

**A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO NO
DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS**

Marcio José Sorgato

Marcio José Sorgato

**A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO NO
DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

**Florianópolis
2015**

Sorgato, Marcio José

A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO NO DESEMPENHO
TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS / Marcio

José Sorgato ; orientador, Roberto Lamberts –
Florianópolis, SC, 2015.

260 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Edificações Residenciais. 3. Desempenho
térmico e energético. 4. Ventilação Natural. 5. Condicionamento artificial
de edificações. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Marcio José Sorgato

**A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO NO DESEMPENHO
TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis (SC), 04 de setembro de 2015.

Prof. Glicério Trichês, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Banca Examinadora:

Roberto Lamberts, Ph.D
Orientador - UFSC/ECV

Aldomar Pedrini, Ph.D
UFRN (Videoconferência)

Prof. Nathan Mendes, Dr.
PUC/PR (Videoconferência)

Ana Ligia Papst de Abreu, Dr.^a
IFSC

Deivis Luis Marinoski, Dr.
UFSC/EGR

Enedir Ghisi, Ph.D
UFSC/ECV

Agradecimentos

É difícil encontrar palavras para agradecer a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Por meio de algumas palavras registro meus sinceros agradecimentos:

Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Roberto Lamberts pela disponibilidade, atenção dispensada, experiência, sabedoria e profissionalismo durante todo o doutorado.

À minha esposa Daiane, obrigada pelo companheirismo, incentivo, ajuda e compreensão. À minha pequena filha Alice obrigada pelo sorriso encorajador, por me fortalecer e fazer seguir em frente.

Aos meus pais, Anacleto e Terezinha e aos meus irmãos Syntia e Vinícius obrigada pelo incentivo e apoio, mesmo à distância sempre estiveram presentes nesta minha trajetória.

Aos colegas do LABEEE, obrigada pela troca de experiências e pelos momentos de descontração.

Ao Bruno Amattos e o Gustavo Martins, que disponibilizaram os recursos computacionais para a realização das simulações.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar e contribuir com este trabalho;

Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFSC, que possibilitou a implementação deste trabalho;

À Eletrobrás, pelo suporte financeiro;

E, finalmente, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

O desempenho térmico e energético de edificações residenciais é influenciado por vários fatores, como: as características arquitetônicas; as propriedades termofísicas dos materiais; os equipamentos; os sistemas de iluminação e de condicionamento artificial; a ventilação natural; as variáveis ambientais e, principalmente, o comportamento dos usuários. O objetivo deste trabalho é investigar a influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais, considerando que os ambientes de permanência prolongada das edificações atendem às condições de conforto térmico. A influência do comportamento do usuário foi investigada por meio de simulação termoenergética de quatro modelos de edificações residenciais: dois unifamiliares e dois multifamiliares. Foram simulados três cenários de estilos de vida e três níveis de comportamento dos usuários combinados com os parâmetros termofísicos da envoltória. As simulações termoenergéticas foram desenvolvidas no programa *EnergyPlus* com o arquivo climático da cidade de Florianópolis. A interação entre o sistema de condicionamento artificial e a ventilação natural foi controlada por meio do *Energy Management System* (EMS). A influência do comportamento do usuário foi analisada por meio do consumo de energia para condicionamento artificial e do percentual de horas de conforto térmico durante o período de ocupação. Os resultados mostraram que as edificações unifamiliares e multifamiliares apresentaram diferentes usos finais para condicionamento artificial. As edificações unifamiliares apresentaram consumo de energia superior ao das edificações multifamiliares. No entanto, as edificações multifamiliares consumiram mais energia para resfriamento. Na análise dos indicadores de eficiência energética, os resultados mostraram que os indicadores kWh/m² e kWh/m²CA não são adequados para avaliar o desempenho energético de edificações que possuem diferentes áreas. O indicador de consumo de energia per capita em função do tempo de ocupação, representou melhor a demanda de energia para condicionamento artificial das edificações residenciais. A análise de sensibilidade dos parâmetros termofísicos da envoltória e dos

VIII

parâmetros comportamentais mostrou que os parâmetros mais influentes são diferentes para edificações unifamiliares e multifamiliares. Para as edificações unifamiliares foram os parâmetros termofísicos da envoltória e nas multifamiliares foi o comportamento do usuário que apresentou o maior impacto no consumo de energia para condicionamento artificial. Os resultados mostraram a complexidade em definir valores para as propriedades termofísicas da envoltória, devido a diferentes soluções para o consumo de energia para aquecimento, resfriamento e para condições de conforto térmico. A pesquisa mostrou que o comportamento do usuário pode influenciar o desempenho termoenergético das edificações residenciais, apresentando maior influência nas edificações multifamiliares.

Palavras chaves: Comportamento do usuário, Desempenho termoenergético, Edificações residenciais.

ABSTRACT

Thermal and energy performance in residential buildings is influenced by several factors, such as architectural features; thermophysical properties of materials; equipment; lighting and artificial air conditioning systems; natural ventilation; environmental variables, and especially by the users behavior. The aim of this study is to investigate the influence of user behavior on thermal and energy performance in residential buildings, taking into account the thermal comfort in bedrooms and living rooms. The influence of user behavior was investigated using building energy simulation in four different typologies: two houses and two multi-family residential buildings. Three routines scenarios and three types of user behavior were combined with thermophysical properties of building envelope. The energy performance of each typology was simulated using the building energy simulation program EnergyPlus, taking into account the weather file of Florianópolis, Brazil. The Energy Management System (EMS) controlled the interaction between artificial air conditioning system and natural ventilation. The energy consumption result for artificial air conditioning and the percentage hours of thermal comfort during occupied period were used to assess the influence of user behavior. The results indicated that dwellings and multi-family residential buildings had different end uses for artificial air conditioning. Dwellings showed an energy consumption result above than multi-family buildings. However, the multi-family buildings presented higher cooling energy consumption. According to the energy efficiency indicators, the results showed that kWh/m^2 and $\text{kWh/m}^2\text{CA}$ are not accurate for assessing the energy performance of buildings that have different areas. The energy consumption index per capita according to the occupied period better represented the energy demand for artificial air conditioning for residential buildings. The sensitivity analysis related to the thermophysical and user behavior parameters showed that the most significant parameters are different for dwellings and multi-family residential buildings. For dwellings, the most significant parameters that had the greatest impact on the energy consumption for artificial air

X

conditioning were the thermophysical. For multi-family, the most significant parameters were the user behaviors. Based on results, it was possible to observe the difficulty of setting values for the thermophysical properties of building envelope due to different solutions related to cooling and heating energy consumption and thermal comfort conditions. The study results indicate that user behavior can influence the thermal and energy performance in residential buildings, mainly in multi-family buildings.

