valores de referência de transmitância de sistemas construtivos comumente adotados na construção de habitações brasileiras (Quadro 12 e Quadro 13). Não foram considerados sistemas com alta capacidade térmica já que não foi analisado o impacto da inércia térmica sobre o desempenho térmico. Essas faixas foram estabelecidas apenas como referência entre transmitâncias encontradas na norma NBR15220-3 (ABNT, 2005c).

Quadro 12. Faixas de referência de transmitância térmica estabelecidas como critério para escolha dos sistemas construtivos de paredes a serem utilizados nas simulações.

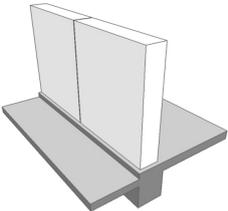
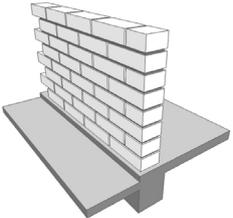
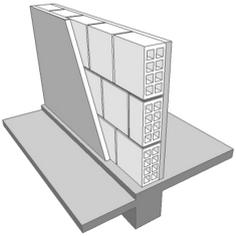
Transmitância térmica U (W/m ² .K)		Critério de classificação	Representatividade do sistema
↑U	Alta	$U > 3,6$	Paredes de chapas de aço, de madeira, de argamassa armada, de tijolos maciços aparentes ou furados, com cerca de 10 cm de espessura ou menos.
↔U	Intermediária	$1,8 < U < 3,6$	Paredes com espessura variando entre 10 e 20 cm, geralmente de tijolos cerâmicos ou de concreto, maciços ou furados, assentados na menor direção.
↓U	Baixa	$U < 1,8$	Paredes pesadas ou leves (com uso de isolante térmico), com espessura e materiais variáveis.

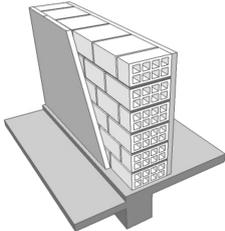
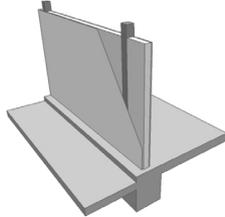
Quadro 13. Faixas de referência de transmitância térmica estabelecidas como critério para escolha dos sistemas construtivos de cobertura a serem utilizados nas simulações.

Transmitância térmica U (W/m ² .K)	Critério de classificação	Representatividade do sistema
↑U Alta	$U > 3,6$	Cobertas de telhas de materiais variados (barro, fibrocimento, chapa metálica...), geralmente sem forro.
↔U Intermediária	$1,8 < U < 3,6$	Cobertas de telhas de materiais variados (barro, fibrocimento, chapa metálica...), de laje mista ou de concreto.
↓U Baixa	$U < 1,8$	Cobertas de telhas de materiais variados (barro, fibrocimento, chapa metálica...), de laje mista ou de concreto e material isolante térmico.

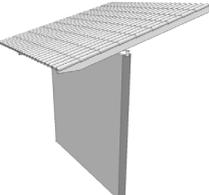
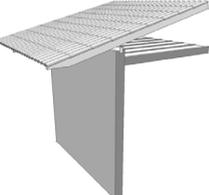
Os sistemas de paredes (P) e de cobertas (C) estão caracterizados no Quadro 14 e no Quadro 15. Foram definidos 5 sistemas construtivos para parede e 3 para cobertura, incluindo em ambos o sistema que caracteriza o caso base (CB).

Quadro 14. Caracterização da transmitância térmica dos sistemas construtivos de parede (P) escolhidos para serem utilizados nas simulações.

Tipo	Imagem	Sistema construtivo representativo	U (W/m ² .K)
P1		Parede de concreto maciço Espessura total: 10cm	5.04
P2		Parede de tijolos maciços aparentes Dimensão do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm Arg. de assentamento: 1,0 cm Espessura total: 10,0 cm	3.7
CB		Parede de tijolos 8 furos quadrados na menor dimensão Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,0 cm	2.49

P3		Parede de tijolos de 8 furos quadrados, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 24,0 cm	1.8
P4		Parede estrutural de madeira com poliestireno expandido revestido com laminado de madeira Espessura EPS: 2,54cm Espessura do laminado: 1,27cm Espessura total: 5,08 cm	1.13

Quadro 15. Caracterização da transmitância térmica dos sistemas construtivos de cobertura (C) escolhidos para simulações.

Tipo	Imagem	Representatividade do sistema	U (W/m ² .K)
C1		Cobertura de telha de barro sem forro Espessura da telha: 1,0 cm	4.55
CB		Cobertura de telha de barro com forro de laje mista Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da laje: 12,0 cm	3.6
C2		Cobertura de telha de barro com 5,0 cm de lã de vidro sobre o forro de madeira Espessura da telha: 1,0 cm Espessura da madeira: 1,0 cm	0.62

Para a absorvância de paredes (A_p) e cobertura (A_c), foram analisados valores encontrados na norma NBR15220-2 (ABNT, 2005b), conforme Quadro 16 e Quadro 17. Foram escolhidos três valores para parede e dois para cobertura, incluindo os valores do caso base (CB).

Quadro 16. Valores de absorptância de parede (Ap).

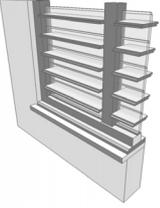
Tipo	Absortância de paredes	Representatividade
CB	0.2	Superfície de cor branca
Ap1	0.5	Superfície de cor com saturação intermediária (pinturas de cor verde, azul...; reboco claro, entre outros)
Ap2	0.8	Superfície de cor escura (pintura cinza, marrom...; tijolo aparente escuro, entre outros)

Quadro 17. Valores de absorptância de cobertura (Ac).

Tipo	Absortância de cobertura	Representatividade
Ac	0.2	Superfície de cor clara (telha de cor branca)
CB	0.7	Superfície de cor escura (telha de barro de cor vermelha)

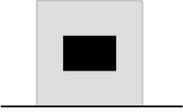
Para a análise de sensibilidade dos tipos de janela foram modeladas uma janela de alumínio e vidro, do caso base (CB), e uma de madeira do tipo veneziana (Quadro 18). Este sistema é bastante difundido em regiões tropicais e se apresenta como alternativa aos sistemas envidraçados pelo seu potencial de controle da radiação solar e da ventilação natural. Em virtude das limitações de modelagem de simulação desse tipo de abertura no VisualDOE 4.1, foi estipulado um material com transmitância térmica de madeira e seu comportamento térmico atua como um fechamento opaco quando há incidência de radiação solar, ou seja, a ventilação está sempre presente, porém não há passagem da radiação de onda curta.

Quadro 18. Tipologias de janela (J).

Tipo	Imagem	Caracterização	U (W/m ² .K)	FS	TV
CB		Janela com vidro simples claro de 3mm	5.91	0.86	0.90
J1		Janela de madeira de venezianas com espessura de 15mm	2.3	0	0

A dimensão da janela do caso base foi definida através da percentagem de janela na fachada (PJF). A partir do caso base foram analisados outros dois valores para o PJF em função do aumento desse valor na proporção de 2x e 3x, com intuito de avaliar o impacto desse aumento sobre o desempenho térmico (Quadro 19).

Quadro 19. Valores e caracterização da percentagem de janela na fachada (PJF).

Tipo	Reapresentação na célula	Peitoril	Dimensão da janela (m)	Área da janela (Aj)	Área da fachada (Af)	Relação área de piso e de janela	PJF (Aj / Af)
CB		1,0 m	1,0 x 1,5	1,5 m ²	9 m ²	1/6	17%
PJF1		1,0 m	2,5 x 1,2	3 m ²	9 m ²	1/3	33%
PJF2		1,0 m	2,95 x 1,5	4,5 m ²	9 m ²	1/2	49%

O desempenho térmico dos ambientes em residências é bastante influenciado pelos fechamentos opacos e sombreamento das aberturas devido a protetores solares, beirais, da própria edificação e/ou de elementos exteriores como muro do lote, edificações vizinhas, arborização, entre outros.

Por causa da complexidade de elementos que podem atuar como sombreadores e dos tipos de sombreamento nas aberturas, procurou-se estabelecer uma faixa de tipos de sombreamento a serem analisados, considerando desde um ambiente sem qualquer sombreamento (S1) a um com sombreamento total da abertura (S4), durante todo o ano, para as quatro orientações (Quadro 20).

Quadro 20. Caracterização dos tipos de sombreamento (S), incluindo o caso base, considerando a orientação e a porcentagem de sombreamento (PS).

Orientação	S1	CB	S2	S3	S4
	Sem proteção	Beiral 60 cm (Caso Base)	Beiral 60 cm e muro (recuo 3,00 m)	Beiral 60 cm e muro (recuo 1,5 m)	Beiral 60 cm, protetor misto e muro (recuo 1,50 m)
N					
PS	0%	~45%	~45%	~55%	100%
S					
PS	0%	~50%	~50%	~60%	100%
L					
PS	0%	~25%	~50%	~65%	100%
O					
PS	0%	~25%	~50%	~65%	100%

O critério de porcentagem de sombreamento (PS) é apresentado apenas como referência, pois serve para quantificar o sombreamento de diferentes tipos de elementos, inclusive elementos externos como vegetação, muros e outras edificações. Os tipos de sombreamento utilizados na pesquisa são beirais, protetores solares e muros de divisa de lotes com recuo de 1,50 m e 3,00 m e altura de 2,5 m. Estes são valores comumente prescritos em códigos de obras de diversas capitais brasileiras de clima quente e úmido.

PRIMEIRA SÉRIE DE SIMULAÇÕES: IMPACTO DAS VARIÁVEIS E MODELAGEM DOS CASOS EXTREMOS

A primeira série de simulações ocorreu em duas etapas. A primeira com a simulação de casos gerados a partir de uma análise combinatória das quatro orientações (N, S, L e O) e dos três tipos de ventilação: V1, V50 e V250, que representam, respectivamente, 1, 50 e 250 TAH, utilizando a mesma célula do caso base para as rotinas de ocupação do quarto e sala. Na segunda etapa foi realizada uma análise de sensibilidade das variáveis de projeto e ocupação.

Os resultados das simulações foram dispostos em gráficos de frequência de temperatura, onde foi possível avaliar a sensibilidade do desempenho térmico do modelo em relação à variação de cada variável isoladamente, durante as horas de ocupação e considerando diferenças na ventilação e orientação. Essa análise também foi empregada para avaliar o impacto sobre o desempenho térmico de um caso com a ocupação base e outro sem ocupação.

A Figura 24 apresenta um diagrama da primeira série de simulações considerando as 17 variáveis (16 de projeto e a ocupação), combinadas aos três tipos de ventilação e às quatro orientações. Nesta série foram simulados um total 408 casos, sendo 204 para cada ocupação.

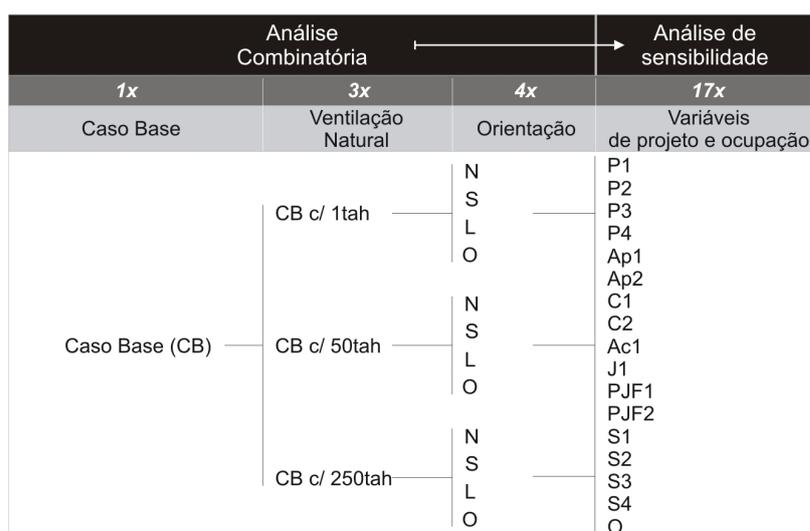


Figura 24. Diagrama da primeira série de simulações considerando os três tipos de ventilação, às quatro orientações e as 17 variáveis (16 de projeto e a ocupação).

A interpretação dos resultados dos gráficos de frequência de temperatura gerados nessas simulações ocorreu de forma qualitativa e os objetivos foram:

- avaliar o impacto das variáveis de projeto e da ocupação sobre o desempenho térmico, considerando a ventilação natural e a orientação;
- identificar as variáveis de pior e de melhor desempenho para modelagem dos casos extremos: Pior Caso (PC) e Melhor Caso (MC), com objetivo de identificar o espectro de desempenho térmico (EDT).

Discussão dos resultados da primeira série de simulações - Quarto

Para compreensão e interpretação dos gráficos resultantes da primeira série de simulações foi elaborada a Figura 25 que identifica os códigos para leitura das legendas destes.

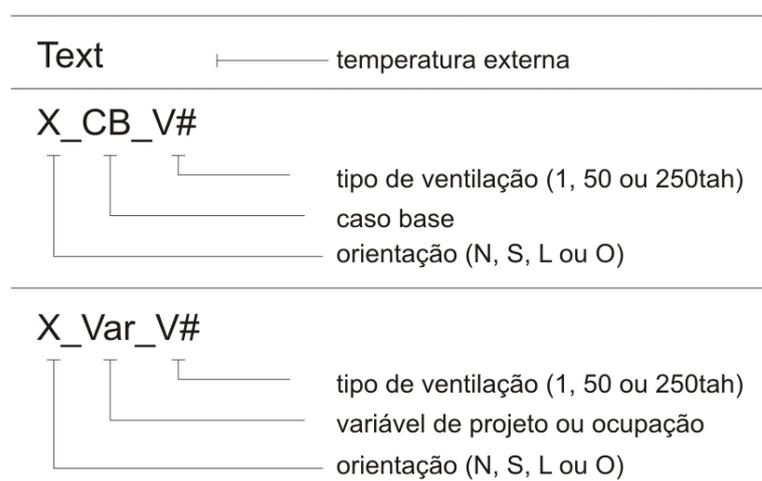


Figura 25. Códigos para leitura das legendas dos gráficos referentes à primeira série de simulações.

A Figura 26 apresenta os resultados das simulações combinatórias do caso base (CB) para as quatro orientações (N, S, L e O) e os três tipos de ventilação (V1, V50 e V250) para a

ocupação quarto. Os resultados foram agrupados em quatro gráficos de frequência de temperatura interna do ar, um para cada orientação, onde basicamente observou-se o aumento do desempenho térmico com aumento do valor das trocas de ar hora (TAH).

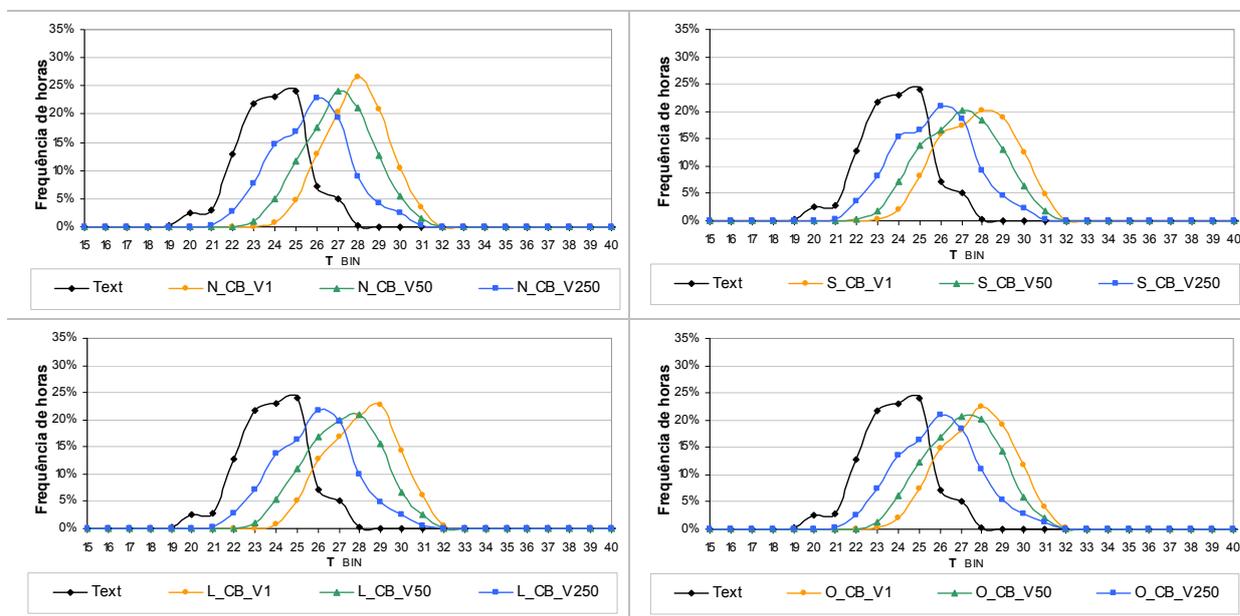


Figura 26. Gráficos da análise combinatória para as quatro orientações e três tipos de ventilação, para ocupação quarto.

Apesar da variação das trocas de ar não ocorrerem em intensidades iguais, a variação do desempenho térmico é quase equidistante para a variação de 1→50 TAH e de 50→250 TAH, em virtude possivelmente de limitações do VisualDOE 4.1 em modelar a ventilação. Notou-se também que as temperaturas internas não se aproximaram da temperatura externa mesmo com uma alta taxa de renovação de ar (250 TAH), sendo caracterizado relativamente como um caso de desempenho intermediário.

Em seguida são analisados os resultados da análise de sensibilidade das variáveis de projeto e ocupação para o quarto. Por motivo de fluidez do texto somente foram apresentados os gráficos mais significativos que ilustram as situações extremas de desempenho térmico que serviram para alcance dos objetivos dessa etapa. A seção completa de gráficos resultantes da primeira série de simulações encontra-se no APÊNDICE A – Gráficos da análise de

sensibilidade para ocupação quarto. Os parâmetros de cada variável também são encontrados junto aos gráficos para referência.

Transmitância da parede (P)

Para a ocupação quarto, as variações na transmitância térmica não apresentaram grandes alterações no desempenho térmico. Isso se deve ao tardio período da noite em que se inicia a ocupação (22:00h), momento em que as perdas de calor já se intensificaram.

No entanto, na maior parte dos casos constatou-se que o melhor desempenho foi caracterizado pelo sistema de maior transmitância térmica (P1) enquanto o pior desempenho pelo sistema de menor transmitância (P4) (Figura 27 e Figura 28). Tal comportamento se explica pelo incremento nas perdas de calor propiciado pelo sistema com menor resistência à transmissão de calor.

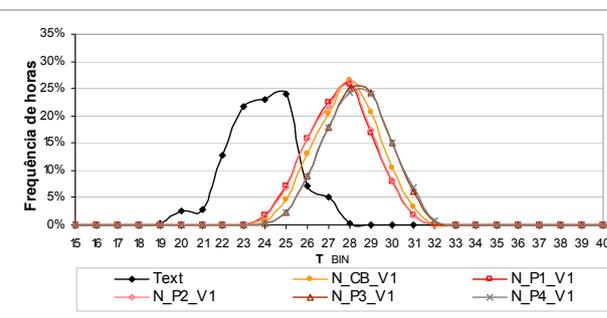


Figura 27. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para os sistemas de maior transmitância térmica (P1).

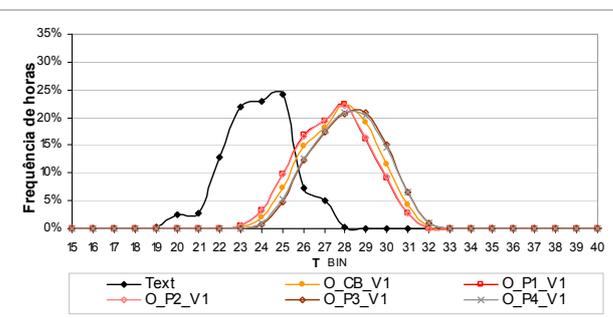


Figura 28. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para os sistemas de maior transmitância térmica (P1).

Absortância de parede (Ap)

Semelhante a transmitância térmica, a alteração da absortância das paredes também não teve grande impacto sobre o desempenho térmico dos casos. Existem variações para cada orientação, porém praticamente há a sobreposição das linhas dos gráficos com situações em

que se observa uma ligeira melhoria no desempenho para a absorvância do caso base, de 0,2, e o pior desempenho para uma absorvância de 0,8 (Figura 29 e Figura 30).

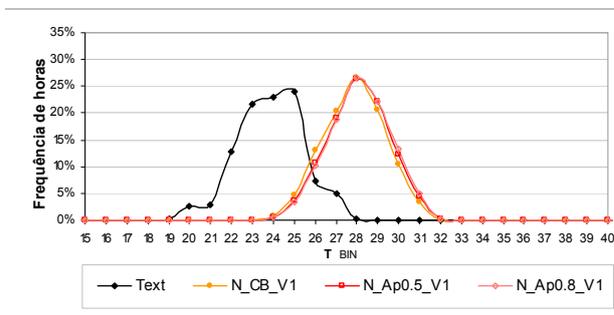


Figura 29. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de 0.2 (CB).

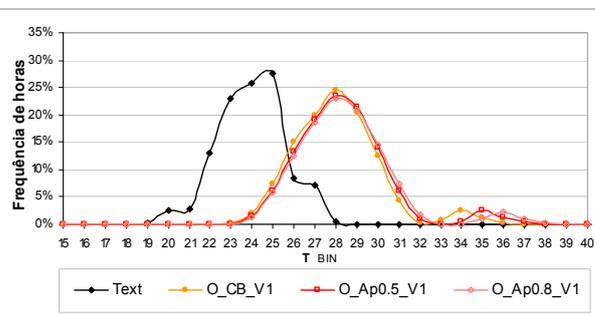


Figura 30. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absorvância de 0.2 (CB).

Transmitância da cobertura (C)

A alteração da transmitância térmica da cobertura resultou em diferenças mais acentuadas no desempenho térmico dos casos com ocupação para o quarto. Nessa análise, mesmo com o aumento das trocas de ar hora (TAH), observaram-se também variações na intensidade do desempenho térmico a partir da alteração da transmitância térmica da cobertura (Figura 32).

Similar ao comportamento térmico das paredes, a cobertura de maior transmitância (C1) teve melhor desempenho pelo incremento nas perdas de calor para a abóbada celeste, no período noturno. Por outro lado, a cobertura com transmitância menor (C2) teve o pior desempenho por impedir essas perdas. (Figura 31 e Figura 32).

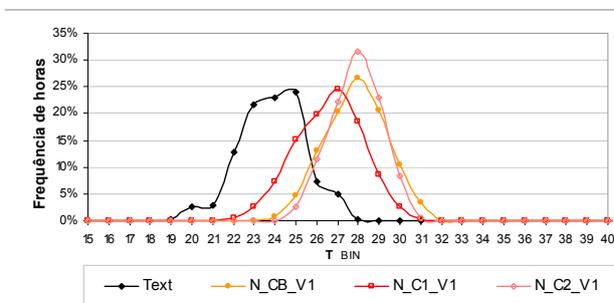


Figura 31. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para transmitância térmica maior (C1).

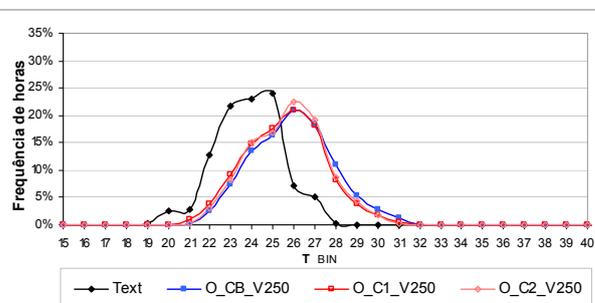


Figura 32. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 250TAH, com ligeira melhoria no desempenho para transmitância térmica maior (C1).

Absortância de cobertura (Ac)

A alteração dos valores de absortância de cobertura também teve maior impacto sobre o desempenho térmico dos casos. A variação de absortância de 0,7, do caso base, para uma de 0,2 reduziu os extremos de temperatura, mesmo para uma ocupação noturna (Figura 33). Observaram-se também variações significativas no desempenho térmico para os casos com maior taxa de renovação de ar (250TAH) (Figura 34).

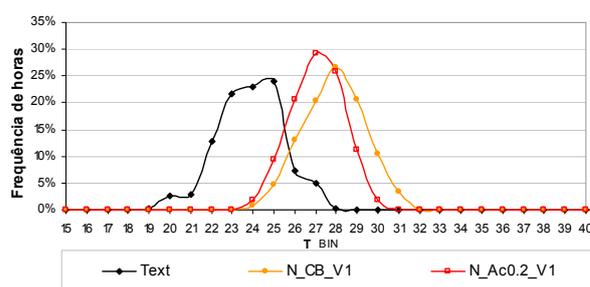


Figura 33. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absortância de cobertura menor de 0.2 (C1).

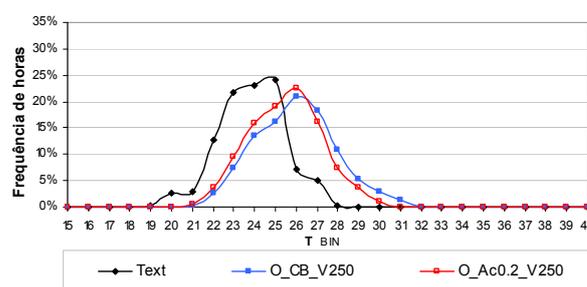


Figura 34. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 250TAH, com melhor desempenho para absortância de cobertura menor de 0.2 (C1).

Porcentagem de Janela a Fachada (PJF)

A variação na Porcentagem de Janela na Fachada (PJF) praticamente não se refletiu no desempenho térmico do caso base. Esse comportamento se explica pelas perdas de calor que ocorreram até o momento de ocupação do ambiente.

Mesmo com uma pequena taxa de troca de ar, 1 TAH, os ganhos de calor através da janela provenientes da radiação solar acabam por se dissipar para o exterior da edificação, principalmente pela cobertura, e em função da ventilação e infiltração. Nas orientações Leste e Oeste, observou-se uma pequena melhoria no desempenho para o caso da PJF de 17%, do caso base (CB) (Figura 35 e Figura 36).

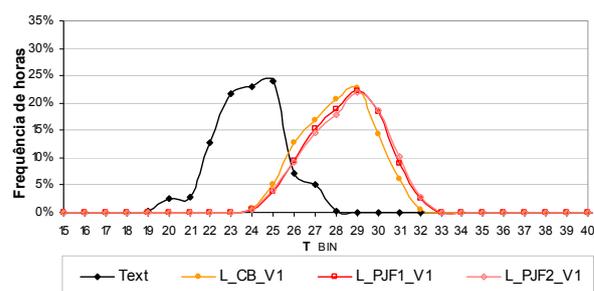


Figura 35. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Leste e 1TAH, com melhor desempenho para PJF menor de 17% (CB).

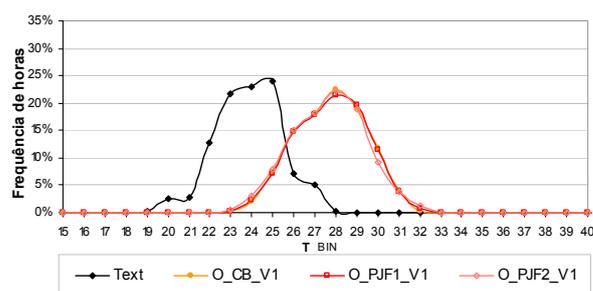


Figura 36. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para PJF menor de 17% (CB).

Tipo de janela (J)

Assim como ocorreu com a variação da PJF, as alterações no tipo de janela tiveram pouco impacto no desempenho térmico do caso base. Da mesma forma também, para orientação Leste e Oeste, há uma ligeira melhoria do desempenho térmico quando usado a janela J1, de madeira (Figura 37 e Figura 38).

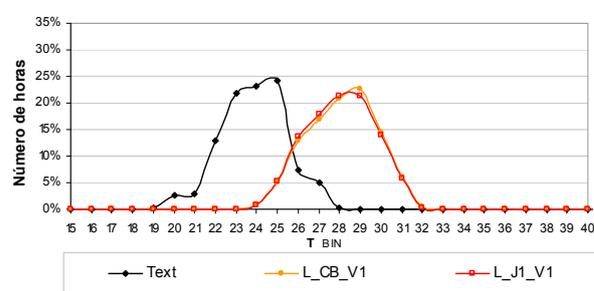


Figura 37. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Leste e 1TAH, com pequena melhoria no desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.

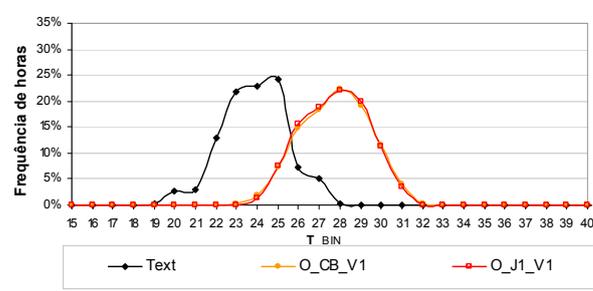


Figura 38. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com pequena melhoria no desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.

Tipo de sombreamento (S)

O sombreamento foi outro parâmetro que teve pouco impacto no desempenho térmico, quando modificado. Diferenças entre um caso sem sombreamento da abertura (S1) e outro 100% sombreado durante todo o dia (S4) apresentaram alterações mínimas no desempenho comparado aos outros parâmetros, com sobreposição de linhas nos gráficos. Comportamento

também explicado pela pouca influência da carga térmica proveniente da radiação solar no período de ocupação noturno analisado (Figura 39 e Figura 40).

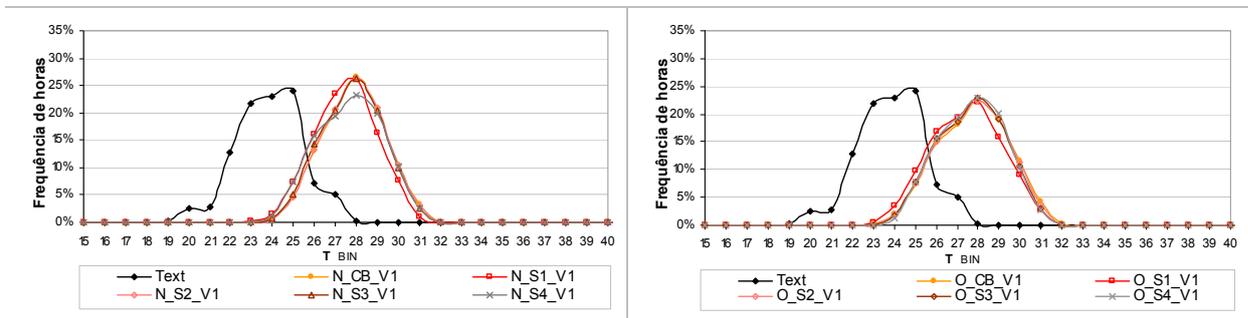


Figura 39. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com variações mínimas no desempenho térmico para diferentes tipos de sombreamento.

Figura 40. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com variações mínimas no desempenho térmico para diferentes tipos de sombreamento.

Ocupação (O)

Os resultados mostrados na Figura 41 e na Figura 42 representam as variações no desempenho térmico para a análise de sensibilidade para um caso sem ocupação (e sem qualquer carga térmica interna) e outro com a ocupação base.

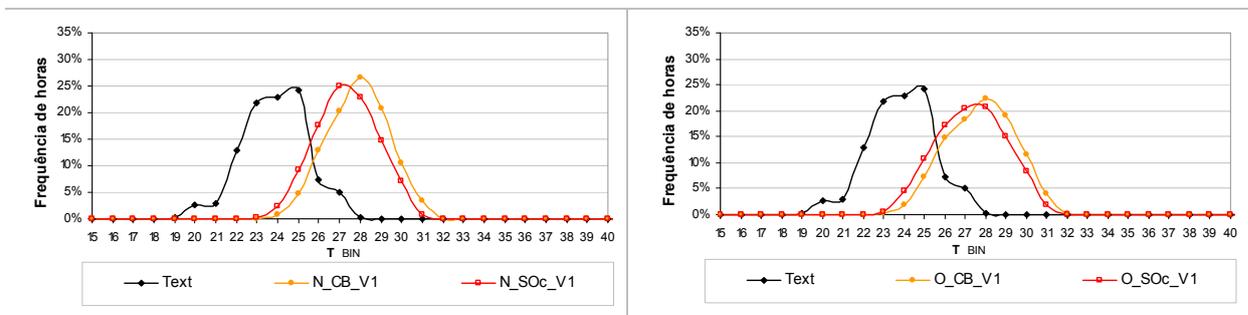


Figura 41. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOC).

Figura 42. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOC).

O impacto na melhoria do desempenho quando não consideradas as cargas térmicas de uso do ambiente é evidente. Como em todos os outros casos, as diferenças no desempenho entre os dois casos são menores para as trocas de ar de 250 TAH. Porém, a análise desse parâmetro demonstra a importância de considerar as cargas térmicas de ocupação em

simulações térmicas e seu impacto assemelha-se a variáveis como transmitância de paredes e coberta, considerando o modelo dos casos analisados.

Discussão dos resultados da primeira série de simulações - Sala

Os resultados das simulações combinatórias do caso base com ocupação sala são apresentados em quatro gráficos de frequência de temperatura interna do ar na Figura 43. Da mesma maneira estão correlacionadas as quatro orientações (N, S, L e O) e os três tipos de ventilação (V1, V50 e V250) onde também se observou o aumento de forma variável do desempenho térmico com aumento do valor das trocas de ar hora (TAH).

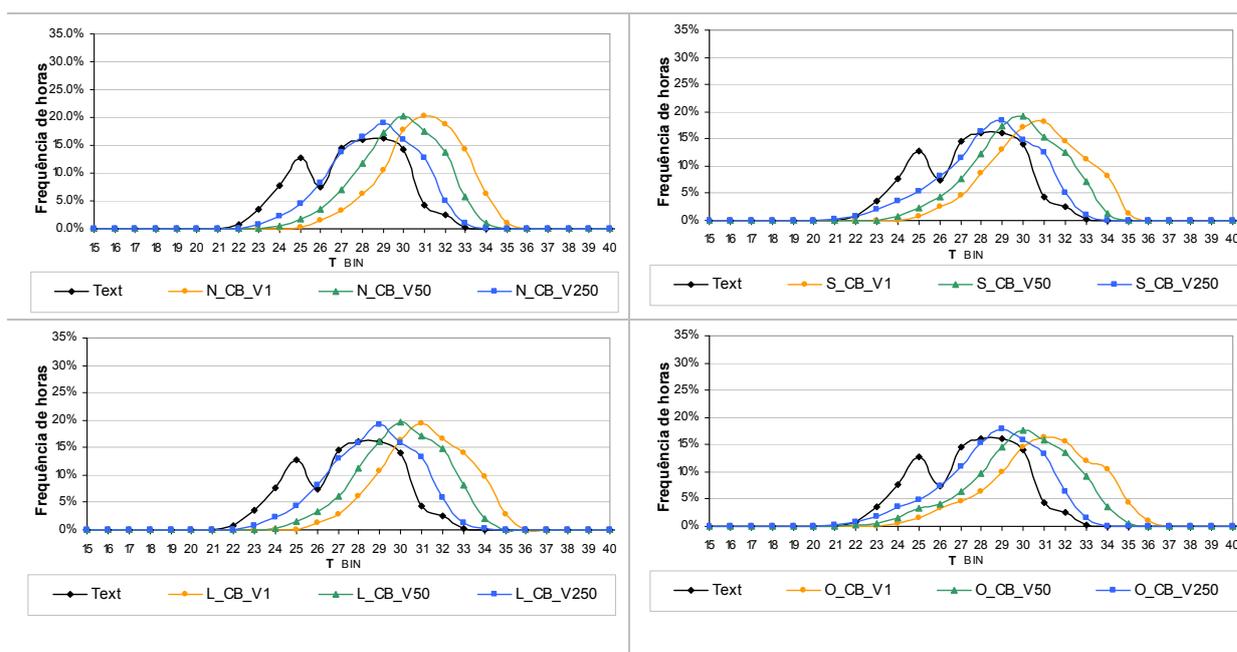


Figura 43. Gráficos da análise combinatória para as quatro orientações e três tipos de ventilação, para ocupação sala.

No entanto, em virtude do período de ocupação diurna, a variação no desempenho ocorreu de forma mais intensa sobre os extremos de temperatura do ar, principalmente quando usado um baixo valor troca de ar hora (1 TAH). Contrariamente à ocupação quarto, as altas taxas de trocas de ar hora (250 TAH) proporcionaram um desempenho térmico com

freqüência de temperatura interna próximo a externa. Essa variação no desempenho térmico tornou mais evidente a sensibilidade deste em relação às variáveis de projeto e ocupação.

Os resultados da análise de sensibilidade de cada variável de projeto e ocupação são discutidos nos itens abaixo. Nestes, foram selecionados apenas os gráficos que demonstram o comportamento térmico para situações extremas de desempenho térmico que serviram para alcance dos objetivos dessa etapa. A seção completa de gráficos dessa etapa encontra-se no APÊNDICE B – Gráficos da análise de sensibilidade para ocupação sala.

Transmitância da parede (P)

A análise de sensibilidade da transmitância das paredes apresentou poucas variações em relação ao desempenho térmico do caso base. Isso poderia ser justificado pelo beiral de 60cm e pela absorvância de parede de 0.20, adotados no caso base. Esses dois fatores em conjunto acabam por atenuar os efeitos da transmitância térmica que tem seu impacto praticamente eliminado pela alta refletividade e sombreamento da parede (Figura 44 e Figura 45). Uma análise que combinasse alterações da transmitância da parede com absorvância talvez pudesse trazer resultados mais evidentes de seu impacto.

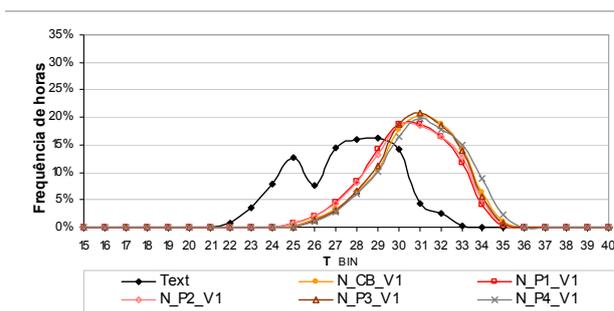


Figura 44. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com pequenas diferenças no desempenho para variações na transmitância térmica da parede.

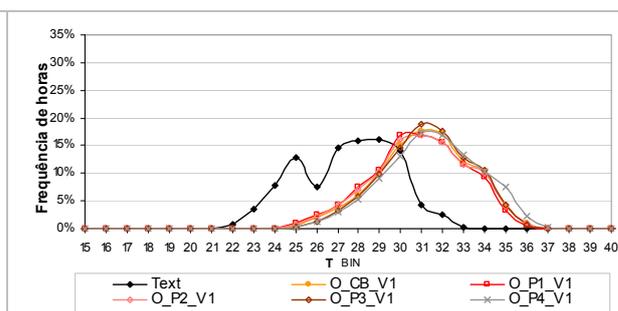


Figura 45. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com pequenas diferenças no desempenho para variações na transmitância térmica da parede.

Absortância da parede (Ap)

As variações no desempenho térmico pelo aumento da absortância da parede de 0,20 (caso base) para 0,50 (Ap0.5) e para 0,80 (Ap0.8) também foram quase imperceptíveis. Estima-se também que isto poderia ter ocorrido em virtude do sombreamento existente que minimiza o impacto da absortância, principalmente para orientações Norte e Sul (Figura 46). Para as orientações Leste e Oeste, as variações no desempenho são mais perceptíveis com a absortância do caso base, de 0.2, apresentando esta os melhores resultados (Figura 47).

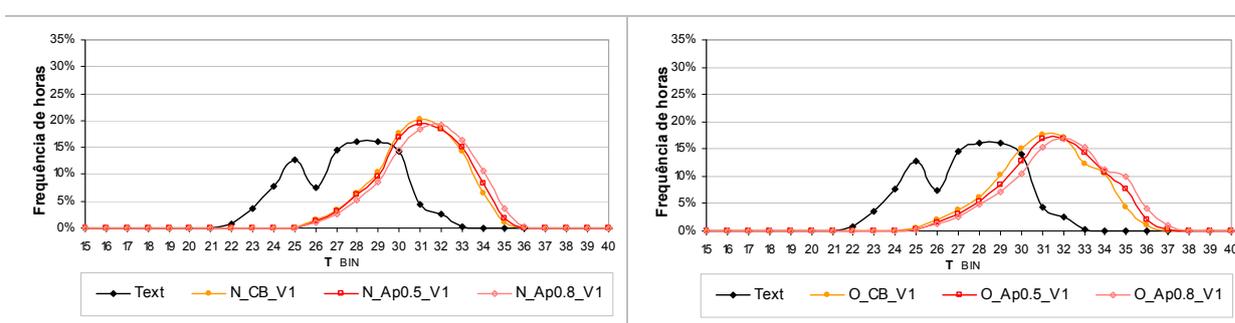


Figura 46. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com pequenas diferenças no desempenho para variações na absortância da parede.

Figura 47. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para absortância da parede menor de 0.2 (CB).

Transmitância da cobertura (C)

Na transmitância da cobertura foram observadas as maiores variações de desempenho térmico do ambiente de ocupação sala analisado. Aqui, o aumento da transmitância térmica para valores de 4,55 W/m².K (C1) elevou a temperatura interna a valores próximos à 40°C (Figura 48). Pela localização geográfica próxima à Linha do Equador, observou-se o impacto dos ganhos de calor que ocorrem pela cobertura e que valores baixos de transmitância de cobertura oferecem o melhor desempenho para uma ocupação diurna (C2) (Figura 49).

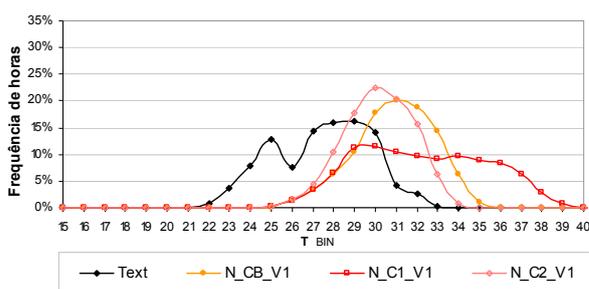


Figura 48. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com pior desempenho para transmitância de cobertura maior (C1), alcançando cerca de 40°C.

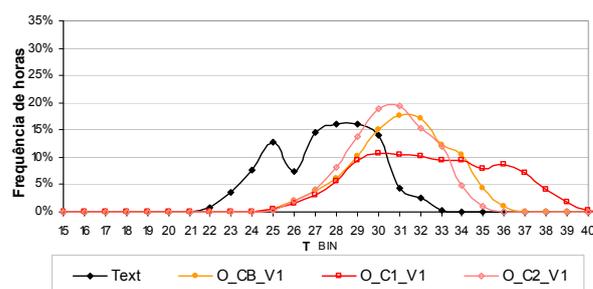


Figura 49. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para transmitância de cobertura menor (C2).

Absortância da cobertura (Ac)

Para a análise da variação da absortância de cobertura, o comportamento térmico do caso base também apresentou grandes variações. Uma alteração na absortância de 0,70 (CB) para uma de 0,20 (Ac0.2) gerou um aumento no desempenho térmico de forma mais intensa do que outras variáveis como transmitância e absortância de parede. Essas diferenças são maiores para uma renovação de ar de 1TAH e seu impacto é maior na redução dos extremos de temperatura interna (Figura 50 e Figura 51).

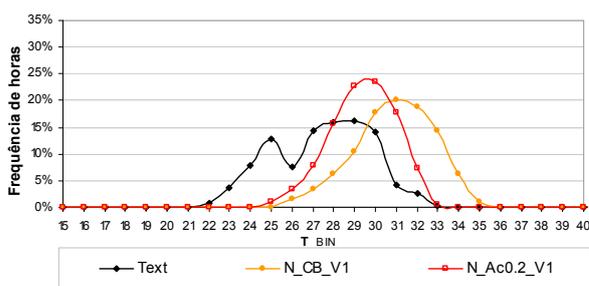


Figura 50. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para absortância de cobertura menor de 0.2 (C1).

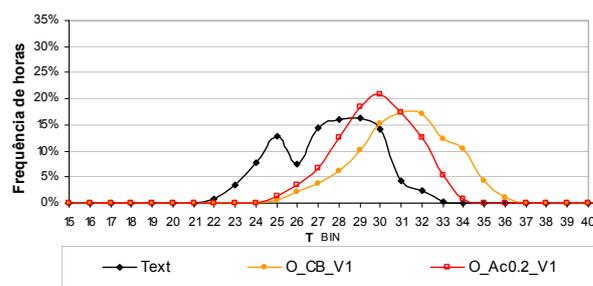


Figura 51. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para absortância de cobertura menor de 0.2 (C1).

Porcentagem de janela na fachada (PJF)

Embora a análise de sensibilidade da porcentagem de janela na fachada (PJF) ter apresentado maior impacto sobre o desempenho térmico de um ambiente de ocupação diurna,

nem sempre as variações aconteceram de forma progressiva de forma a reduzir o desempenho com o aumento da PJF (Figura 52). As maiores variações no desempenho aconteceram a as orientações Leste e Oeste, em virtude, principalmente, do elemento de sombreamento existente no caso base – beiral – que é mais eficiente para as orientações Norte e Sul. Contudo, a PJF do caso base, de 17%, teve o melhor desempenho (Figura 53).

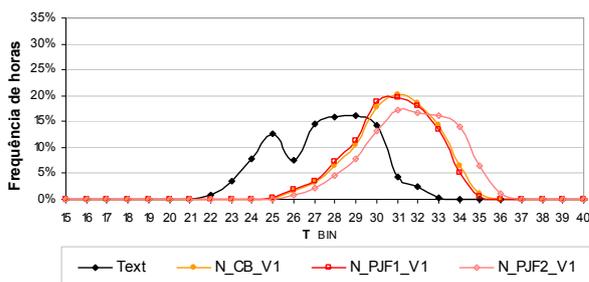


Figura 52. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com desempenho semelhante para CB (17%) e PJF1 (33%) e pior desempenho para PJF2 (49%).

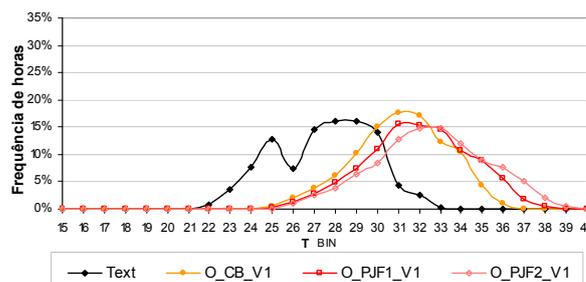


Figura 53. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para a PJF do caso base (CB) de 17%.

Tipo de janela (J)

A variação do tipo de janela apresentou as mesmas características de desempenho da variável porcentagem de janela na fachada (PJF). A alteração de um tipo de janela de vidro simples (CB) por um tipo de madeira (J1) promoveu o aumento de desempenho térmico dos casos proporcional nas quatro orientações (Figura 54 e Figura 55).

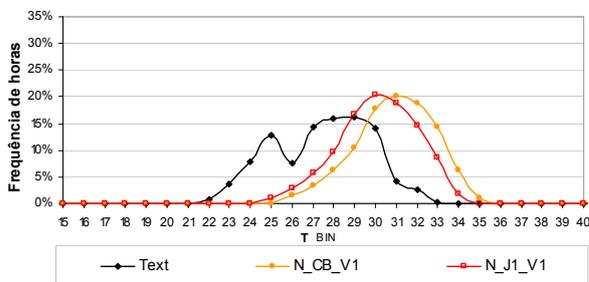


Figura 54. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.

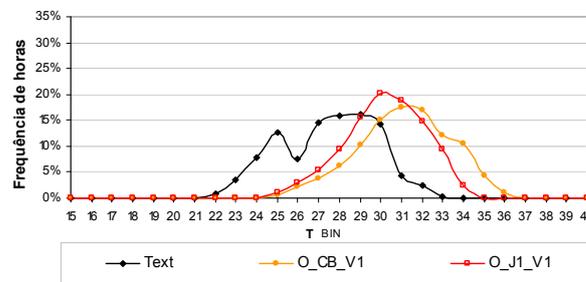


Figura 55. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com melhor desempenho para janela de madeira (J1), com menor valor de U e de fator solar.

Tipo de sombreamento (S)

Os resultados da análise de sensibilidade do tipo de sombreamento geraram poucas variações no desempenho térmico dos casos, sendo estas mais perceptíveis para aqueles com 1 TAH e orientação Leste ou Oeste (Figura 57). Credita-se isso também à presença do beiral no caso base, mas principalmente à baixa absorvância da parede que tem grande impacto em reduzir os ganhos de calor provenientes da radiação solar. Ainda assim os casos com maior porcentagem de sombreamento (S4) apresentaram melhores resultados em todas as orientações (Figura 56).

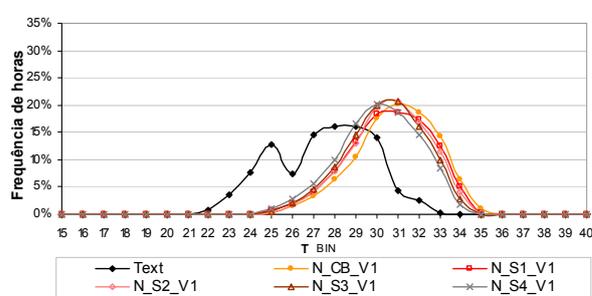


Figura 56. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com desempenho pouco melhor para S4.

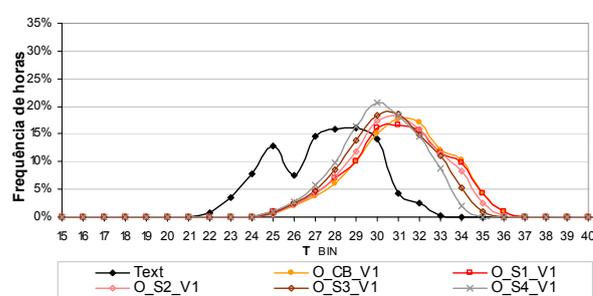


Figura 57. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Oeste e 1TAH, com destaque de melhor desempenho para S4 e pior desempenho para S1 (sem proteção solar).

Ocupação (O)

O desempenho térmico de um ambiente de ocupação diurna comparado à outro sem ocupação também apresentou variação no desempenho térmico do caso base. Em função das maiores cargas térmicas geradas pela radiação solar essas diferenças foram relativamente menores em relação à ocupação noturna, ou mesmo, em relação às orientações Leste e Oeste (Figura 59). Entretanto, evidencia-se também a importância da consideração das cargas térmicas internas de ocupação na simulação do desempenho térmico de edificações.

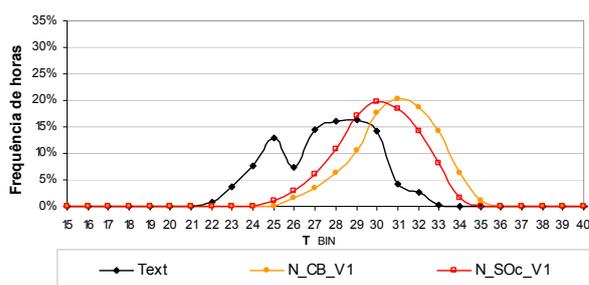


Figura 58. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOc).

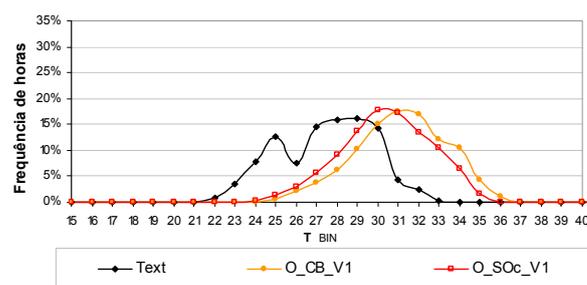


Figura 59. Gráfico de frequência de temperatura para orientação Norte e 1TAH, com melhor desempenho para o caso sem ocupação (SOc), porém com menor variação entre casos.

Identificação das variáveis de pior e melhor desempenho

Baseado nas análises dos gráficos desta etapa foi possível identificar as variáveis de pior e melhor desempenho térmico a fim de serem modelados e simulados na etapa seguinte dois casos que foram denominados: Pior Caso (PC) e Melhor Caso (MC). Assim, esses dois casos ficaram caracterizados pelos parâmetros da Tabela 1 para a ocupação quarto e da Tabela 2 para ocupação sala.

Tabela 1. Caracterização dos parâmetros analisados para modelagem do Pior e Melhor Caso para ocupação quarto.

Variável	Pior Caso (PC)	Melhor Caso (MC)
Transmitância de parede	P4 ($U=1.13 \text{ W/m}^2.\text{K}$)	P1 ($U=5.04 \text{ W/m}^2.\text{K}$)
Absortância de parede	Ap2 (0.8)	CB (0.2)
Transmitância de cobertura	CB ($U=3.6 \text{ W/m}^2.\text{K}$)	C1 ($4.55 \text{ W/m}^2.\text{K}$)
Absortância de cobertura	CB (0.7)	Ac1 (0.2)
Tipo de janela	CB (vidro simples)	J1 (madeira)
PJF	PJF2 (49%)	CB (17%)
Tipo de sombreamento	S1 (0% somb.)	S4 (100% somb.)

Tabela 2. Caracterização dos parâmetros analisados para modelagem do Pior e Melhor Caso para a ocupação sala.

Variável	Pior Caso (PC)	Melhor Caso (MC)
Transmitância de parede	P1 (U=5.04 W/m ² .K)	P4 (U=1.13 W/m ² .K)
Absortância de parede	Ap2 (0.8)	CB (0.2)
Transmitância de cobertura	C1 (U=4.55 W/m ² .K)	C2 (U=0.62 W/m ² .K)
Absortância de cobertura	CB (0.7)	Ac1 (0.2)
Tipo de janela	CB (madeira)	J1 (madeira)
PJF	PJF2 (49%)	CB (17%)
Tipo de sombreamento	S1 (0% somb.)	S4 (100% somb.)

Esses modelos representam extremos em relação à decisão projetual, considerando apenas os parâmetros analisados, que podem ser entendidos como um caso em que são tomadas as piores decisões e outro em que são tomadas as melhores decisões em relação ao desempenho térmico, respectivamente.

SEGUNDA SÉRIE DE SIMULAÇÕES: IDENTIFICAÇÃO DO ESPECTRO DE DESEMPENHO TÉRMICO

A partir dos resultados encontrados na primeira série de simulações, foram modelados dois casos: Pior Caso (PC) e Melhor Caso (MC) que combinam variáveis de forma a identificar os limites de pior e melhor desempenho térmico, respectivamente. Com isso, uma segunda série de simulações foi realizada através de uma nova análise combinatória para os dois casos extremos com os três tipos de ventilação e as quatro orientações, considerando apenas a ocupação base do quarto e sala, durante as horas de ocupação. Foram simulados 48 casos, sendo 24 casos para cada ocupação (Figura 60).

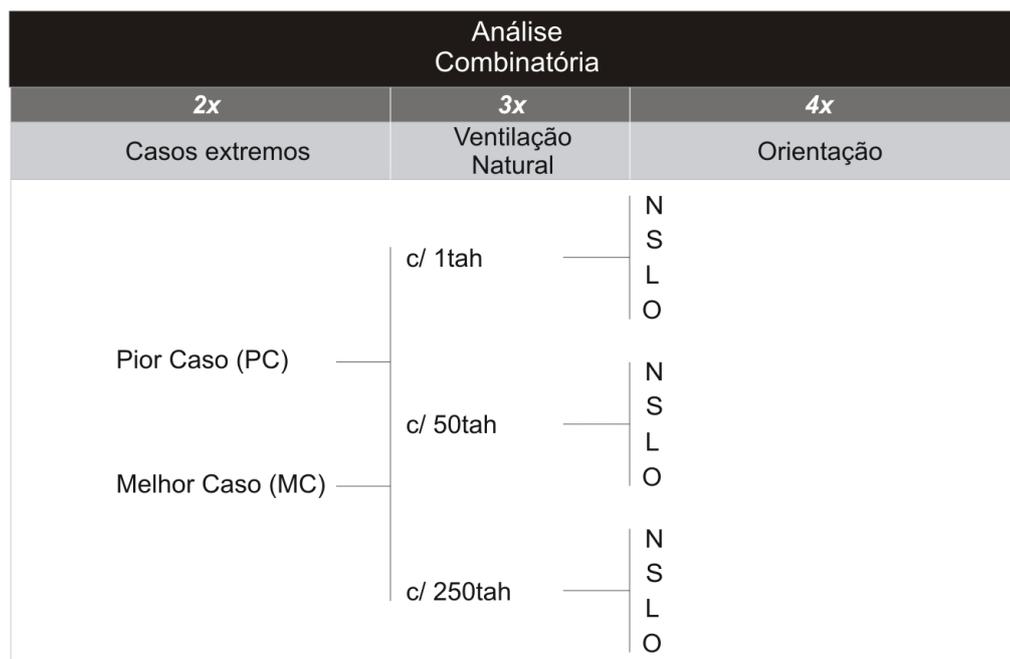


Figura 60. Diagrama da segunda série de simulações considerando o pior e melhor caso, combinados aos três tipos de ventilação e às quatro orientações.

Os resultados dessas simulações foram agrupados em gráficos de frequência de temperatura que podem ser comparados, apenas como referência, aos resultados das simulações para o caso base, de acordo com o tipo de ventilação e orientação. Abaixo de cada gráfico de frequência de temperatura foram apresentados também gráficos de colunas mostrando a frequência ou número de horas em que a temperatura interna encontrou-se em cada faixa de desempenho térmico.

Os gráficos resultantes dessa segunda série de simulações podem ser encontrados no APÊNDICE C – Gráficos com resultados do pior e melhor caso para a ocupação quarto e sala. Os dados desses gráficos serviram de base para o cálculo do Índice de Desempenho Térmico Resultante (IDTR) para a ocupação quarto e sala a fim de desenvolver o sistema de classificação que busca estimar o impacto da decisão arquitetônica em uma gama de soluções para a tipologia analisada.

PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO

O desenvolvimento do sistema de classificação se fundamenta na identificação do espectro de desempenho térmico (EDT) que reflete a diferença de desempenho entre o pior e melhor caso tomando como referência o desempenho térmico calculado através do IDTR – Índice de Desempenho Térmico Resultante⁹. Esse espectro está representado pela variação de desempenho térmico dentro de um universo limitado pelo pior e melhor caso, considerando os tipo de ventilação e a orientação.

Para a ocupação quarto, observou-se que o desempenho térmico do pior e melhor caso para as quatro orientações e as três taxas de ventilação de 1, 50 e 250 TAH, (Figura 61, Figura 62 e Figura 63, respectivamente) são muito próximos, caracterizando um estreito EDT. Destaca-se que as variações no desempenho térmico sempre foram mais acentuadas para a mais baixa taxa de ventilação (1 TAH) para os dois casos.

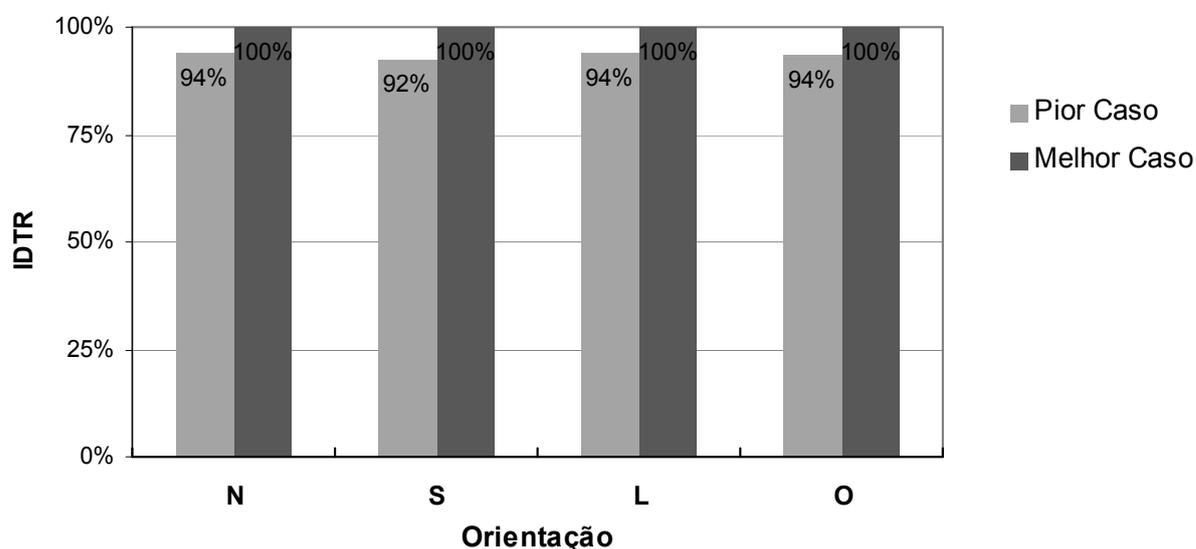


Figura 61. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 1 TAH para ocupação quarto.

⁹ Ver item 2.2 Critério de conforto térmico.

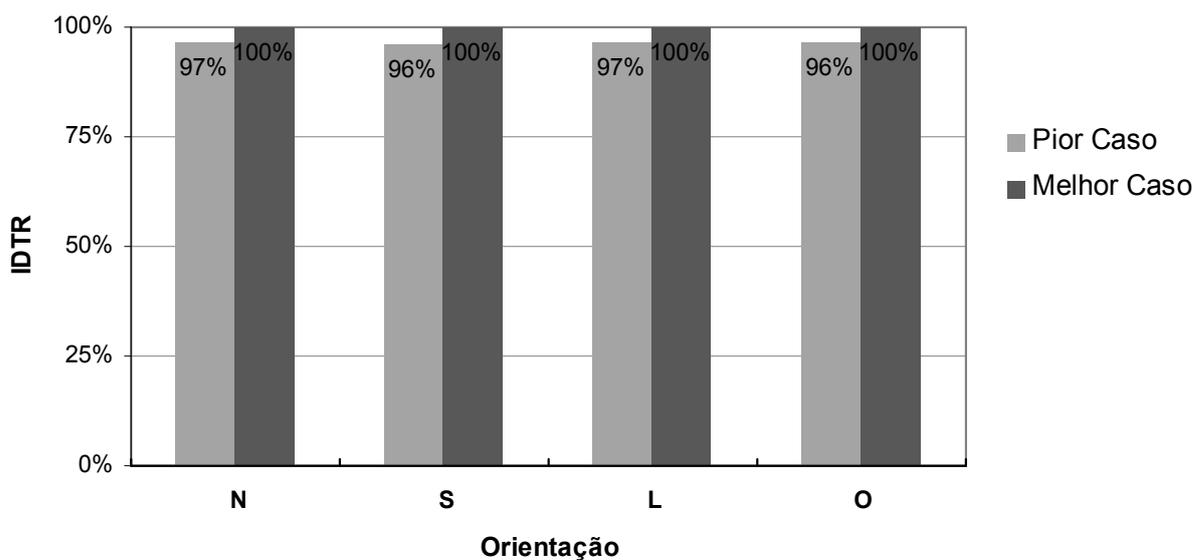


Figura 62. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 50 TAH para ocupação quarto.

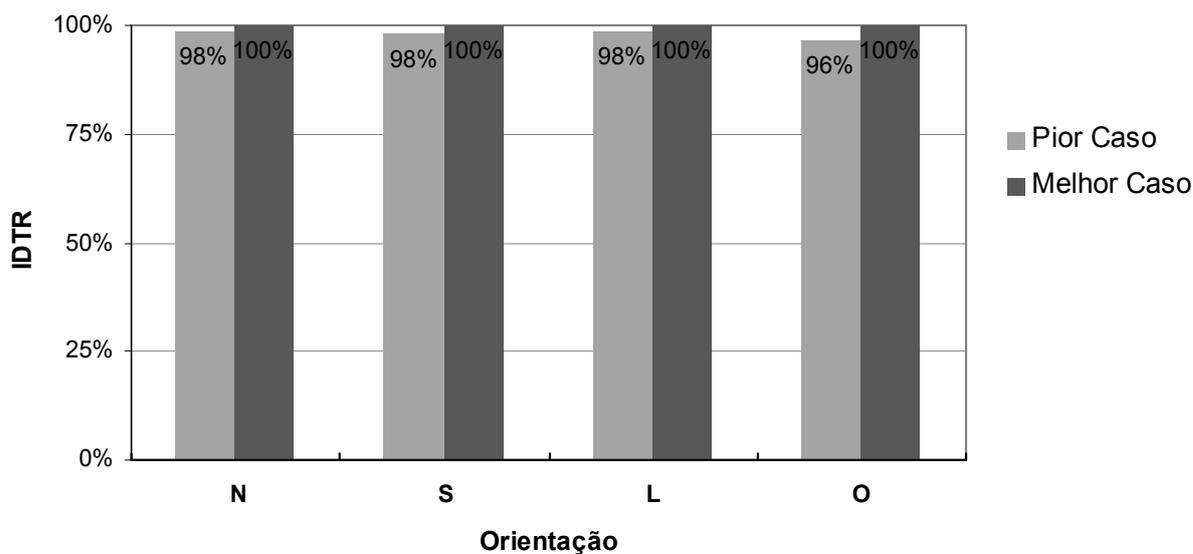


Figura 63. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 250 TAH para ocupação quarto.

Esse comportamento indica que as variáveis de projeto tiveram pouca influência sobre o desempenho térmico do ambiente, fato observado também na análise de sensibilidade. Nesse caso, para a ocupação quarto, notou-se que as condições do clima produzem as condições ambientais do espaço interno, desde que minimamente ventilado, sendo posto em segundo plano a influência da envoltória. Em virtude disso, as análises do EDT para a ocupação quarto

não foram utilizados no sentido de desenvolver um sistema de classificação já que essa situação não se reflete sobre a avaliação da decisão arquitetônica.

Para a ocupação sala, as variações no desempenho térmico foram mais sensíveis às configurações do pior e melhor caso, conforme Figura 64, Figura 65 e Figura 66, que mostram o IDTR destes para as quatro orientações e taxas de ventilação de 1, 50 e 250 TAH, respectivamente.

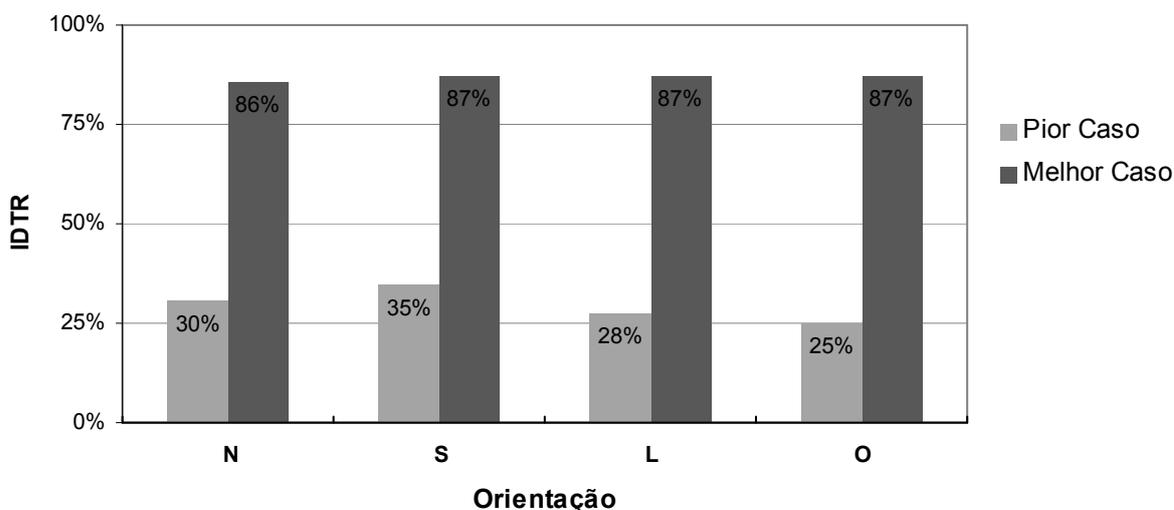


Figura 64. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 1 TAH para ocupação sala.

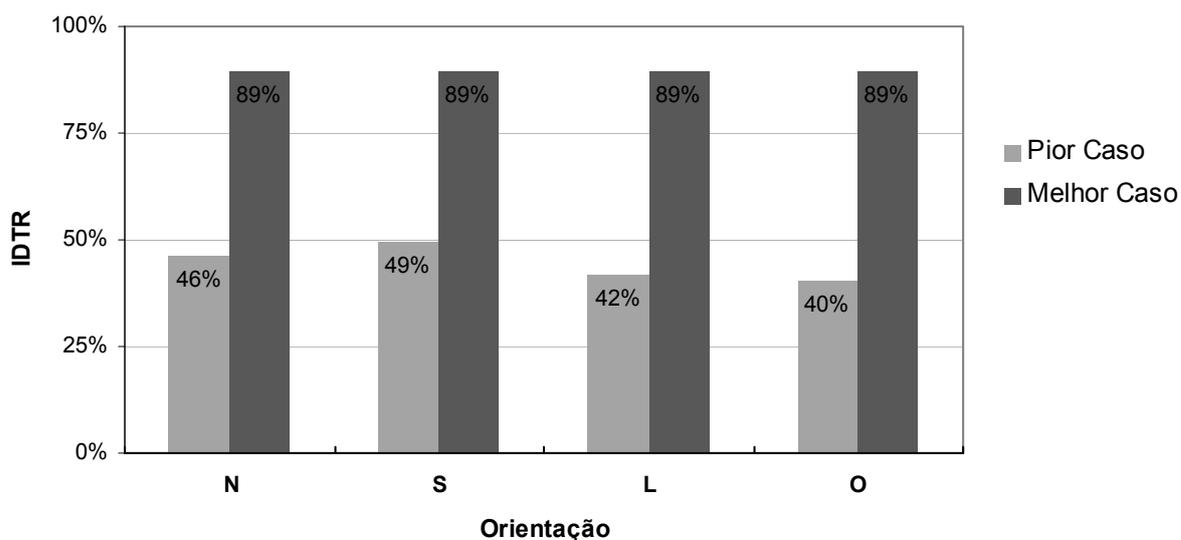


Figura 65. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 50 TAH para ocupação sala.

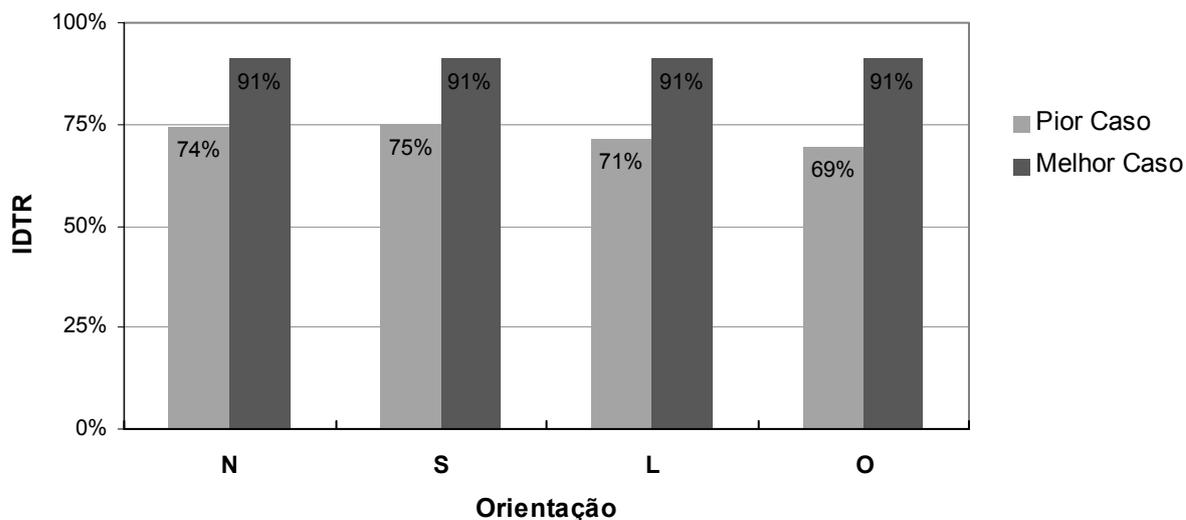


Figura 66. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 250 TAH para ocupação sala.

Os resultados demonstram a influência da radiação solar sobre o desempenho térmico do ambiente que gerou maiores variações entre o desempenho térmico do pior e melhor caso, permitindo-nos observar que a orientação do ambiente implica em diferentes níveis de desempenho térmico, sendo a orientação Norte a que apresentou melhor desempenho e orientação Oeste o pior desempenho, para os três tipos de ventilação.

Para o melhor caso (MC), a influência das taxas de ventilação foi reduzida, evidenciando que o desempenho térmico de um caso “bem resolvido” é menos dependente da ventilação. Portanto, a decisão arquitetônica acaba por ter maior relevância no sentido da eficiência ou melhoria do desempenho térmico em casos de ocupação diurna.

As taxas de ventilação diminuem as variações entre o melhor e pior caso quando são aumentadas (de 1→50 e de 50→250 TAH). Esse comportamento mascara o desempenho térmico de um ambiente “mal resolvido” que pode ter um bom desempenho na presença de taxas de ventilação elevadas, relegando a um segundo plano as variáveis de projeto. Outro aspecto confirmado foi que as variáveis de projeto, representadas na envoltória, apresentaram

maior importância devido ao controle da radiação solar. Deste modo, o impacto foi maior para condições de pouca ventilação (1 TAH) e uma orientação que privilegia cargas térmicas mais intensas, como a Oeste.

Portanto, o EDT encontrado para orientação Oeste e com 1 TAH foi adotado como critério para o desenvolvimento de um sistema de classificação do desempenho térmico de residências unifamiliares naturalmente ventiladas em clima quente e úmido que considere o impacto da radiação solar. A escolha da orientação Oeste se deve a maior amplitude de desempenho encontrada, o que englobaria as outras orientações. E, a escolha do espectro de desempenho com 1 TAH ocorre pelo destaque à influência da decisão arquitetônica, o que não aconteceria se fosse escolhido o espectro das taxas de ventilação de 50 e 250 TAH, que reduz o impacto das variáveis de projeto.

A Tabela 3 mostra os valores do espectro de desempenho térmico (EDT) para a ocupação sala com 1 TAH e para as quatro orientações. Nesta, destaca-se o EDT de 62% resultante da maior diferença entre o IDTR do pior e melhor para orientação Oeste e 1 TAH.

Tabela 3. IDTR do pior e melhor caso para as quatro orientações e ventilação de 1 TAH, para ocupação sala e EDT para cada orientação.

Orientação	N	S	L	O
IDTR - PC	30	35	28	25
IDTR - MC	86	87	87	87
Espectro de desempenho térmico (EDT)	56	52	59	62

Por uma questão de simplificação, o sistema de classificação baseou-se na dedução de valores de referência do IDTR que representam a divisão em cinco intervalos iguais do espectro de desempenho de 62%. À cada intervalo foi associada uma classificação em número de estrelas que varia de 1 a 5, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Sistema de classificação em estrelas com valores de referência para cada desempenho, de acordo com o IDTR.

Valor de referência do IDTR			Classificação
74.6	até	87	★ ★ ★ ★ ★
62.2	até	74.6	★ ★ ★ ★
49.8	até	62.2	★ ★ ★
37.4	até	49.8	★ ★
25	até	37.4	★

APLICAÇÃO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO E COMPARAÇÃO COM MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO EXISTENTES

O sistema de classificação foi aplicado a um dos modelos simulados para exemplificar as vantagens e desvantagens em relação a outras técnicas de análise. O caso escolhido envolveu a análise de sensibilidade da transmitância da cobertura para a ocupação sala, com 1 TAH e orientação Norte. Nessa análise o caso base tem a transmitância da cobertura (CB) alterada para C1 e para C2, permanecendo todas as outras variáveis fixas. A Figura 67 mostra os valores de transmitância térmica usados.

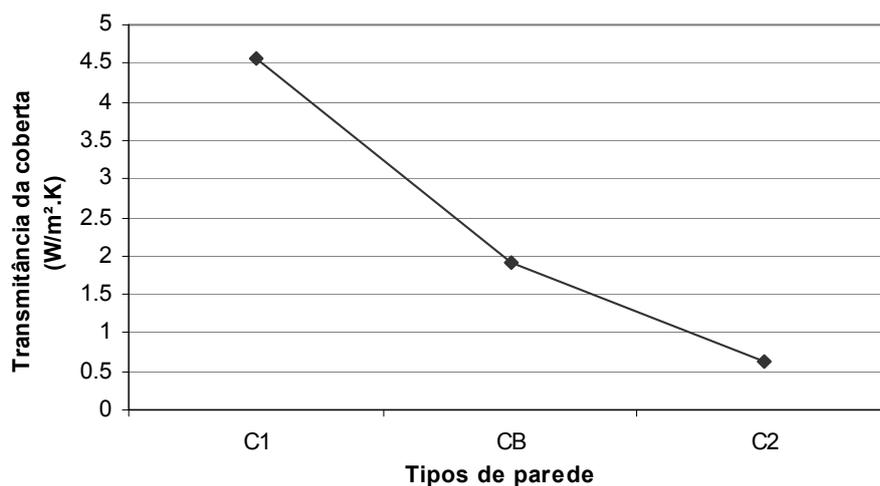


Figura 67. Valores usados na análise de sensibilidade da transmitância da cobertura.

Os resultados analisados através de gráficos de frequência de temperatura (Figura 68) têm como vantagem a visualização dos resultados, porém a quantificação do desempenho é

limitada. Os resultados para o caso escolhido mostram uma grande variação na frequência de temperatura ou de desempenho, entre os três de casos. O sistema de transmitância maior (C1) apresentou o pior desempenho, tendo como consequência temperaturas internas elevadas, entre 36-40°C.

Desta forma, foi possível avaliar a magnitude do desempenho através da distribuição da temperatura e verificação de seus extremos, porém este não responde, em todas as situações, a questão mais básica do projetista: “qual modelo é o melhor?” Nesse sentido, outros métodos podem ser usados, como: contagem de horas de desconforto e graus-hora de desconforto.

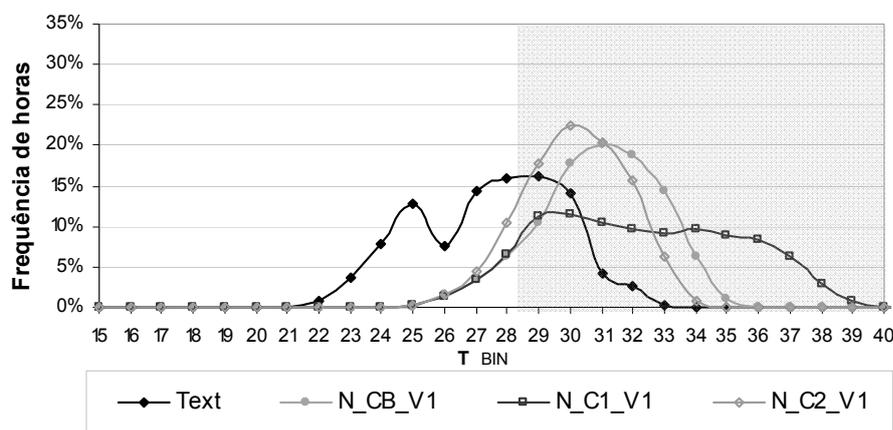


Figura 68. Gráfico de frequência de temperaturas mostrando os resultados da análise de sensibilidade da transmitância da cobertura para ocupação sala e demarcação da zona de desconforto ao calor.

Para o mesmo caso foi realizada a contagem de horas de desconforto em termos percentuais em relação às horas totais de ocupação. A partir do modelo adaptativo adotado anteriormente, foram consideradas apenas as temperaturas acima do limite superior da zona de conforto, ou seja, horas de desconforto ao calor usando como limite superior da zona de conforto as temperaturas de neutralidade de cada mês somadas 2,5°C. Esse limite da zona é de cerca de 28,3°C e destaca-se com uma mancha na Figura 68. Os resultados são mostrados na Figura 69.

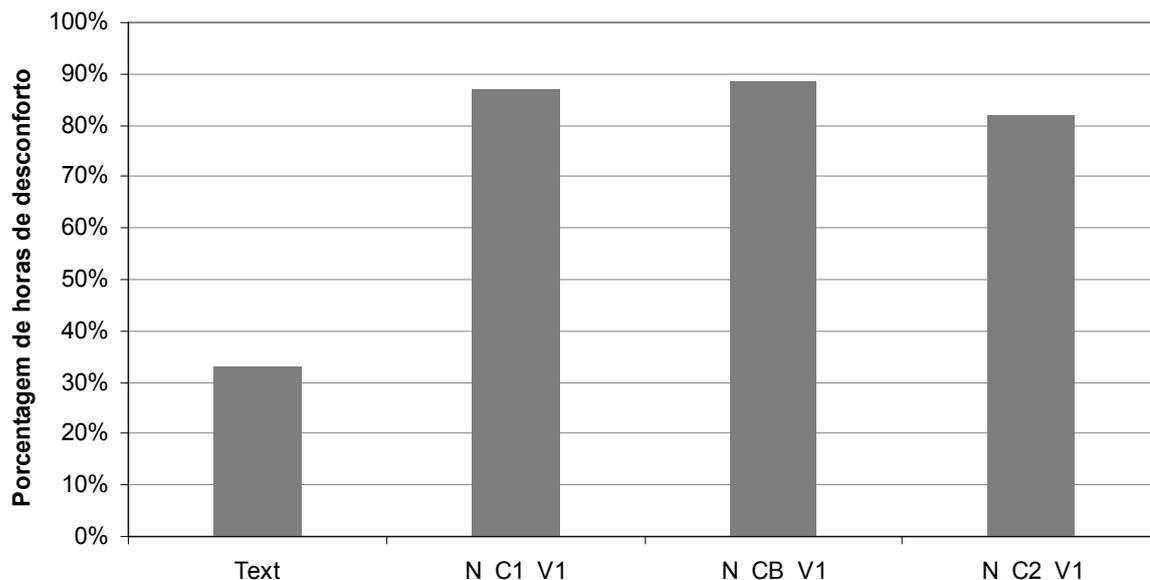


Figura 69. Resultados da contagem de horas de desconforto em porcentagem para os três casos simulados, durante o período de ocupação.

Observou-se que há uma relativa equivalência no desempenho térmico dos três casos, de cerca de 85% das horas de desconforto apesar de possuírem sistemas construtivos com propriedades termo-físicas bastante diferentes. Na análise através da frequência de temperatura estes apresentaram desempenhos completamente distintos. Tal situação ratifica as críticas feitas anteriormente de que a técnicas de contagem de horas de desconforto acabam por não identificar a intensidade desse desconforto no ambiente, permitindo que casos com diferentes soluções de projeto sejam considerados com desempenho semelhante apesar das grandes diferenças de temperatura interna.

A avaliação do desempenho térmico através da contagem dos graus-hora apresentou uma resposta mais adequada para enfatizar a intensidade do desconforto. Na Figura 70 são apresentados os totais de graus-hora de desconforto para os três casos simulados. Notou-se que a extensão na diferença de desempenho térmico entre os casos evidencia suas diferenças quanto às propriedades termo-físicas de seus componentes e, conseqüentemente, quanto à magnitude do desempenho desses sistemas. No entanto, a abordagem de análise através de graus-hora é menos intuitiva para ser assimilada do que a anterior.

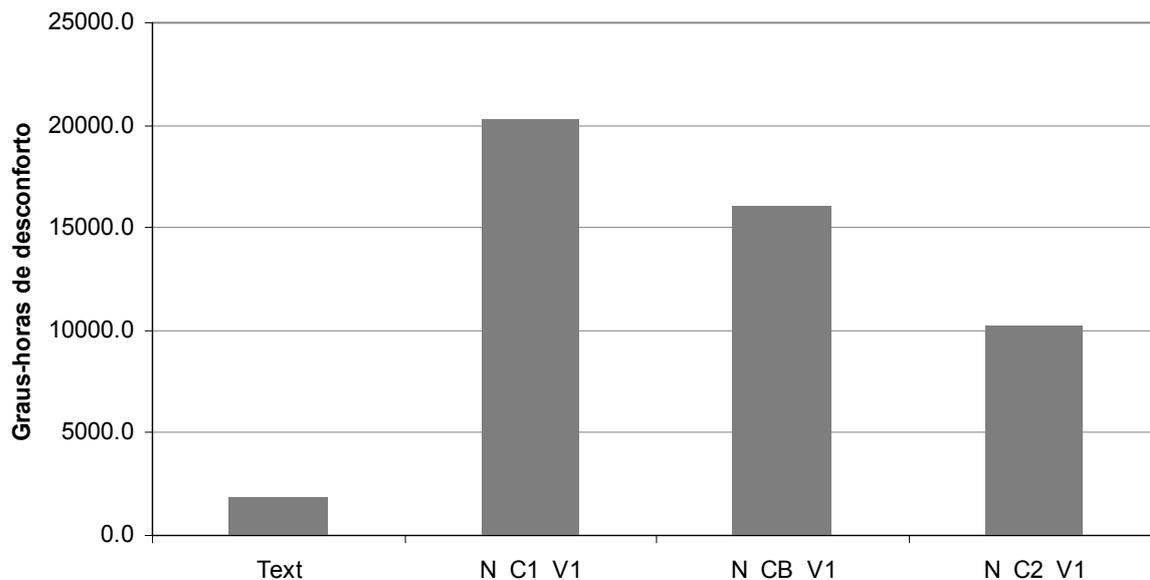


Figura 70. Resultados de graus-horas de desconforto para os três casos simulados.

O uso do sistema IDTR significou um passo além da contagem de graus-hora de desconforto, pois foi desenvolvido a partir da identificação de um espectro de desempenho térmico associado aos sistemas construtivos e ao clima. A Figura 71 mostra o EDT com valores entre 25% e 87% que, divididos em cinco partes iguais, têm associado a cada faixa uma categoria de classificação em estrelas. Para cada um dos três casos foi calculado o IDTR, sendo comparados seus valores no mesmo gráfico.

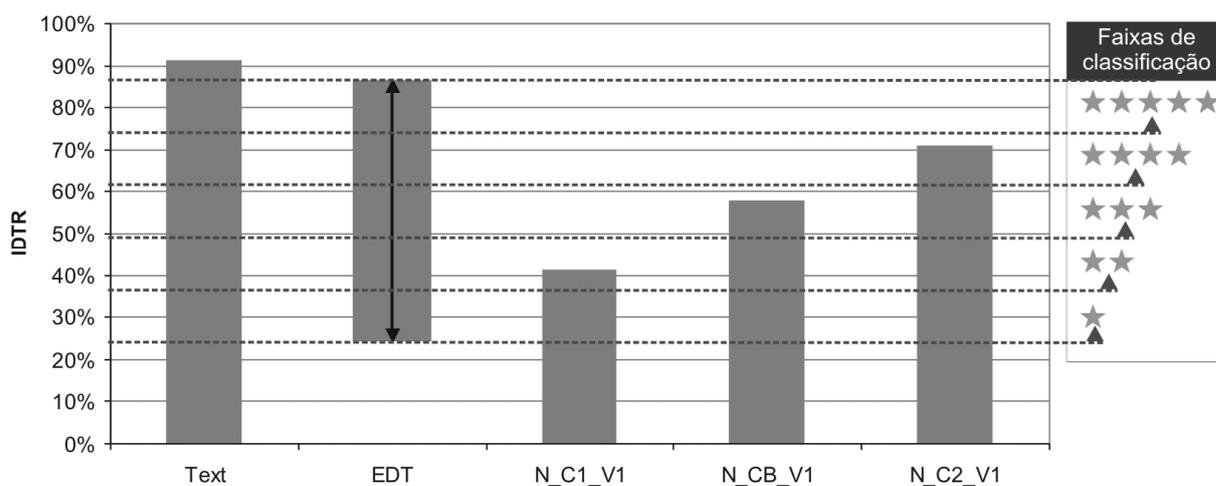


Figura 71. Resultados avaliados pelo IDTR e conseqüente classificação de cada um dos três casos simulados, em estrelas, durante o período de ocupação, apresentando também sua relação com o Espectro de Desempenho Térmico (EDT).

Os resultados mostraram as diferenças de desempenho térmico dos três casos dentro de uma faixa de possível de variações de desempenho térmico que podem ser alcançadas através da decisão projetual. Desse modo, a classificação de cada caso foi ilustrada em 2, 3 e 4 estrelas para os casos C1, CB e C2, respectivamente (Figura 71). O uso desse sistema de classificação privilegia a decisão projetual e se configurou como uma combinação entre os métodos de contagem de horas de desconforto e de graus-horas de desconforto, indicando a intensidade desse desconforto através dos pesos para cada faixa de desempenho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo desenvolver um método de avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares para o clima quente úmido, usando critério de desempenho térmico a temperatura do ar interno. O desenvolvimento desse método seguiu o próprio desenvolvimento da pesquisa. Assim, as conclusões e considerações finais foram agrupadas de acordo com as etapas realizadas.

Quanto à simulação do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas

A simulação de edificações naturalmente ventiladas ainda é uma tarefa complexa em virtude das limitações dos programas de simulação, da complexidade do fenômeno de escoamento do ar, da influência do entorno e dos registros climáticos. O método de trocas de ar por hora certamente compromete os resultados e por isso não se recomenda seu uso para análises específicas.

Sua aplicação na pesquisa se justificou pela viabilização do estudo comparativo entre o impacto das decisões. Para amenizar essas limitações, foram adotados três tipos de ventilação: uma mais leve de 1 TAH que possibilitaria apenas a renovação de ar interna, mantendo a qualidade do ar; uma intermediária de 50 TAH que responderia pela retirada de calor do ambiente e uma de 250 TAH que além de promover o resfriamento da edificação, de forma hipotética, resultaria na perda de calor por convecção de um ocupante no ambiente simulado. A adoção dessas variações foi empreendida justamente para

compreender melhor seu impacto sobre desempenho térmico, associado também à decisão projetual.

Considerando as incertezas contidas também em outros métodos de ventilação natural em simulações, o uso do método de trocas de ar por hora foi satisfatório no sentido em que propiciou a realização de centenas de simulações e ainda assim, possibilitou observar o impacto relativo dos três tipos de ventilação natural para cada variável analisada. As análises também mostraram que a ventilação natural pode ter um forte impacto sobre o desempenho térmico das edificações, devendo sua configuração ser adequado ao estudo para que não sejam comprometidas as influências da decisão projetual de tal forma que um projeto “mal resolvido” em termos de desempenho térmico possa se apoiar nos ventos para justificar soluções de projeto inadequadas ao clima, pois não há garantias da eficiência da edificação em virtude das variações de disponibilidade desses, principalmente em zonas urbanas mais adensadas.

Análogo a questão da ventilação natural, a ocupação mostrou-se como uma variável decisiva na avaliação do desempenho térmico, tanto pela questão das cargas térmicas internas a serem contabilizadas como pela rotina de uso que pode influenciar a avaliação ou a elaboração de recomendações de projeto que considerem o desempenho térmico. O desempenho térmico dos casos simulados para ocupação quarto e sala tiveram comportamentos distintos, sendo muito mais relevantes no segundo as variáveis relacionadas às decisões de projeto.

Assim, salienta-se a necessidade de considerar as rotinas de ocupação em simulações onde a avaliação deve ser feita no momento em que as pessoas estão no ambiente. De forma mais complexa, a definição dessas ocupações típicas para edificações naturalmente ventiladas apresenta imprecisões quando torna-se necessário estimar a operação de janelas

e outras aberturas, de elementos de sombreamento operacionais internos ou externos em função de questões como segurança, privacidade, entre outros.

Outro aspecto é a discussão da complexidade em analisar casos distintos com ocupações variadas ou mesmo rotinas de uso de 24 horas, onde o comportamento térmico pode ser completamente diferente ou indiferente à decisão projetual. Para isso, seriam necessários estudos que procurassem estabelecer rotinas típicas de ocupação de residências brasileiras e métodos para normalizar essas ocupações, por exemplo, por intensidade de uso, por densidade de ocupação, por aspectos sócio-culturais e econômicos (renda familiar, saturação de equipamentos, rotinas de ocupação...) a fim de permitir análises comparativas em simulações.

Quanto aos índices de conforto térmico e critérios de avaliação

A escolha de um índice de conforto baseado no modelo adaptativo foi justificado na revisão da literatura científica através de estudos que vem sendo realizados e que lhes conferem maiores qualidades do que outros índices. A escolha particular de um índice para avaliação de edificações nos climas brasileiros, especificamente em Natal-RN, ainda necessita de estudos que considerem os aspectos tanto climáticos quanto sócio-culturais, relacionados à ocupação de residências unifamiliares.

Destaca-se que o estudo não explorou a influência da temperatura radiante média porque os modelos de predição adotados da literatura ainda não exploram essa variável. Entretanto, sua influência pode ser decisiva na sensação do conforto térmico. A variação na temperatura de conforto em cada mês, inerente aos modelos adaptativos, torna complexa muitas das análises, podendo ser motivo inclusive de sua pouca disseminação em pesquisas no Brasil.

Os critérios de avaliação existentes como o de contagem de horas de desconforto e graus-horas de desconforto foram de grande relevância para o desenvolvimento da pesquisa, pois serviram de base para o desenvolvimento do sistema de classificação proposto. Porém, é notória a necessidade de revisão ou ajustes desses critérios para a avaliação de edificações residenciais naturalmente ventiladas em climas brasileiros.

Quanto ao sistema de classificação

O sistema de classificação foi desenvolvido através do desenvolvimento de um índice de avaliação de desempenho denominado de Índice de Desempenho Térmico Resultante (IDTR). Apesar das considerações hipotéticas envolvidas, o sistema conseguiu incorporar elementos dos métodos de avaliação existentes e concentrar-se na avaliação das variáveis de projeto.

A sua aplicação sobre o projeto arquitetônico dependeria de ferramentas que pudessem automatizar o processo, porém seu entendimento, baseado em um sistema convencional, já conhecido pelo menos no Brasil para classificar o desempenho energético de aparelhos eletrodomésticos, pode contribuir para divulgação dos conceitos relacionados à arquitetura bioclimática, conseqüentemente, aprimorando a eficiência e qualidade das edificações brasileiras.

Estabelecer qual o limite máximo ou mínimo para classificação não foi objetivo dessa dissertação. No entanto, limites mínimos (1 ou 2 estrelas) podem ser estabelecidos a fim de evitar práticas extremas inadequadas ao clima.

Além disso, considera-se que o critério adotado na definição dos intervalos de referência para classificação deveria usar valores representativos obtidos a partir de uma análise estatística do desempenho das práticas convencionais ou mesmo da relação custo-benefício das configurações arquitetônicas. Como essas questões fogem ao escopo dessa

pesquisa devido à complexidade, recomenda-se o desenvolvimento do assunto em futuros trabalhos.

Questões complementares

Além dos objetivos principais, a análise dos resultados das simulações realizadas permitiu a elaboração de recomendações de projeto, de forma qualitativa, para edificações residenciais naturalmente ventiladas em clima quente e úmido. Recomendações estas que visam prevenir os ganhos de calor e maximizar suas perdas.