Keywords: User behavior; thermal performance; residential buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de diferentes perfis de edificações com climatização artificial.....	28
Figura 2 – Esquema das interações relativas ao consumo de energia no setor residencial.....	38
Figura 3 – Diagrama dos parâmetros que influenciam no comportamento do usuário.....	43
Figura 4 – Esquema das principais variáveis que influenciam na decisão do usuário.....	50
Figura 5 - Ontologia do comportamento do usuário no desempenho termoenergético das edificações	51
Figura 6 - Zonas de conforto para os ambientes condicionados artificialmente	54
Figura 7 – Limites da zona de conforto da ASHRAE 55.	55
Figura 8 - Limites da zona de conforto da ASHRAE 55 com a proposta da zona de adaptação do clo.....	56
Figura 9 - Zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados da EN 15251.....	57
Figura 10 – Frequência das temperaturas que os usuários acionaram o sistema de condicionamento artificial	59
Figura 11 – Interface do BCVTB.....	67
Figura 12 - Croqui perspectivo e croqui da planta baixa do modelo unifamiliar 1	84
Figura 13 - Croqui perspectivo do modelo unifamiliar 2.....	85
Figura 14 - Croqui da planta baixa do modelo unifamiliar 2	86
Figura 15 - Croqui perspectivo da unidade habitacional do modelo multifamiliar 3	87

Figura 16 - Croqui da planta baixa da unidade habitacional do modelo multifamiliar 3.....	87
Figura 17 - Croqui perspetivo da unidade habitacional do modelo multifamiliar 4.....	88
Figura 18 - Croqui da planta baixa da unidade habitacional do modelo multifamiliar 4.....	89
Figura 19 – Critérios para habilitar a ventilação natural do usuário com comportamento ativo	93
Figura 20 - Temperaturas de acionamento dos dispositivos de sombreamento no usuário ativo.....	94
Figura 21 – Critérios para habilitar a ventilação natural do usuário com comportamento intermediário.....	95
Figura 22 – Critérios para habilitar a ventilação natural do comportamento do usuário passivo	96
Figura 23 – Temperaturas de acionamento dos dispositivos de sombreamento no usuário passivo.....	97
Figura 24 – Limites de conforto térmico de 90% aceitabilidade da ASHRAE 55-2013, com a proposta da zona de adaptação do clo	101
Figura 25 – Limites de conforto térmico da categoria I da EN 15251, com a proposta da zona de adaptação do clo	102
Figura 26 – Croqui da cobertura com U_{Cob} 0,5 W/m ² .K e C_{tCob} 113,0 kJ/m ² .K.	105
Figura 27 – Croqui da cobertura com U_{Cob} 1,0 W/m ² .K e C_{tCob} 113,0 kJ/m ² .K	105
Figura 28 – Croqui da cobertura com U_{Cob} 1,9 W/m ² .K e C_{tCob} 113,0 kJ/m ² .K.	106
Figura 29 – Croqui da cobertura com U_{Cob} 0,50 W/m ² .K e C_{tCob} 27,0 kJ/m ² .K.....	106

Figura 30 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 1,0 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Cob} 27,0 \text{ kJ/m}^2.K$	107
Figura 31 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 1,9 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Cob} 27,0 \text{ kJ/m}^2$	107
Figura 32 – Parede de tijolo cerâmico de oito furos; $U_{ParExt} 0,5 \text{ W/m}^2K$ e $Ct_{Par}.146,0 \text{ kJ/m}^2.K$	108
Figura 33 – Parede de tijolo cerâmico de oito furos; $U_{ParExt} 1,0 \text{ W/m}^2K$ e $Ct_{Par}.146,0 \text{ kJ/m}^2.K$	108
Figura 34 – Parede de tijolo cerâmico de oito furos; $U_{ParExt} 2,2 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Par}.146,0 \text{ kJ/m}^2.K$	109
Figura 35 – Parede de tijolos cerâmicos maciços; $U_{ParExt} 3,6 \text{ W/m}^2K$ e $Ct_{Par} 158,0 \text{ kJ/m}^2.K$	109
Figura 36 – Parede de <i>steel frame</i> ; $U_{ParExt} 0,5 \text{ W/m}^2K$ e $Ct_{Par} 10,5 \text{ kJ/m}^2.K$	110
Figura 37 – Parede de <i>steel frame</i> ; $U_{ParExt} 1,0 \text{ W/m}^2K$ e $Ct_{Par} 10,5 \text{ kJ/m}^2.K$	110
Figura 38 – Parede de <i>steel frame</i> ; $U_{ParExt} 2,2 \text{ W/m}^2K$ e $Ct_{Par} 10,5 \text{ kJ/m}^2.K$	111
Figura 39 – Parede com capacidade térmica baixa; $U_{ParExt} 3,6 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Par} 27,0 \text{ kJ/m}^2.K$	111
Figura 40 – Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial	116
Figura 41 – Dados do arquivo climático da cidade de Florianópolis. ...	120
Figura 42 - Esquema do diagrama de caixa.....	127
Figura 43 – Resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial, aquecimento, resfriamento e o consumo total dos modelos unifamiliares 1 e 2.	135

Figura 44 – Histograma do consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos unifamiliares 1 e 2.	136
Figura 45 – Resultados do percentual de uso do sistema de condicionamento artificial e do percentual de horas de conforto adaptativo dos modelos unifamiliares 1 e 2.	137
Figura 46 - Resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial, aquecimento, resfriamento e total dos modelos multifamiliares 3 e 4.	138
Figura 47 - Histograma do consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos multifamiliares 3 e 4.	139
Figura 48 - Resultados do tempo de uso do sistema de condicionamento artificial e horas de conforto adaptativo dos modelos multifamiliares 3 e 4.	140
Figura 49 – Análise dos indicadores de eficiência energética nos modelos unifamiliares	142
Figura 50 – Análise dos indicadores de eficiência energética nos modelos multifamiliares.	146
Figura 51 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 1.	149
Figura 52 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 2.	151
Figura 53 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo multifamiliar 3	153
Figura 54 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC do modelo multifamiliar 4.	155
Figura 55 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo unifamiliar 1	158

Figura 56 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo unifamiliar 2	161
Figura 57 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo multifamiliar 3.....	164
Figura 58 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo multifamiliar 4.....	165
Figura 59 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida contemporâneo/ativo, modelo unifamiliar 1	170
Figura 60 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/intermediário, modelo unifamiliar 1	172
Figura 61 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/ativo, modelo unifamiliar 2	174
Figura 62 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/passivo, modelo unifamiliar 2	176
Figura 63 – Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/ativo, modelo multifamiliar 3.....	179
Figura 64 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/passivo, modelo multifamiliar 3.....	180
Figura 65 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/ativo, modelo multifamiliar 4.....	183

Figura 66 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida contemporâneo/passivo, modelo multifamiliar 4 184

Figura 67 – Variação do desempenho da família com 4 pessoas nos modelos unifamiliares 1 e 2..... 188

Figura 68 – Variação do desempenho da família com 4 pessoas nos modelos multifamiliares 3 e 4..... 190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros e variáveis que influenciam no consumo de energia de residências.....	37
Tabela 2 – Principais fatores que influenciam no comportamento do usuário na operação das janelas.....	44
Tabela 3 – Tamanho da família e a distribuição dos usuários nos ambientes de permanência prolongada dos modelos unifamiliar e multifamiliar com dois dormitórios.....	98
Tabela 4 – Tamanho da família e o número de usuários nos ambientes de permanência prolongada do modelo unifamiliar 2.....	99
Tabela 5 – Tamanho da família e o número de usuários dos ambientes de permanência prolongada do modelo multifamiliar 4.	100
Tabela 6 – Informações referente as configurações e algoritmos da simulação.	112
Tabela 7 – Parâmetros adotados na modelagem da rede de ventilação natural.	113
Tabela 8 – Detalhes da modelagem do sistema de condicionamento artificial.....	114
Tabela 9 – Cargas internas de equipamentos dos ambientes de permanência prolongada.	117
Tabela 10 - Taxas metabólicas para cada atividade.	118
Tabela 11 – Parâmetros da modelagem dos dispositivos de sombreamento.....	119
Tabela 12 – Temperaturas do solo dos modelos unifamiliares 1 e 2..	119
Tabela 13 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo unifamiliar 1 (dois dormitórios).....	121
Tabela 14 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo unifamiliar 2 (três dormitórios).	122

Tabela 15 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo multifamiliar 3 (unidade habitacional com dois dormitórios).....	124
Tabela 16 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo multifamiliar 4 (unidade habitacional com três dormitórios).....	125
Tabela 17 - Comparação entre os casos que apresentaram os maiores valores nos indicadores de consumo dos modelos unifamiliares 1 e 2.	144
Tabela 18 - Comparação entre os casos que apresentaram os maiores indicadores de consumo dos modelos multifamiliares.	147
Tabela 19 – Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 1.....	150
Tabela 20 - Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 2.....	152
Tabela 21 - Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo multifamiliar 3.	154
Tabela 22 - Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo multifamiliar 4	156
Tabela 23 – Resultados dos casos com os menores e maiores consumos dos três cenários dos modelos unifamiliares 1 e 2.....	189
Tabela 24 – Resultados dos casos com os menores e maiores consumos dos três cenários dos modelos multifamiliares 3 e 4.....	191

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. Objetivo Geral	29
1.1.1. Objetivos Específicos	29
1.2. Estrutura do trabalho	30
2. REVISÃO DE LITERATURA	33
2.1. A influência do comportamento do usuário no consumo de energia da edificação	33
2.2. A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico da edificação.....	41
2.3. Condições de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente	52
2.4. Normas de desempenho e regulamentos de eficiência energética	59
2.4.1. Normas brasileiras de desempenho térmico de edificações residenciais.....	59
2.4.2. Regulamento de Eficiência Energética em Edificações Residenciais.....	61
2.5. Ferramentas de simulação computacional térmica e energética de edificações	64
2.5.1. Recursos de controles avançados em simulação termoenergética	66
2.6. Algoritmos de comportamento dos usuários e padrões de uso.....	72
2.7. Análise de sensibilidade	76
2.8. Considerações finais sobre a revisão de literatura.....	80
3. MÉTODO	83

3.1.	Análise da influência do usuário no desempenho termoenergético.....	83
3.1.1.	Modelo da edificação 1.....	84
3.1.2.	Modelo da edificação 2.....	85
3.1.3.	Modelo da edificação 3.....	86
3.1.4.	Modelo da edificação 4.....	88
3.1.5.	Área de janela e ventilação dos modelos.....	89
3.2.	Cenários dos usuários	90
3.2.1.	Cenário do usuário com estilo de vida contemporâneo ...	90
3.2.2.	Cenário do usuário com estilo de vida tradicional.....	91
3.2.3.	Cenário do usuário com estilo de vida flexível.....	92
3.3.	Comportamento do usuário.....	92
3.3.1.	Comportamento do usuário ativo.....	92
3.3.2.	Comportamento do usuário intermediário.....	94
3.3.3.	Comportamento do usuário passivo.....	96
3.4.	Tamanho da família.....	97
3.5.	Condições de conforto e aceitabilidade dos usuários.....	100
3.6.	Propriedades Térmicas dos Componentes da Envolvória.....	103
3.6.1.	Características das coberturas	104
3.6.2.	Características das paredes.....	107
3.7.	Simulação do desempenho térmico e energético dos modelos... ..	112
3.7.1.	Modelagem da ventilação natural	112
3.7.2.	Modelagem do sistema de condicionamento artificial... ..	113