A prevenção dos ganhos de calor destacou-se nas simulações através das variáveis de projeto, representadas pelos elementos da envoltória, e estão diretamente ligadas à decisão projetual. As recomendações de projeto provenientes dessas análises são semelhantes àquelas encontradas na revisão da literatura, porém se diferenciando em alguns casos de acordo com a ocupação.

O incremento nas perdas de calor pode ocorrer pelo movimento do ar no interior e exterior da edificação e pela eliminação ou redução de fontes de calor interno, como pessoas, eletrodomésticos e equipamento de condicionamento. Esse comportamento foi observado nas simulações com o aumento das taxas de ventilação natural e pela simulação de um caso sem ocupação que geraram resultados de melhor desempenho térmico.

Assim, a representatividade das recomendações aqui propostas se resume aos casos semelhantes aos simulados na pesquisa e são direcionadas para cada ocupação, especificadas abaixo:

Quarto

- Pouca influência de parâmetros como transmitância térmica e absorvância de paredes, devendo ser considerada a construção desse sistema com materiais leves,

de baixa capacidade térmica, e com cores claras a fim de reduzir os ganhos de calor durante o dia e facilitar as perdas de calor no período noturno;

- A cobertura deve ter cores claras, porém sua transmitância térmica pode ser alta – no caso de ocupação noturna – para acelerar as perdas de calor interno para a abóbada celeste durante a noite.
- As variáveis relacionadas à janela também tiveram pouca influência sobre o desempenho térmico, porém deve ser dada preferência às aberturas maiores, desde que sombreadas, para aumentar as trocas de ar e reduzir os ganhos de calor durante o dia, respectivamente. Isto pode ser feito pelo uso de esquadrias que permitam a passagem do vento, como venezianas de madeira, e que não possuam fechamentos transparentes.
- A orientação Norte é a que apresenta o melhor desempenho térmico para todos os casos simulados.

Sala

- O uso de paredes com baixa transmitância e cores claras implica em melhor desempenho térmico. No entanto, estes não foram examinados detalhadamente em decorrência da existência de um elemento de sombreamento no caso base (beiral) e de sua absorvância baixa de 0.2 que acabou por mascarar o impacto dessas variáveis;
- A transmitância e absorvância de cobertura foram as variáveis de maior impacto sobre o desempenho térmico. O uso de coberturas com baixa transmitância e superfícies claras é a opção mais viável para evitar ganhos excessivos de calor na edificação;

- A redução da porcentagem de janela na fachada (PJF) também leva a um melhor desempenho da edificação. Contudo, as aberturas são fontes de iluminação natural e ventilação, devendo ser considerado o seu dimensionamento;
- Nas janelas deve-se evitar o uso de fechamentos transparentes, como o vidro, e orientações à Leste ou Oeste, onde o sombreamento se torna mais complexo.
- O sombreamento da janela deve ser amplo, buscando taxas de 100%, principalmente à Norte e Sul. Nesse caso, estudos de iluminação natural também devem ser feitos para estimar uma opção que associe o conforto térmico à iluminação natural.
- A orientação Norte foi a que teve melhor desempenho seguido da Sul, Leste e Oeste.

Quanto às limitações da pesquisa e estudos futuros

Apesar do crescente desenvolvimento de estudos em conforto térmico, de simulação de edificações e na avaliação de desempenho térmico destas, pesquisas que envolvem estas disciplinas ainda não estão vulneráveis às limitações dos métodos e das ferramentas de pesquisa.

A escassez de referências bibliográficas para auxiliar o desenvolvimento de um método de classificação de desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas foi o primeiro obstáculo à pesquisa. Foram necessários ajustes aos métodos e simplificações na modelagem dos casos simulados para a sua continuidade. A redução do número de variáveis investigadas, a adoção de técnicas de simulação e de análise dos dados como frequência de temperatura, contagem de horas e análises de sensibilidade foram essenciais para viabilizar o estudo.

As limitações associadas à ferramenta de pesquisa e modelagem da ocupação e da ventilação natural podem comprometer a pesquisa em diferentes níveis. Esses empecilhos recaem sobre a caracterização dos modelos empregados nas simulações e nas diferenças em relação a uma situação real.

Apesar da grande flexibilidade do VisualDOE na caracterização de geometria, há limitações na modelagem da envoltória e nos cálculos de transferência de calor feitos pelo algoritmo do DOE 2.1, com simplificações para reduzir o tempo de processamento das simulações. Por exemplo, no estudo de edificações residenciais, onde é comum a forma da cobertura inclinada em edificações brasileiras, optou-se por simular cobertas planas em decorrência da dificuldade de modelagem que implica em alterações textuais no arquivo inteligível ao DOE2.1E, usando a linguagem BDL. Esse aspecto implica também em imprecisões quanto ao cálculo das propriedades termo-físicas dos materiais da biblioteca do VisualDOE, bem como sobre o cálculo do volume e pé-esquerdo da célula que representa o caso base.

Quanto ao cálculo das cargas térmicas, O DOE 2.1 calcula-as com base na temperatura do ar interno definido pelo usuário onde apenas posteriormente são calculadas as variações da temperatura. Isso implica em cálculos menos confiáveis das cargas térmicas quando existem maiores variações da temperatura interna, o que geralmente ocorre nas edificações naturalmente condicionadas, trazendo maiores imprecisões aos resultados.

Além disso, há uma tendência em relevar a importância de variáveis associadas às transmitâncias térmicas de paredes, vidros e de cobertas e desse cálculo serem minimizadas as perdas de calor quando o modelo considera que o ambiente interno possui temperaturas mais baixas do que o exterior e não o contrário, como acontece em edificações sem condicionamento artificial. Esse mecanismo também tem efeito sobre a

redução da temperatura do ar através da perda de calor pelo piso e do impacto de elementos como paredes sombreadas que podem ser desprezados.

A configuração da ocupação é dificultada pela falta de literatura apropriada com informações acerca do padrão de ocupação, da diversidade e representatividade de tipologias (variações formais), de programas e de *layout* interno. O tipo de uso e o padrão de ocupação são características de uma edificação que estão diretamente relacionados ao seu desempenho térmico e energético. Duas edificações com mesmo tipo de uso podem apresentar diferentes resultados em relação ao desempenho térmico e energético caso tenham um padrão de ocupação diferente. Portanto, a presente pesquisa é restrita a um pequeno universo de aplicação, semelhante ao aqui analisado, em função da complexidade e das inúmeras combinações de variáveis que influenciam o desempenho térmico de uma edificação e que não poderiam ser abordadas no escopo dessa dissertação.

Também é importante destacar as limitações da modelagem da ventilação natural, que é um dado de entrada e não um resultado da simulação. A pesquisa é limitada pela insuficiência de informações para subsidiar a modelagem de infiltração e ventilação (trocas de ar por hora) embasadas em coletas sistemáticas de dados de campo. A ferramenta de simulação VisualDOE também não é propriamente voltada aos estudos de edificações naturalmente ventiladas, porém foi escolhida pelos motivos citados anteriormente. Recomenda-se que o estudo subsidie novas análises com o programa EnergyPlus.

É importante salientar que a pesquisa teve também como resultado o delineamento de etapas a serem seguidas para a constituição de um sistema alternativo de classificação de desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas em clima quente e úmido, sendo, portanto, plausível a recomendação de estudos futuros que se utilizem de uma ferramenta mais apropriada a esse fim.

Estudos mais detalhados poderiam incluir, por exemplo, a modelagem da ventilação natural através de técnica de CFD, incorporando às análises a velocidade e direção dos ventos. Constatou-se ainda lacunas relacionadas à investigações que incorporem dados de campo relativos à ocupação; dados climáticos oriundos de estações meteorológicas que possam aumentar a resolução e qualidade dos dados de radiação solar existentes e a consideração de outras variáveis de projeto não abordadas aqui, como a cobertura inclinada e transferência de calor pelo piso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELARD, L.; BOYER, H.; GARDE, F.; GATINA, J. C. A detailed weather data generator for building simulations. **Energy and Buildings**, v. 31, p. 75-88, 2000.

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. **The use of simulation software to evaluate the thermal performance of buildings in Brazil**. In: IBPSA BUILDING SIMULATION CONFERENCE 1999, 6., 1999, Kyoto. **IBPSA Conference Proceedings 1999**. Kyoto: International Building Performance Simulation Association, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Nonresidential cooling and heating load calculation procedures**. In: AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Fundamentals Handbook. New York, 2001a. p. 29.1 - 29.40.

_____. **Thermal Comfort**. In: AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Fundamentals Handbook. New York, 2001b. p. 8.1 - 8.29.

_____. **ASHRAE Standard 90.2-2004 – Energy Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta: ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004a. 45 p.

_____. **ASHAE Standard 55-2004 - Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004b. 30 p.

ARAÚJO, V. M. D. de. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro (o caso de Natal/RN)**. Natal: EDUFRRN, 2001. 138 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15220-1 - Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005a. 7 p.

_____. **NBR15220-2 - Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005b. 21 p.

_____. **NBR15220-3 - Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005c. 25 p.

AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. V. **Thermal comfort**. Brisbane: Passive and Low Energy Architecture International (PLEA). 1997. 64 p. (PLEA Notes; Note 3).

AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE. Your home Technical Manual. Disponível em < <http://www.greenhouse.gov.au/yourhome/technical/index.htm>>. Acesso em 25 nov. 2005.

BARBOSA, M. J.; LAMBERTS, R. Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, aplicada a Londrina-PR. **Ambiente Construído**, v. 02, n. 1, p. 15-28. 2002.

BÁRTHOLO, Á. D. M.; LAMBERTS, R.; PAPST, A. L.; GOULART, S.; PEDRINI, A. **Projeto de uma Residência Energeticamente Eficiente em Foz do Iguaçu**. In: XV SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 1999, Foz do Iguaçu. **Anais do XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Foz do Iguaçu: FURNAS Centrais Elétricas SA, 1999.

BAY, J-H. **Cognitive biases in design: the case of tropical architecture**. Delft: Technische Universiteit Delft, 2001. 248 p.

BRAGER, G. S.; DEAR, R. J. de. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, v. 27, p. 83-96. 1998.

CHAN, W. R.; PRICE, P. N.; GADGIL, A. J. **Sheltering in Buildings from Large-Scale Outdoor Releases**. Berkelay: Lawrence Berkeley National Laboratory - LBNL, 2004. 11 p. (Paper LBNL-55575)

CHEN, Q. Y. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. **Energy and Buildings**, v. 36, p. 1197-1209. 2004.

COMFORTCALC. Teaching Tools v.200. Square One Research, 2006.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C., BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J.; GLAZER, J. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings Journal**, v. 33, n. 4, p. 443-457, 2001.

CRAWLY, D. B., HAND, J. W., KUMMERT, M. e GRIFFITH, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Washington: U. S. Departmente of Energy, University of Strathclyde, University of Wisconsin, 2005. p.56. (Version 1.0).

DARMAWAN, A. **Adaptive thermal comfort: a multicultural issue**. In: FIRST INTERNATIONAL ONE DAY FORUM ON NATURAL AND HYBRID VENTILATION - HYBVENT FORUM '99, 1., 1999, Sydney. IEA-ECB&CS Annex 35. IEA-International Energy Agency, 1999.

DEAR, R. J. de.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, n. 1, p. 1-18. 1998a.

_____. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, v. 27, p. 83-96. 1998b.

_____. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to Ashrae standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, p. 549-561. 2002.

ENERGY INFORMATION AGENCY (EIA). **End-Use Consumption of Electricity 2001**. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/recs2001/enduse2001/enduse2001.html>>. Acesso em 15 set. 2006.

ENERGY SAVING TRUST. **Energy efficient ventilation in dwellings – a guide for specifiers**. London: Energy Saving Trust, 2006. 20 p.

ENERGYSTAR. Disponível em: <<http://www.energystar.gov>>. Acesso em 15 set. 2006.

FANGER, P. O.; TOFTUM, J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. **Energy and buildings**, v. 34, p. 533-536. 2002.

GARDE, F.; MARA, T.; LAURET, A. P.; BOYER, H.; CELAIRE, R. Bringing simulation to implementation: presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. **Solar Energy**, v. 71, n. 2, p. 109-120. 2001.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2ª ed. London: Applied Science Publishers, 1976. 483 p.

_____. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11-23. 1992.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. 2ª ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC. 1998.

GUY, S.; FARMER, G. Reinterpreting sustainable architecture: the place of technology. **Journal of Architectural Education**, v. 54, n. 3, p. 14-148. 2001.

HAVENITH, G.; HOLMÉR, I.; PARSONS, K. Personal factors in thermal comfort assesment: clothing properties and metabolic heating production. **Energy and Buildings**, v. 34, p. 581-591. 2002.

HUMPHREYS, M. A. Outdoor temperatures and comfort indoors. **Building Research and Practice (J CIB)**, v. 06, n. 02, p. 92–105. 1978.

HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. An adaptive guideline for UK office temperatures. In: NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A.; SYKES, O.; ROAF, S. (Ed.). **Standards for thermal comfort: indoor temperatures for the 21st**. London: E & FN Spon, 1995.

JANDA, K. B.; BUSCH, J. F. World-wide Status of Energy Standards for Buildings. **Energy**. v. 19, p. 27-44. 1994

KOENIGSBERGER, O. H.; INGERSOLL, T. G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of tropical housing and building: Parte 1, Climatic Design**. London: Longman, 1974. 319 p.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: Editora PW, 1997. 192 p.

- LAMBERTS, R.; CARLO, J. C. Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações. Florianópolis: LABEEE-UFSC, 2005. 228 p. (Relatório LABEEE-200504)
- LIMA, M. A. **Development of bioclimatic design**. 1995. 379f. Tese (Doutorado em Arquitetura). Department of Architecture, The University of Queensland, Brisbane, 1995.
- LIMA, G. L. F.; OLIVEIRA, A. G. D.; PEDRINI, A.; ARAÚJO, V. M. D. Índices de conforto térmico: revisão e proposta para o clima quente e úmido de Natal-RN. In: VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais do VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído**. Maceió: 2005. p. 1044-1053.
- LOMAS, K. L.; EPPEL, H. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 19, n. 2, p. 21-44. 1992.
- MCWILLIAMS, J. **Review of Airflow Measurement Techniques**. Berkelay: Lawrence Berkeley National Laboratory-LBNL, 2002. p.1-116. (LBNL-49747)
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2003. Brasília: Ministério de Minas e Energia. 2003. 168 p.
- MUI, K. W. H.; CHAN, W. T. D. Adaptive comfort temperature model of air-conditioned building in Hong Kong. **Building and Environment**, v. 38, n. 6, p. 837-852. 2003.
- NICOL, F. Special issue on thermal comfort standards. **Energy and buildings**, v. 34, n. 6, p. 529-685, 2002.
- _____. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. **Energy and buildings**, v. 36, p. 628-637. 2004.
- NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Building**, v. 34, p. 563-572. 2002.
- _____. Maximum temperatures in buildings to avoid heat discomfort. In: PALENC - Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, 2005. Santorini. **1st International Conference PALENC Book of Proceedings, Volume 1**. Santorini: Heliotopos Conferences, 2005. p. 219-224.
- NICOL, F.; ROAF, S. Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project. **Energy and Buildings**, v. 23, p. 169-174. 1996.
- OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism**. Princeton: Princeton University Press, 1963. 190 p.
- PEDRINI, A.; A. C. R. MASCARENHAS. **Avaliação dos projetos de habitação popular da caixa econômica federal**. Natal: LabCon/UFRN, 2006.
- PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Eletrobrás/Procel premia municípios que se destacaram em eficiência energética. **Informativo Eletrobrás do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**, Rio de Janeiro, v. 67. p. 1-4. 2003.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em < <http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?View={EE50CFB3-CA51-415F-A861-E49BD2A2C6FE}>>. Acesso em 20 set. 2005.

PURDY, J.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. The significant factors in modelling residential buildings. In: IBPSA BUILDING SIMULATION CONFERENCE 2001, 7., 2001, Rio de Janeiro. **IBPSA Conference Proceedings 2001**. Rio de Janeiro: International Building Performance Simulation Association, 2001. p. 207-224.

SHERMAN, M.; DICKERHOFF, D. **Air-Tightness of U.S. dwellings**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory-LBNL, 1998. p. 1-16. (LBNL-35700)

SIMULATION RESEARCH GROUP. DOE-2. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Disponível em < <http://gundog.lbl.gov/dirsoft/d2whatis.html>>. Acesso em 25 ago. 2000.

SUSTAINABILITY VICTORIA. Disponível em <http://www.sustainability.vic.gov.au/www/html/2035-5-star-homes.asp>. Acesso em 20 jun. 2005.

SZOKOLAY, S. V. Science in architectural education . Science versus criativity. Is there a dichotomy? **Architectural Science Review**, Sydney, v. 23, n. 1, p. 10-13, mar. 1980.

_____. **Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design**. Bullington: Architectural Press, 2004. 328 p.

SZOKOLAY, S. V.; DOCHERTY, M. Climate Analysis. Brisbane: Passive and Low Energy Architecture (PLEA). 1999. 56 p. (PLEA Notes, Note 5).

TANTASAVASDI, C.; SREBRIC, J.; CHEN, Q. Natural ventilation design for houses in Thailand. **Energy and Buildings**, v. 33, p. 815-824. 2001.

VisualDOE 4.1. Architectural Energy Corporation, 2005.

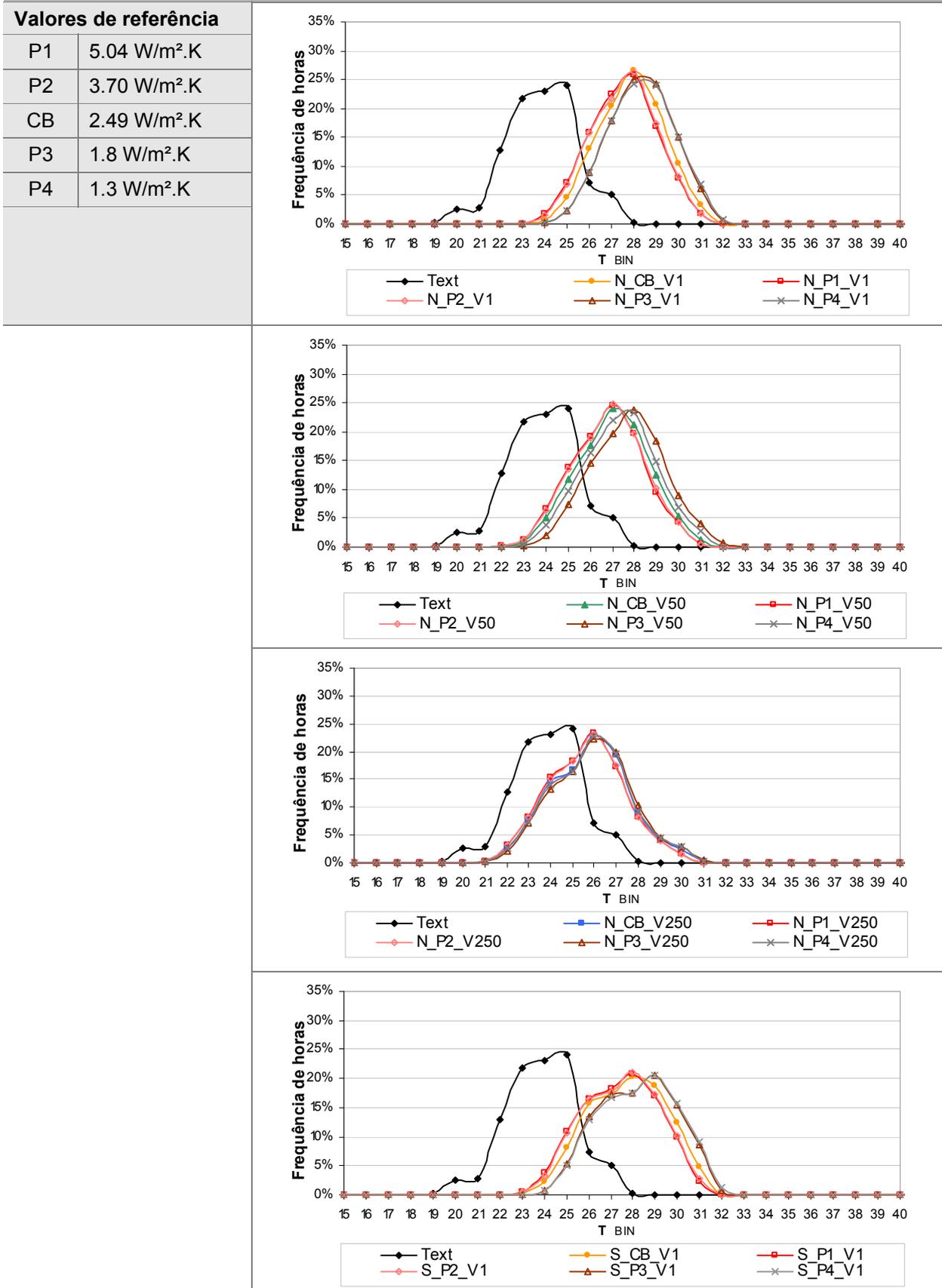
VOORDT, T. J. M. van der; VRIELINK, D.; WEGEN, H. B. R. van. Comparative floorplan-analysis in programming and architectural design. **Design Studies**, Delft, v. 18, p. 67-88, 1997.

WIT, S. D. Influence of modeling uncertainties on the simulation of building thermal comfort performance. In: IBPSA BUILDING SIMULATION CONFERENCE 1997. 5., 1997, Prague. **IBPSA Conference Proceedings 1997**. Prague: International Building Performance Simulation Association, 1997.

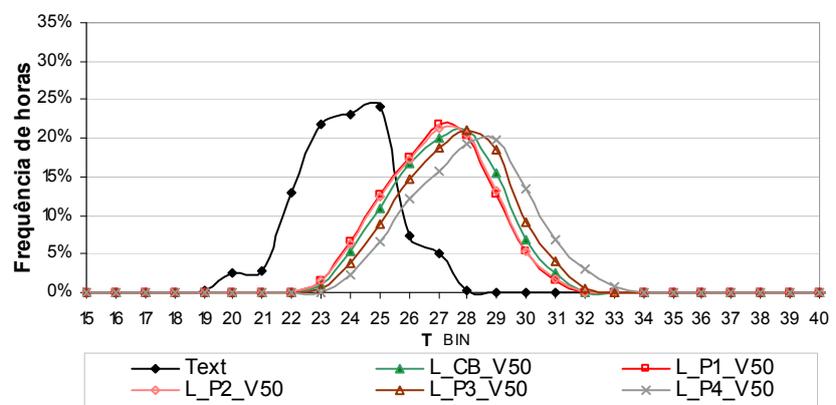
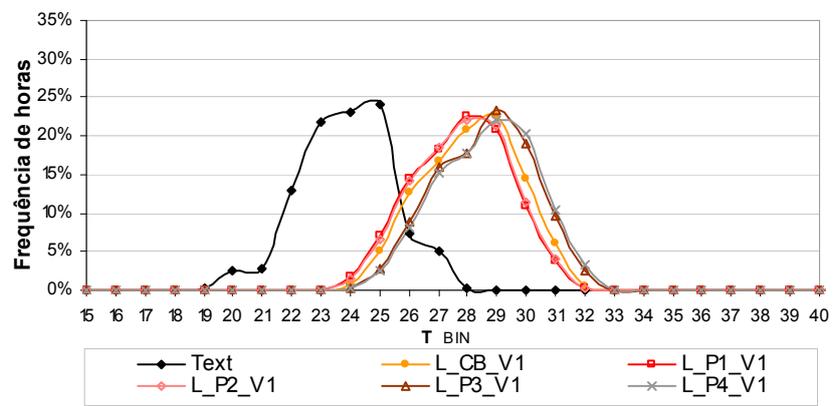
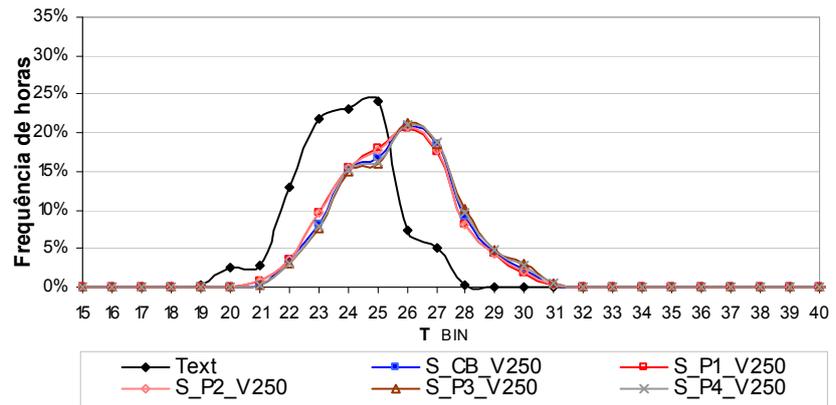
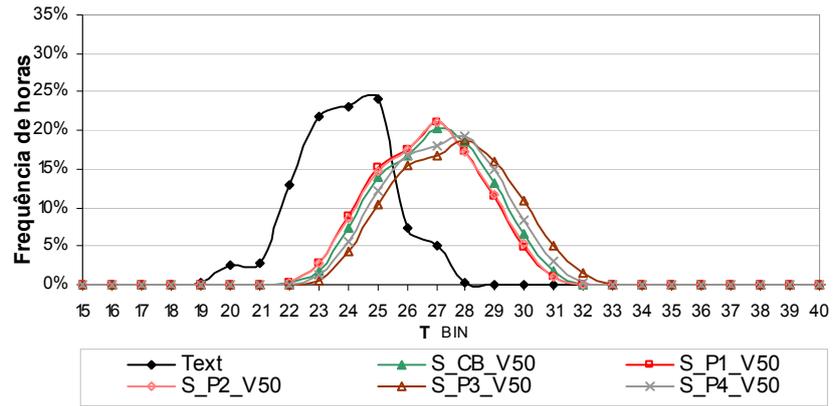
APÊNDICE A

Gráficos da análise de sensibilidade para ocupação quarto.

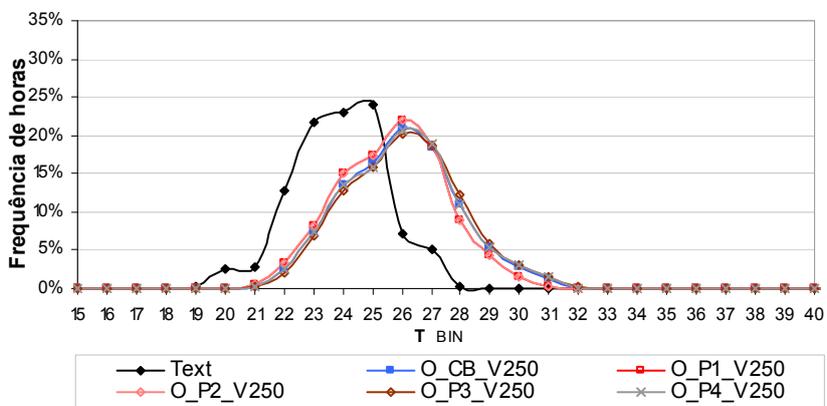
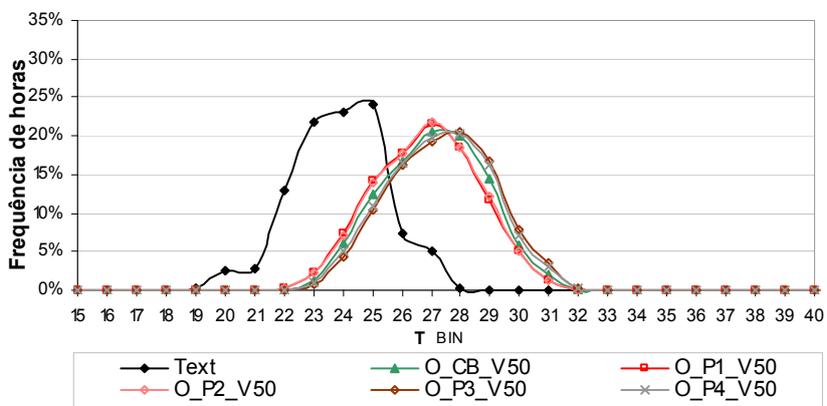
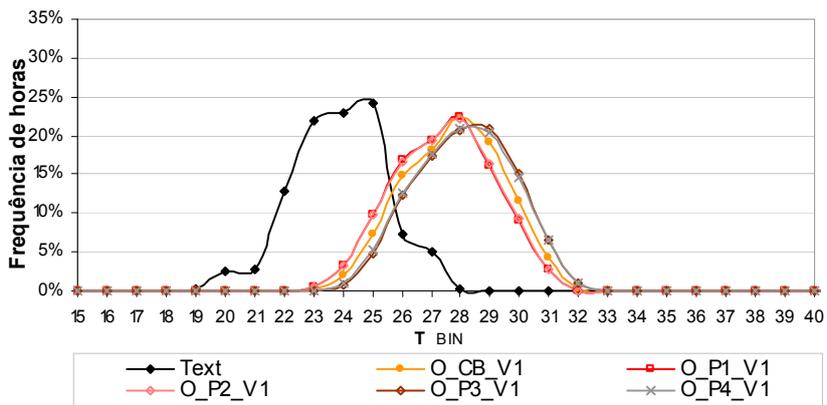
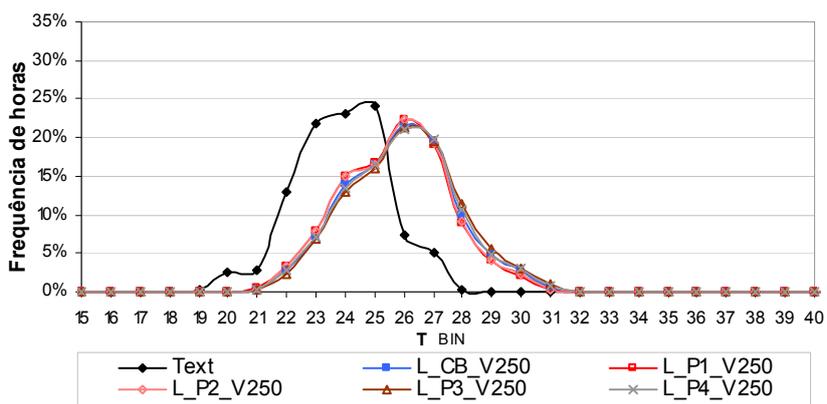
Transmitância da parede (P)



Valores de referência	
P1	5.04 W/m ² .K
P2	3.70 W/m ² .K
CB	2.49 W/m ² .K
P3	1.8 W/m ² .K
P4	1.3 W/m ² .K



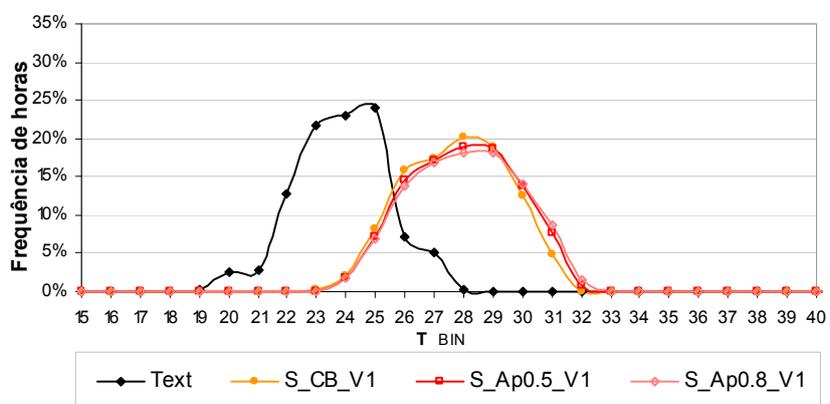
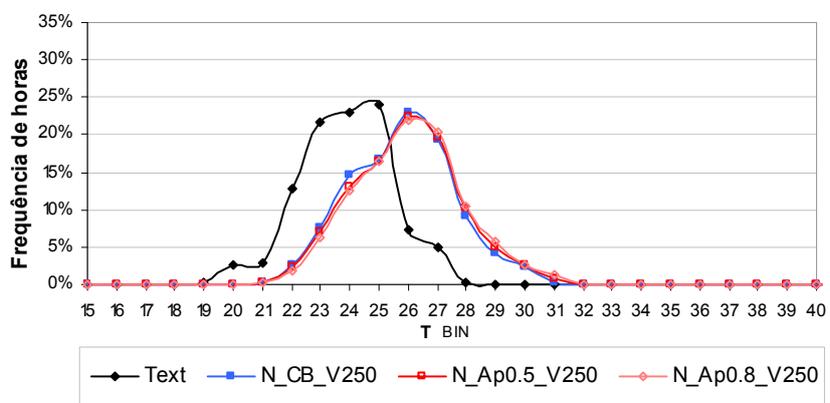
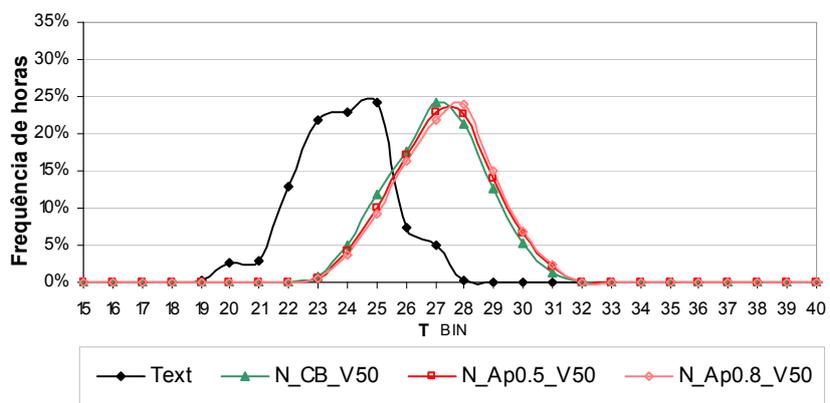
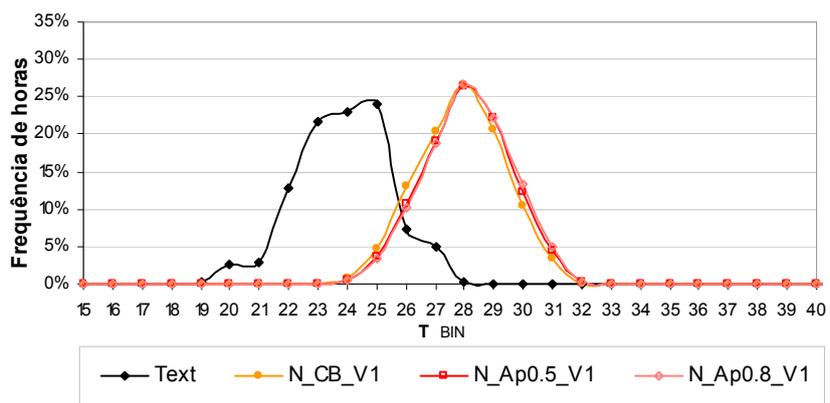
Valores de referência	
P1	5.04 W/m ² .K
P2	3.70 W/m ² .K
CB	2.49 W/m ² .K
P3	1.8 W/m ² .K
P4	1.3 W/m ² .K



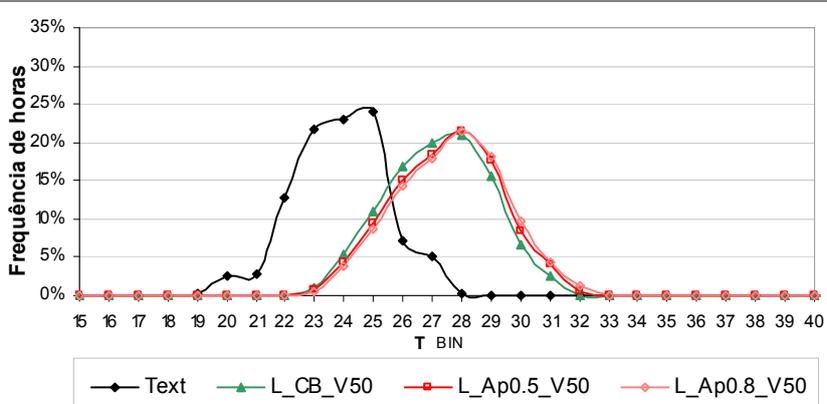
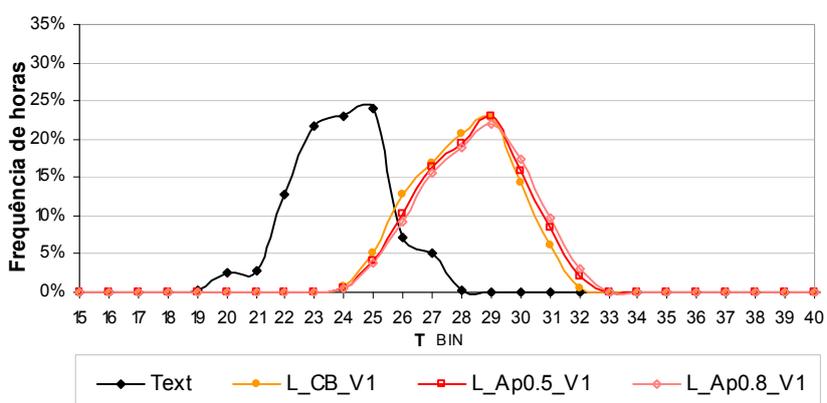
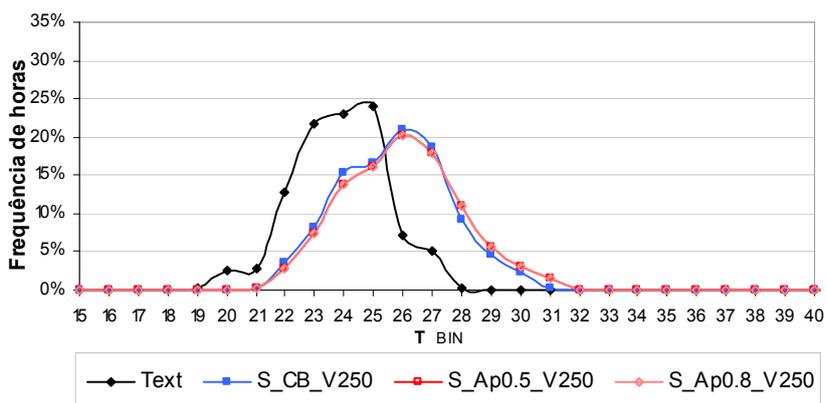
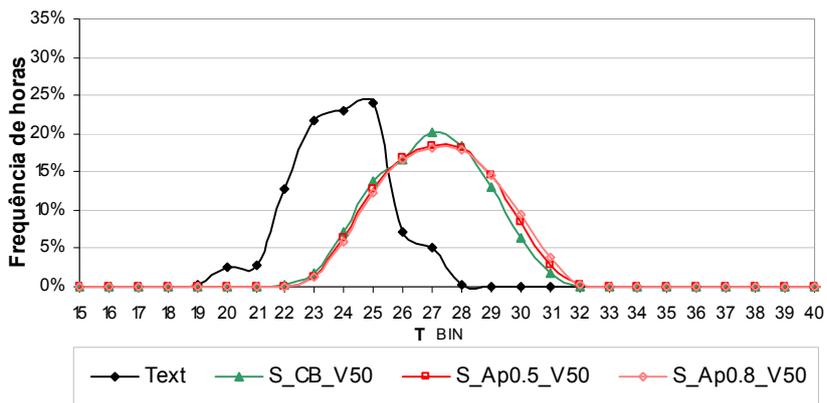
Absortância da parede (Ap)

Valores de referência

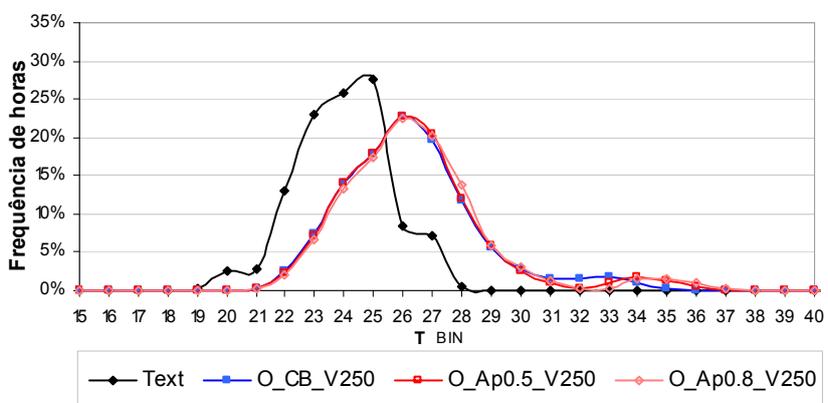
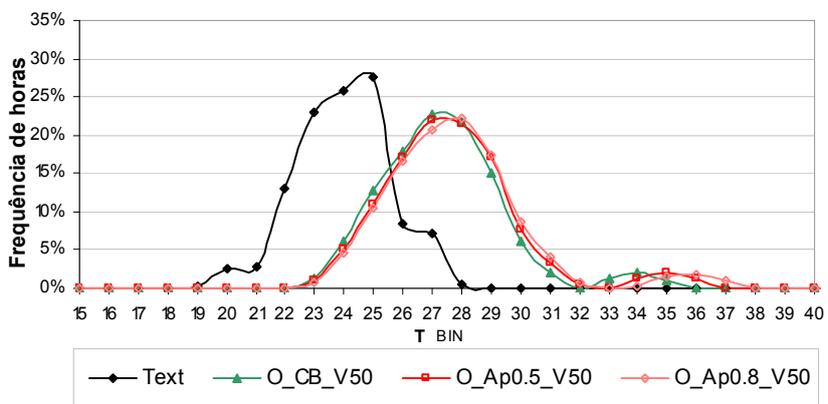
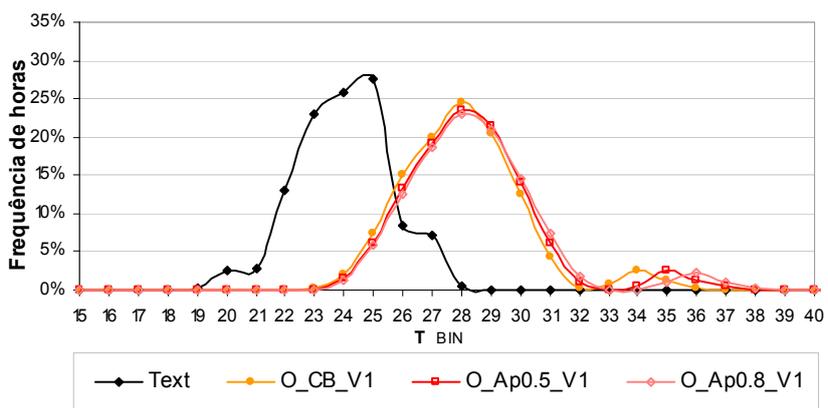
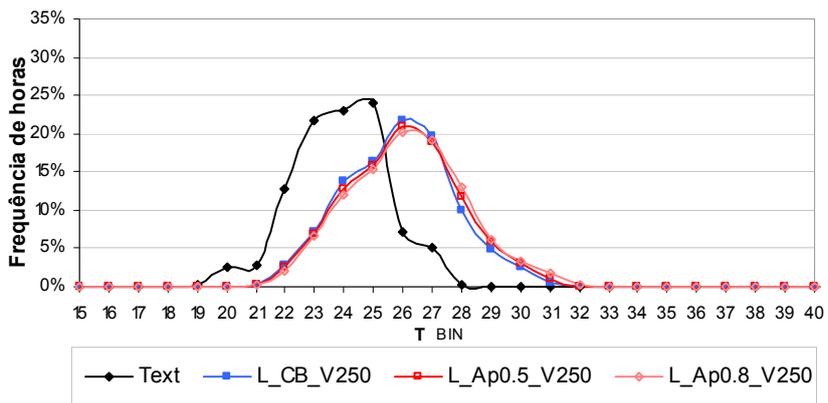
CB	0.20
Ap0.5	0.50
Ap0.8	0.80



Valores de referência	
CB	0.20
Ap0.5	0.50
Ap0.8	0.80



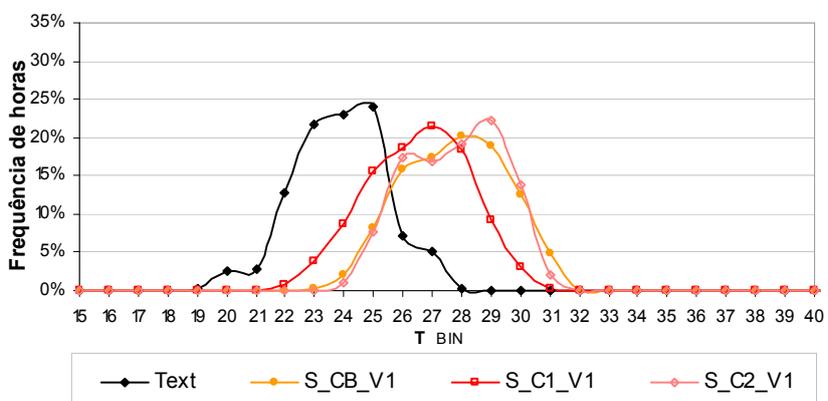
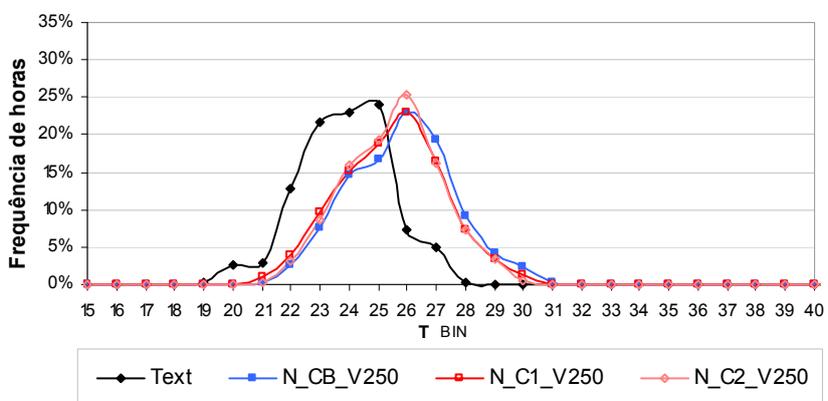
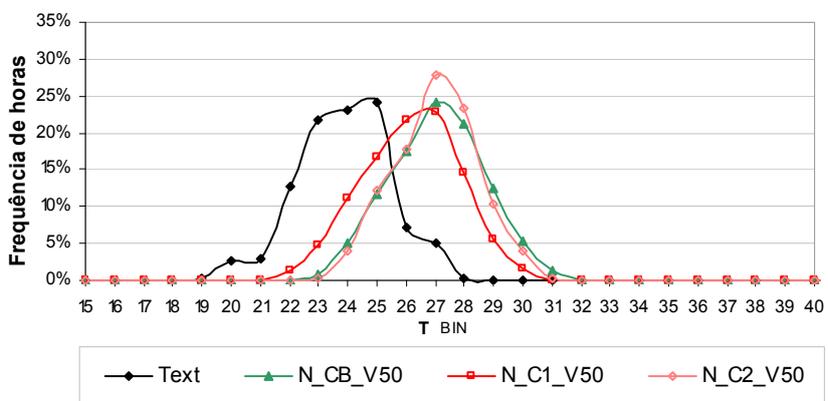
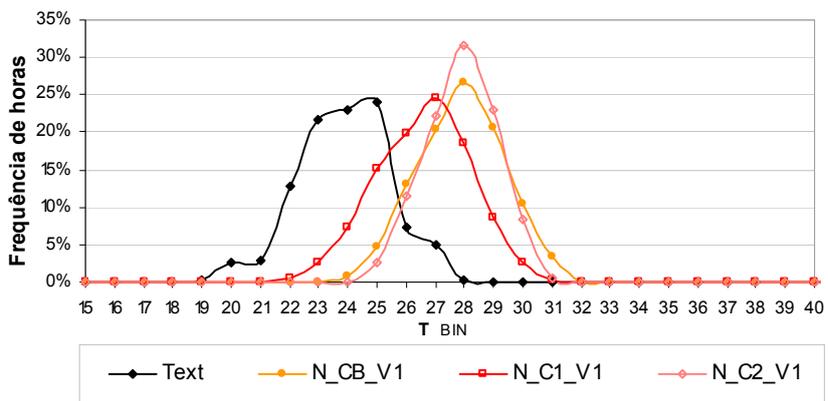
Valores de referência	
CB	0.20
Ap0.5	0.50
Ap0.8	0.80



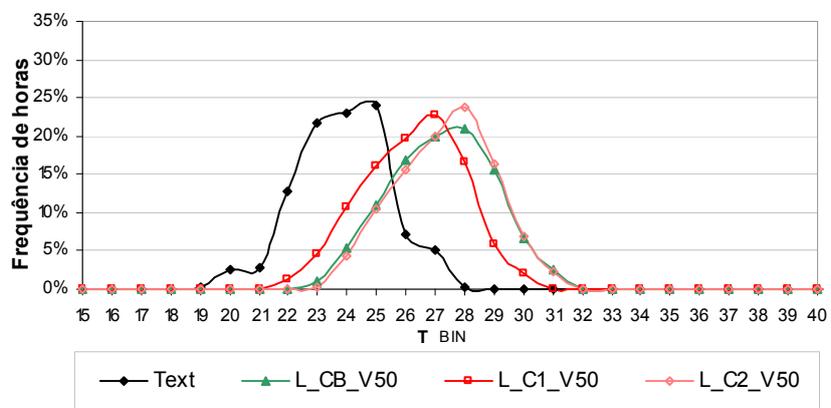
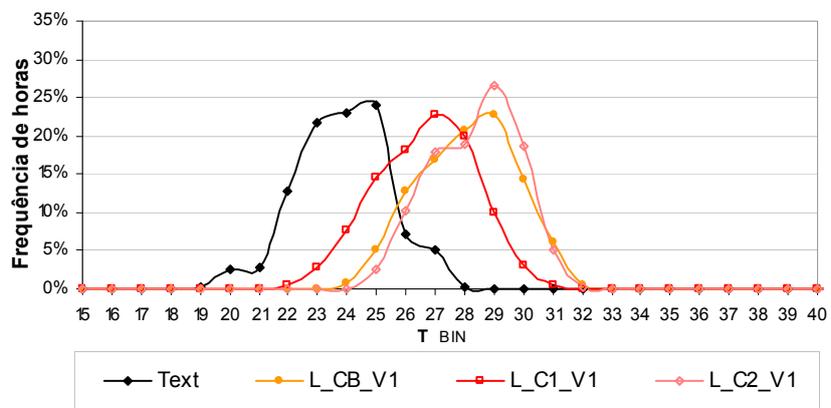
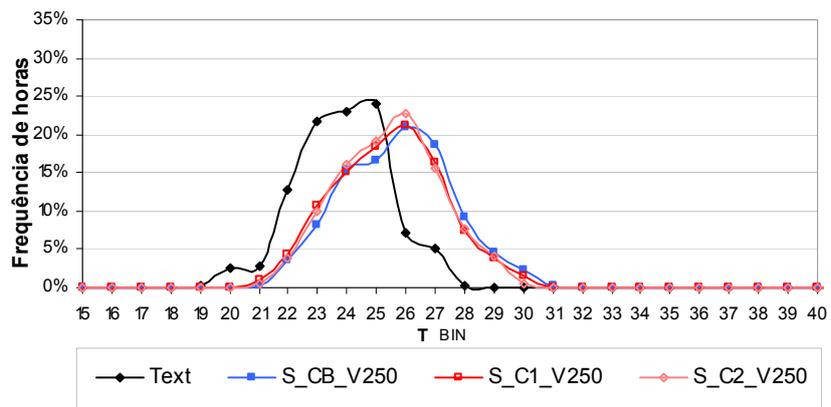
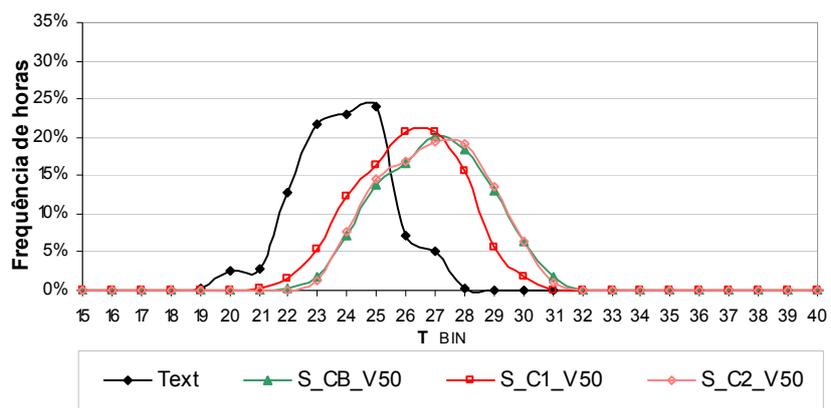
Transmitância da cobertura (C)

Valores de referência

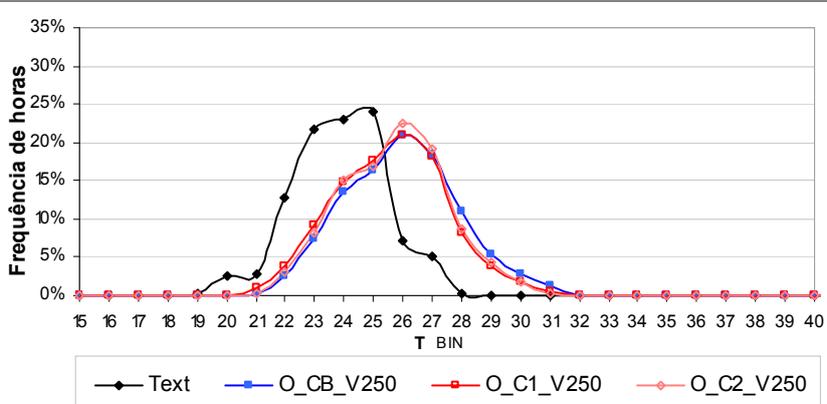
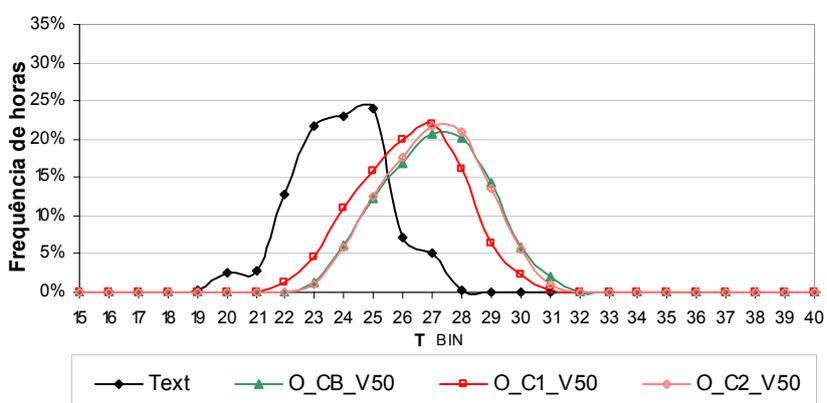
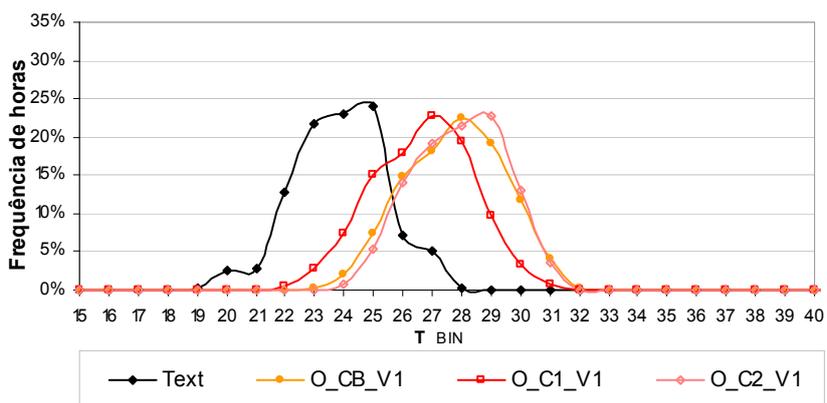
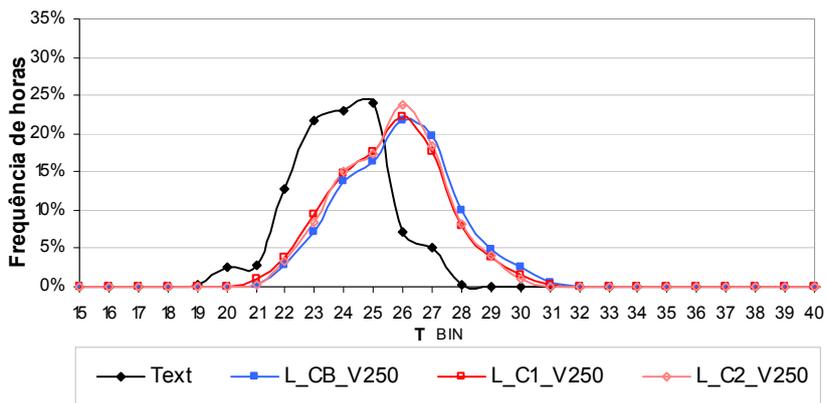
C1	4.55 W/m ² .K
CB	1.92 W/m ² .K
C2	0.62 W/m ² .K



Valores de referência	
C1	4.55 W/m ² .K
CB	1.92 W/m ² .K
C2	0.62 W/m ² .K



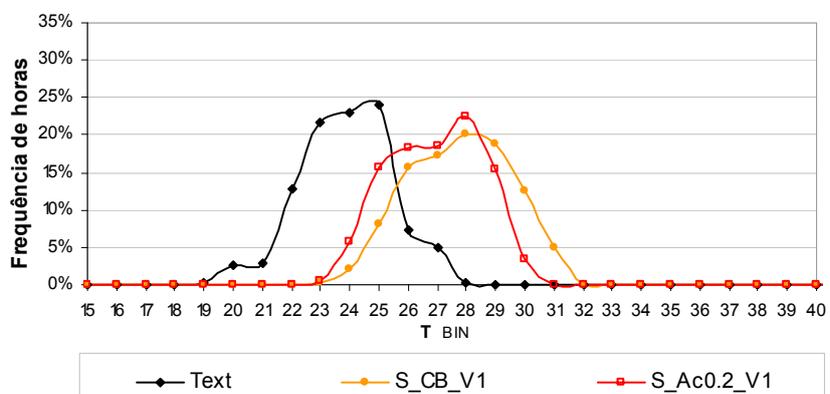
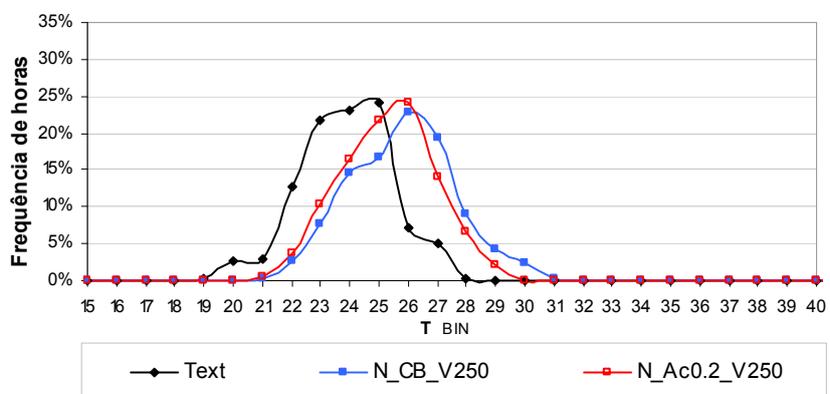
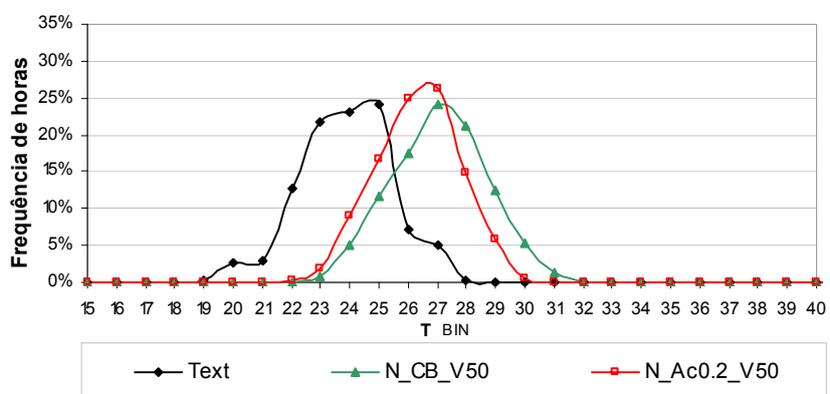
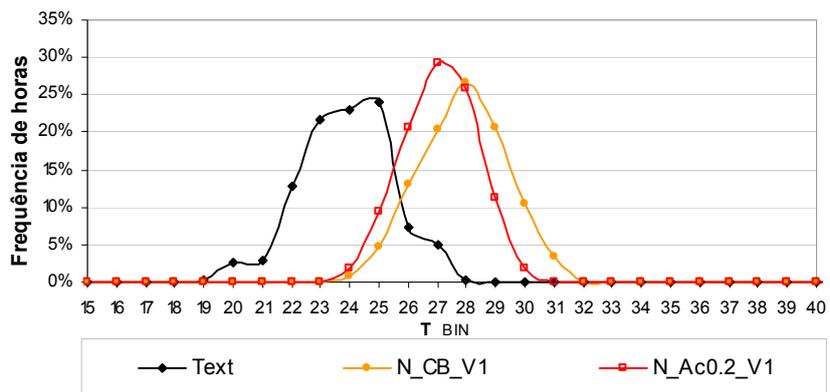
Valores de referência	
C1	4.55 W/m ² .K
CB	1.92 W/m ² .K
C2	0.62 W/m ² .K



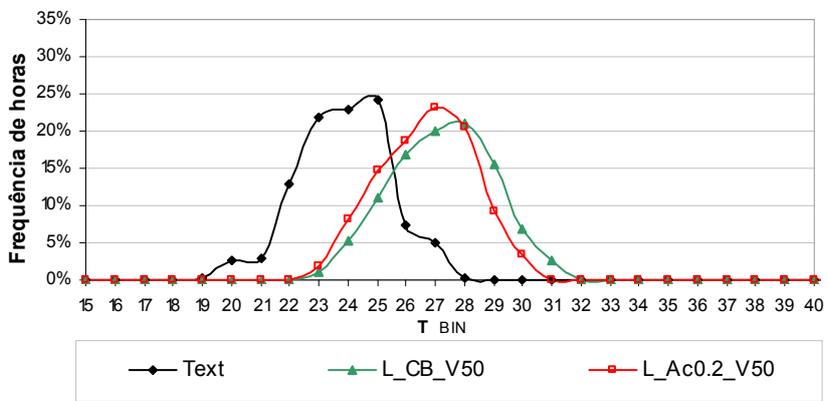
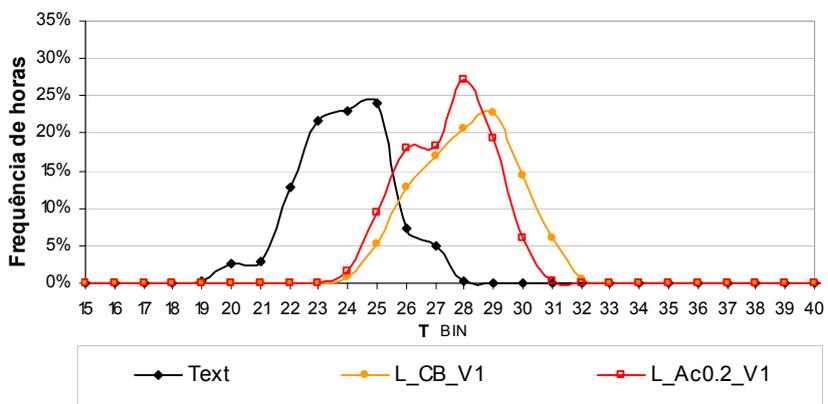
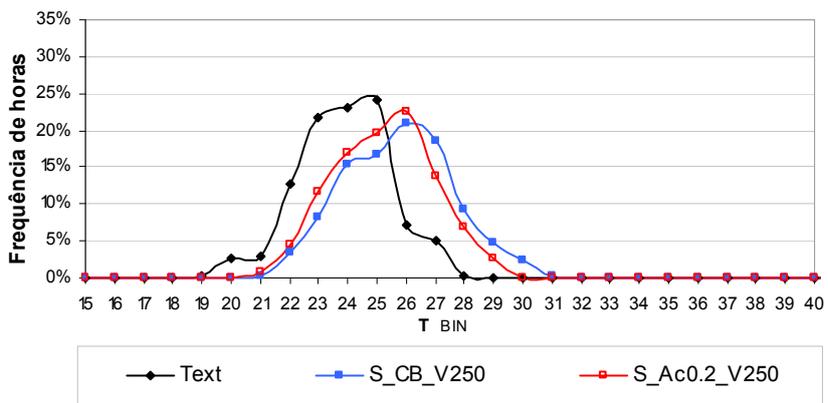
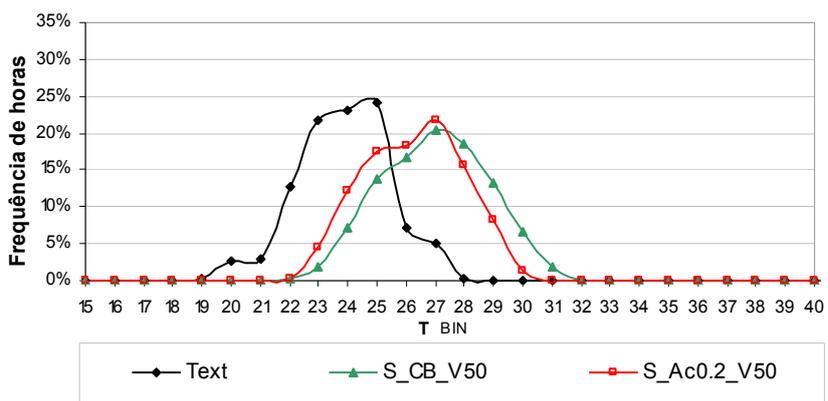
Absortância da cobertura (Ac)

Valores de referência

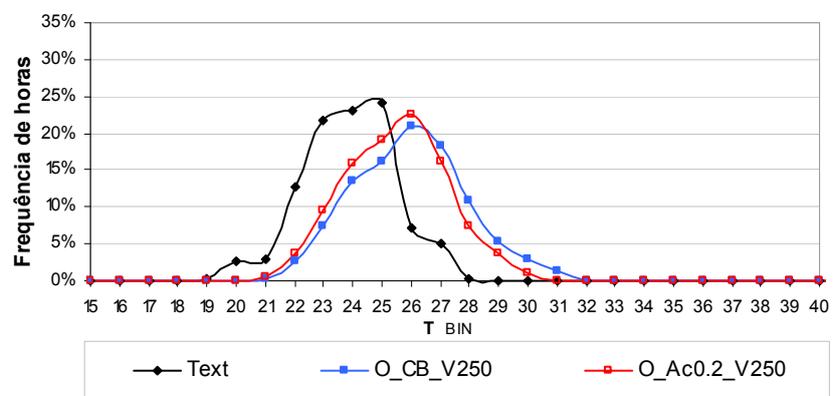
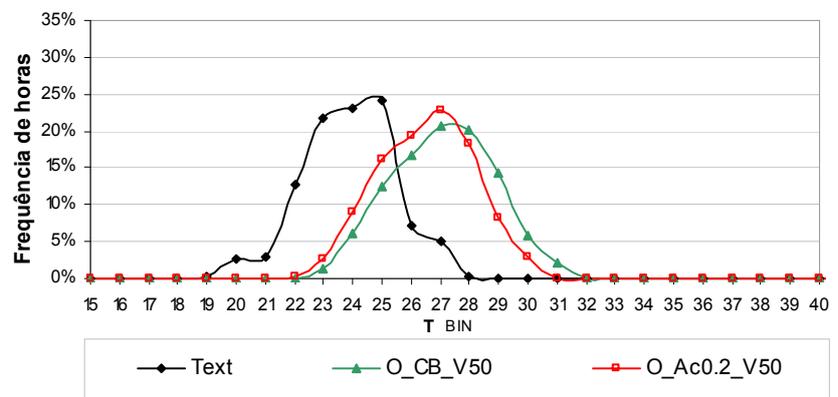
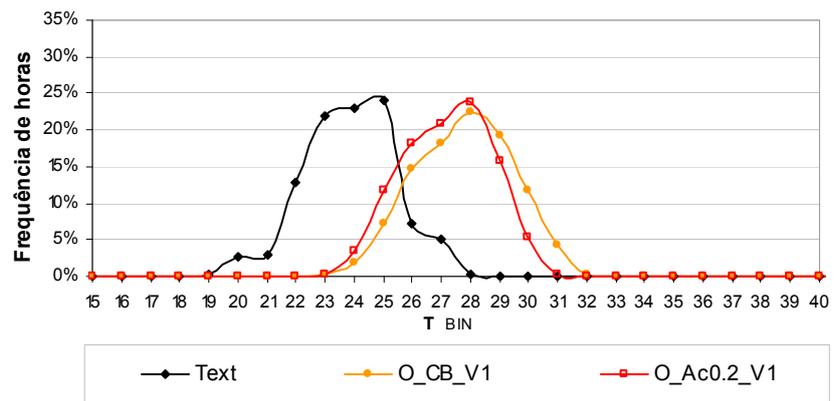
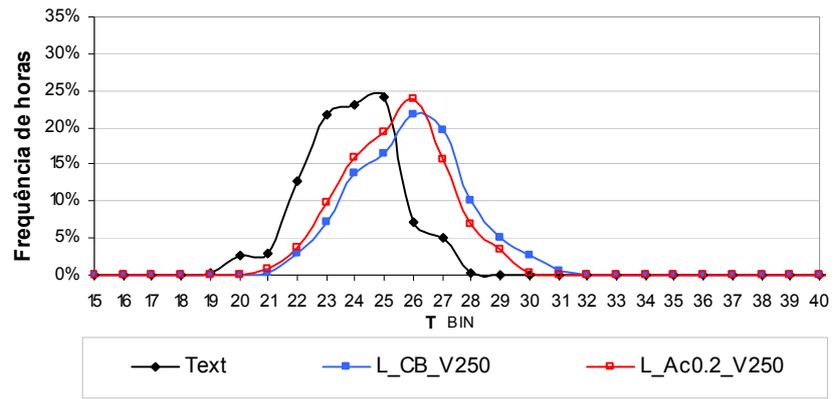
Ac0.2	0.20
CB	0.70



Valores de referência	
Ac0.2	0.20
CB	0.70



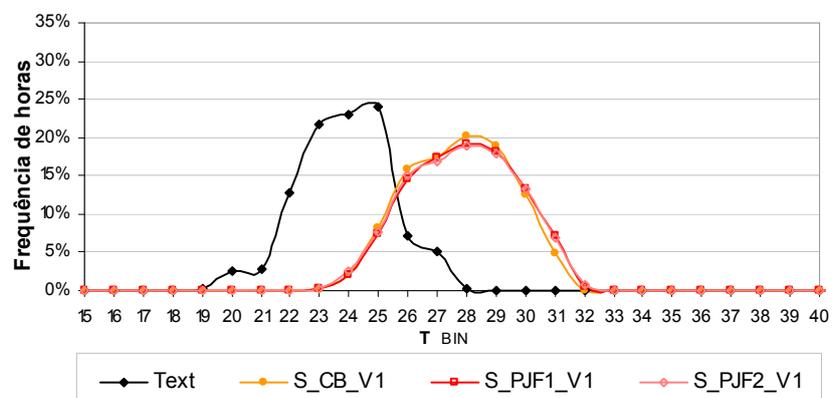
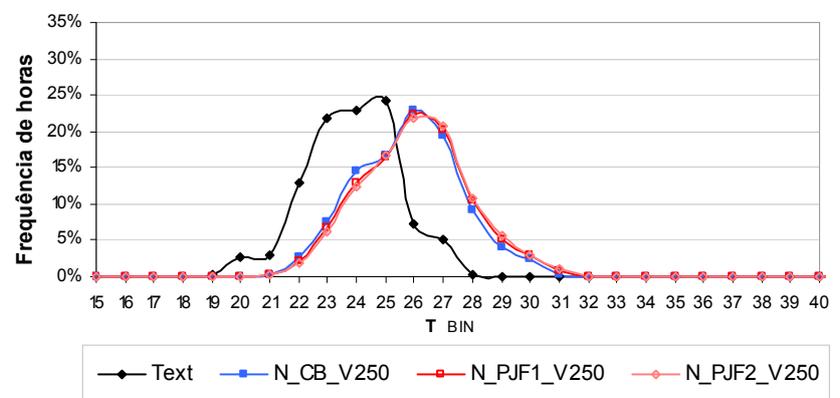
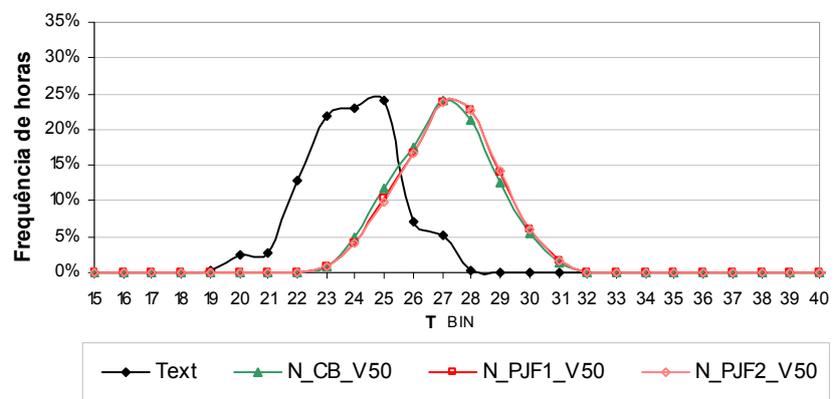
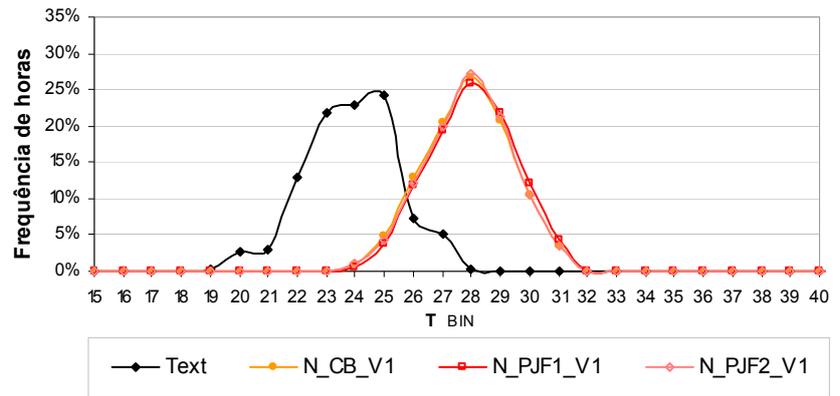
Valores de referência	
Ac0.2	0.20
CB	0.70



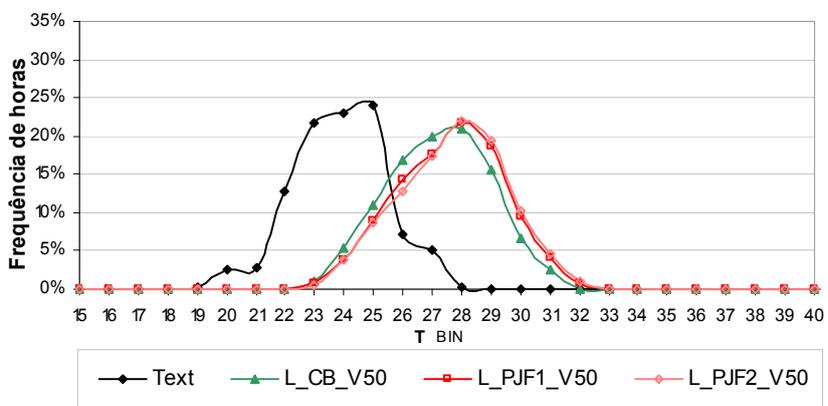
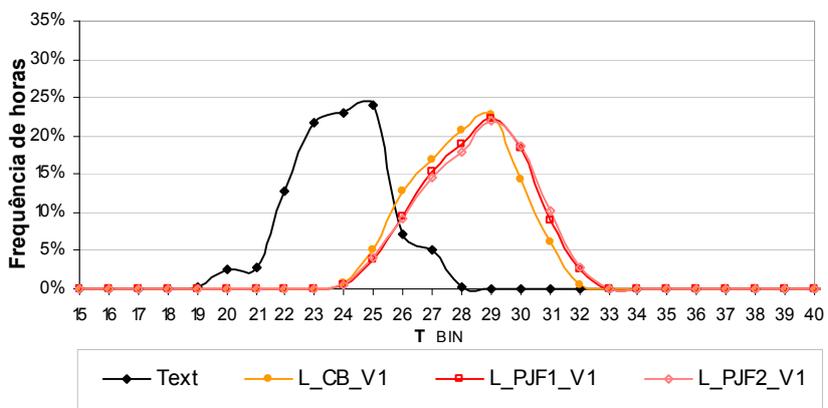
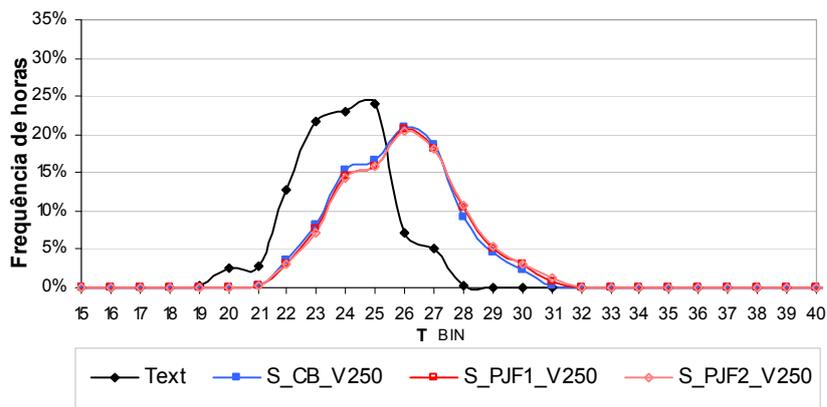
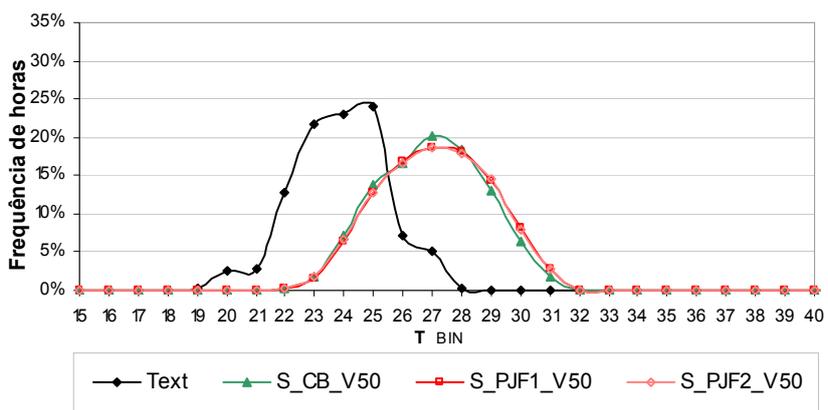
Porcentagem de janela na fachada (PJF)

Valores de referência

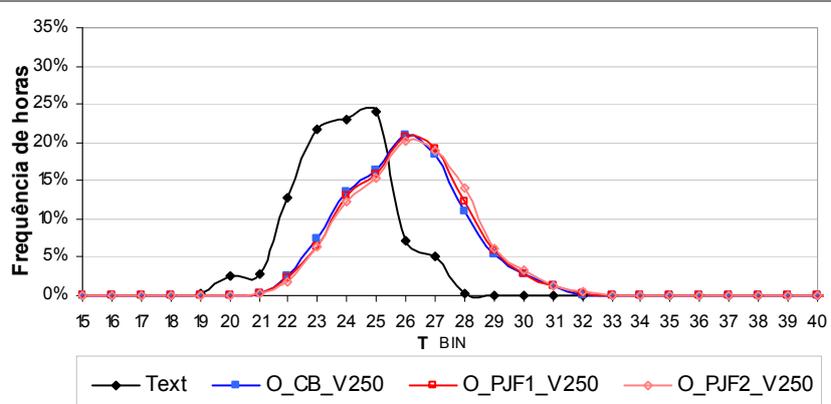
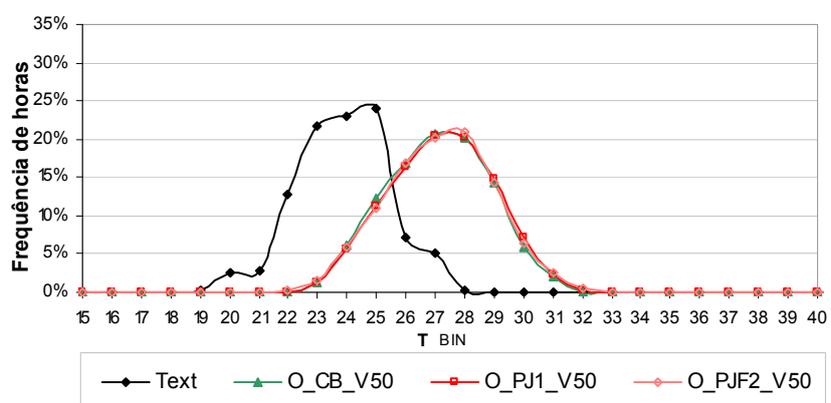
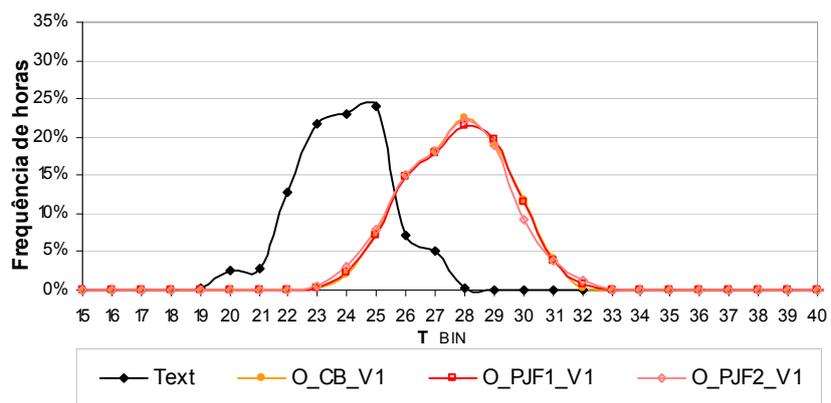
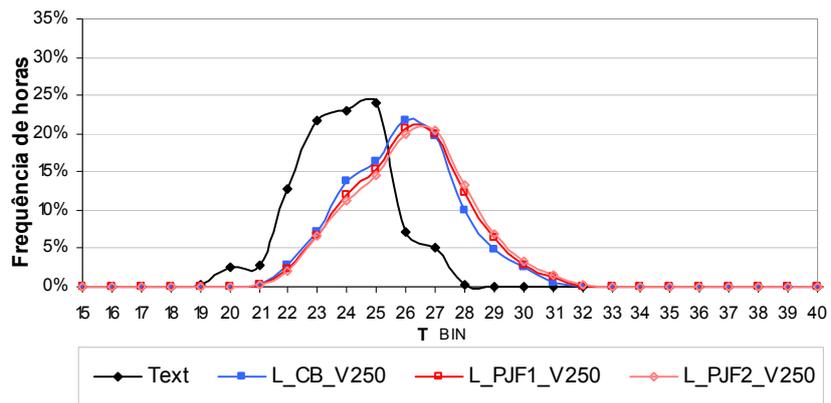
CB	17%
PJF1	33%
PJF2	49%



Valores de referência	
CB	17%
PJF1	33%
PF2	49%



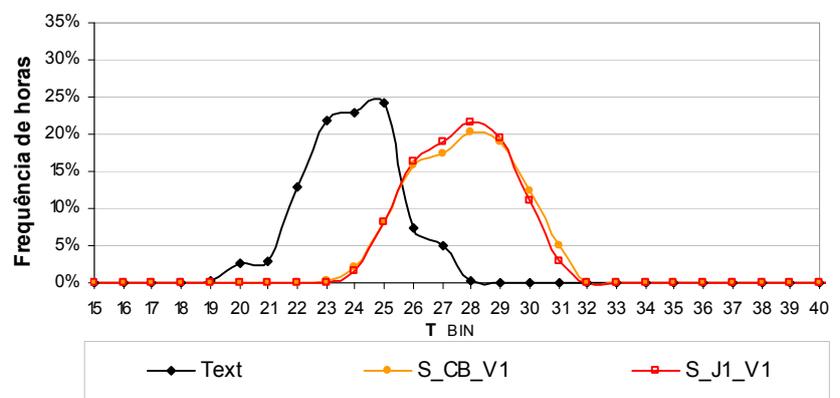
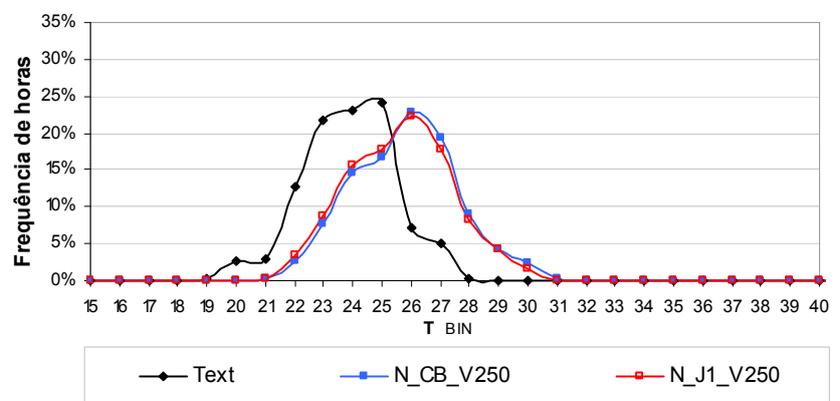
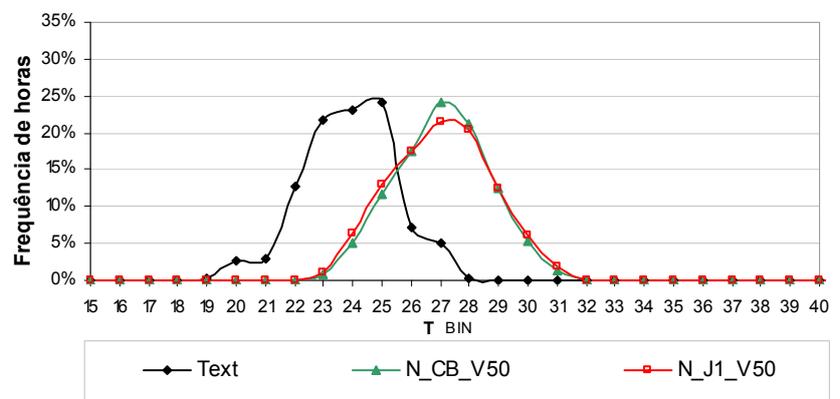
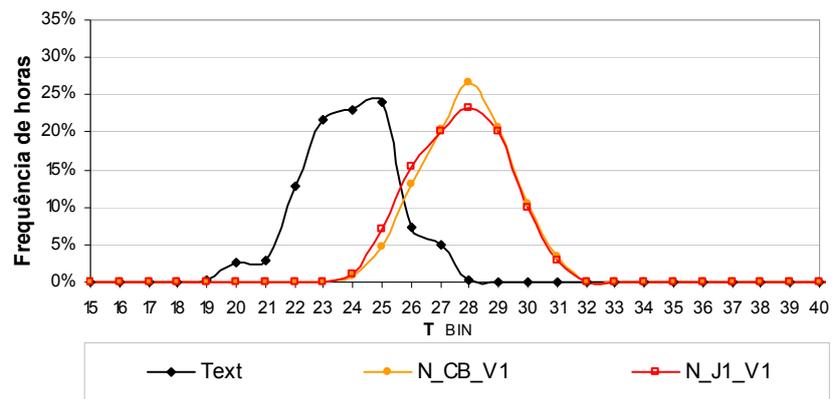
Valores de referência	
CB	17%
PJF1	33%
PF2	49%



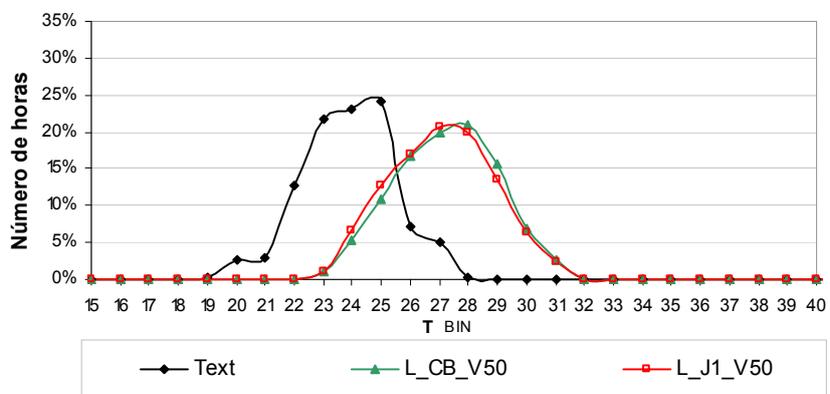
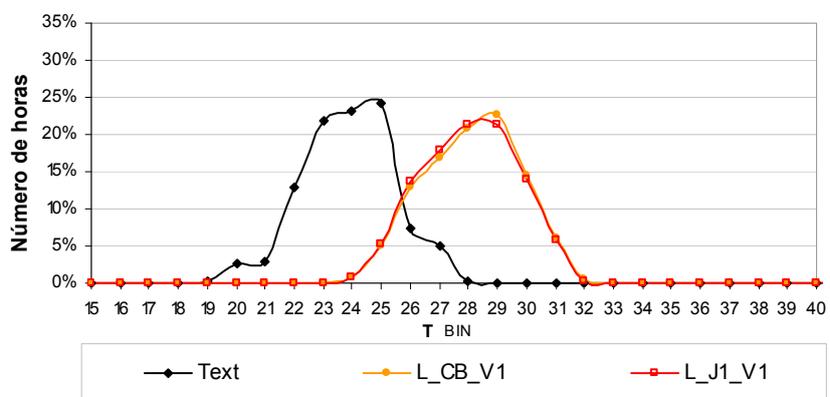
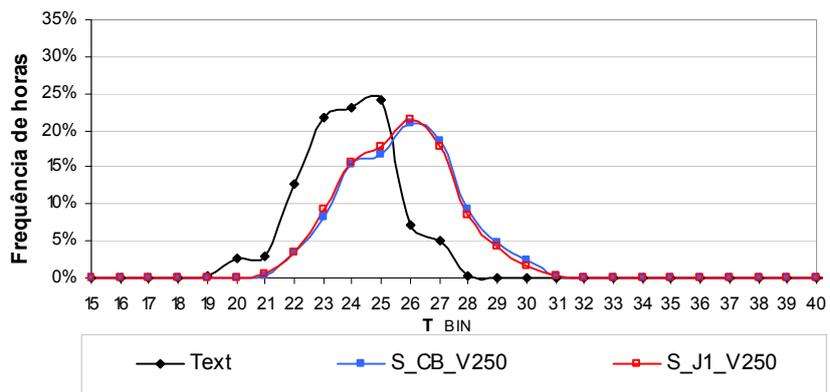
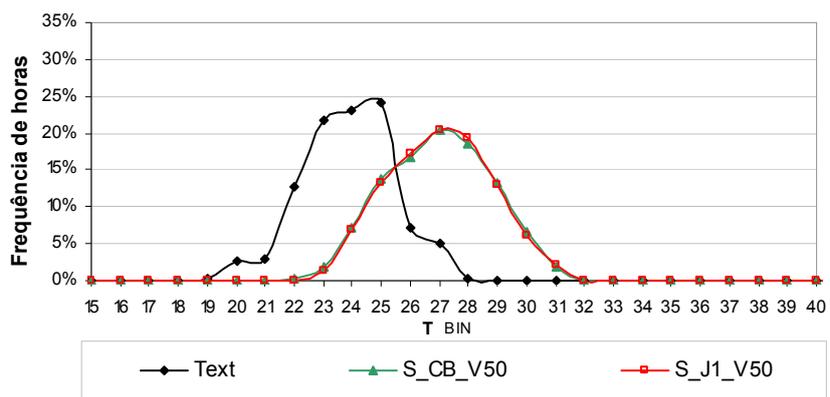
Tipo de janela (J)

Valores de referência

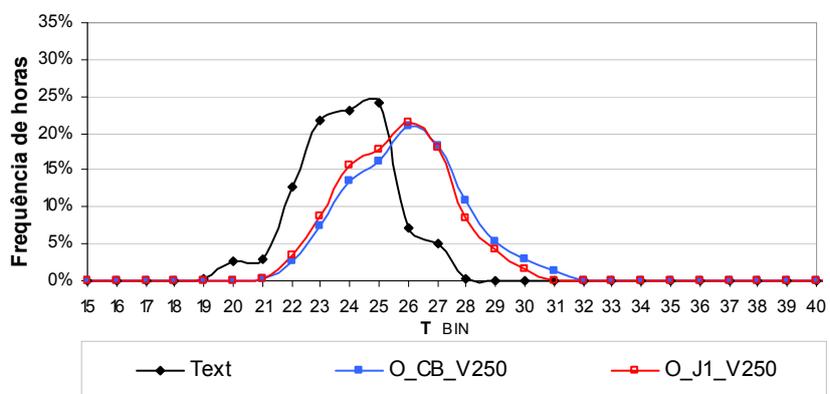
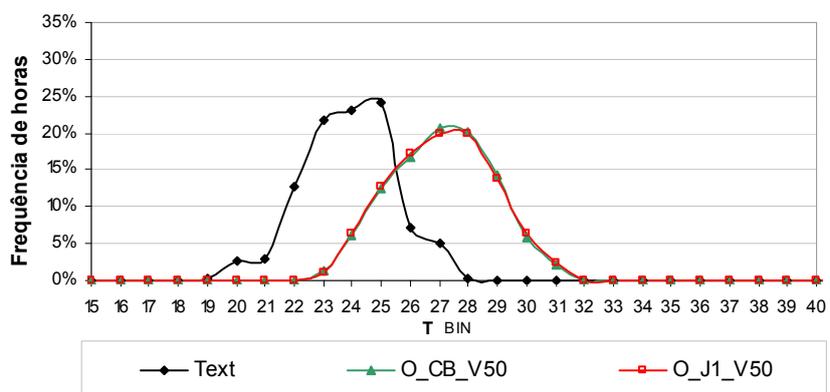
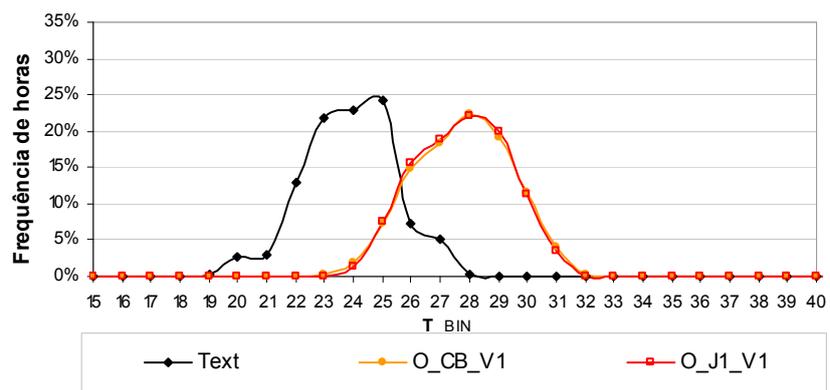
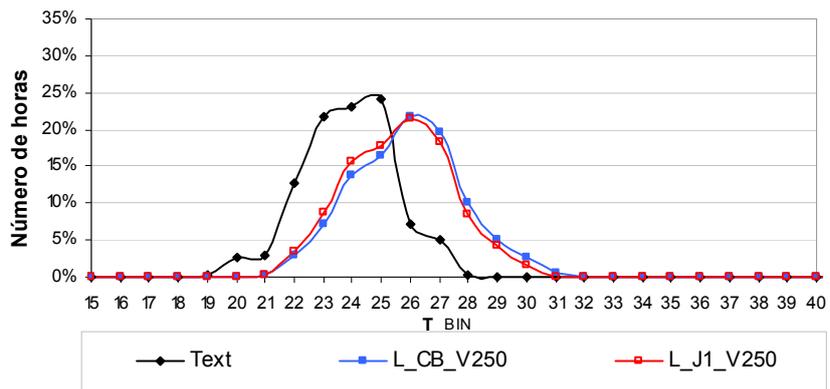
CB	(Vidro simples)
J1	(Madeira)