3.7.3.	Controle de integração da ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial	114
3.7.4.	Cargas internas de equipamentos, pessoas e iluminação artificial....	116
3.7.5.	Modelagem dos dispositivos de sombreamento das aberturas.....	118
3.7.6.	Modelagem da temperatura do solo nos modelos unifamiliares.....	119
3.8.	Características do clima de Florianópolis	119
3.9.	Casos para simulação	120
3.10.	Análise do desempenho térmico e energético.....	126
3.10.1.	Análise estatística dos casos simulados	126
3.10.2.	Análise dos indicadores de eficiência energética.....	127
3.10.3.	Análise de sensibilidade dos parâmetros simulados.....	130
3.10.4.	Análise da influência do comportamento do usuário no consumo de energia e no percentual de horas de conforto térmico.....	131
3.10.5.	Análise da influência dos principais parâmetros no desempenho da edificação e frequência	131
3.10.6.	Análise do desempenho térmico e energético da família de 4 pessoas.....	132
4.	RESULTADOS	133
4.1.	Análise estatística dos resultados das simulações	134
4.1.1.	Modelos das edificações unifamiliares	134
4.1.2.	Modelos multifamiliares 3 e 4.....	137
4.2.	Análise do indicador de eficiência energética.....	141

4.2.1.	Análise do indicador de eficiência energética dos modelos unifamiliares	141
4.2.2.	Análise do indicador de eficiência energética nos modelos multifamiliares	144
4.3.	Análise de sensibilidade dos parâmetros simulados.....	148
4.4.	Análise da influência do comportamento do usuário.....	157
4.4.1.	Análise da influência do comportamento do usuário nos modelos de edificações unifamiliar	157
4.4.2.	Análise da influência do comportamento do usuário nos modelos de edificações multifamiliares	163
4.5.	Análise da influência dos principais parâmetros no desempenho da edificação	167
4.5.1.	A influência dos principais parâmetros no desempenho dos modelos de edificações unifamiliares.....	168
4.5.2.	A influência dos principais parâmetros no desempenho dos modelos de edificações multifamiliares	177
4.6.	Desempenho termoenergético dos modelos com uma família padrão brasileira	186
5.	CONCLUSÕES.....	193
5.1.	Limitações da pesquisa	196
5.2.	Recomendações para trabalhos futuros	197
REFERÊNCIAS	199	
APÊNDICE A	213	
APÊNDICE B.....	227	
APÊNDICE C.....	241	
APÊNDICE D	255	

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, muitos países desenvolveram normas e regulamentos de desempenho termoenergético para as edificações residenciais com o objetivo de reduzir o consumo de energia das edificações.

O desempenho termoenergético das edificações residenciais é influenciado por vários fatores, como: características arquitetônicas; propriedades termofísicas da envoltória; orientação; equipamentos; sistemas de iluminação, de ventilação e de condicionamento artificial; dispositivos de sombreamento e condições externas do clima.

Além de todos os fatores mencionados, há também o papel fundamental do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético das edificações, que através da presença e das interações com os sistemas de iluminação, ventilação, condicionamento artificial, controle de aberturas das janelas e com os dispositivos de sombreamento das janelas impactam no desempenho da edificação (FABI *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, pesquisadores investigaram a influência do comportamento dos usuários no desempenho das edificações, avaliando a interação destes no controle dos sistemas da edificação: condicionamento ambiental (condicionamento artificial e ventilação natural), sistema de iluminação e dispositivos de sombreamento. A maioria dos estudos compartilha uma característica em comum, que é a ligação entre as ações de controle do usuário com os parâmetros ambientais mensurados no interior ou exterior da edificação (NICOL, 2001; HERKEL *et al.*, 2008; YUN e STEEMERS, 2008).

Para as edificações que adotam estratégias passivas, como a ventilação natural ou aquecimento solar passivo, as ações dos usuários são importantes para proporcionar condições aceitáveis de conforto térmico nos ambientes. A ventilação natural nas edificações tem função importante, tais como garantir a qualidade do ar e proporcionar conforto térmico aos usuários, quando as condições do clima externo forem favoráveis.

A busca pelo conforto térmico é a condição predominante que motiva os usuários a interagir com os dispositivos de ventilação das edificações que são operadas da forma híbrida (ventilação e condicionamento artificial). As interações dos usuários estão relacionadas com os fatores psicológicos (idade, sexo, saúde); sociais (número de moradores); disponibilidade de recursos (dinheiro, conhecimento e estilo de vida); características da residência (aberturas, ventilação, sistema de condicionamento artificial); e com o clima (temperatura, umidade, radiação) (DUBRUL, 1988). As variáveis ambientais são parâmetros que influenciam na tomada de decisão dos usuários em relação à operação da ventilação.

A ação de abrir a janela é a resposta mais intuitiva e simples de controlar o superaquecimento em um ambiente. No entanto, esta ação depende da interação do usuário em explorar o potencial da estratégia passiva para proporcionar ambientes mais confortáveis (YUN *et al.*, 2009). A compreensão do comportamento dos usuários é um parâmetro importante para a concepção e avaliação do desempenho das edificações ventiladas naturalmente.

Nas últimas décadas, vários estudos desenvolveram modelos de abertura de janelas baseados na relação da temperatura externa e interna do ambiente (WARREN e PARKINS, 1984; FRITSCH *et al.*, 1990; NICOL, 2001; RAJA *et al.*, 2001; NICOL e HUMPHREYS, 2002; HERKEL *et al.*, 2005; PFAFFEROTT e HERKEL, 2007; HERKEL *et al.*, 2008; YUN e STEEMERS, 2008). Alguns estudos trabalham com métodos estocásticos para prever a presença e o comportamento dos usuários por meio do método de cadeia de Markov e Monte Carlo (FRITSCH *et al.*, 1990; PAGE *et al.*, 2007; PFAFFEROTT e HERKEL, 2007; YUN *et al.*, 2009). Estes estudos apresentam diferentes soluções para estimar a interação dos usuários em relação à abertura das janelas. Não é recomendado generalizar o comportamento do usuário, principalmente em condições climáticas diferentes. Em países com clima tropical, a ventilação pode contribuir para a redução do consumo de energia para condicionamento artificial.

A energia consumida nas edificações depende das demandas requeridas pelos usuários para proporcionar condições adequadas de conforto térmico nos ambientes. Segundo Olesen (2007) a economia de energia não deve prejudicar o conforto e a saúde das pessoas. O consumo de energia das edificações pode ser reduzido através da adoção de estratégias passivas.