Valores de referência	
CB	(Vidro simples)
J1	(Madeira)

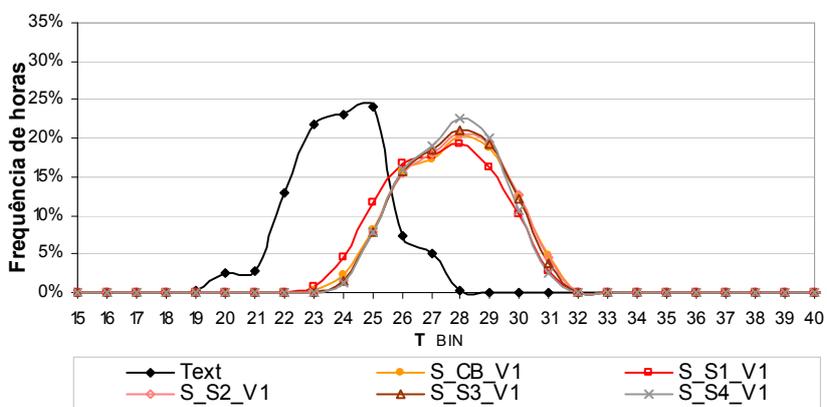
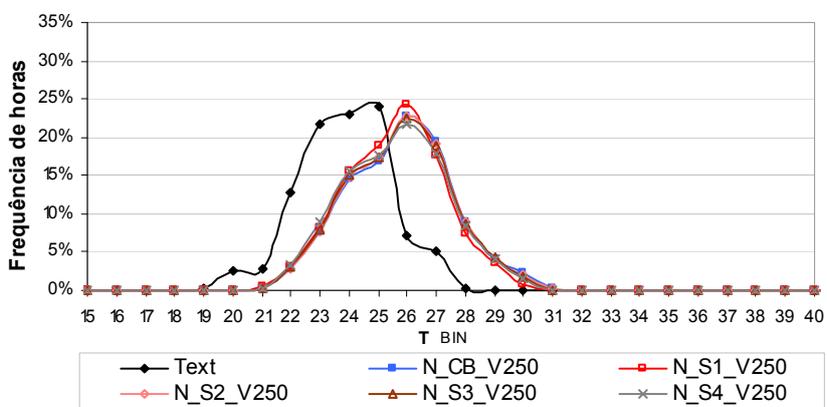
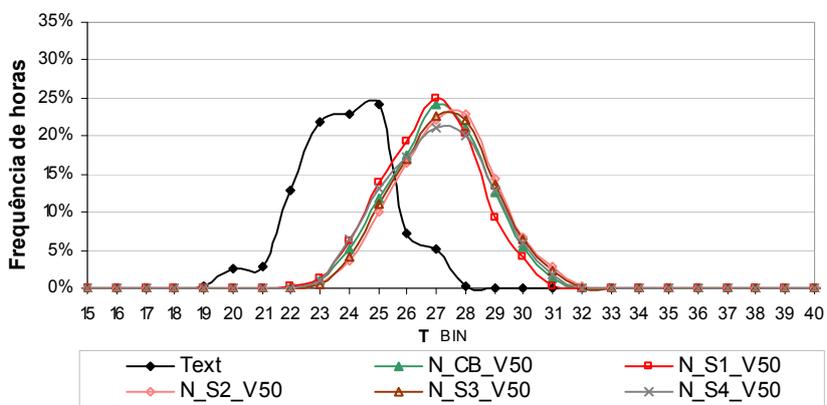
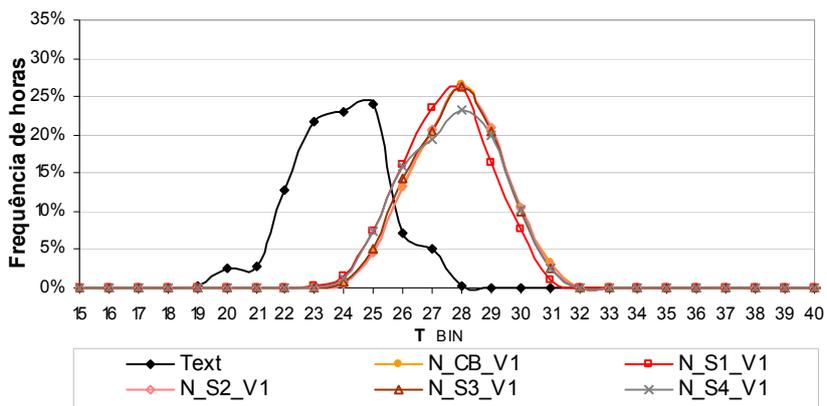


Valores de referência	
CB	(Vidro simples)
J1	(Madeira)

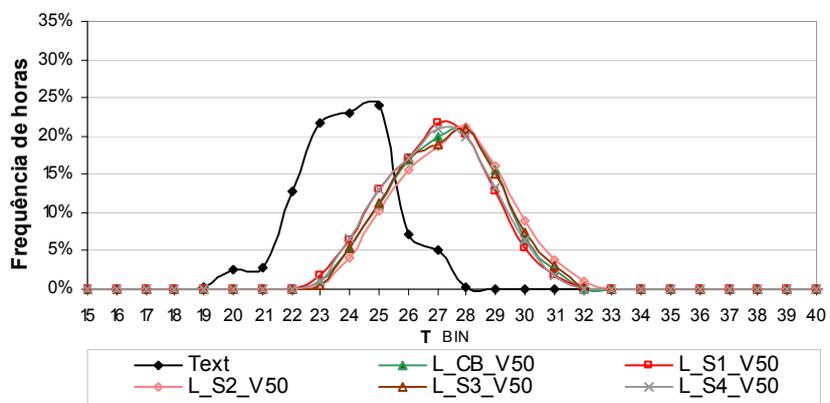
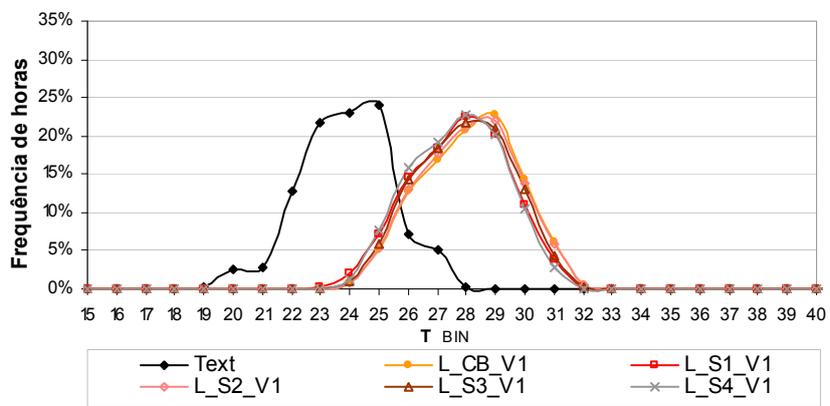
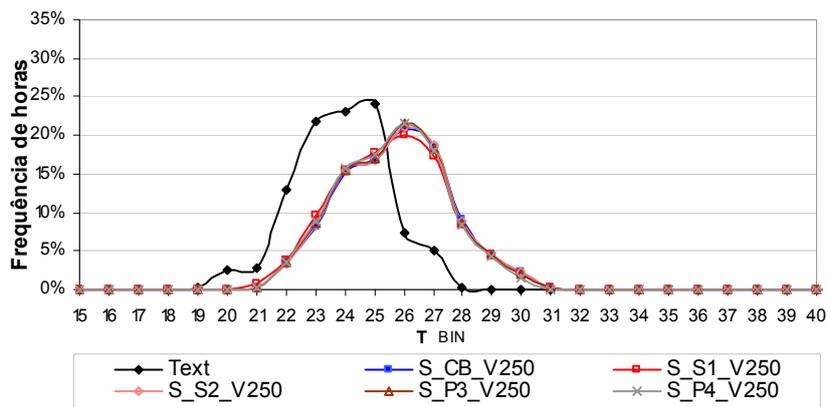
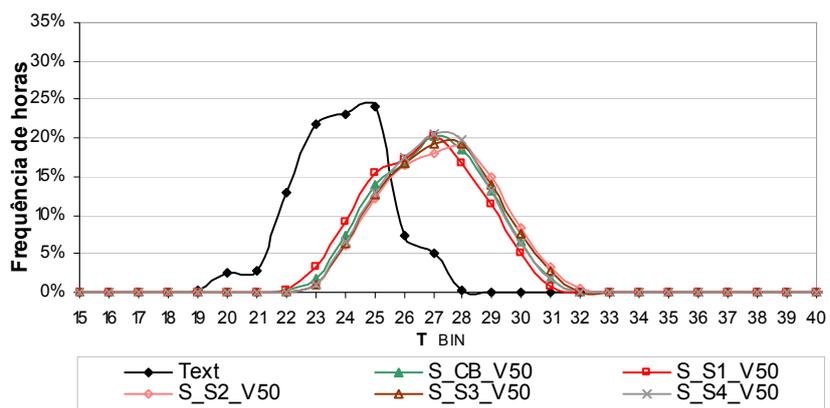


Tipo de sombreamento (S)

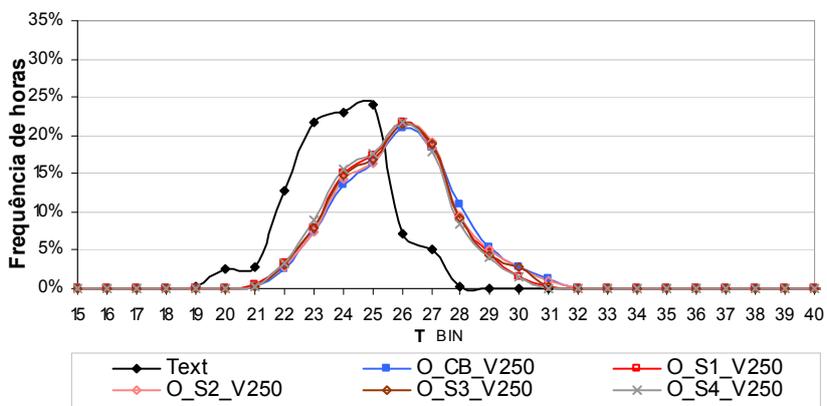
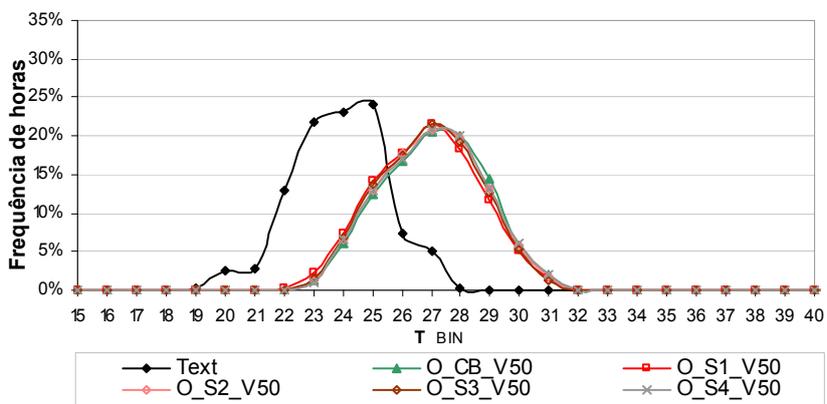
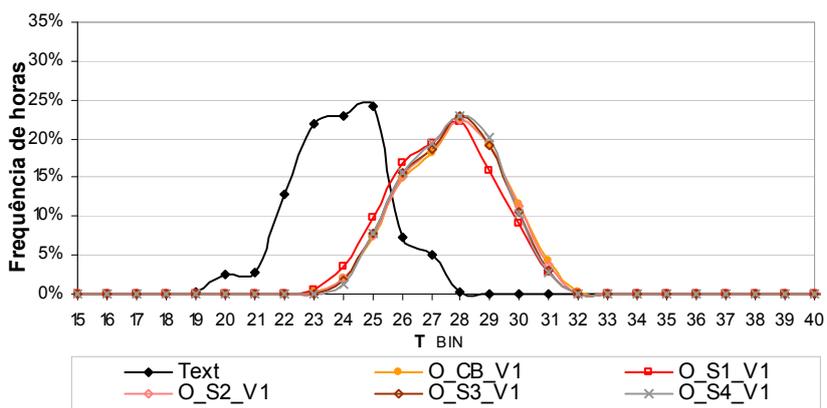
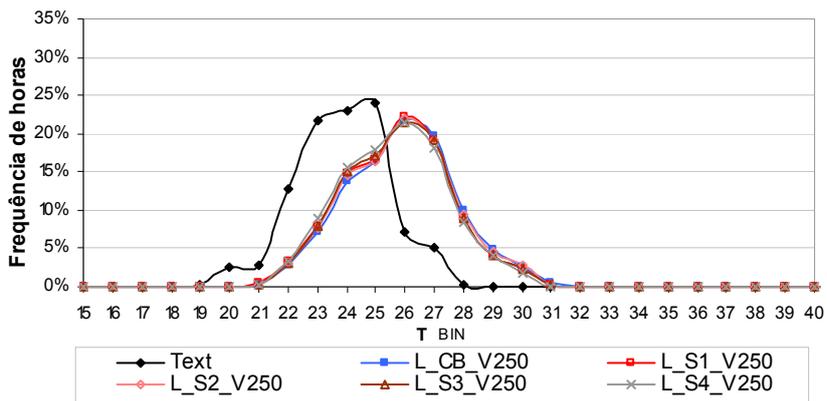
Valores de referência	
S1	Sem proteção
CB	Beiral 60cm
S2	Beiral e muro com recuo de 3.00m
S3	Beiral e muro com recuo de 1.50m
S4	Beiral, muro (1.50m) e protetor



Valores de referência	
S1	Sem proteção
CB	Beiral 60cm
S2	Beiral e muro com recuo de 3.00m
S3	Beiral e muro com recuo de 1.50m
S4	Beiral, muro (1.50m) e protetor

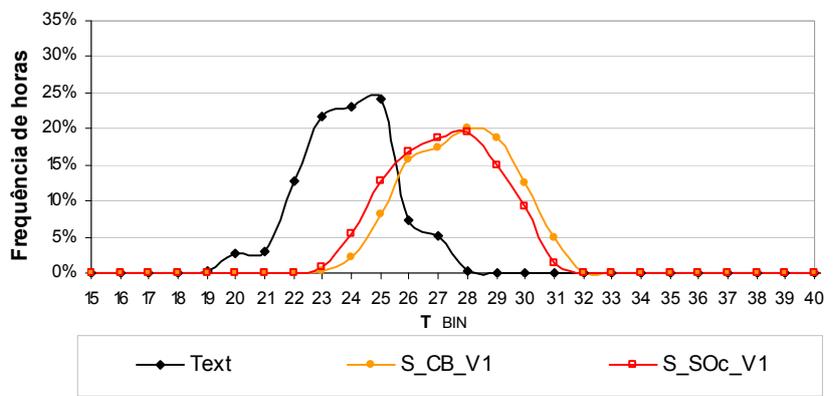
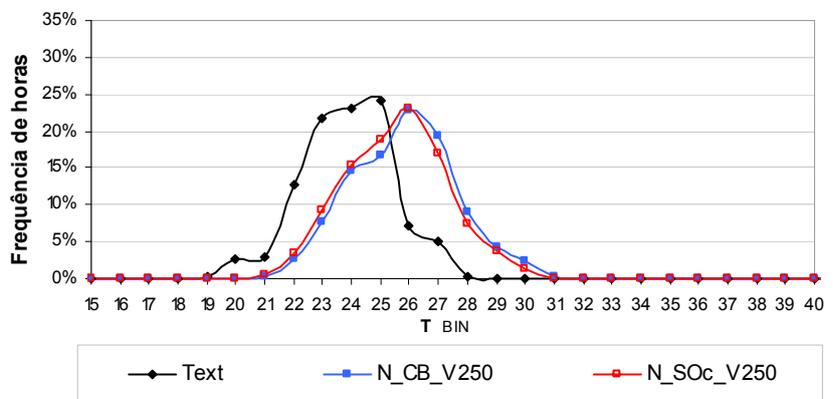
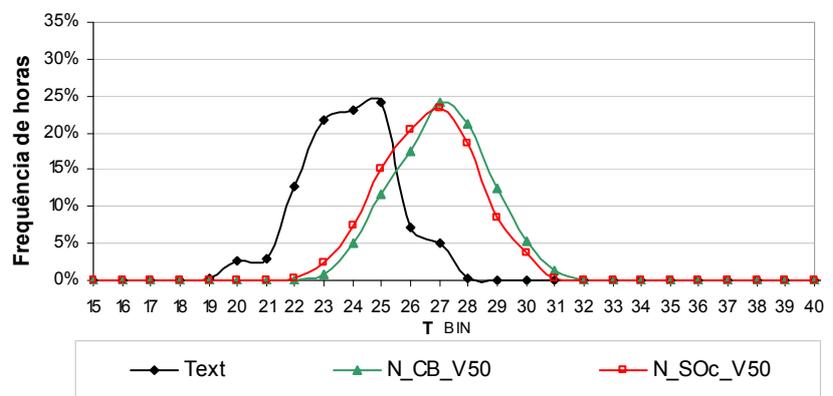
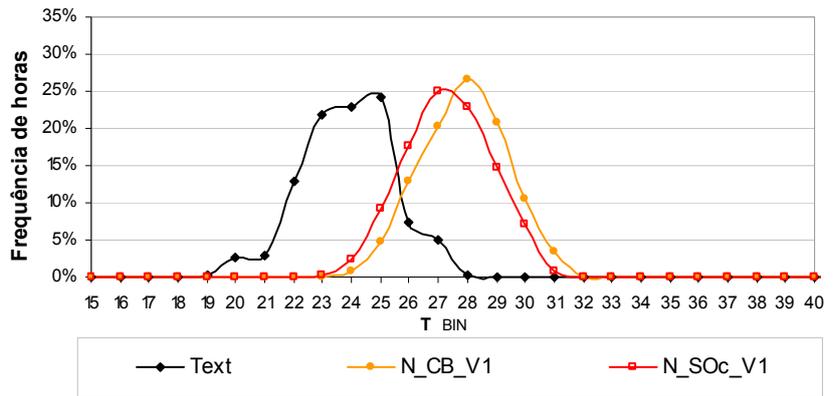


Valores de referência	
S1	Sem proteção
CB	Beiral 60cm
S2	Beiral e muro com recuo de 3.00m
S3	Beiral e muro com recuo de 1.50m
S4	Beiral, muro (1.50m) e protetor

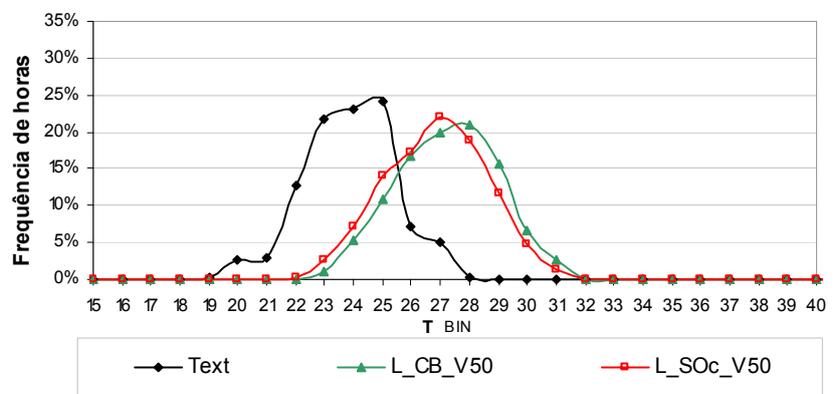
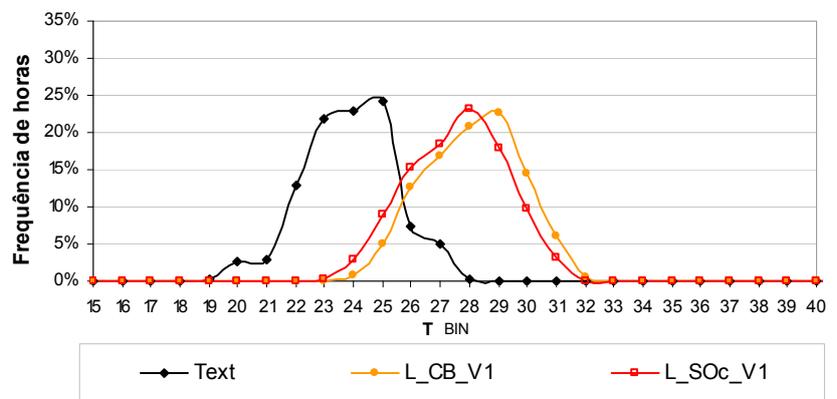
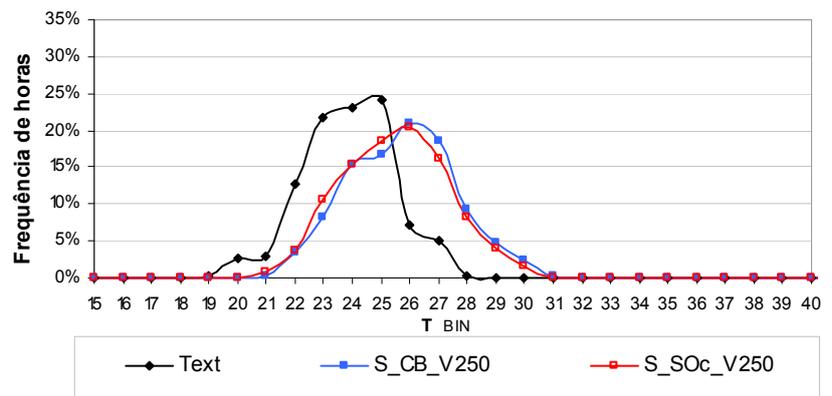
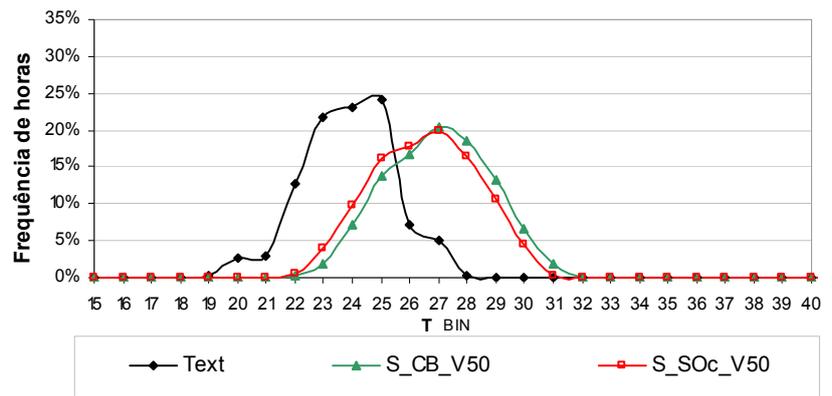


Ocupação (O)

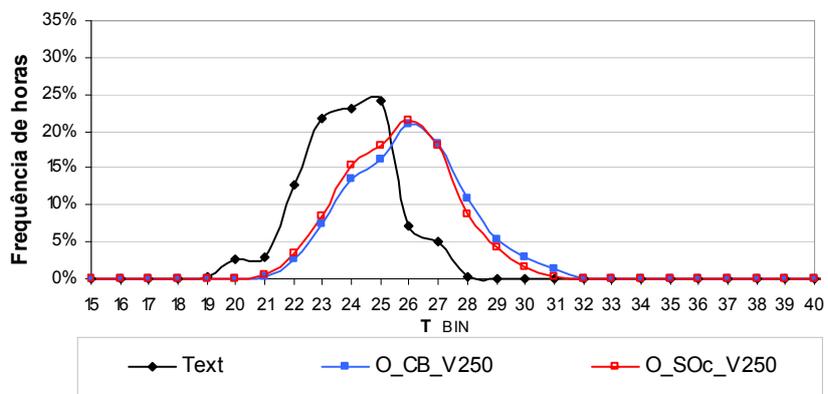
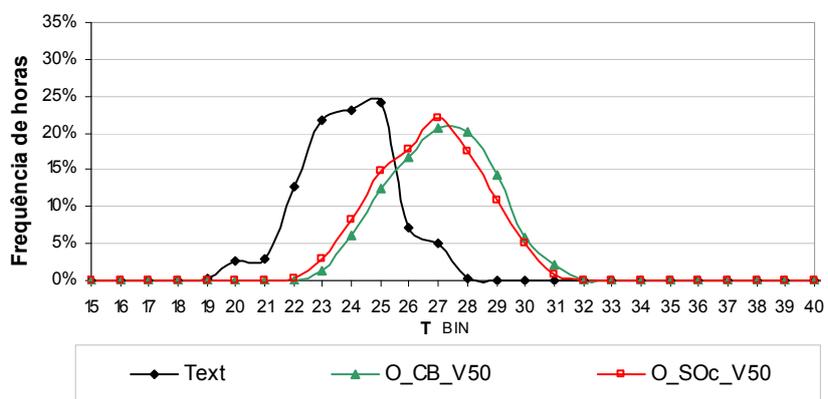
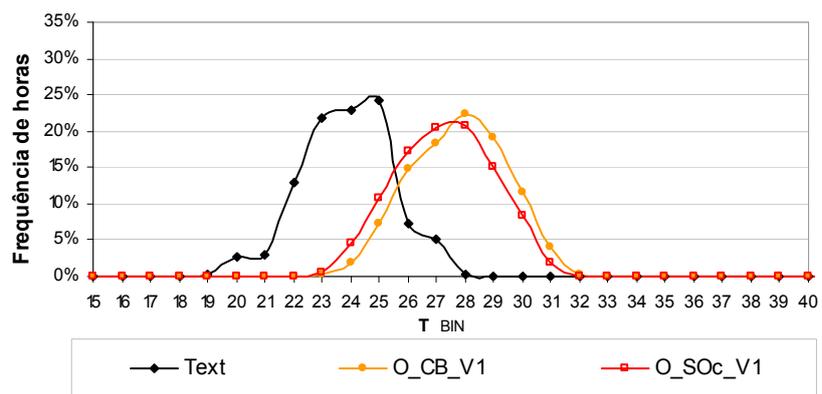
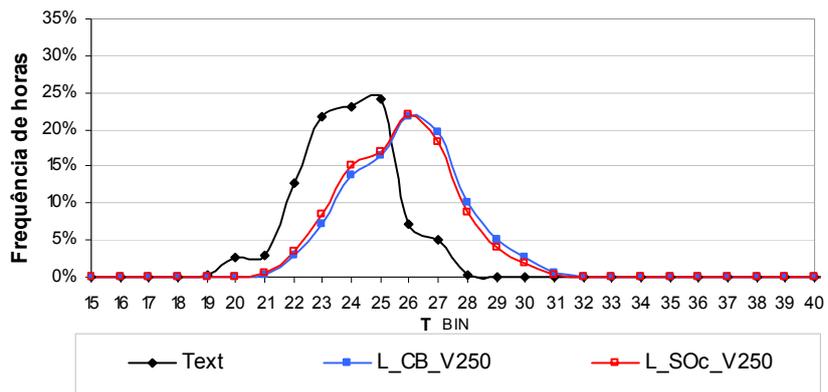
Valores de referência	
CB	Ocupação Base
SOc	Sem ocupação



Valores de referência	
CB	Ocupação Base
SOc	Sem ocupação



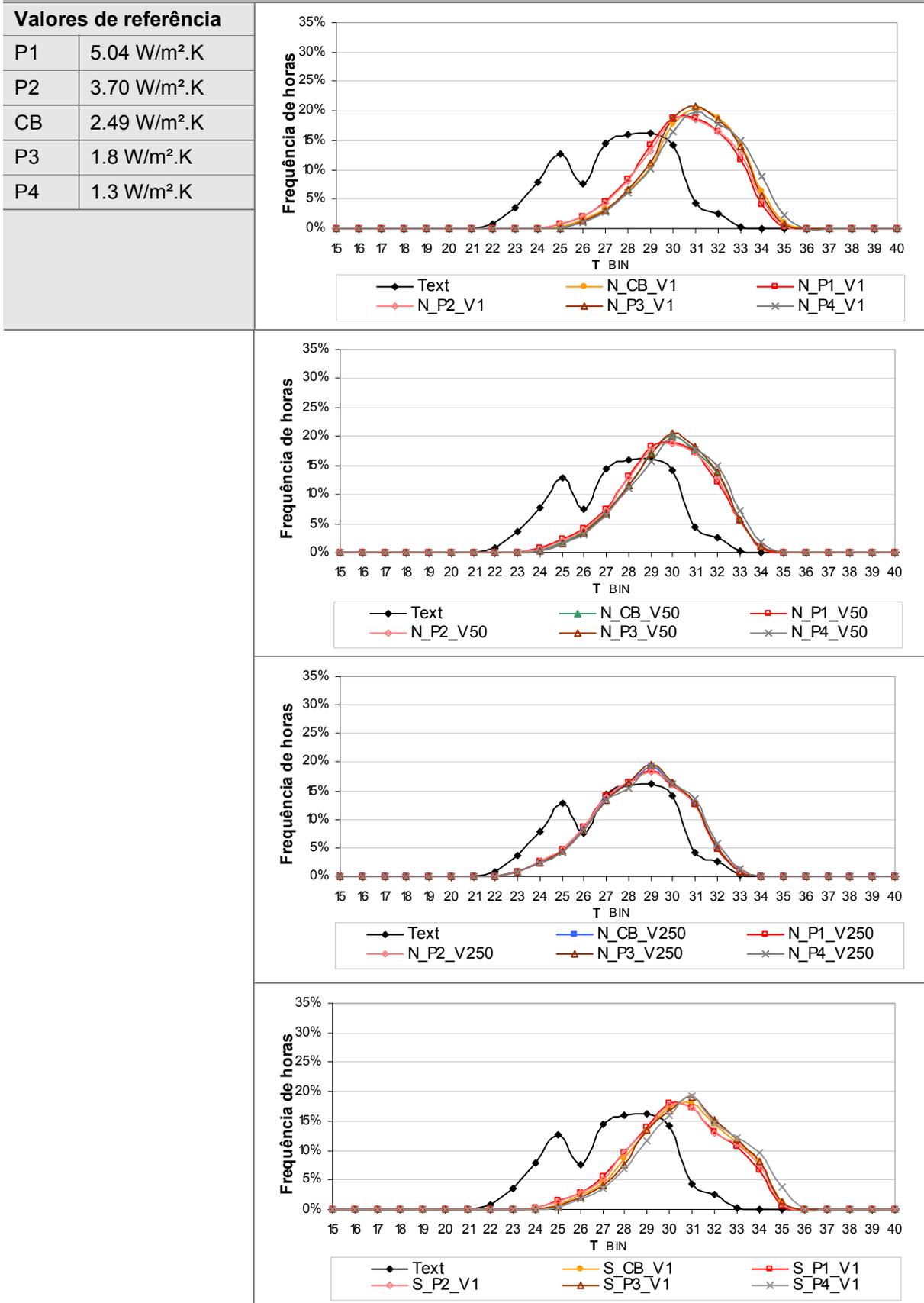
Valores de referência	
CB	Ocupação Base
SOc	Sem ocupação



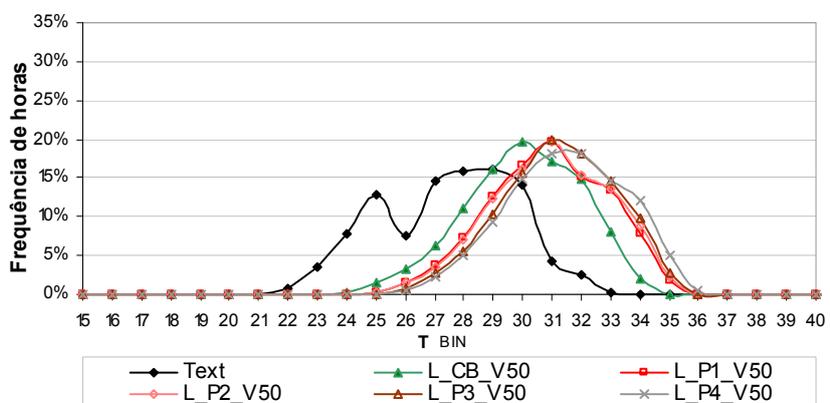
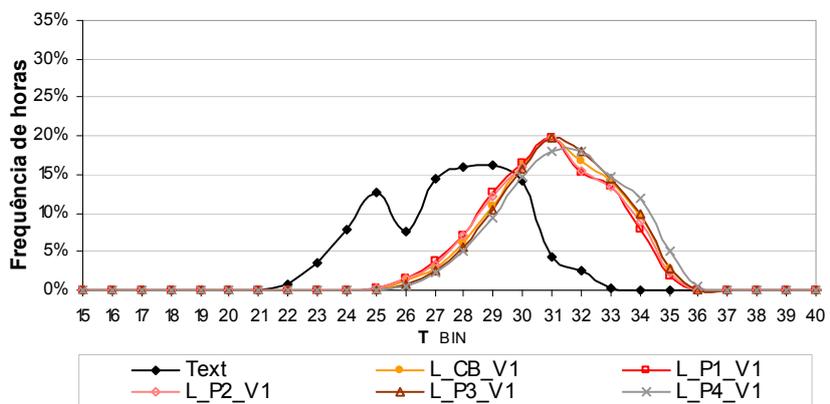
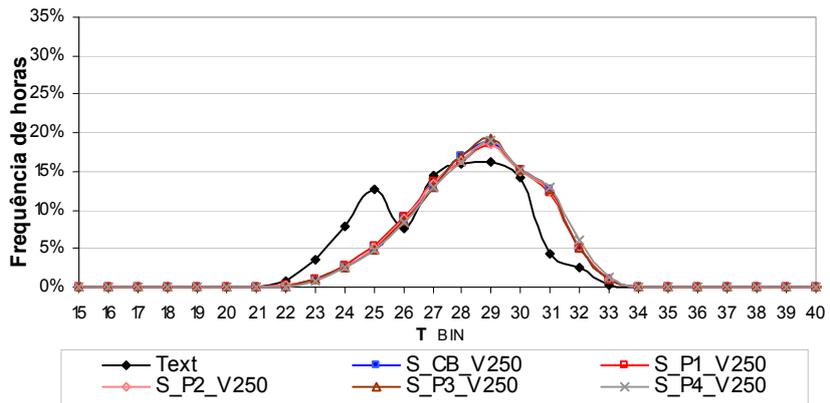
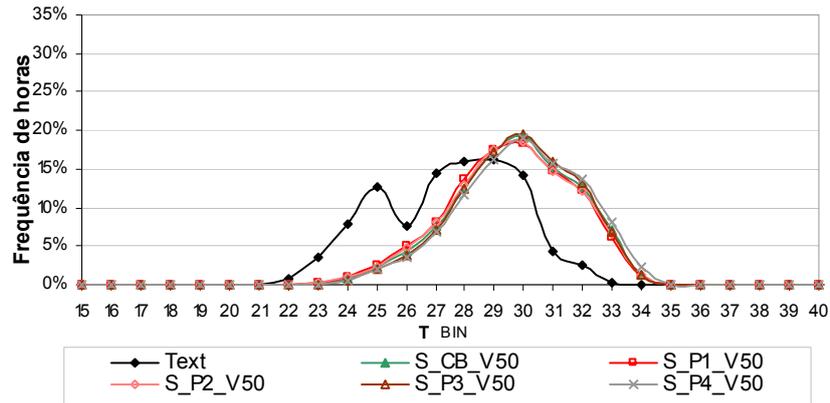
APÊNDICE B

Gráficos da análise de sensibilidade para ocupação sala.

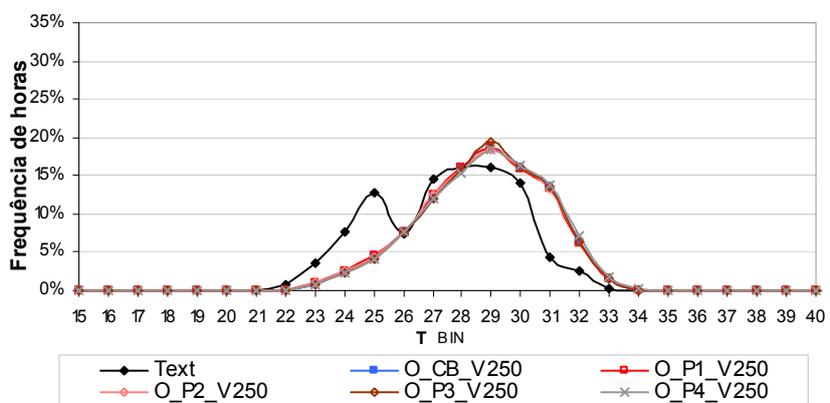
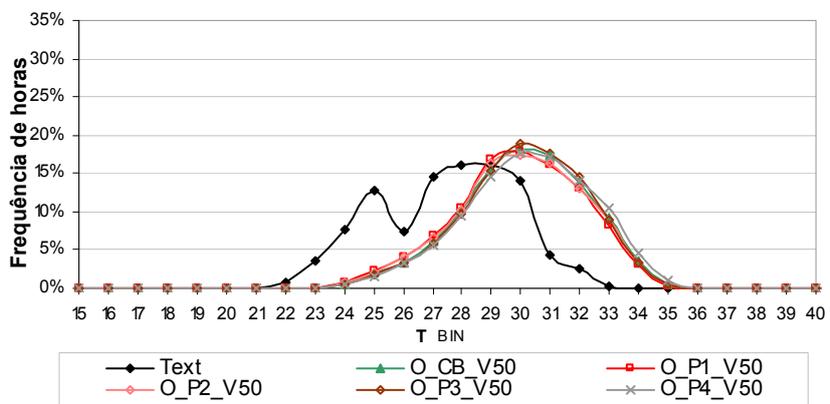
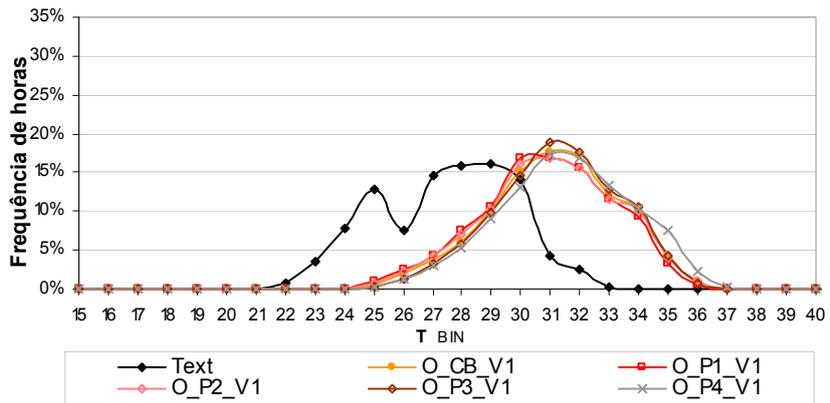
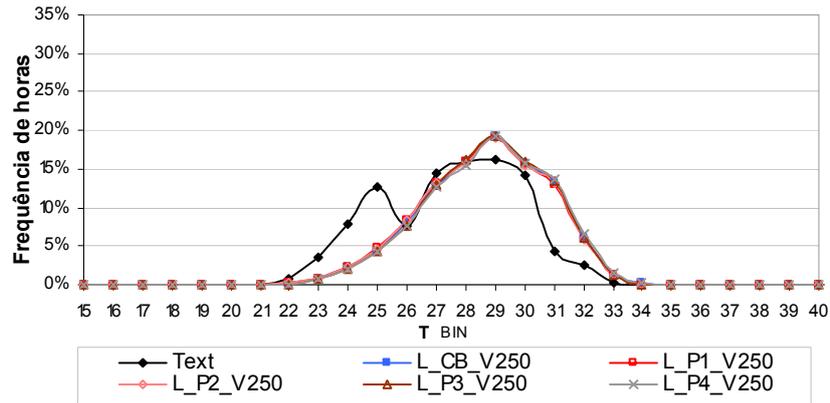
Transmitância de parede (P)



Valores de referência	
P1	5.04 W/m ² .K
P2	3.70 W/m ² .K
CB	2.49 W/m ² .K
P3	1.8 W/m ² .K
P4	1.3 W/m ² .K

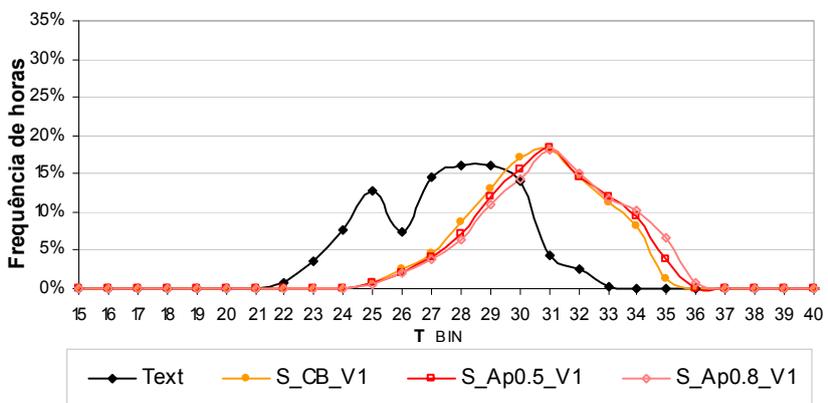
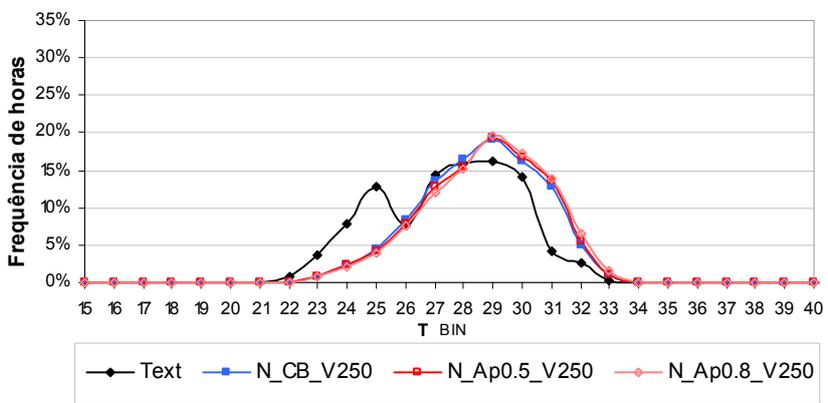
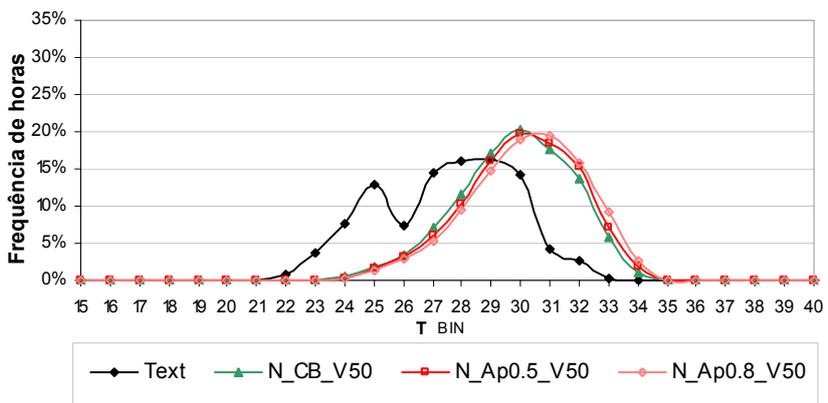
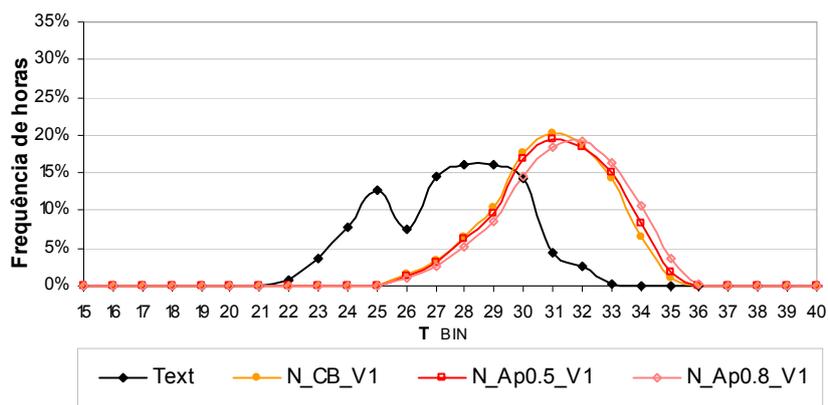


Valores de referência	
P1	5.04 W/m ² .K
P2	3.70 W/m ² .K
CB	2.49 W/m ² .K
P3	1.8 W/m ² .K
P4	1.3 W/m ² .K

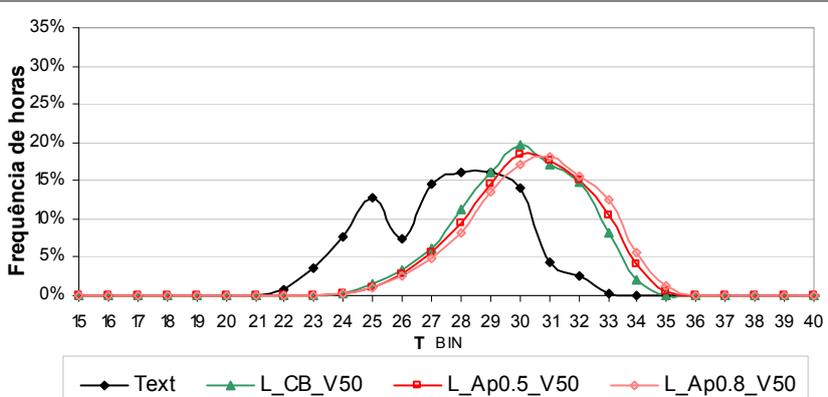
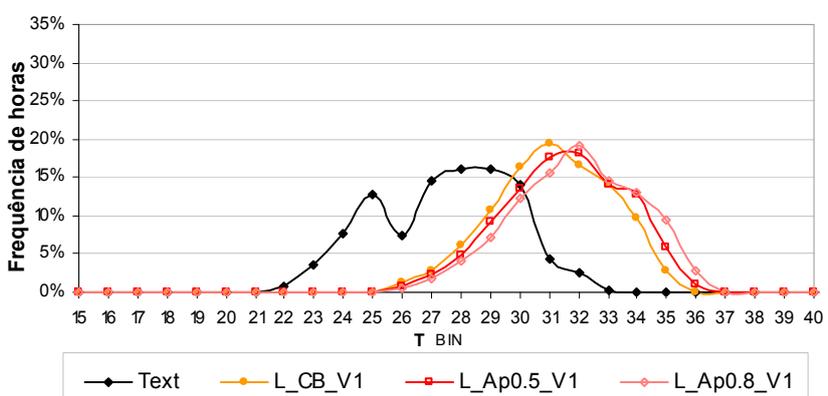
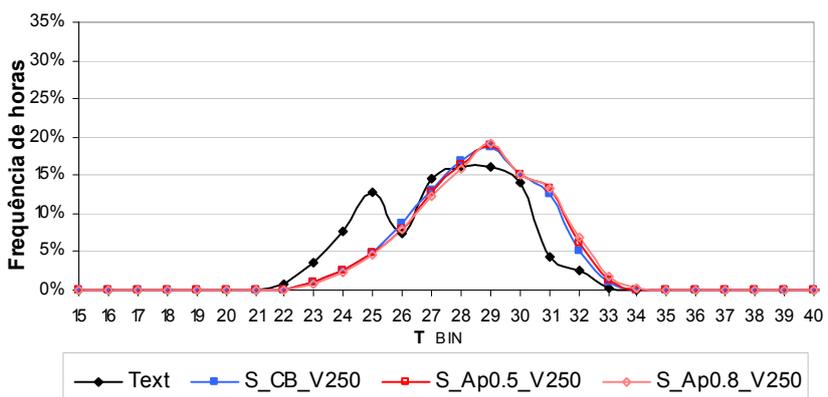
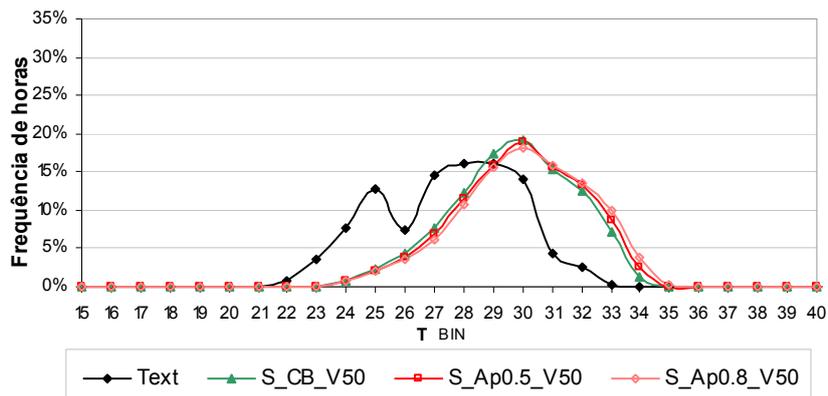


Absortância da parede (Ap)

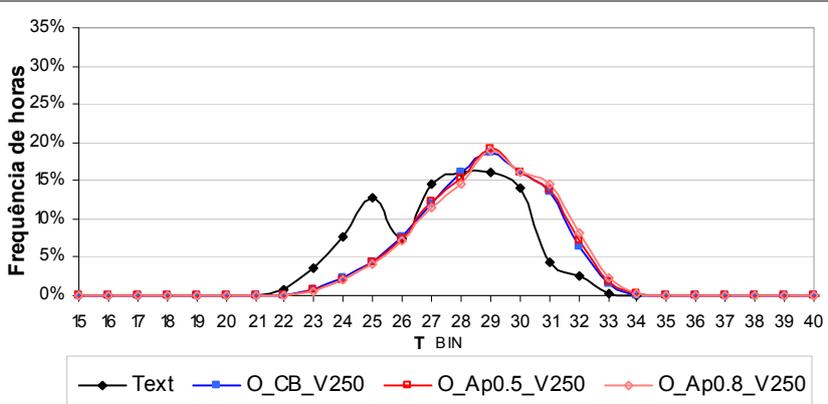
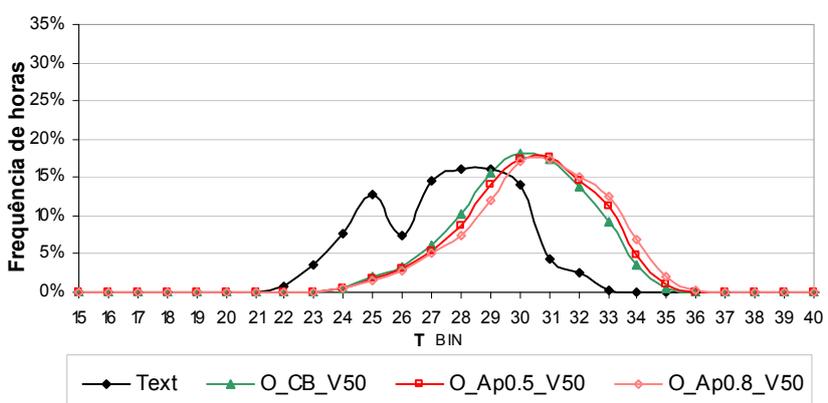
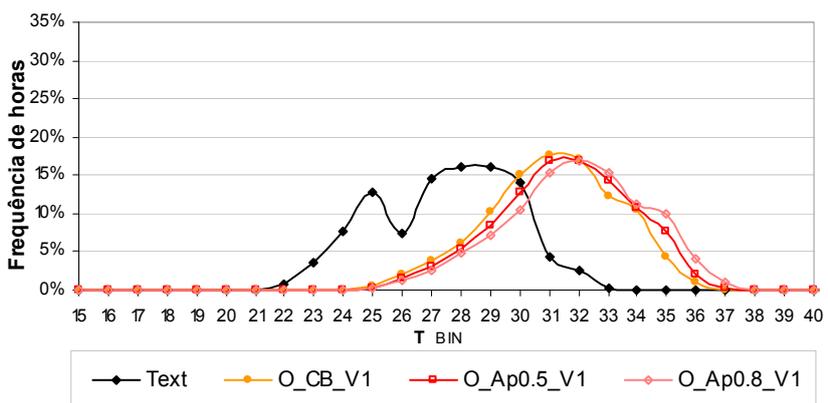
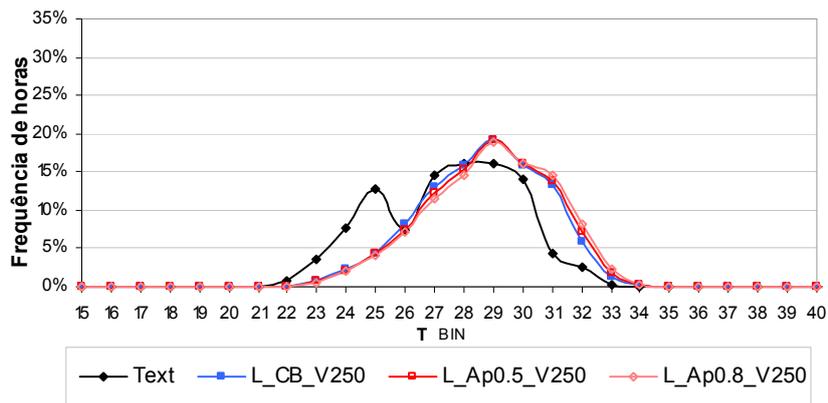
Valores de referência	
CB	0.20
Ap0.5	0.50
Ap0.8	0.80



Valores de referência	
CB	0.20
Ap0.5	0.50
Ap0.8	0.80



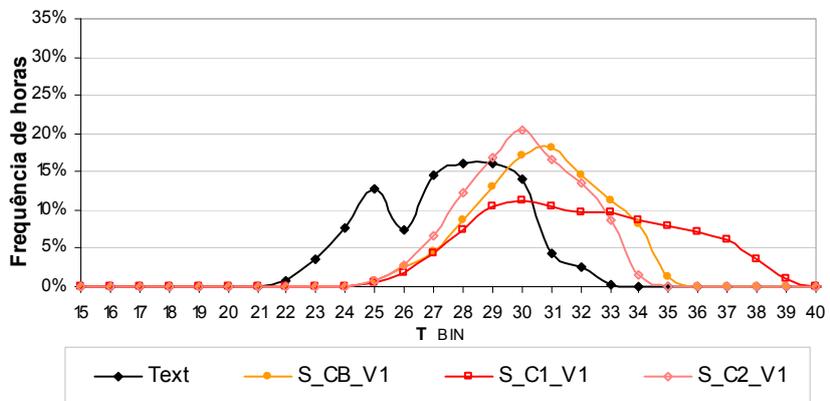
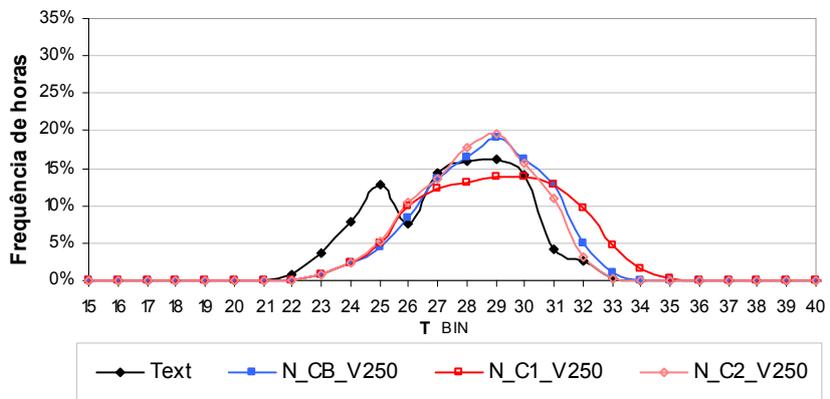
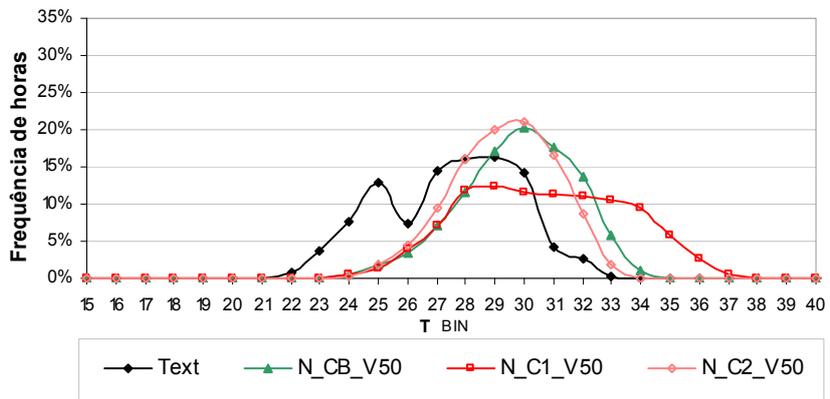
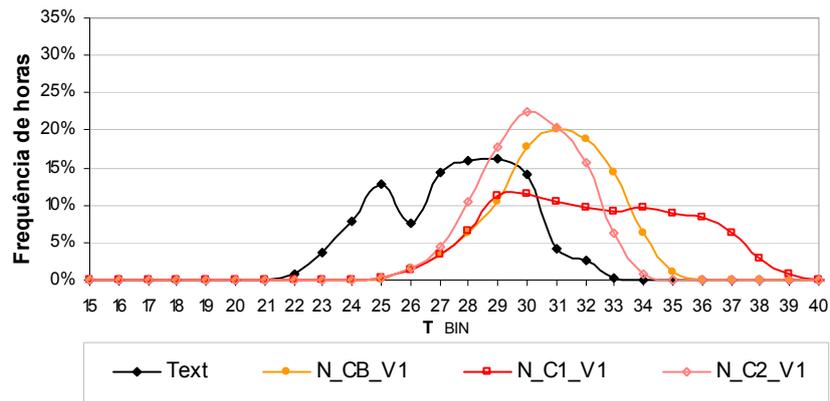
Valores de referência	
CB	0.20
Ap0.5	0.50
Ap0.8	0.80



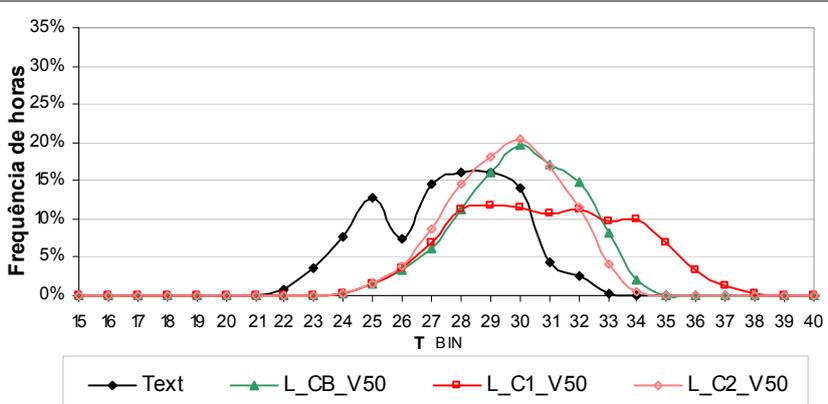
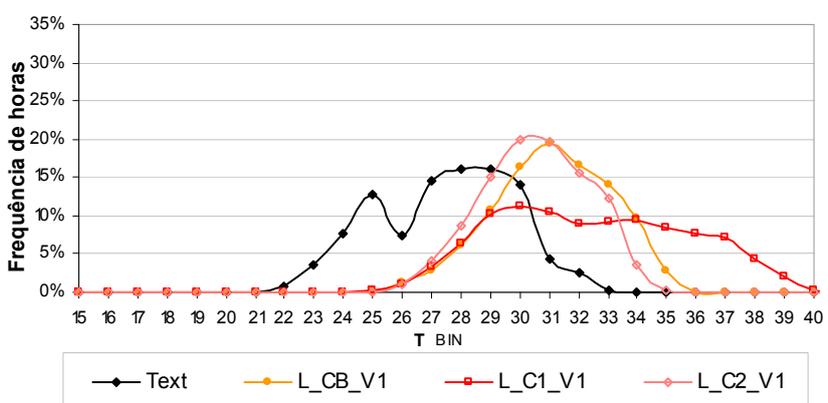
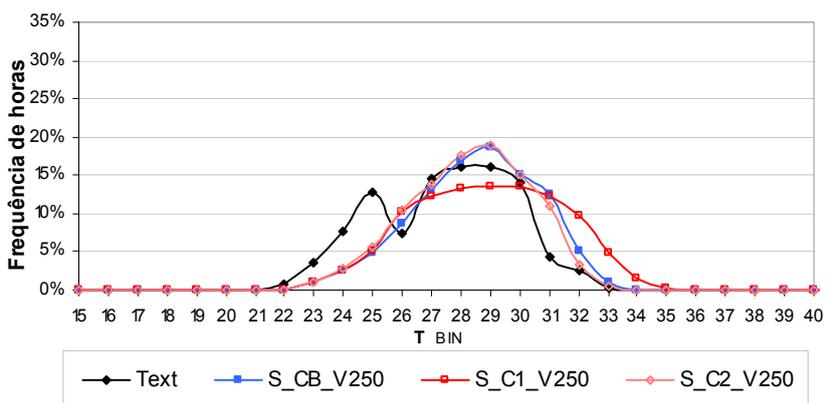
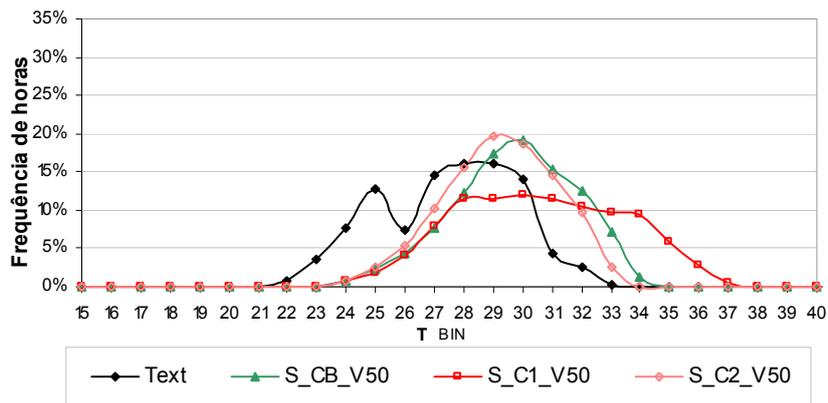
Transmitância da cobertura (C)

Valores de referência

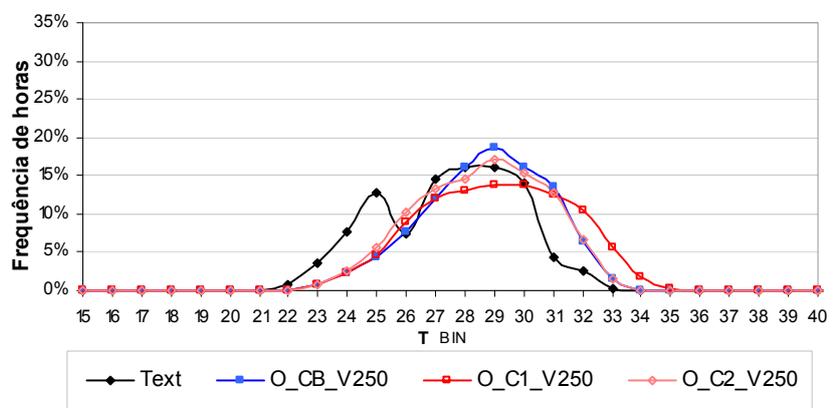
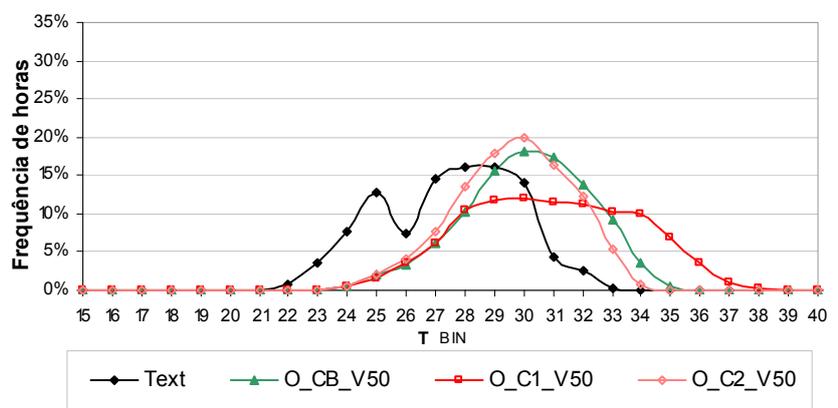
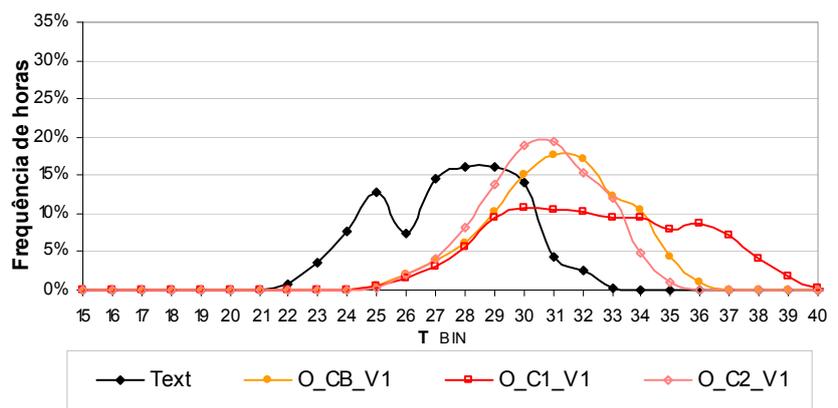
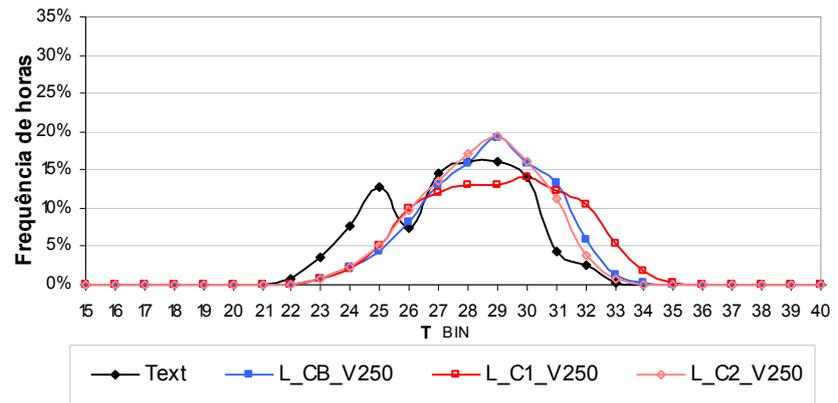
C1	4.55 W/m ² .K
CB	1.92 W/m ² .K
C2	0.62 W/m ² .K



Valores de referência	
C1	4.55 W/m ² .K
CB	1.92 W/m ² .K
C2	0.62 W/m ² .K



Valores de referência	
C1	4.55 W/m ² .K
CB	1.92 W/m ² .K
C2	0.62 W/m ² .K

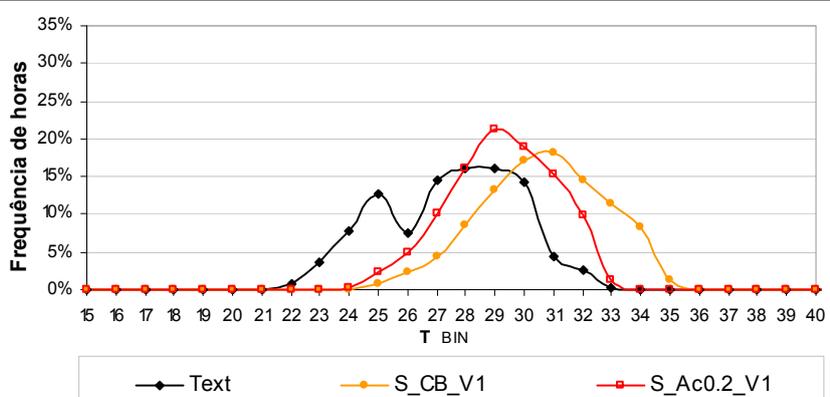
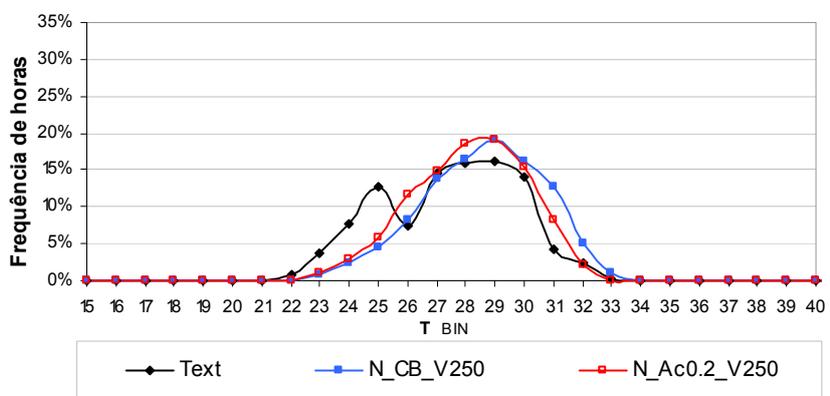
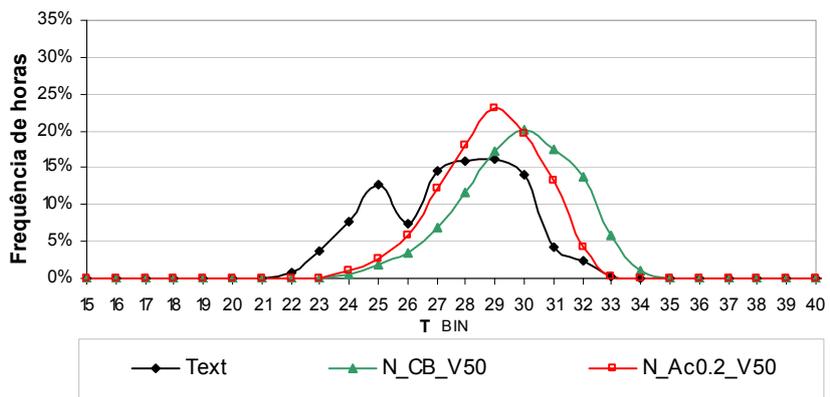
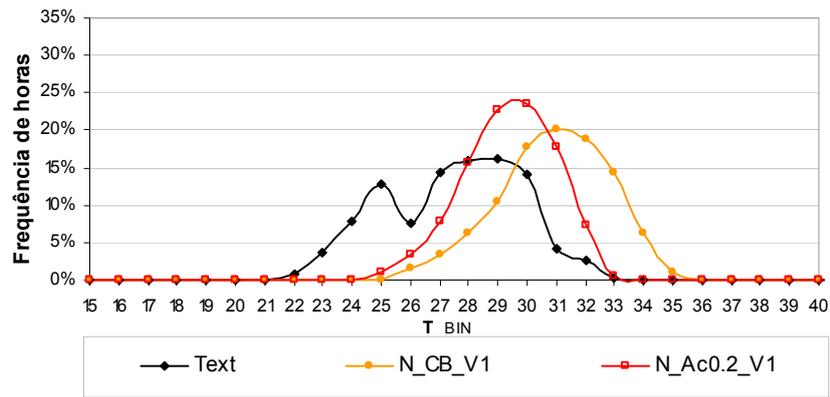


Absortância da cobertura (Ac)

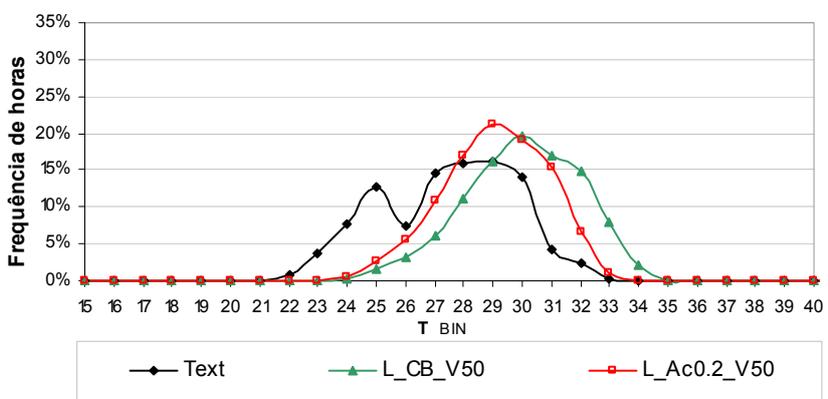
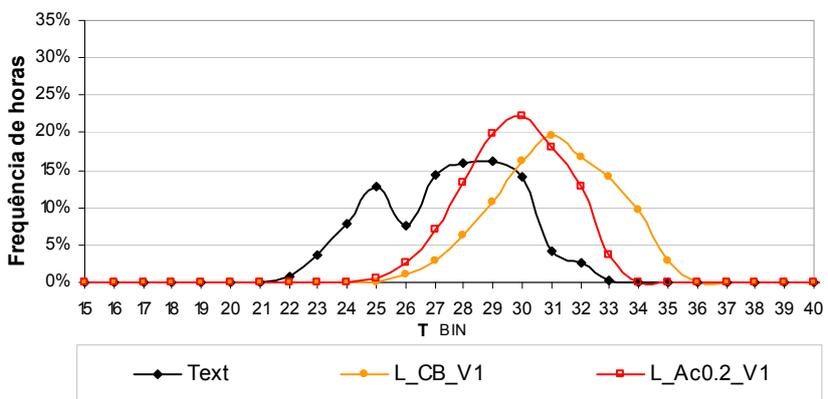
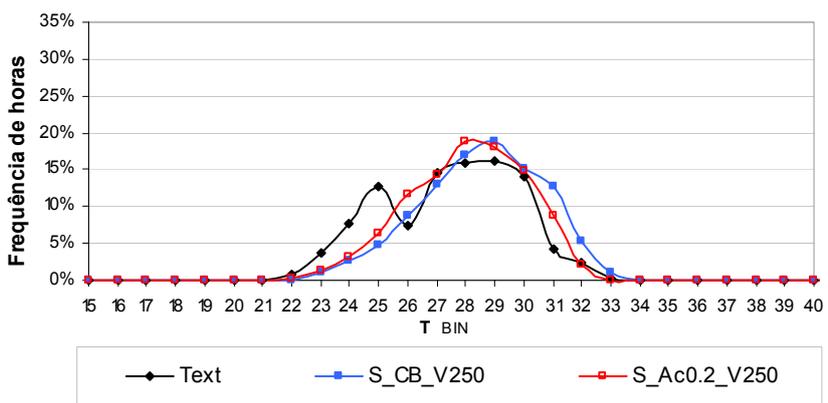
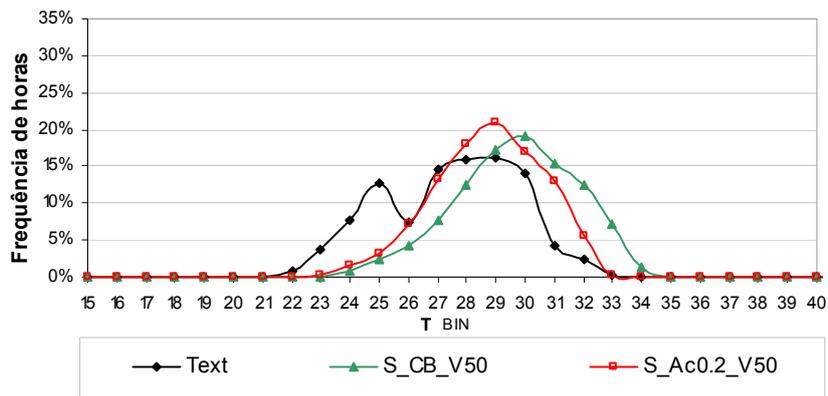
Valores de referência

Ac0.2 0.20

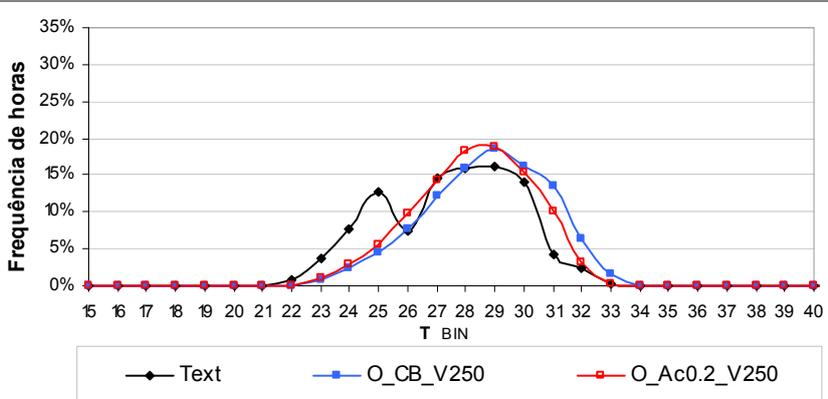
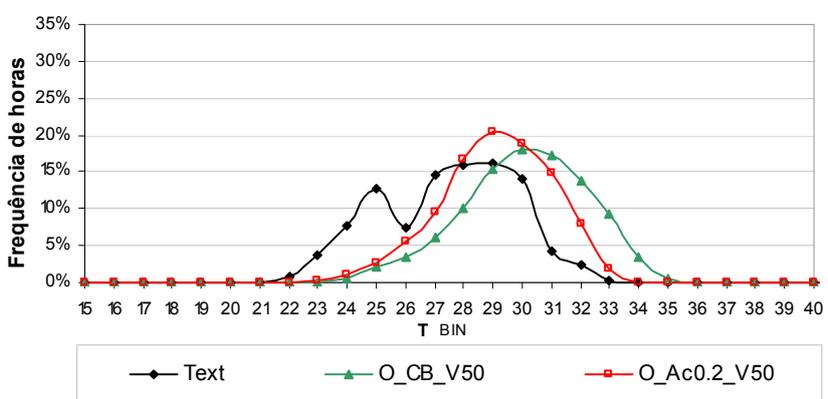
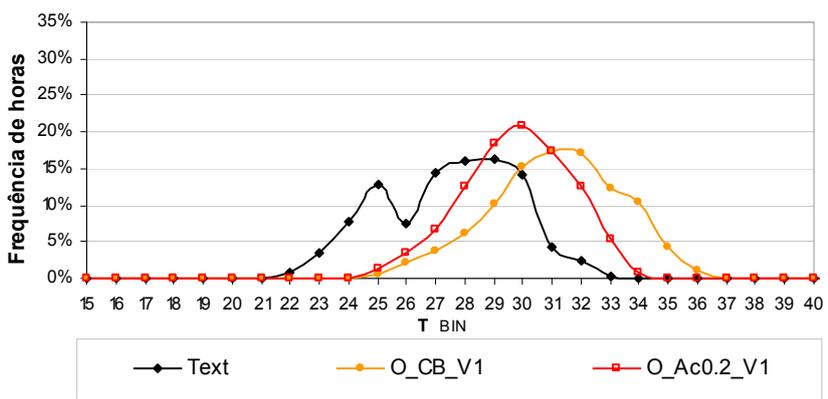
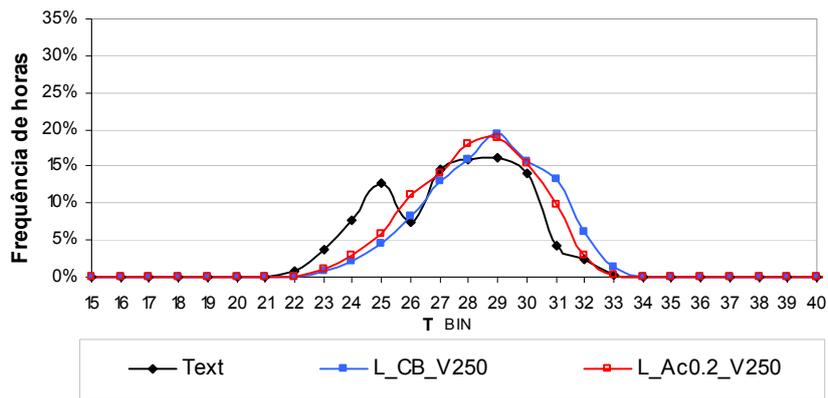
CB 0.70



Valores de referência	
Ac0.2	0.20
CB	0.70



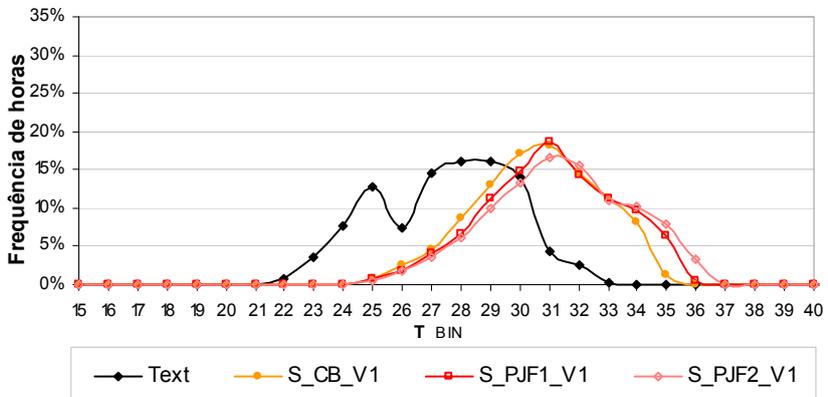
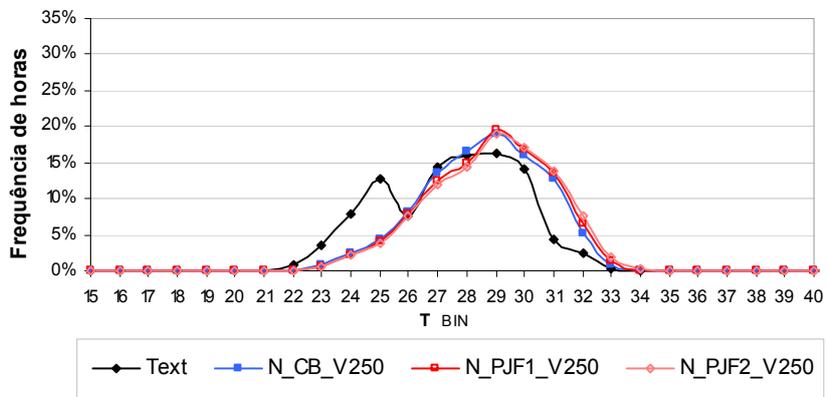
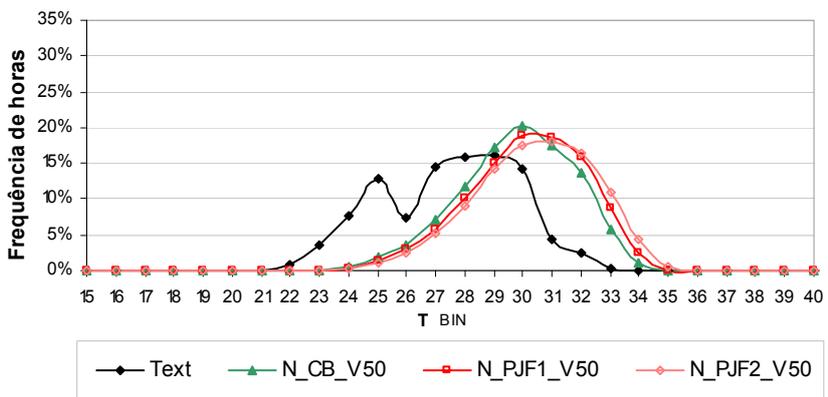
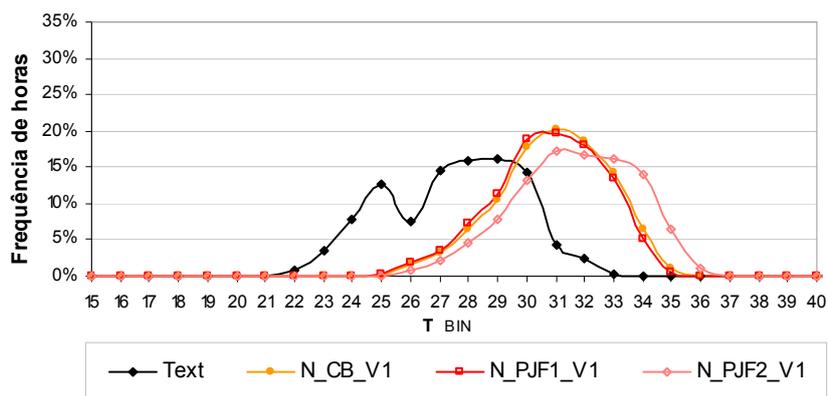
Valores de referência	
Ac0.2	0.20
CB	0.70



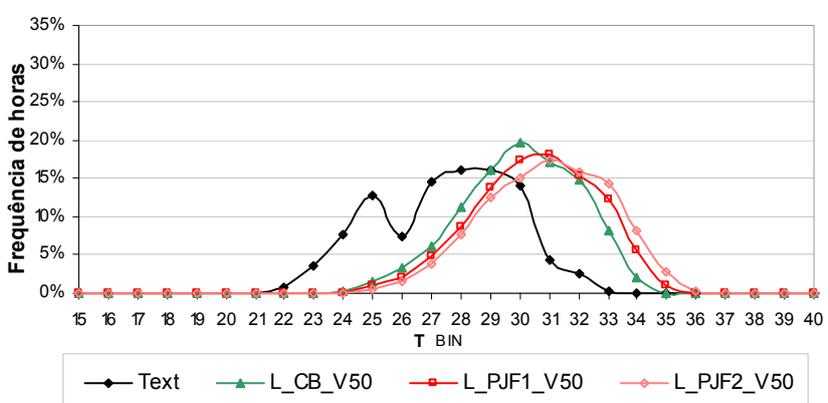
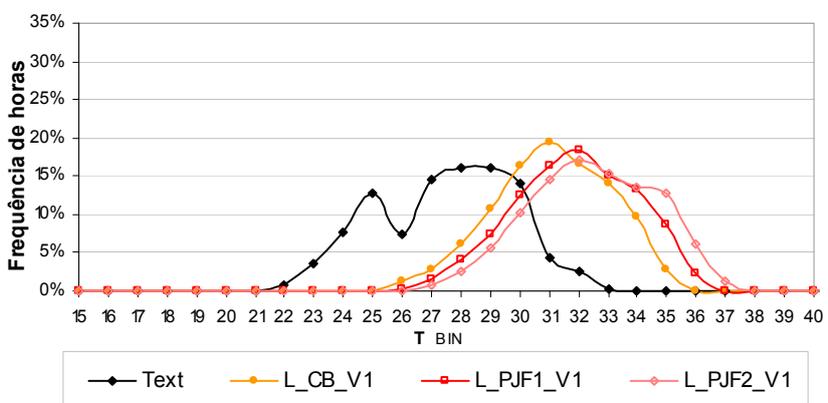
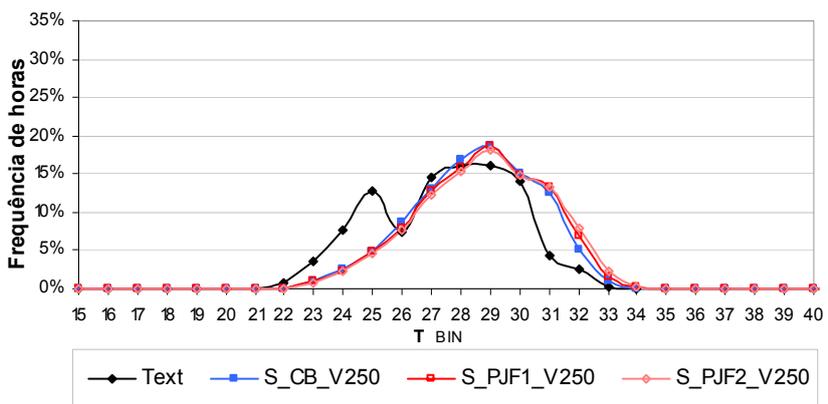
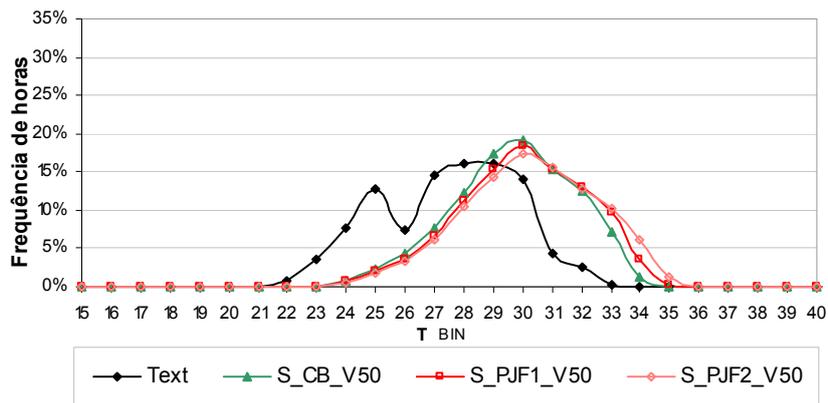
Porcentagem de janela na fachada (PJF)

Valores de referência

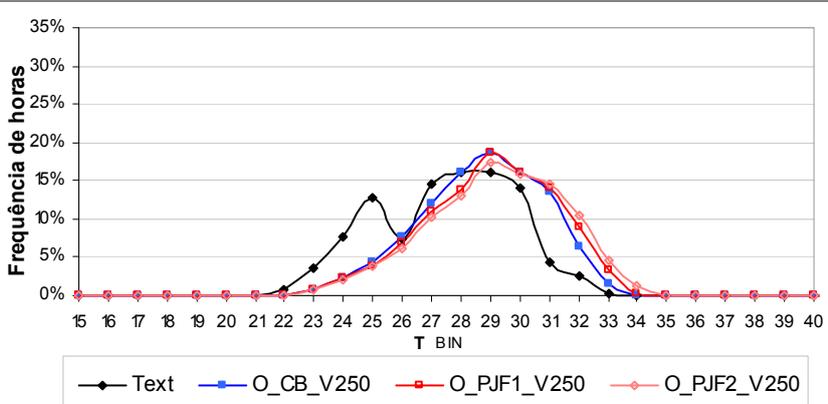
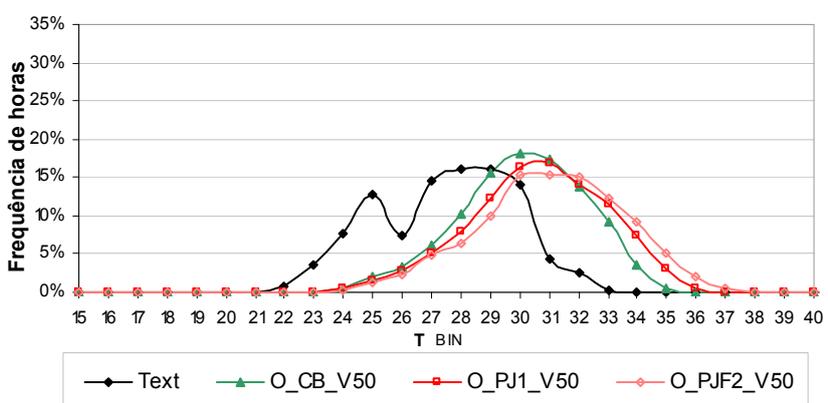
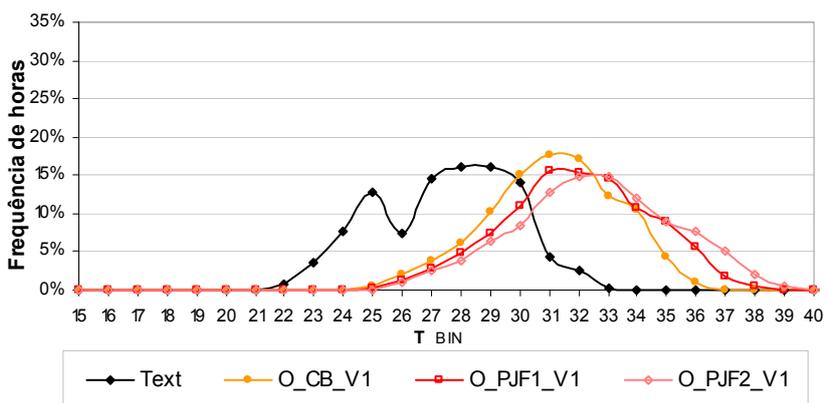
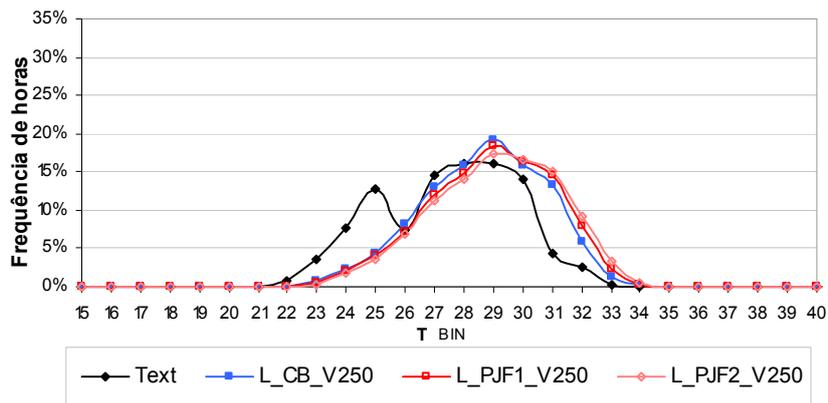
CB	17%
PJF1	33%
PF2	49%