Diversas pesquisas analisaram a influência das características arquitetônicas e propriedades termofísicas da envoltória das edificações residenciais (LIPING e HIEN, 2007; MATOS, 2007; WANG *et al.*, 2007; PEREIRA, 2009; SORGATO, 2009; VERSAGE, 2009; TUHUS-DUBROW e KRARTI, 2010; BATISTA, 2011; POUHEY, 2011; YILDIZ e ARSAN, 2011; OLIVEIRA, 2012; GOSSARD *et al.*, 2013; SILVA e GHISI, 2013; SILVA, A. S.; e GHISI, E., 2014; HEMSATH e ALAGHEBAND BANDHOSSEINI, 2015; IOANNOU e ITARD, 2015). Algumas destas pesquisas foram desenvolvidas para a realidade brasileira, outras para culturas, hábitos e climas diferentes da realidade brasileira.

As pesquisas relacionadas com o desempenho termoenergético em edificações residenciais podem ser classificadas em três níveis: 1º Identificar as condições promissoras para proporcionar economia de energia e melhorar as condições de conforto térmico; 2º Analisar o desempenho das condições promissoras em protótipos de edificações; 3º Avaliar o desempenho das condições promissoras em condições reais de uso.

Normalmente as pesquisas do primeiro nível são desenvolvidas por meio de programas de simulação termoenergética. Os recursos computacionais tornam possíveis uma análise em tempo reduzido e minucioso dos efeitos de diversos parâmetros relacionados ao desempenho termoenergético da edificação (HENSEN *et al.*, 2002). Os programas de simulação termoenergética têm sido cada vez mais utilizados em pesquisas e em projetos submetidos para certificações.

As pesquisas no segundo e terceiro nível apresentam menos publicações devido ao alto custo dos experimentos *in loco* e o tempo no desenvolvimento da pesquisa. Nas pesquisas que avaliam as condições

reais de uso apresentam um alto nível de complexidade, devido ao monitoramento de todas as variáveis e as interações dos usuários. Nas edificações residenciais, as pesquisas em condições reais de uso podem ser restritas para algumas condições devido à invasão de privacidade dos moradores.

As simulações termoenergéticas apresentam algumas vantagens em relação aos experimentos *in loco*: o baixo custo e a possibilidade de variar diferentes parâmetros tais como: forma, aberturas, propriedades termofísicas da envoltória, clima, condições de uso, padrão de operação e diferentes sistemas de condicionamento artificial. Para Mazzarella e Pasini (2009), a simulação é uma ferramenta que permite aos arquitetos e engenheiros investigarem as complexas relações entre o ambiente e a forma, materiais, comportamento dos usuários, equipamentos e as tecnologias de controle da edificação.

Atualmente as pesquisas por meio de simulações termoenergéticas em edificações residenciais devem ser consideradas como uma condição de teste. A maioria das pesquisas realizadas por simulações termoenergéticas assumem condições estáticas na operação do sistema de condicionamento artificial; na ventilação natural; no padrão de ocupação; e no padrão de iluminação artificial. Segundo Schweiker (2010), Tabak (2008), Branco *et al.* (2004) e Clarke (2001), não são consideradas todas as influências dos usuários na operação das edificações simuladas. Os resultados das simulações são estimativas do desempenho das edificações. Para algumas edificações, o comportamento dos usuários pode apresentar maiores impactos que a envoltória da edificação.

Modelos avançados de comportamento dos usuários exigem estudos abrangentes, considerando os hábitos culturais, costumes e preferências dos usuários. As preferências dos usuários podem alterar-se de acordo com as condições climáticas externas à edificação. Desta forma, as possíveis interações dos usuários em relação à abertura de janelas e persianas, acionamento dos sistemas de iluminação e

condicionamento artificial são de extrema importância na avaliação do desempenho termoenergético das edificações. Estudos têm mostrado que o comportamento dos usuários pode resultar em variações importantes no desempenho termoenergético das edificações (HOES *et al.*, 2009; SCHWEIKER e SHUKUYA, 2010).

No Brasil, a maioria das edificações residenciais são ventiladas naturalmente, nas quais o usuário controla a abertura das janelas. Outra característica das edificações brasileiras é a inércia térmica nos sistemas construtivos, pois as normas brasileiras (ABNT, 2005; 2013b) recomendam componentes construtivos com capacidade térmica média. A inércia térmica é uma estratégia passiva importante para proporcionar conforto térmico nas edificações ventiladas naturalmente em climas que possuem amplitude térmica, sendo que o resultado do efeito vai depender do comportamento do usuário da edificação (CHENG *et al.*, 2005). Nas estações quentes, os usuários podem explorar o uso da ventilação nos períodos em que a temperatura externa é inferior à temperatura interna da edificação. A escolha das propriedades térmicas dos componentes construtivos da edificação deve considerar os hábitos de ocupação e operação dos usuários.

Muitas pesquisas mostraram que o comportamento do usuário pode impactar no consumo de energia da edificação (HAAS, 1997; ABRAHAMSE *et al.*, 2005; WOOD e NEWBOROUGH, 2007; SANTIN *et al.*, 2009; KORJENIC e BEDNAR, 2011). Os fatores que podem influenciar no consumo de energia da edificação são: composição da família; idade, hábitos, costumes, estilo de vida, saúde e segurança dos usuários; conforto térmico, visual e acústico. A pesquisa de Jiang *et al.* (2008) mostrou que o consumo de energia para condicionamento artificial de 25 unidades habitacionais com a mesma envoltória apresentou uma variação significativa. O autor justifica que as diferenças são devidas ao comportamento do usuário e às diferenças na eficiência dos condicionadores de ar.

Há evidências que nos últimos anos vêm crescendo a presença de condicionadores de ar nas edificações residenciais brasileiras (G1, 2013). De acordo com a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado,

Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), no período de 2012 a 2013 o crescimento das vendas de condicionadores de ar foi de 33,5% para os modelos *splits* e 15% para os modelos de janela. No ano de 2013 foram comercializados 4,3 milhões de condicionadores de ar para o setor residencial. A presença dos condicionadores de ar nas edificações residenciais é devida a uma combinação de fatores: aumento do poder aquisitivo, facilidade de compra, redução do custo de aquisição e elevação do padrão de vida das classes C e D (ABRAVA, 2014). A Figura 1 apresenta duas edificações de diferentes classes sociais que buscaram soluções de condicionamento artificial para melhorar as condições de conforto térmico nas unidades habitacionais.