Valores de referência	
CB	17%
PJF1	33%
PF2	49%

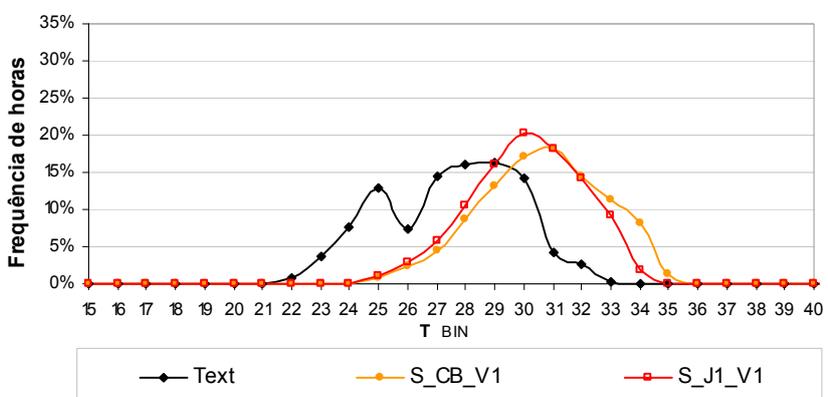
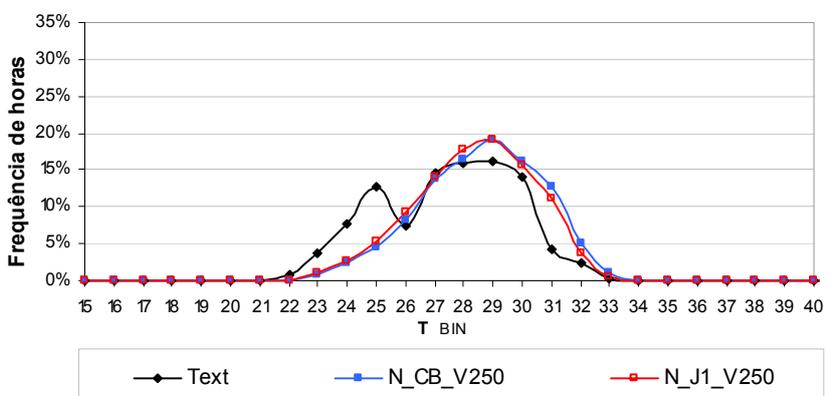
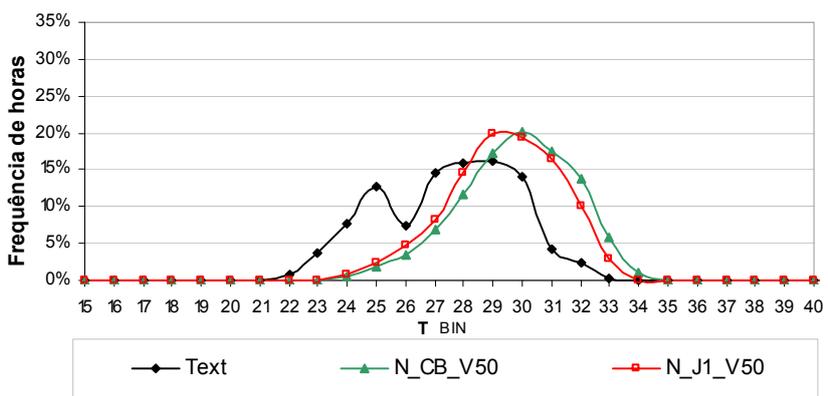
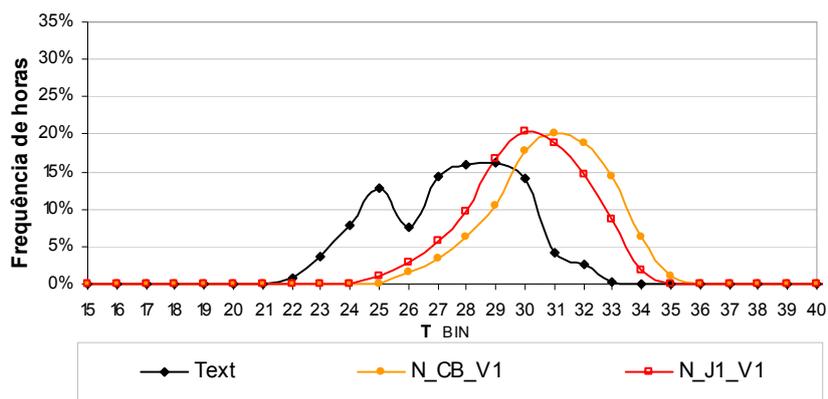


Valores de referência	
CB	17%
PJF1	33%
PF2	49%

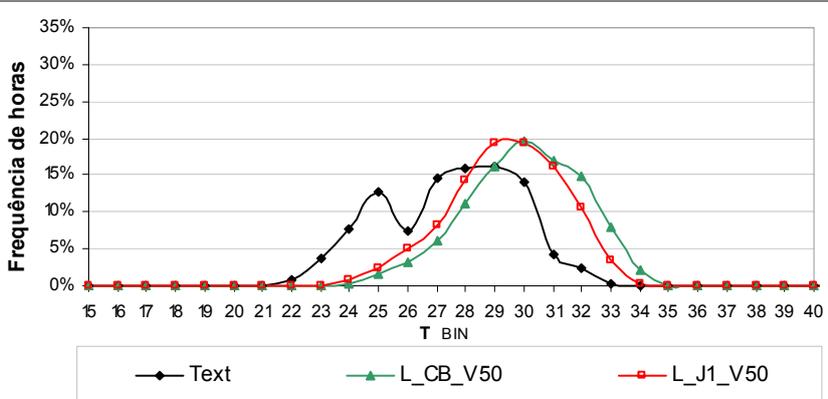
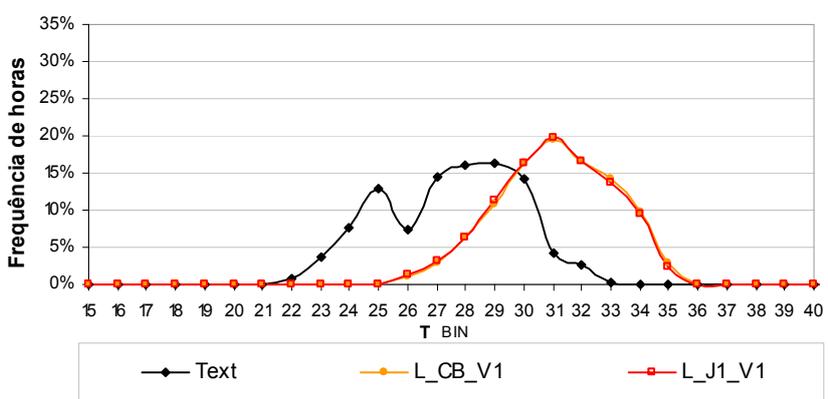
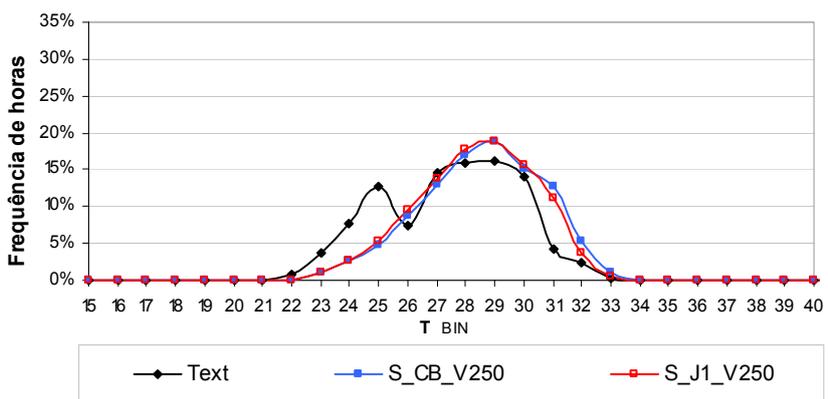
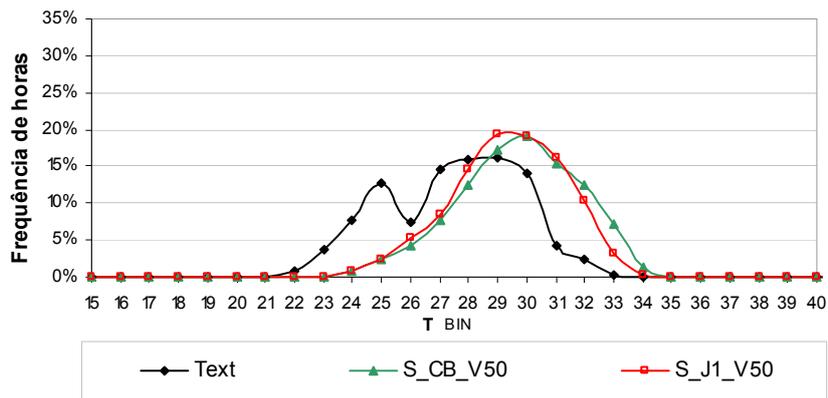


Tipo de janela (J)

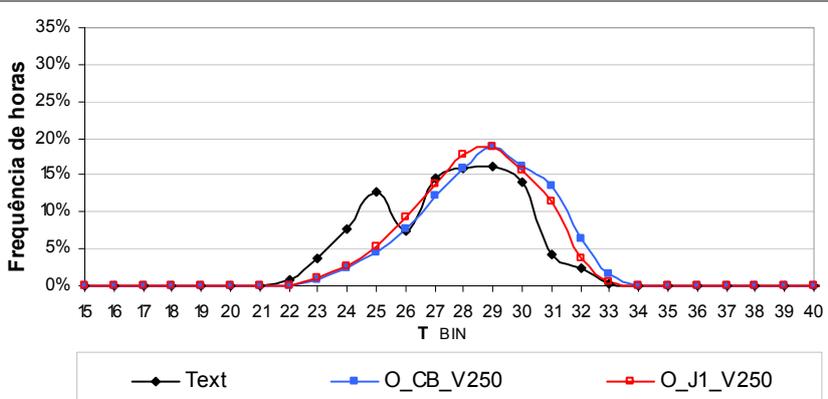
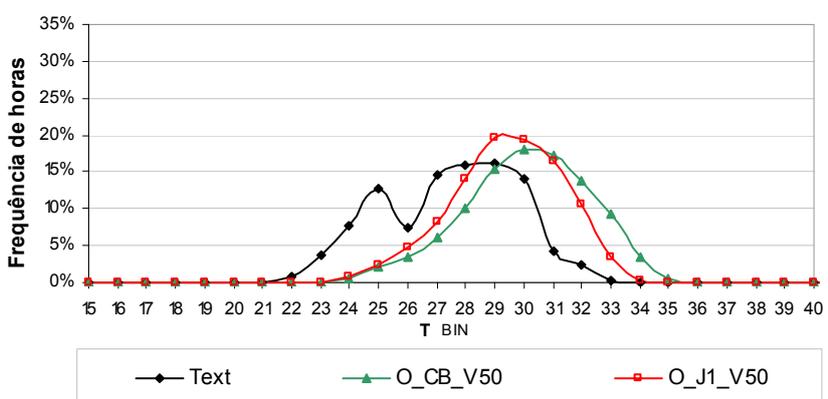
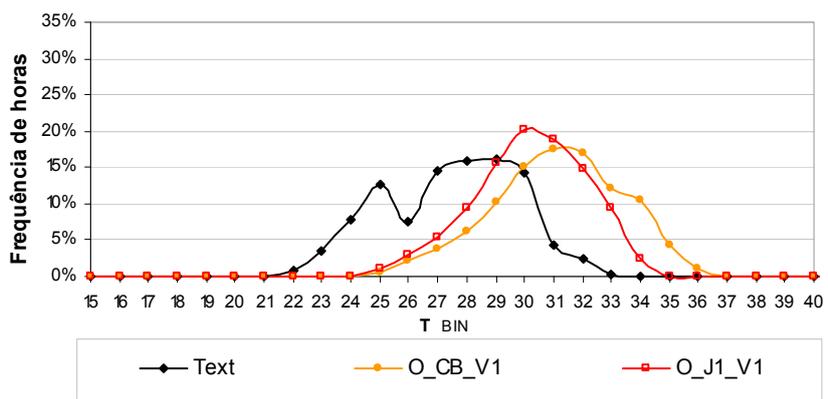
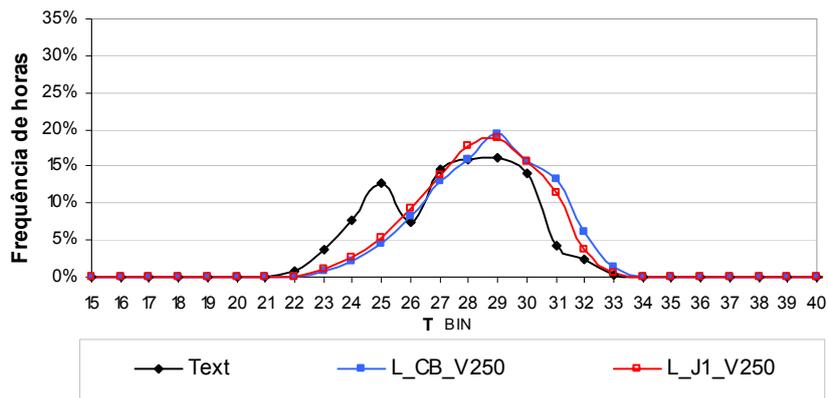
Valores de referência	
CB	(Vidro simples)
J1	(Madeira)



Valores de referência	
CB	(Vidro simples)
J1	(Madeira)

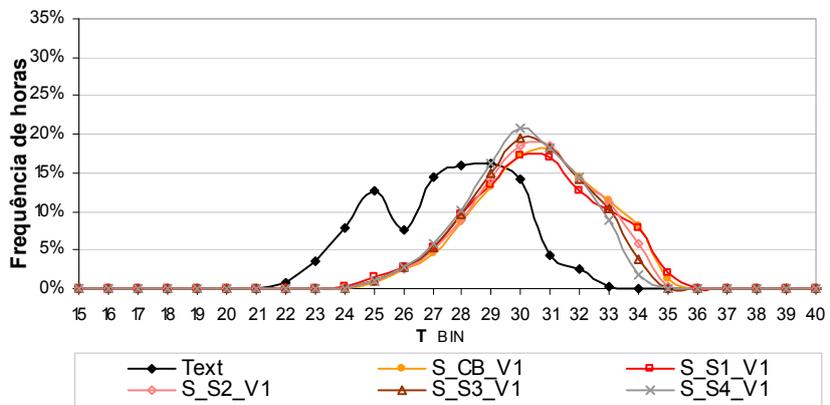
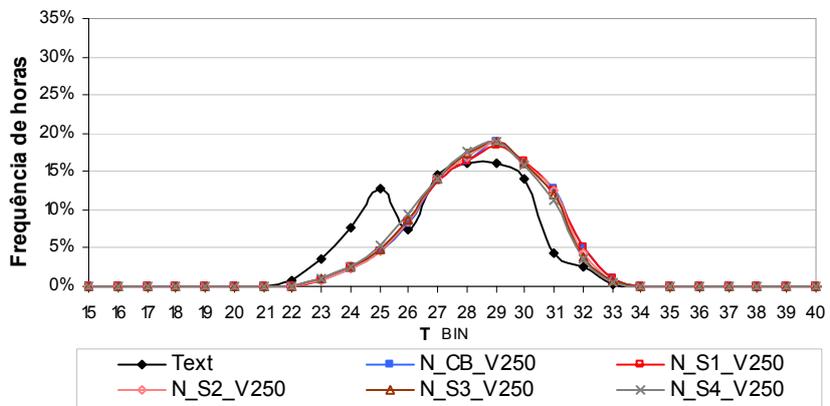
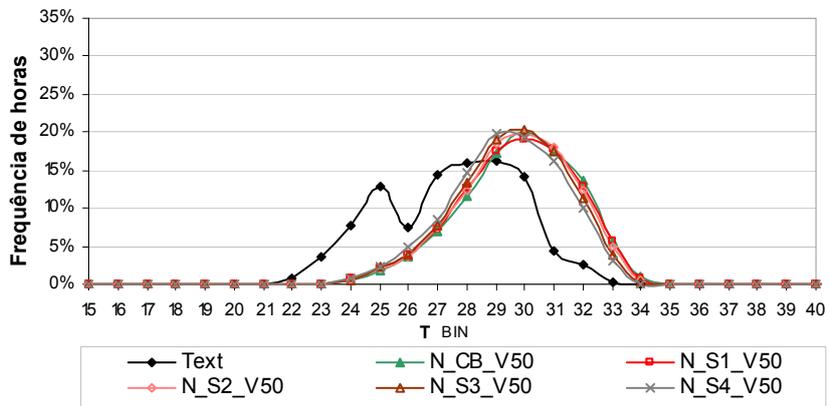
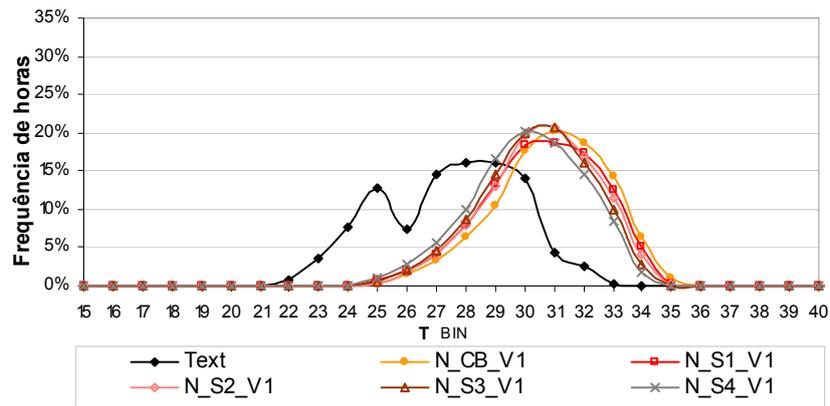


Valores de referência	
CB	(Vidro simples)
J1	(Madeira)

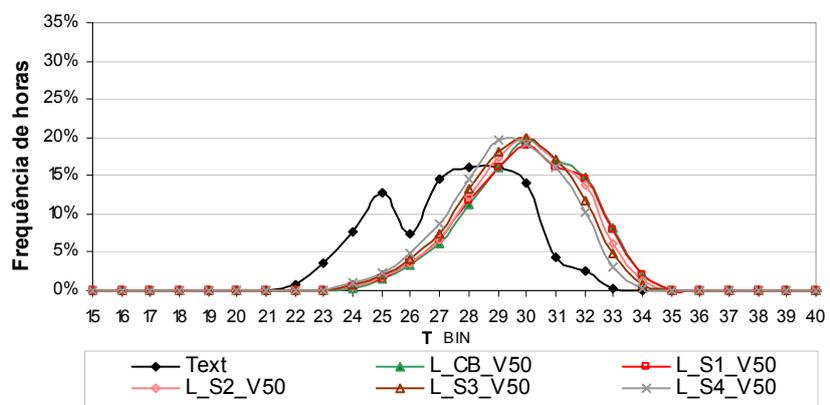
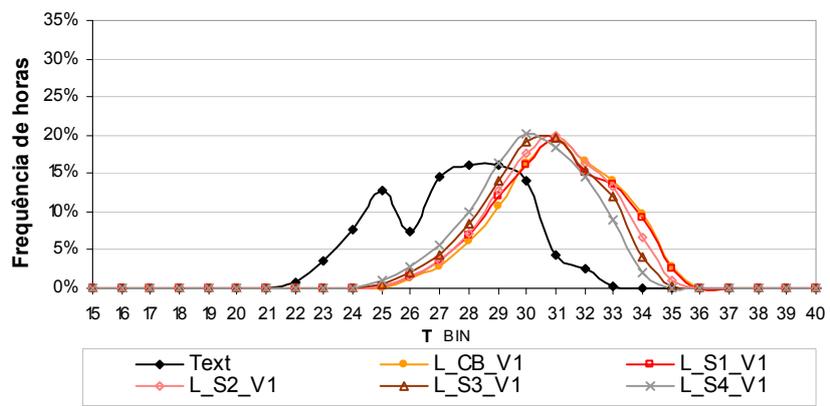
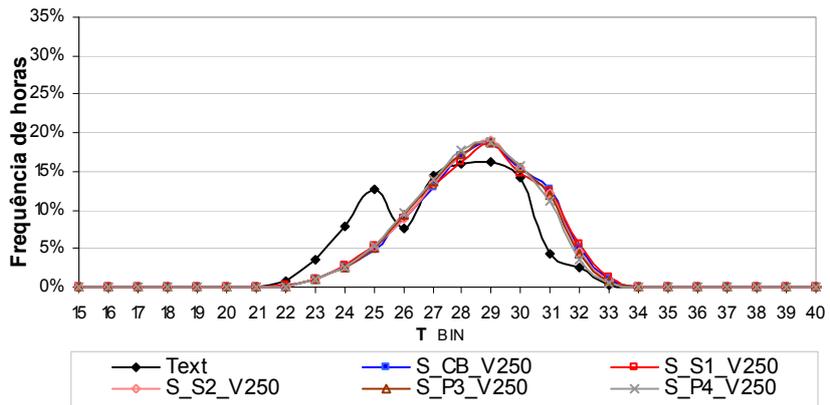
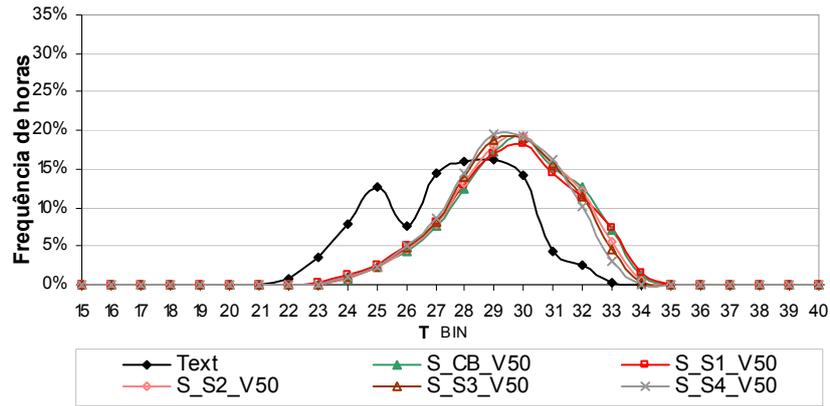


Tipo de sombreamento (S)

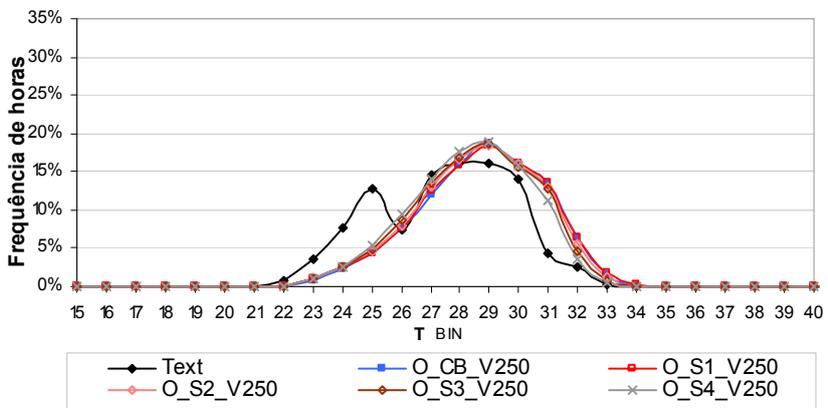
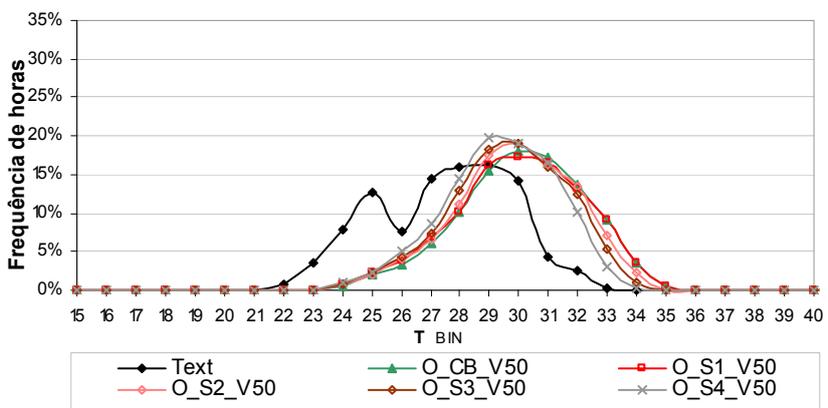
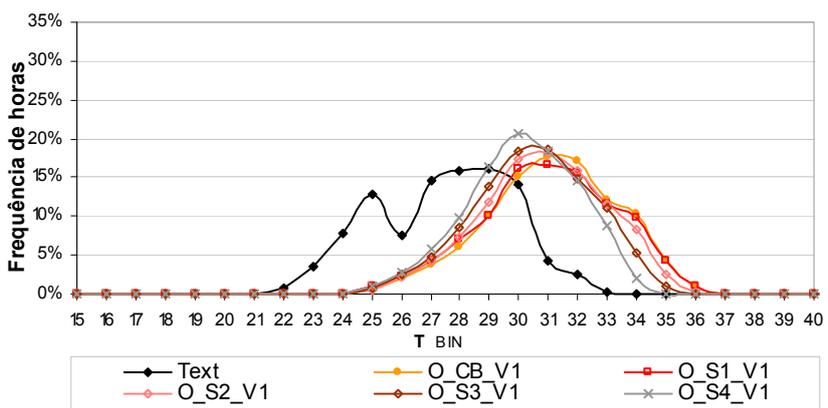
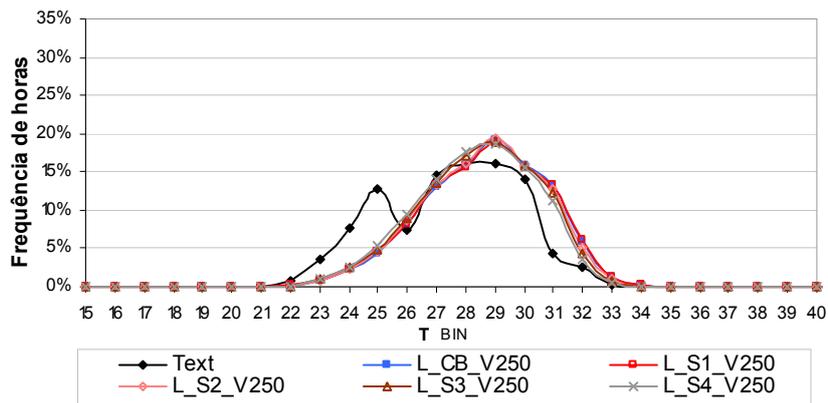
Valores de referência	
S1	Sem proteção
CB	Beiral 60cm
S2	Beiral e muro com recuo de 3.00m
S3	Beiral e muro com recuo de 1.50m
S4	Beiral, muro (1.50m) e protetor



Valores de referência	
S1	Sem proteção
CB	Beiral 60cm
S2	Beiral e muro com recuo de 3.00m
S3	Beiral e muro com recuo de 1.50m
S4	Beiral, muro (1.50m) e protetor

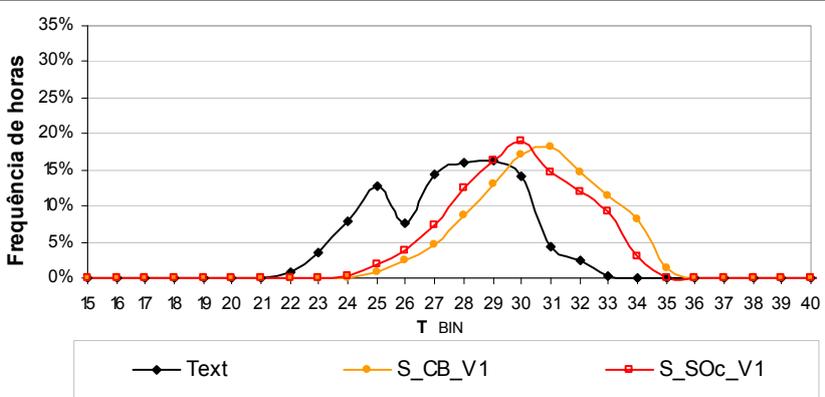
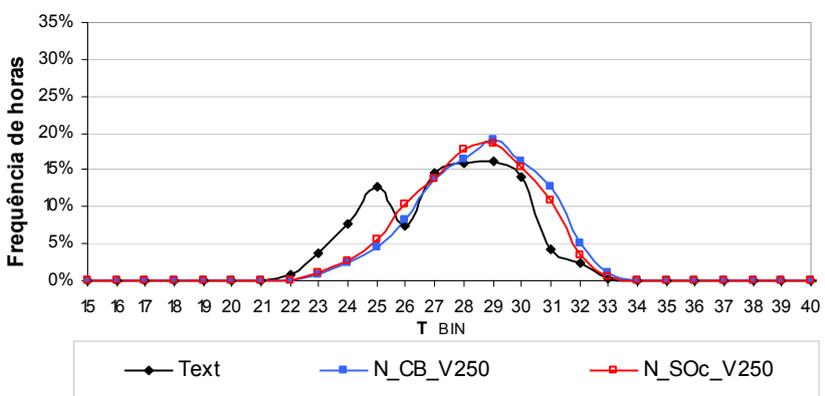
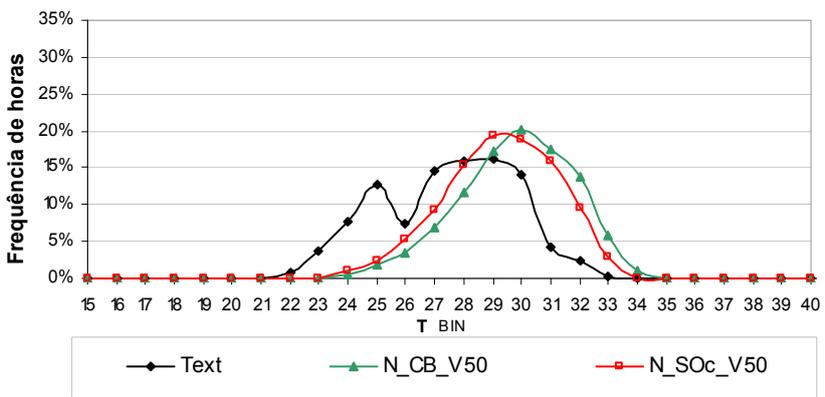
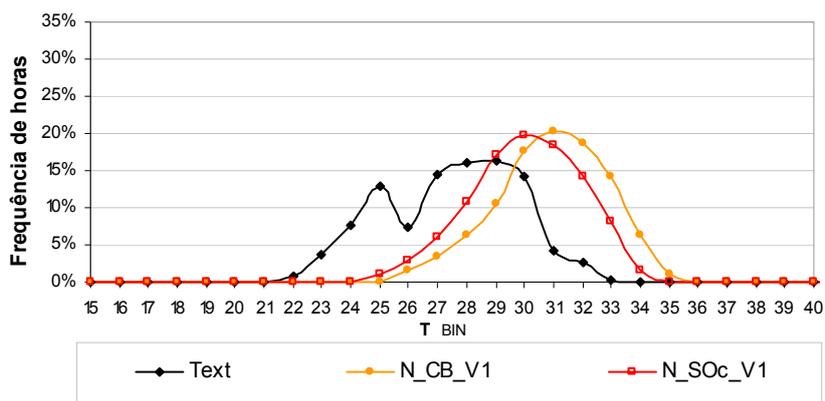


Valores de referência	
S1	Sem proteção
CB	Beiral 60cm
S2	Beiral e muro com recuo de 3.00m
S3	Beiral e muro com recuo de 1.50m
S4	Beiral, muro (1.50m) e protetor

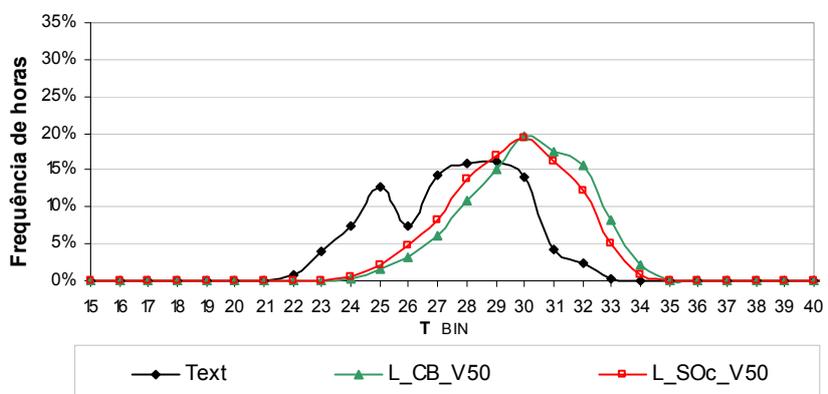
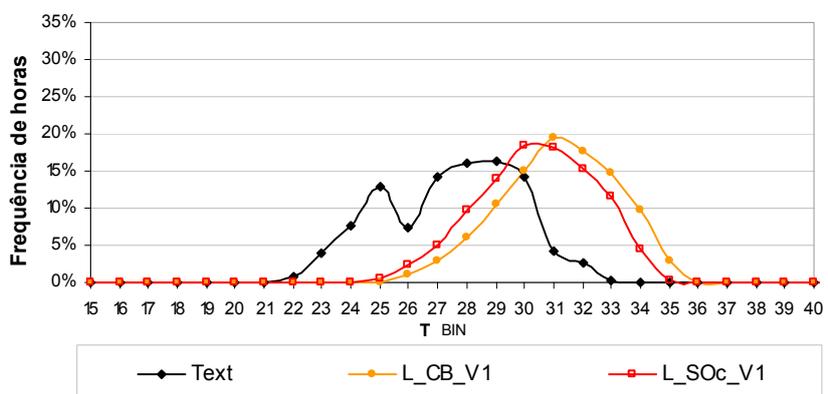
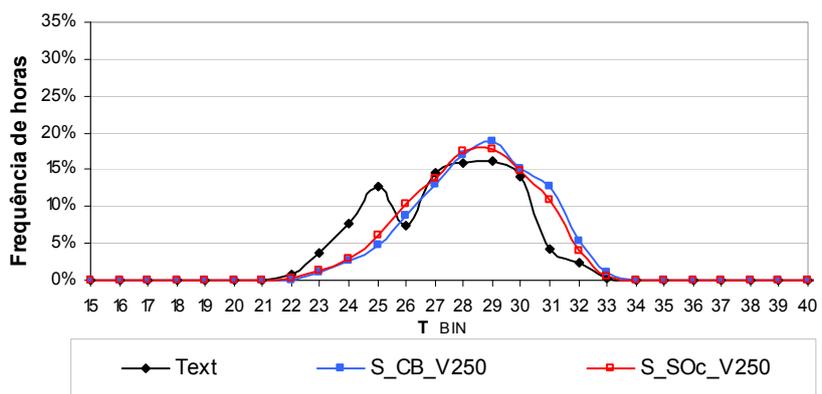
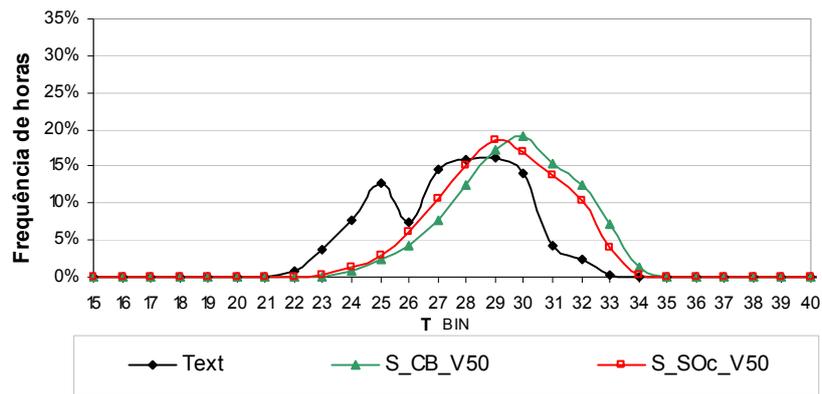


Ocupação (O)

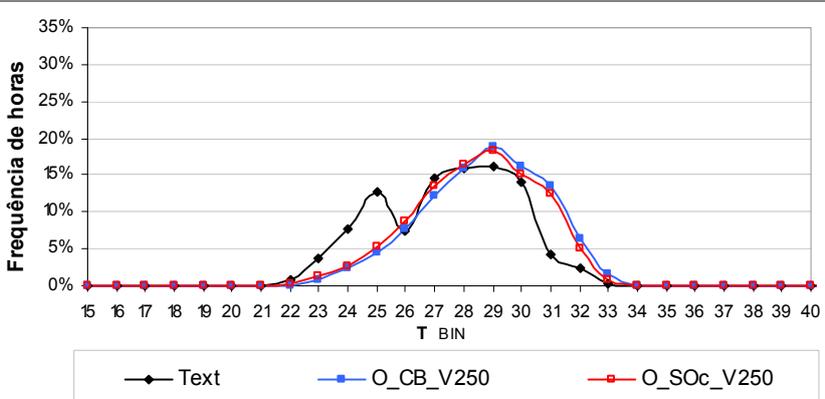
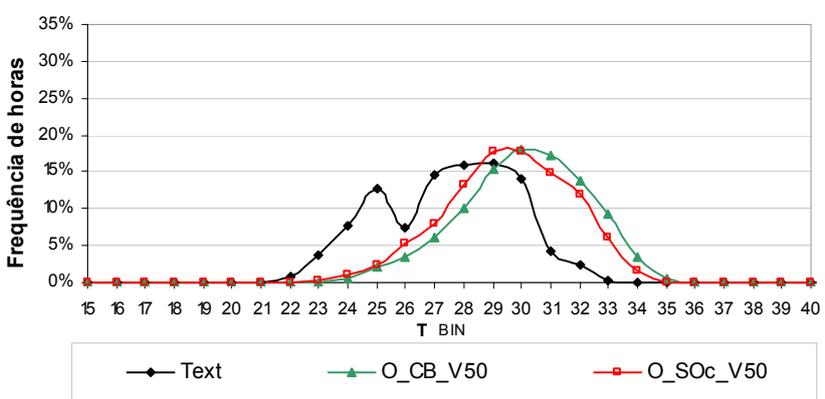
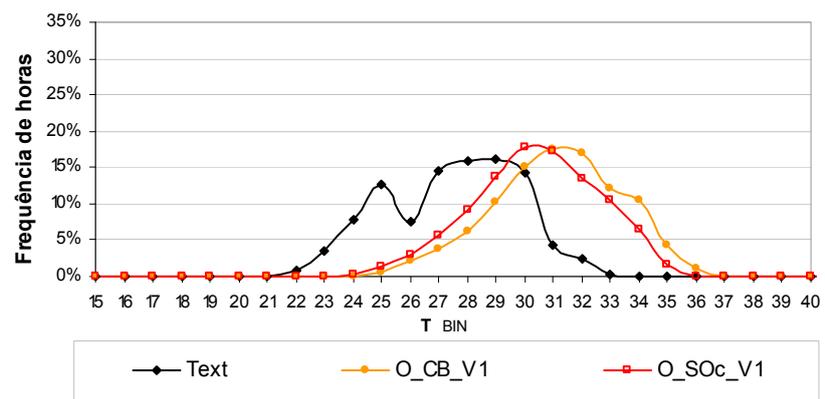
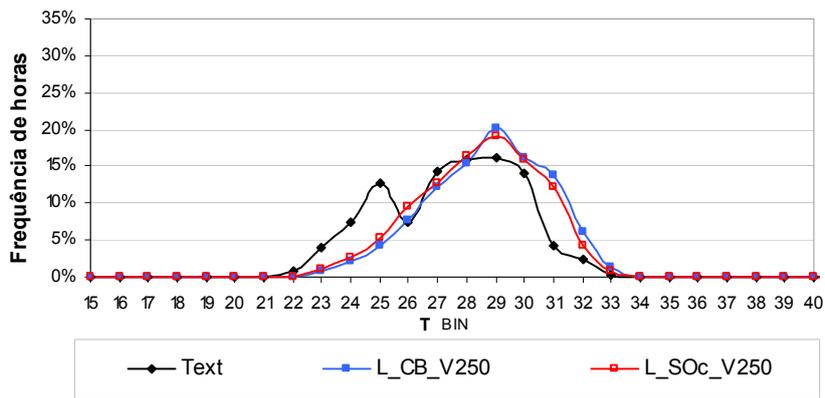
Valores de referência	
CB	Ocupação Base
SOc	Sem ocupação



Valores de referência	
CB	Ocupação Base
SOc	Sem ocupação



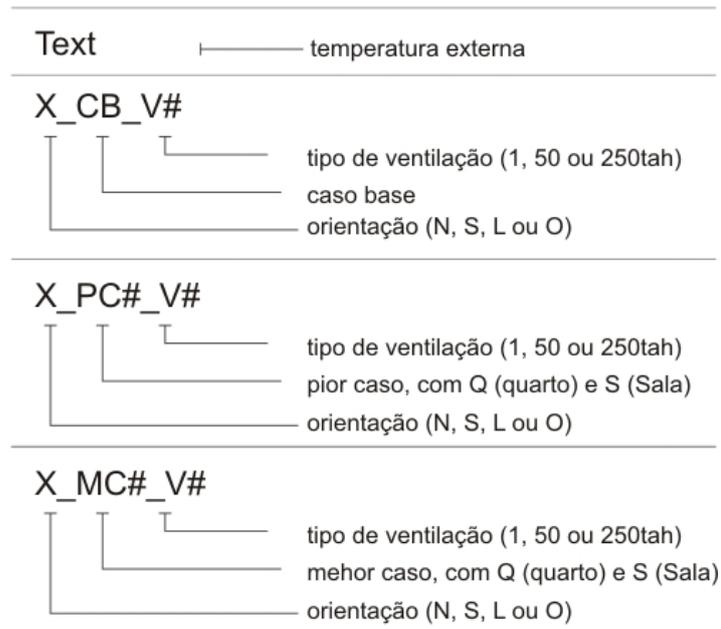
Valores de referência	
CB	Ocupação Base
SOc	Sem ocupação



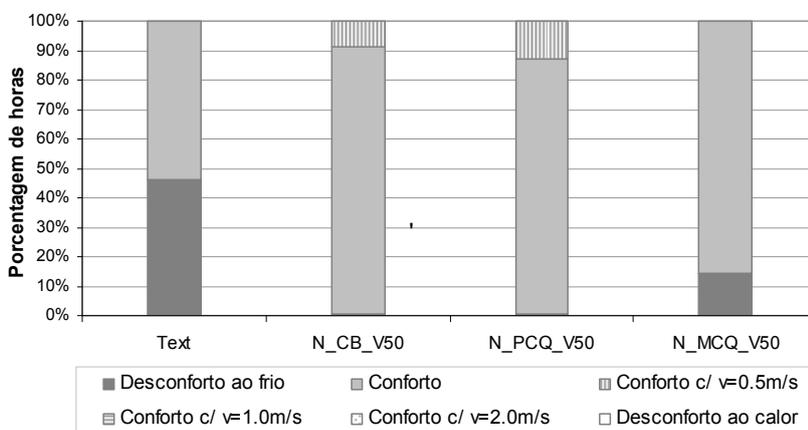
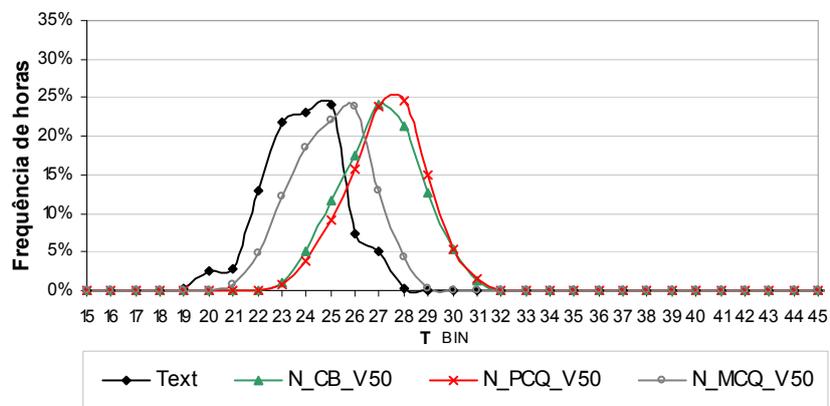
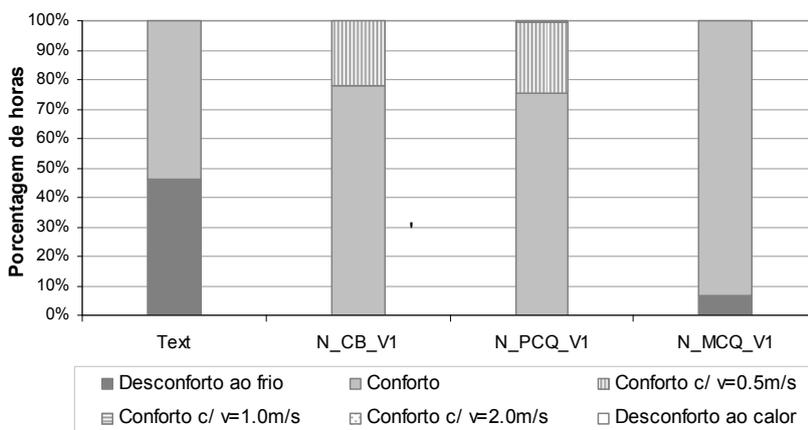
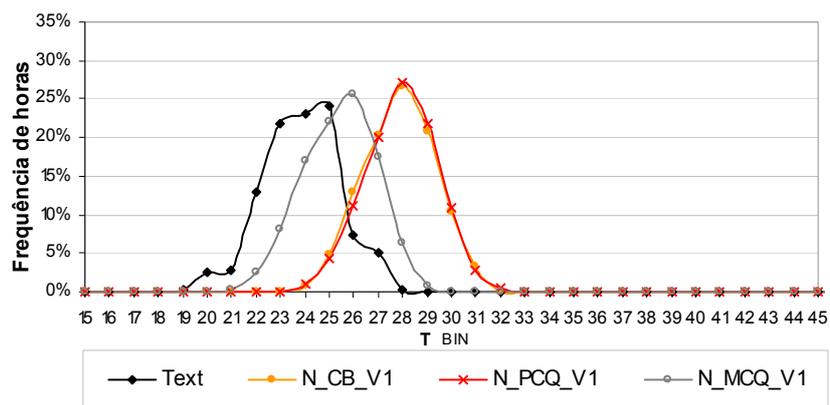
APÊNDICE C

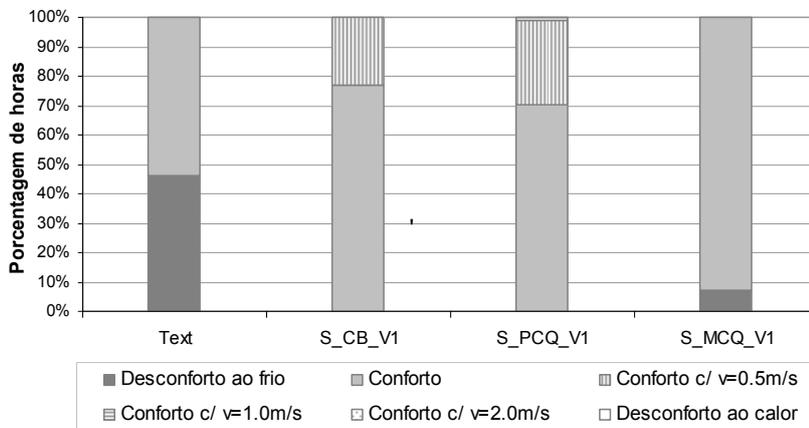
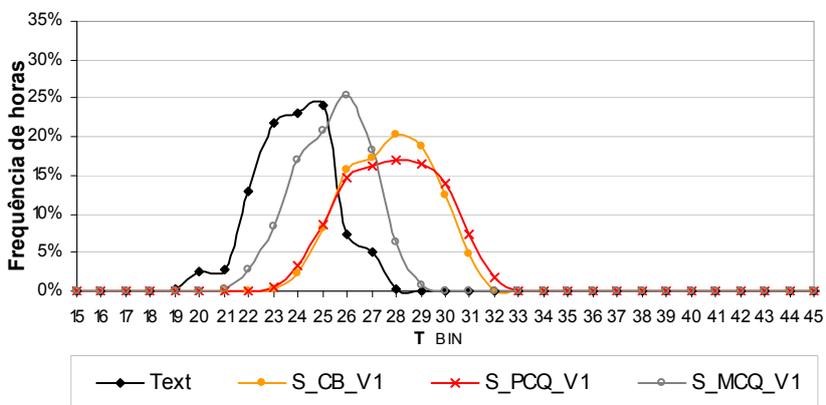
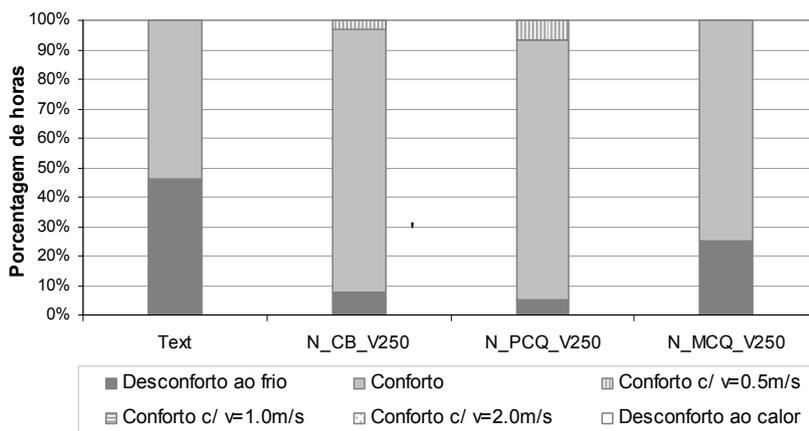
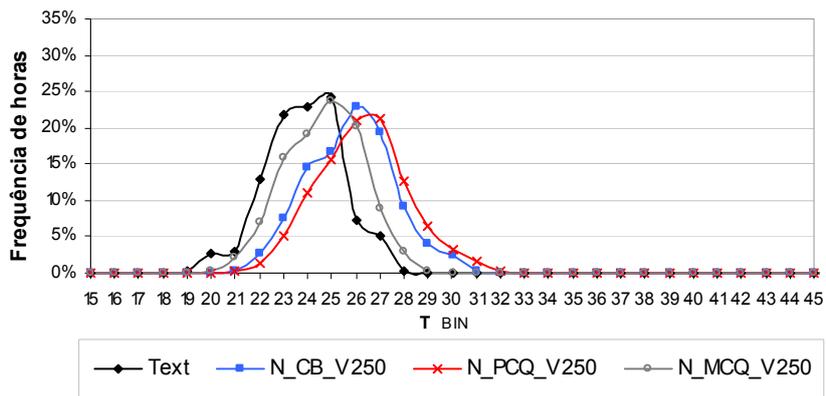
Gráficos com resultados do pior e melhor caso para a ocupação quarto e sala.