Figura 1 – Exemplo de diferentes perfis de edificações com climatização artificial.



a) edificação de alto padrão



b) edificação de interesse social

O consumo de energia para condicionamento artificial é uma informação importante para desenvolver ações de eficiência energética em edificações residenciais. A envoltória da edificação pode influenciar significativamente no consumo de energia para condicionamento artificial. Os dados referentes aos usos finais do setor residencial do Brasil apresentam divergências e baixa confiabilidade, conforme as pesquisas de Fedrigo *et al.* (2009), Achão e Schaeffer (2009) e Ghisi *et al.* (2007).

Frente a este contexto, esta pesquisa se propõe a explorar a influência do comportamento do usuário no desempenho termoenergético de edificações residenciais em um clima subtropical. No escopo da pesquisa foram considerados diferentes cenários de comportamento de usuários, propriedades termofísicas da envoltória, modelos de edificações residenciais, limites das condições de conforto térmico e as diferentes condições de ventilação natural integradas às condições de uso do sistema de condicionamento artificial. A influência do comportamento dos usuários no desempenho termoenergético das edificações ainda apresenta uma carência de estudos.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é investigar a influência do comportamento do usuário no desempenho termoenergético de edificações residenciais, considerando que os ambientes de permanência prolongada das edificações atendem às condições de conforto térmico no período de ocupação.

1.1.1. Objetivos Específicos

Atrelados ao objetivo geral deste trabalho, propõem-se cinco objetivos específicos:

- a. Analisar a diferença no desempenho termoenergético de diferentes modelos de edificações residenciais (unifamiliares e multifamiliares);
- b. Escolher um indicador de eficiência energética para avaliar o desempenho termoenergético das edificações residenciais;
- c. Analisar a sensibilidade dos parâmetros termofísicos da envoltória e dos parâmetros comportamentais do usuário no desempenho termoenergético de edificações residenciais;

- d. Analisar a importância das propriedades termofísicas da envoltória para os diferentes comportamentos dos usuários;
- e. Analisar o desempenho termoenergético das edificações residenciais com uma família padrão brasileira.

1.2. Estrutura do trabalho

A estrutura da pesquisa está dividida em cinco capítulos, nas quais são comentadas as etapas realizadas no desenvolvimento da pesquisa. No primeiro capítulo apresenta-se a introdução sobre o tema da pesquisa, contextualizando o problema a ser explorado e os objetivos almejados.

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão de literatura nacional e internacional relacionada com o tema da pesquisa. Primeiramente, são apresentadas as reflexões sobre o impacto do comportamento dos usuários no desempenho termoenergético das edificações. Também são apresentados os recursos de simulações termoenergéticas e uma revisão da aplicação de controles avançados em simulações de edificações.

O método utilizado no desenvolvimento da pesquisa é apresentado no terceiro capítulo. Inicialmente, são apresentadas as características dos modelos das edificações. Posteriormente, são detalhados os cenários do comportamento dos usuários, descrevendo as condições consideradas em cada cenário. No item 3.3 são apresentadas as características das propriedades termofísicas da envoltória consideradas para a análise da influência do comportamento do usuário. Os detalhes das condições de modelagem no programa de simulação termoenergético são apresentados no item 3.7 e as características do clima no item 3.8. O método de amostragem e as probabilidades de cada parâmetro analisado são apresentados no item 0. No último item são apresentados os métodos de análise dos resultados das simulações termoenergéticas.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados da pesquisa. No item 4.1, são apresentadas as análises estatísticas dos resultados das simulações termoenergéticas. A análise do indicador de eficiência energética é apresentada no item 4.2. Os itens 4.3 e 4.4 abordam os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros simulados e da análise da influência do comportamento do usuário. O item 4.5 apresenta a análise da influência dos principais parâmetros no desempenho termoenergético das edificações residenciais, de acordo com os cenários de comportamento dos usuários. No último item dos resultados é apresentada a análise do desempenho termoenergético dos modelos com uma família padrão brasileira.

No último capítulo (quinto) apresentam-se as conclusões da pesquisa com base nos resultados, bem como as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura referente ao comportamento dos usuários em edificações. Realiza-se uma abordagem da influência do comportamento do usuário no consumo de energia e no desempenho térmico e energético em edificações. Também foram revisadas as normas de conforto térmico, desempenho térmico de edificações e o regulamento de eficiência energética para edificações residenciais. Em relação às simulações termoenergéticas são apresentados os algoritmos de comportamento dos usuários, os recursos de simulação computacional e os recursos para controle avançado nas simulações termoenergéticas. Finalizando, são apresentados estudos que utilizaram o método de análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais influentes no desempenho das edificações.

2.1. A influência do comportamento do usuário no consumo de energia da edificação

Muitas pesquisas mostram que o estilo de vida do usuário e o seu comportamento podem ter um impacto grande no consumo de energia da edificação. São vários os fatores que podem influenciar no consumo de energia das edificações, como: composição da família; idade, hábitos, costumes, estilo de vida, saúde e segurança dos usuários; conforto térmico, visual e acústico.

A maioria das publicações relacionadas com o comportamento do usuário foram desenvolvidas para edificações comerciais; para edificações residenciais há menor número de publicações devido às restrições de privacidade. Neste trabalho foram apresentados alguns estudos sobre as edificações comerciais, com o objetivo de mostrar os métodos e soluções adotados nas pesquisas.

Korjenic e Bednar (2011) investigaram o impacto do estilo de vida sobre a demanda de energia de uma residência unifamiliar da Áustria. No estudo, foram consideradas diferentes tecnologias do sistema de aquecimento e combustíveis para geração de calor e energia. Também foi examinado o uso de fontes de energia renovável. Foram analisados diferentes comportamentos dos moradores, alterados de forma sistemática. Os resultados mostraram que o estilo de vida e o comportamento dos moradores têm influência significativa no consumo total de energia da residência. Os autores mencionam a importância de considerar o estilo de vida e o comportamento dos usuários na avaliação da eficiência energética da edificação.

Santin *et al.* (2009) pesquisaram o efeito do comportamento dos usuários no consumo de energia para aquecimento das edificações residenciais na Holanda. O estudo investigou as características da envoltória e da ocupação que afetam o consumo de energia para o aquecimento. Os resultados mostraram que as características de ocupação e de comportamento afetam o consumo de energia em 4,2%, enquanto as características da envoltória da edificação determinam 42% do consumo de energia para aquecimento da residência. No entanto, em uma comparação com diferentes tipos de residências, sistemas de condicionamento artificial e efeito do comportamento dos usuários, pode-se obter diferenças mais expressivas no consumo de energia para condicionamento artificial de aquecimento.

Ren *et al.* (2014) monitoraram o uso do sistema de condicionamento artificial em 34 residências na China, oito cidades. O estudo foi realizado por meio de questionários e medições de temperatura dos ambientes, concentração de CO₂ e consumo de energia do sistema. O período de monitoramento foi de 2 meses, entre 15 de julho e 15 de setembro. Os autores identificaram os padrões típicos de uso do sistema de condicionamento artificial, que estão relacionados às condições ambientais ou a eventos nos ambientes (antes de almoçar, antes de dormir). A probabilidade do acionamento do sistema de condicionamento artificial aumenta em função da temperatura interna,

e o desligando está associado à desocupação do ambiente. Os resultados foram usados para configurar um modelo de probabilidade de uso do sistema de condicionamento artificial. Os autores concluíram que o modelo de probabilidade pode descrever grande parte do comportamento de uso para as condições ambientais e para os eventos. Para melhorar a predição do modelo é necessário expandir os dados de monitoramento.

O estudo de Jiang *et al.* (2008) analisou o consumo de energia para condicionamento artificial de 25 apartamentos de uma edificação localizada em Pequim. Todos os apartamentos têm as mesmas propriedades térmicas na envoltória. O consumo de energia para condicionamento artificial variou de sem consumo a 14 kWh/m², com uma média de 2,3 kWh/m². A justificativa das diferenças é devida ao comportamento do usuário e às diferenças na eficiência dos condicionadores de ar. No estudo não há informações referentes aos perfis dos usuários, desta forma não se sabe se todas as unidades possuem a mesma demanda para condicionamento artificial. A variação do número de pessoas que residem na unidade habitacional impacta significativamente no consumo, por isso o indicador de kWh/m² não seria o recomendado para comparar consumos de edificações com perfis diferentes.

Anderson *et al.* (2015) investigaram o consumo de energia em edificações residenciais no período que estão desocupadas. O estudo foi desenvolvido em sete edificações residenciais multifamiliares, resultando em 1.000 unidades habitacionais individuais na cidade de Seul (Correia do Sul), durante o ano de 2013. Os resultados mostraram que mais de 30% da energia consumida nas unidades habitacionais ocorre durante o período que estão desocupadas. Não há relação entre o consumo total de energia e o consumo de energia no período que a unidade habitacional estava desocupada. Os autores sugerem quantificar o consumo de energia para os serviços úteis (refrigeração e para manter a temperatura mínima), no período em que as unidades habitacionais estão desocupadas.

Mohammadi *et al.* (2007) pesquisaram o comportamento dos usuários de 29 escritórios da Áustria. O objetivo do estudo foi observar as ações dos usuários em relação ao sombreamento e à iluminação dos escritórios, correlacionando com as condições climáticas internas e externas. Os resultados mostraram que as ações dos usuários em ligar as luzes eram determinadas pelos baixos níveis de iluminação na estação de trabalho. A probabilidade de os usuários desligarem as luzes dos escritórios estava relacionada ao horário do próximo intervalo. Os resultados sugerem a possibilidade de identificar padrões gerais de comportamento dos usuários em função das condições climáticas e das condições ambientais da edificação. A ideia do autor foi desenvolver modelos comportamentais dos usuários mais confiáveis para melhorar a confiabilidade das análises de desempenho de edificações realizadas por simulação computacional.

Haas (1997) analisou alguns parâmetros que influenciam no consumo de energia das residências. Os parâmetros analisados foram: fatores demográficos, econômicos e políticos; fatores individuais; estilo de vida; cultura; estrutura, tecnologia e clima. As variáveis de cada parâmetro são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e variáveis que influenciam no consumo de energia de residências.

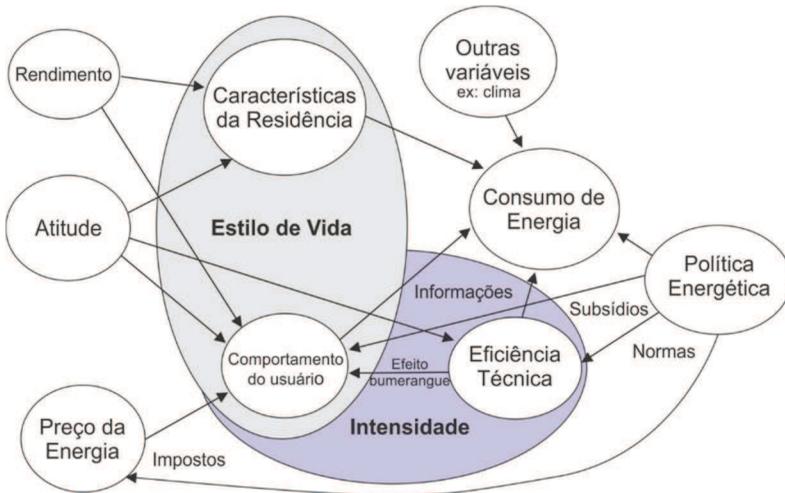
PARÂMETROS	VARIÁVEIS
Demográficos	Aumento ou redução dos moradores Crescimento da população Idade dos ocupantes
Fatores econômicos	Preço da energia Custo de investimento dos equipamentos Renda disponível
Fatores individuais	Atitude Consciência
Estilo de vida	Tempo gasto em casa e no trabalho Atividades realizadas dentro e fora de casa
Cultura	Cozinhar Lavar roupa Aquecimento ou arrefecimento Preferências de conforto
Estrutura	Saturação do equipamento Área da residência Ambientes com sistema de aquecimento ou arrefecimento
Tecnologia	Eficiência
Clima	Demanda de aquecimento e arrefecimento
Política	Normas de construção e eletrodomésticos Impostos Efeito dos programas de gestão

Fonte: Adaptado de Haas (1997).