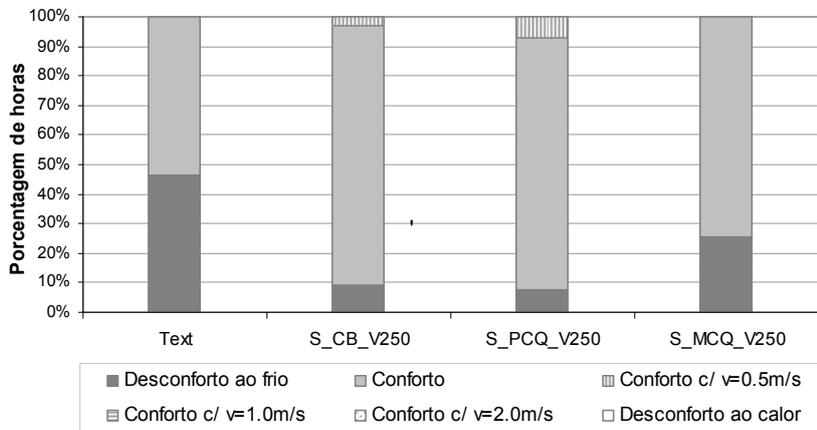
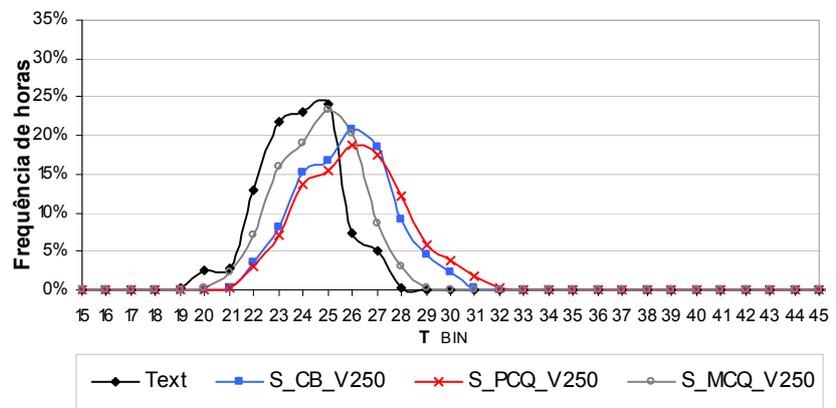
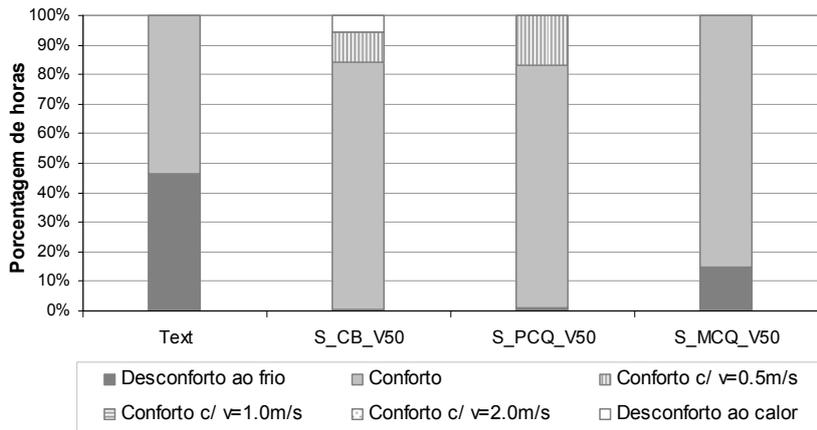
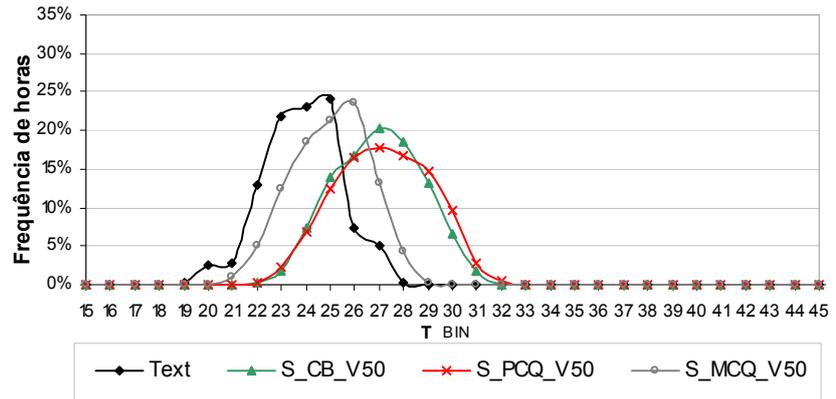
A figura abaixo representa os códigos de identificação das variáveis e casos apresentados nas legendas dos gráficos seguintes.

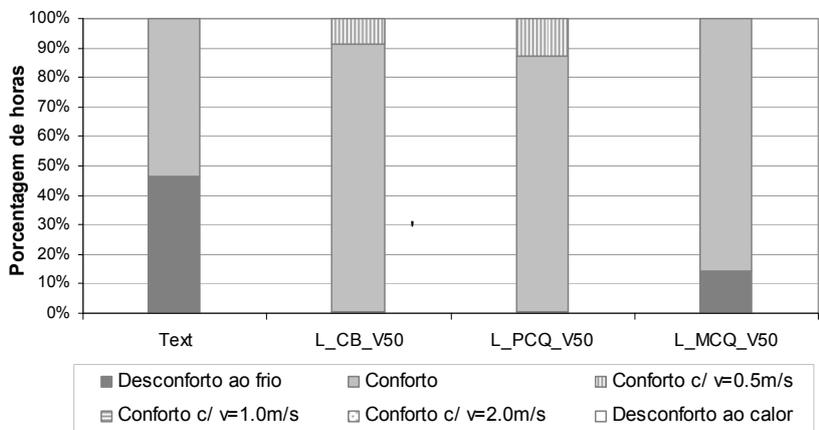
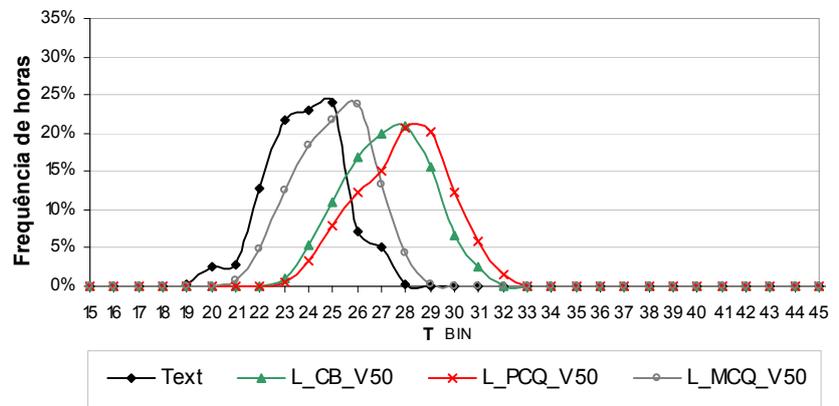
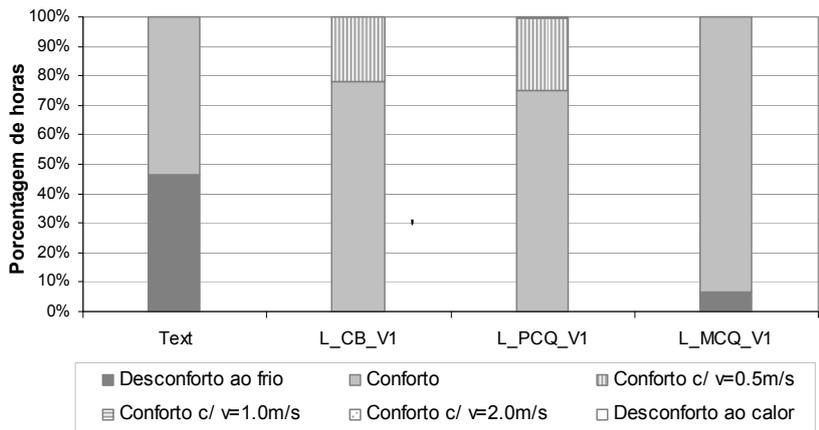
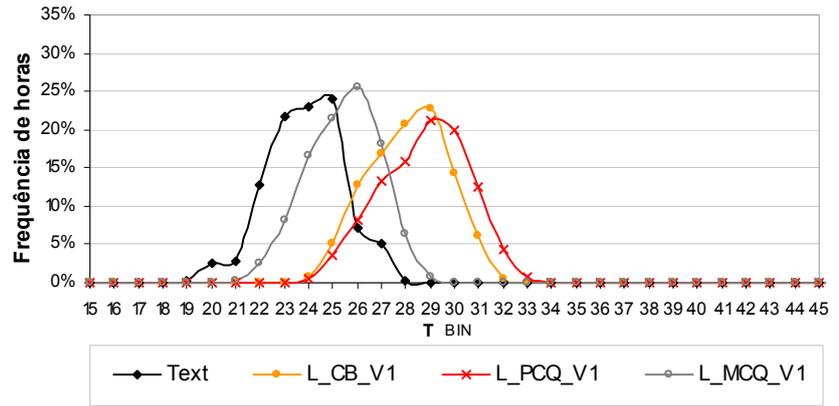


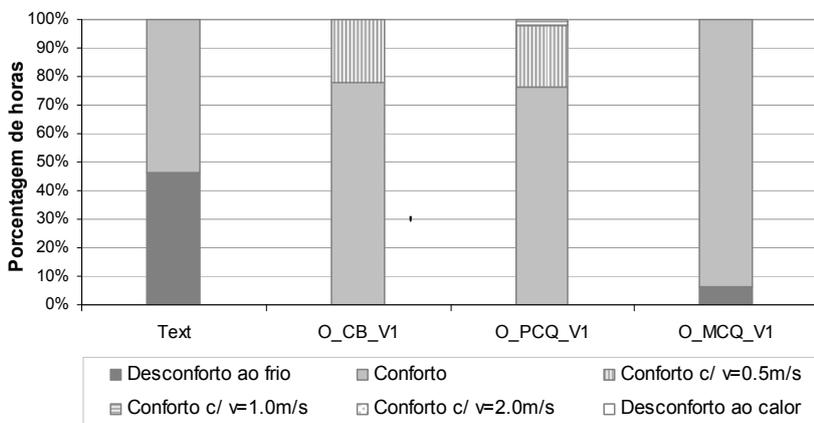
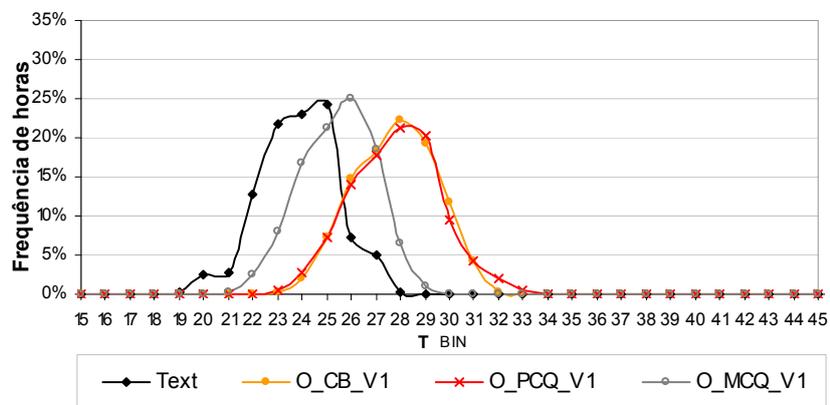
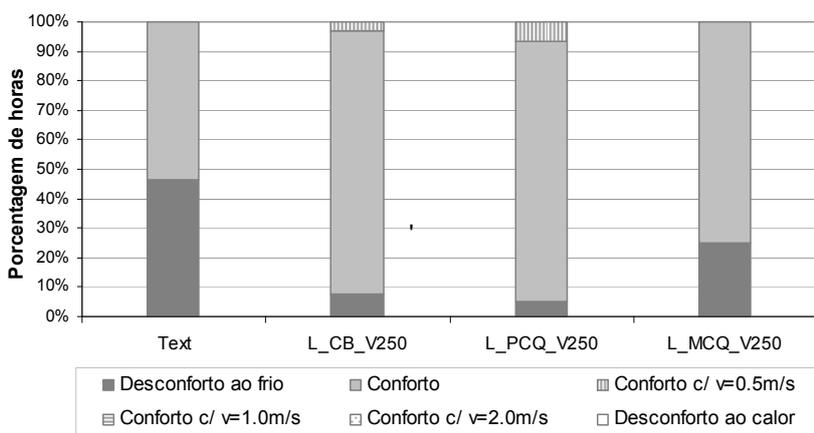
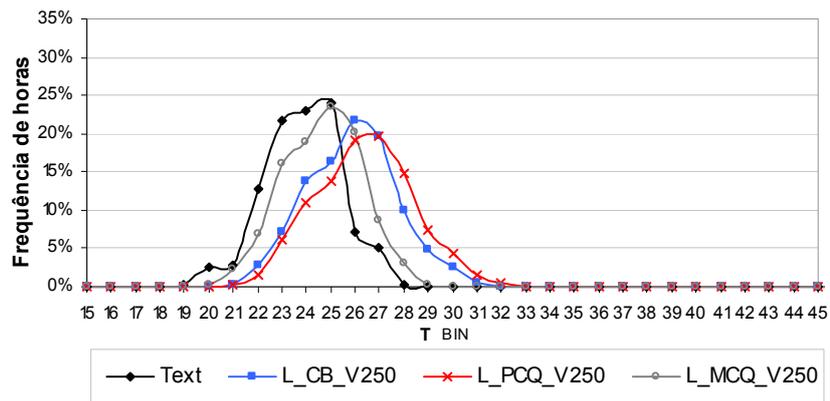
Resultados do pior e melhor caso para a ocupação quarto.

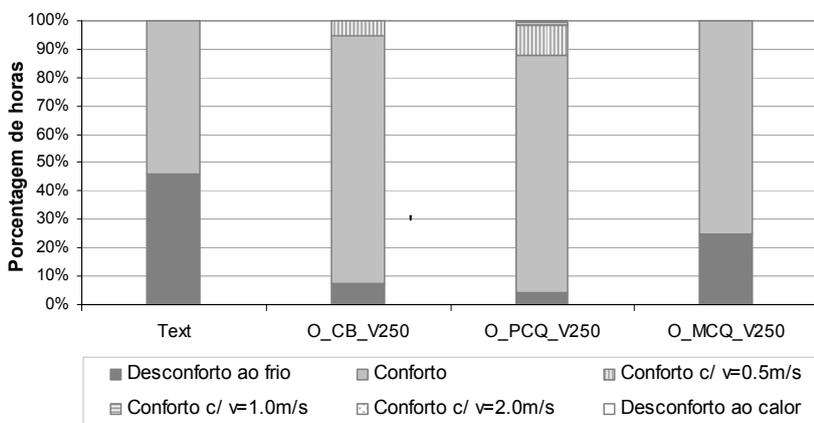
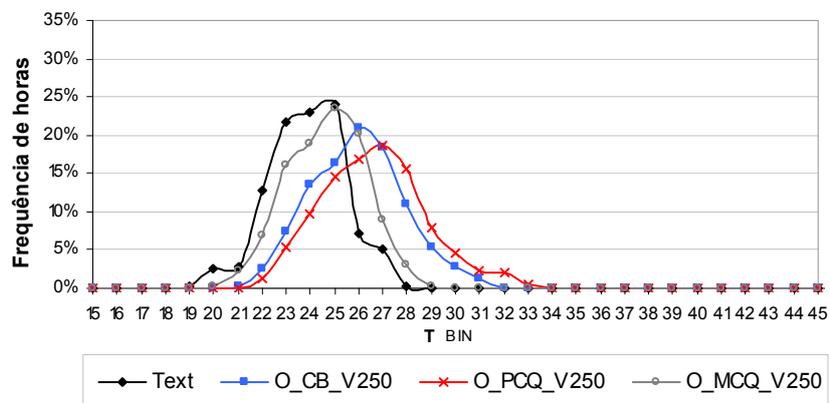
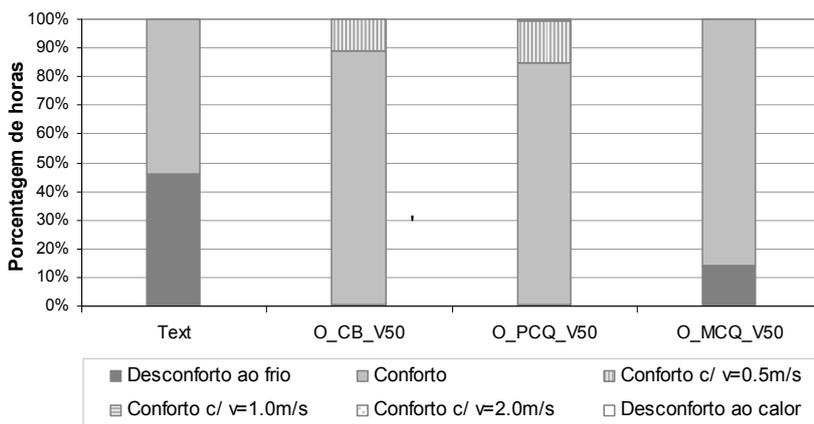
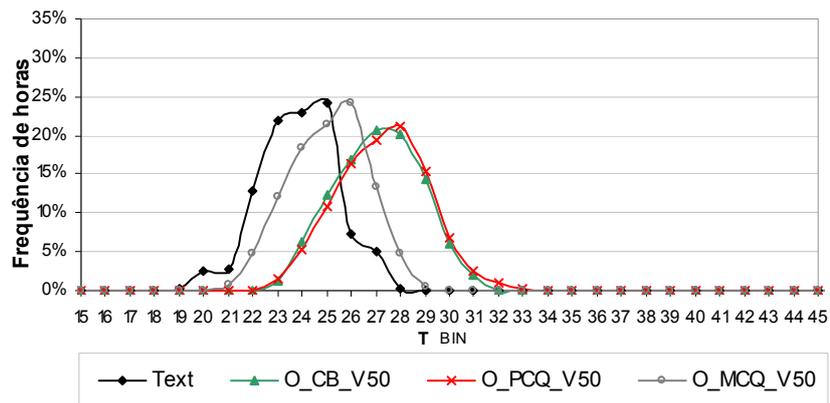




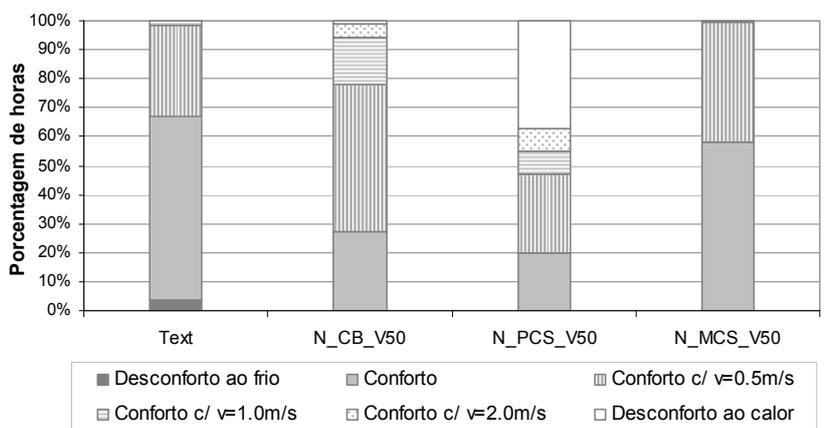
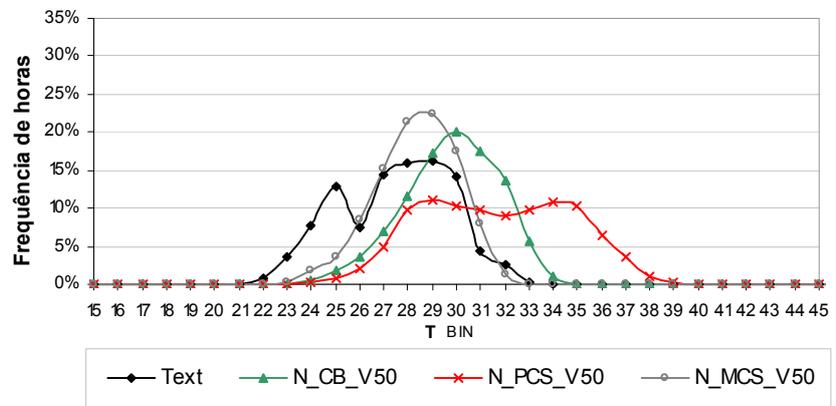
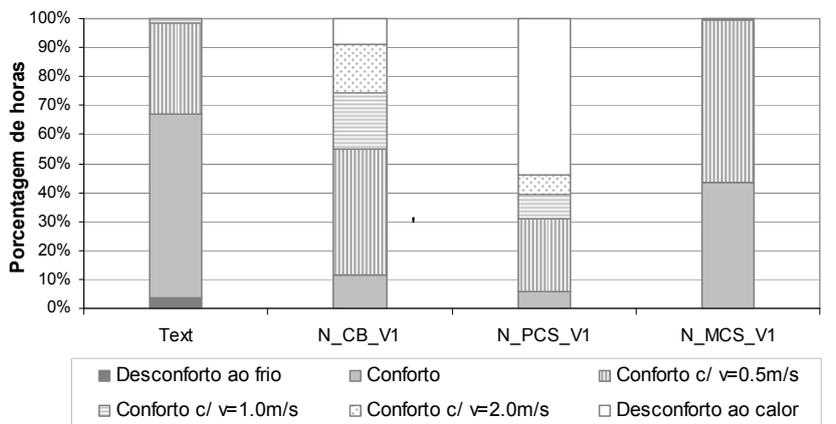
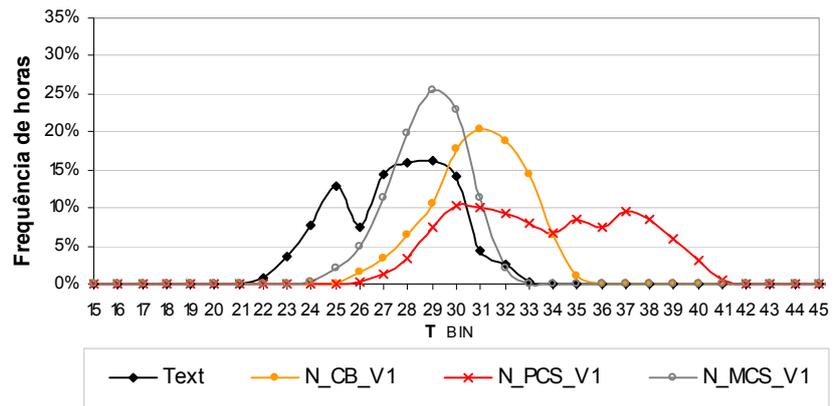


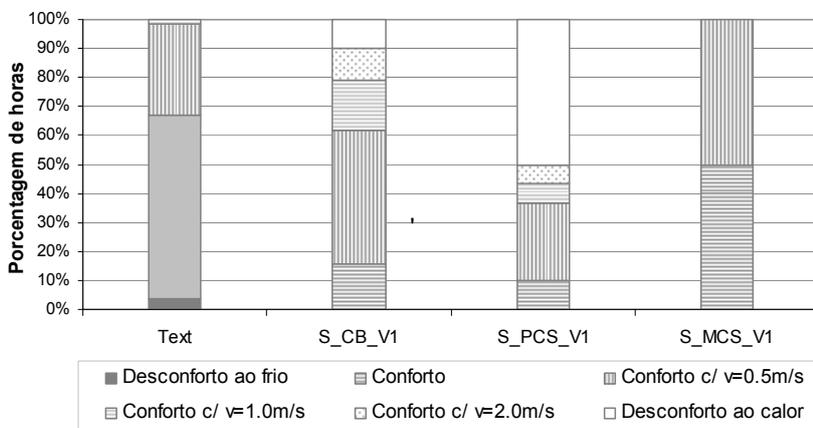
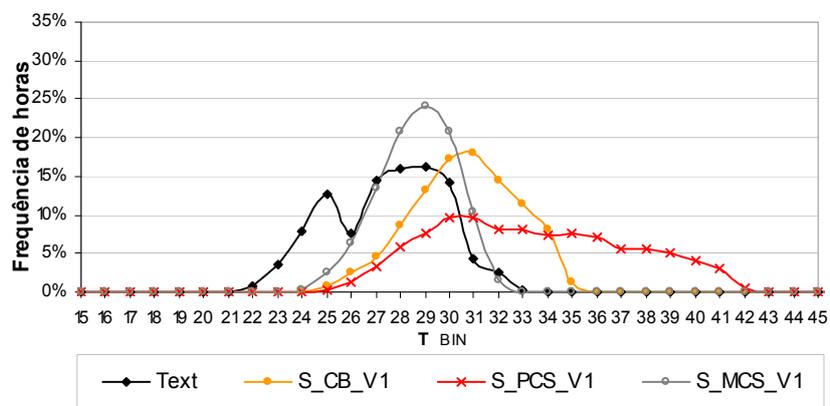
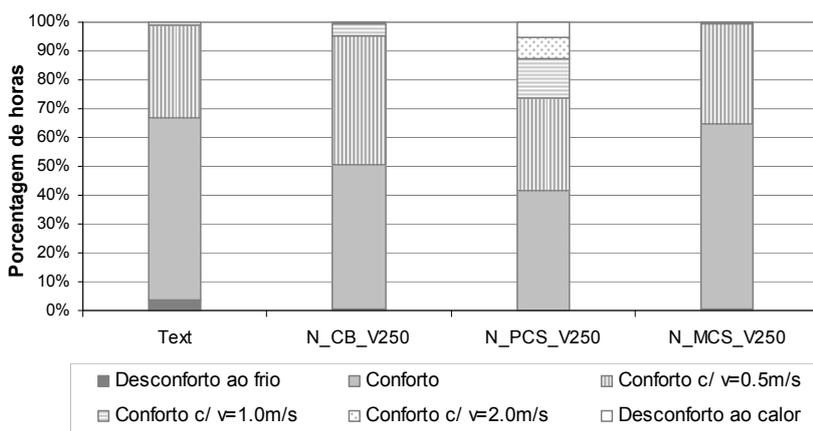
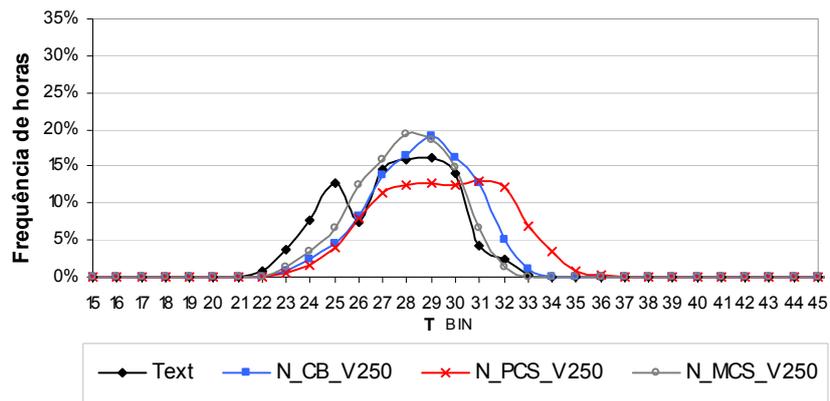


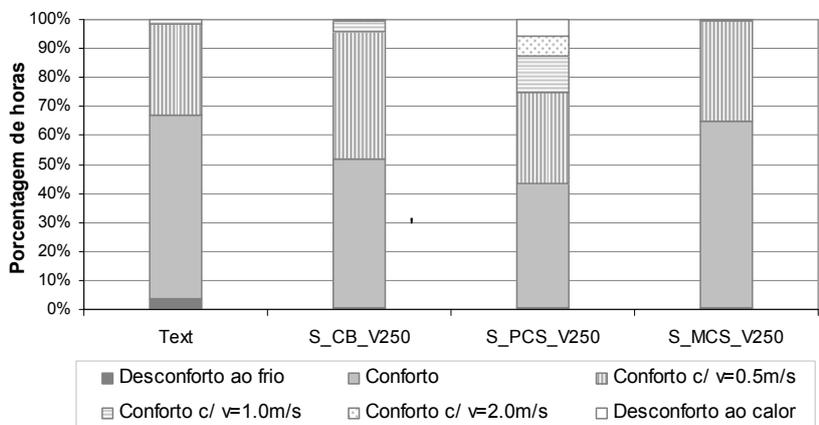
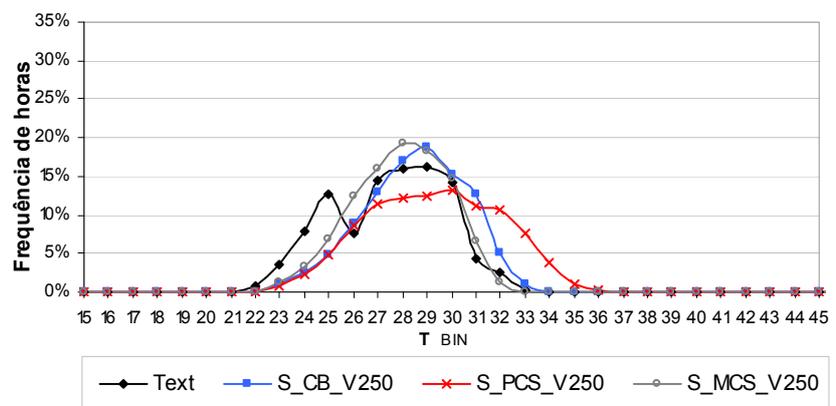
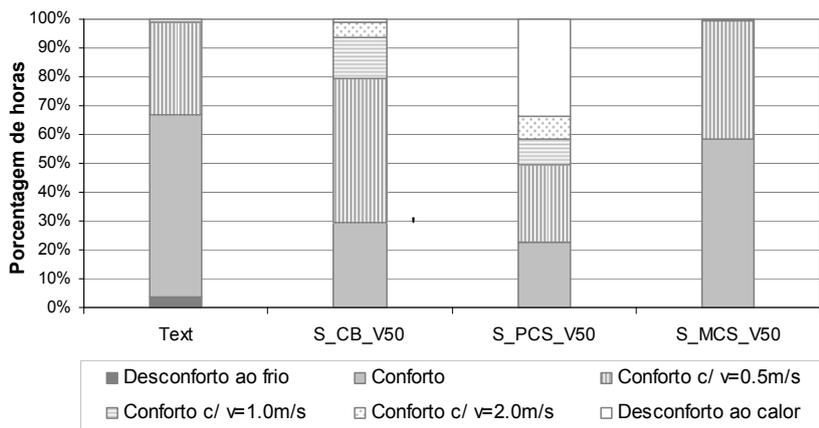
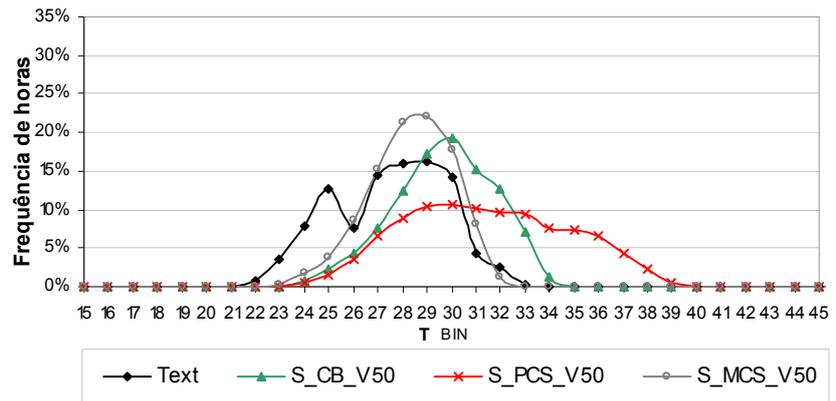


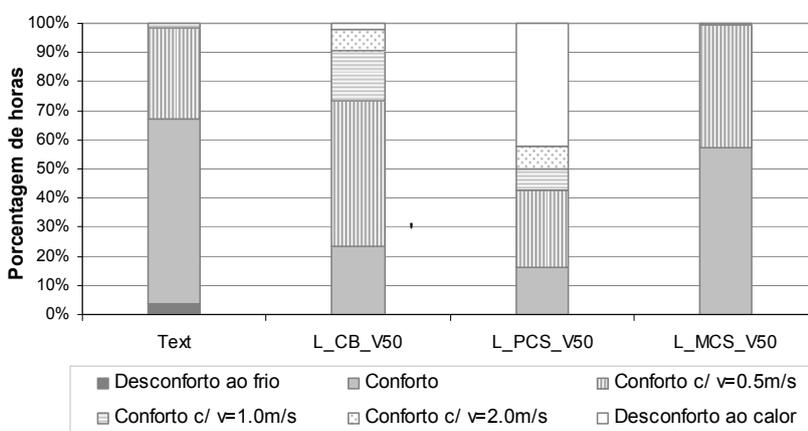
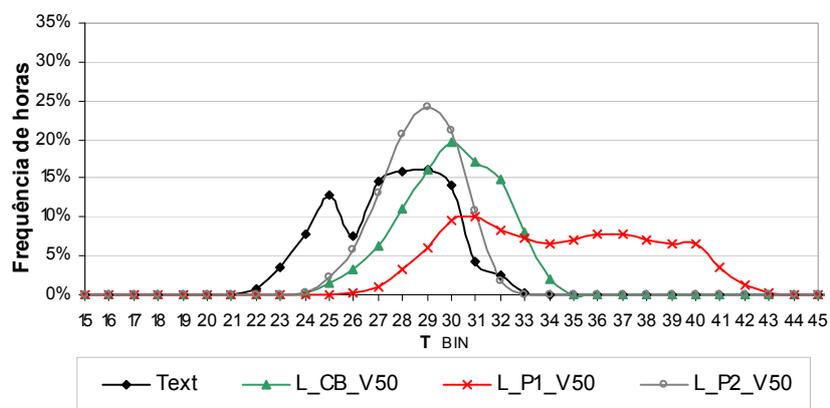
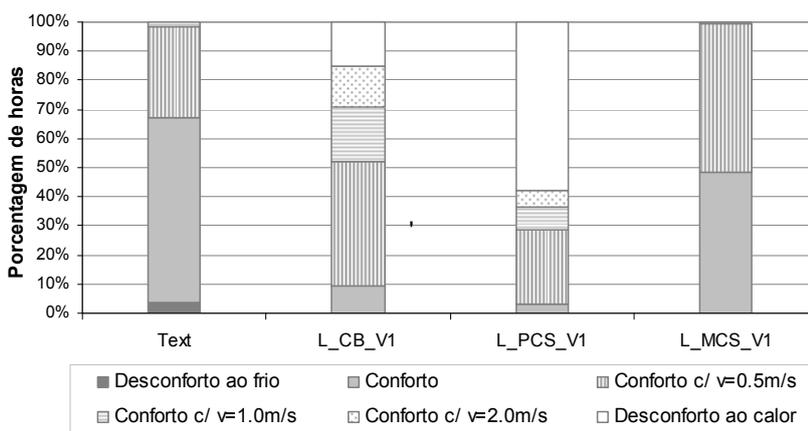
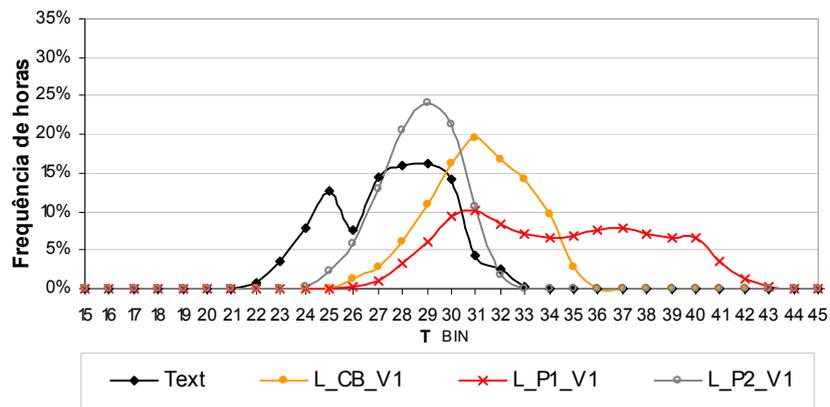


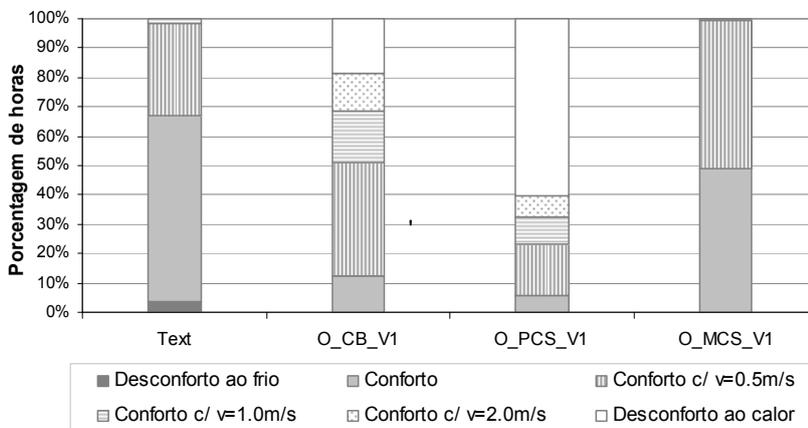
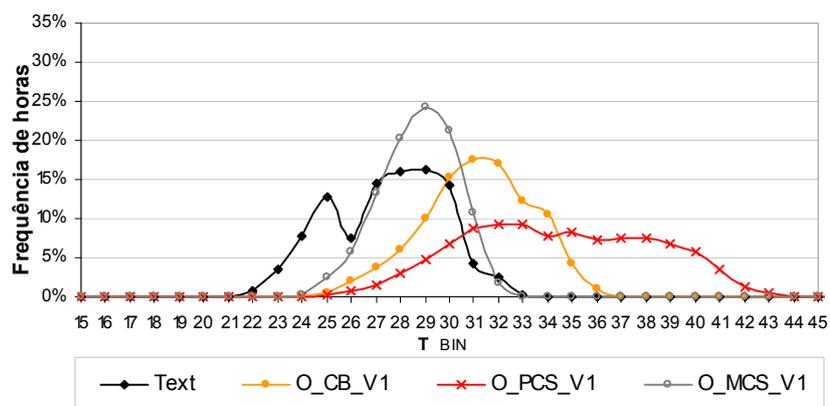
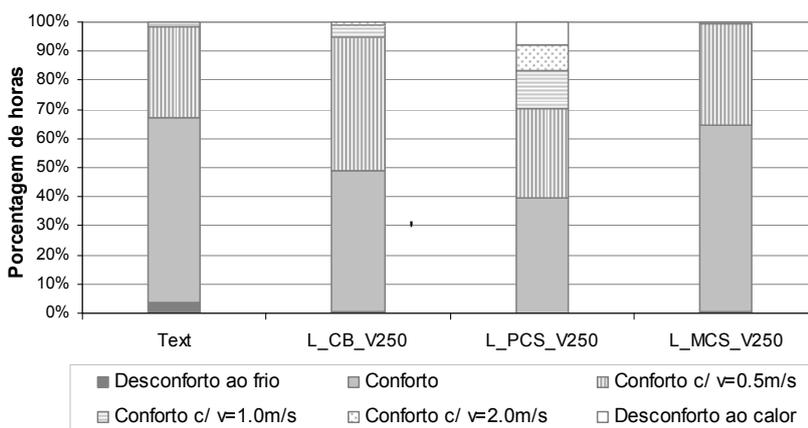
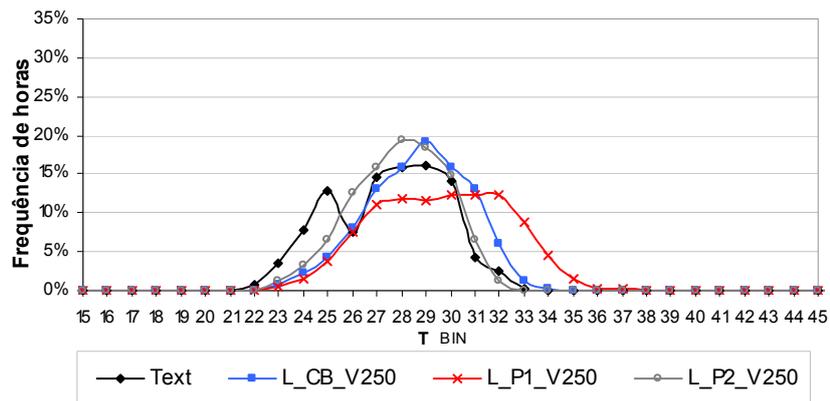
Resultados do pior e melhor caso para a ocupação sala.

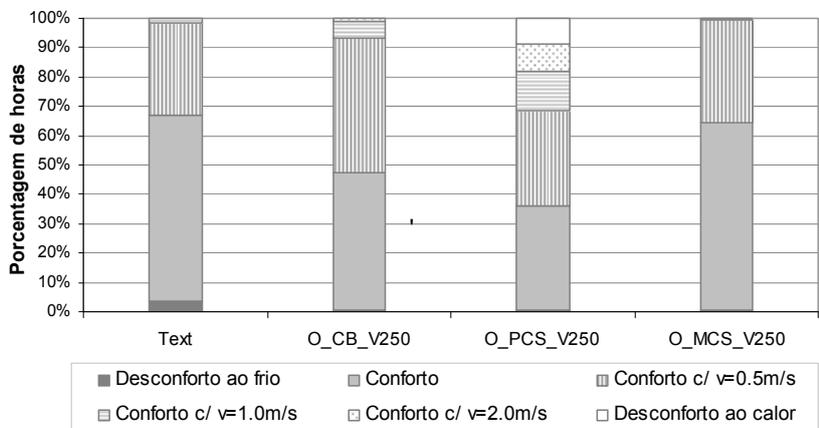
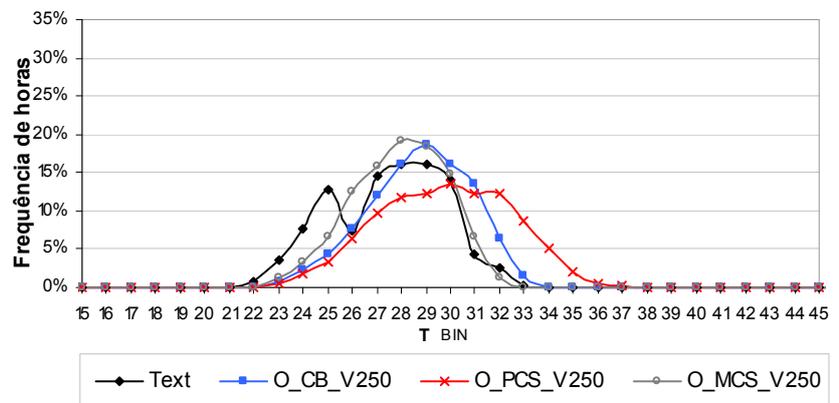
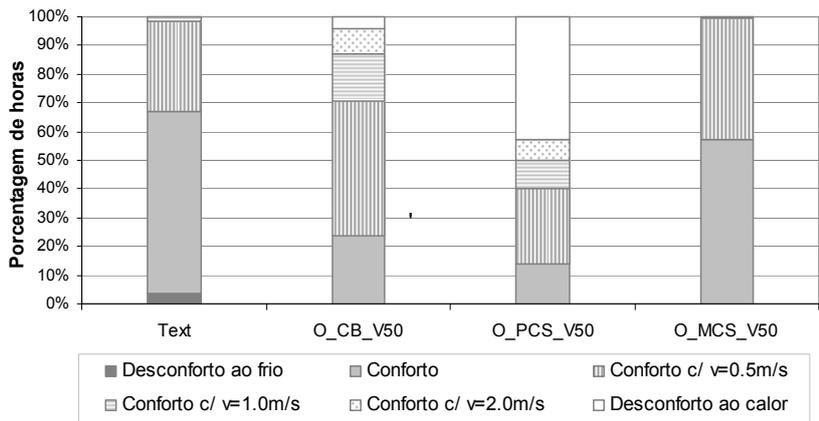
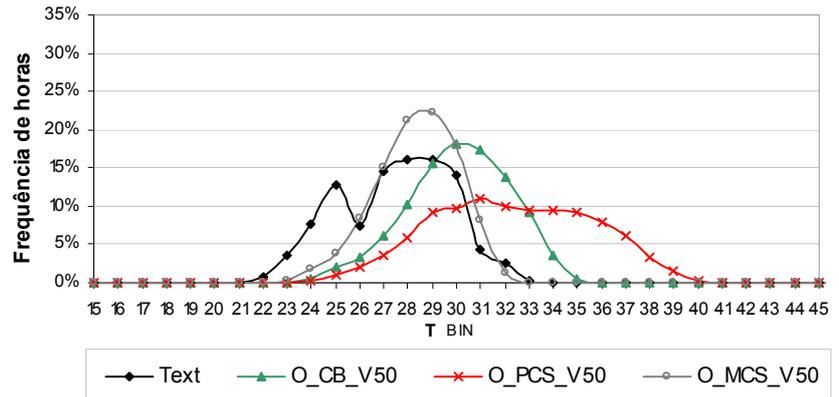












Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)