Haas (1997) apresenta um esquema das interações relativas ao consumo de energia no setor residencial (Figura 2). Observa-se que diferentes variáveis influenciam no consumo de energia, sendo que algumas das variáveis, como o comportamento do usuário, atitude do usuário e as variáveis climáticas, são imprevisíveis. O esquema apresenta a complexidade da caracterização do consumo de energia das edificações residenciais. O autor menciona que o comportamento dos usuários está relacionado com estilo de vida. As principais influências sobre o estilo de vida são a renda e a atitude. Os parâmetros que influenciam

indiretamente no consumo de energia são os preços de energia, renda e atitude do usuário.

Figura 2 – Esquema das interações relativas ao consumo de energia no setor residencial.



Fonte: Adaptado de Haas (1997).

Enquanto alguns cientistas usam comparações de consumo de energia para inferir os efeitos do comportamento dos usuários, outros autores utilizaram questionários para investigar parâmetros determinantes no consumo de energia. Este método foi utilizado por Sardianou (2008). Os resultados mostraram que a idade do responsável da família, o número de moradores, a renda anual, o tamanho e a posse influenciaram na demanda de energia para aquecimento. A conclusão da pesquisa foi que o nível socioeconômico tem impacto sobre os padrões de comportamento dos ocupantes.

Guerra-Santin e Itard (2010) investigaram os principais efeitos do comportamento dos usuários no consumo de energia para aquecimento do ambiente em residências da Holanda. Os resultados mostraram que, em relação ao uso da residência, a presença de idosos na família impacta no consumo de energia do sistema de aquecimento e de ventilação. Os

autores identificaram que o estilo de vida, a preferência e o comportamento do usuário são fatores importantes no consumo de energia da residência.

O consumo de energia para aquecimento dos ambientes e de água quente em 2.280 edificações da Lituânia foram comparados por Juodis *et al.* (2009). Os resultados mostraram um fator de consumo de 1,2 (baixo) e 1,7 (alto) quando comparados com edificações semelhantes. Concluíram que as diferenças e incertezas estavam relacionadas com o projeto, a construção da edificação e não discutem a diferença do comportamento dos usuários que utilizam as edificações. O consumo de água quente está diretamente ligado ao comportamento do usuário, sendo que neste trabalho não foi discutida a importância do comportamento dos usuários.

Schweiker e Shukuya (2011) investigaram o comportamento de 39 usuários de um dormitório de estudantes estrangeiros na cidade de Tóquio em relação ao uso dos condicionadores de ar. A investigação foi realizada em etapas, sendo a primeira etapa a distribuição de um questionário para identificar os estudantes que estavam interessados em participar da pesquisa. Selecionados os estudantes, foram instalados dois sensores sem fio no dormitório: um sensor para coletar dados de temperatura e umidade e outro sensor para verificar se a janela está aberta ou fechada. Os dados foram coletados por seis semanas, iniciando no final de junho até a metade de agosto. Durante esse período, também foram monitorados a temperatura externa, a umidade, o vento e a radiação solar. Os dados coletados foram divididos em quatro grupos: usuários que não utilizam o ar condicionado; usuários que utilizam o ar condicionado, quando as condições estão extremas e o ventilador não atende as condições de conforto; usuários que tentam evitar o uso do ar condicionado, mas utilizam antes de tentar outras estratégias; e os usuários que utilizam o ar condicionado o tempo todo, mesmo quando não há necessidade. Os resultados da pesquisa mostraram que a preferência dos usuários é o fator que influencia no número de vezes que o ar-condicionado é acionado. Também há relação entre a temperatura externa e o uso do ar-condicionado, mas apresenta

uma variação de padrões de comportamento. O estudo mostrou que não houve influência do conhecimento das estratégias alternativas no comportamento real do usuário e a preferência das condições térmicas está relacionada com os hábitos culturais do seu país.

Os estudos na literatura mostram que ganhos em eficiência energética em edificações podem ser atingidos de duas maneiras distintas. Uma delas seria através da substituição dos eletrodomésticos e equipamentos obsoletos instalados na edificação por outros mais eficientes. Geralmente, os efeitos destas ações duram longos períodos. Por outro lado, ganhos em eficiência podem ser alcançados através de mudanças no comportamento dos usuários, exigindo esforços constantes dos moradores da residência para atingir as metas de eficiência (ABRAHAMSE *et al.*, 2005).

A mudança no comportamento pode apresentar bons resultados para a eficiência energética das edificações. Muitos usuários não têm conhecimento de qual é a melhor forma para operar a edificação em determinadas condições. A automação residencial tem grande potencial de auxiliar os usuários a reduzir o consumo de energia, fornecendo informações sobre a melhor forma de operar a edificação e apresentando os usos finais de energia para os usuários. Alguns trabalhos abordaram a influência da automação residencial com relação ao comportamento dos usuários e o consumo de energia das edificações, como Bonino *et al.* (2012), Wood e Newborough (2007), Klein *et al.* (2012), Bartram *et al.* (2011) e Chetty *et al.* (2008).

Pereira e Marinovski (2010) estimaram o consumo de energia elétrica da Casa Eficiente, através de diferentes perfis de usuários e a eficiência dos eletrodomésticos e equipamentos. Foram simulados quatro perfis de usuários combinados com a eficiência dos eletrodomésticos e equipamentos: Família Sbanja, com eletrodomésticos e equipamentos ineficientes; Família Sbanja com eletrodomésticos e equipamentos eficientes; Família Consciente, com eletrodomésticos e equipamentos ineficientes; e Família Consciente com eletrodomésticos e

equipamentos eficientes. Para os quatro cenários foram considerados uma família de classe média composta por um casal e dois filhos. Os usuários da Família Sbanja utilizam os eletrodomésticos, equipamentos e a iluminação artificial da residência por mais tempo que o necessário e acima da média nacional. Os usuários da Família Consciente possuem um comportamento mais consciente, evitando desperdícios no uso dos eletrodomésticos, equipamentos e da iluminação artificial da residência. O consumo médio mensal de energia dos quatro cenários foram: Família Sbanja com eletrodomésticos/equipamentos ineficientes consumiu 923,12 kWh/mês; Família Sbanja com eletrodomésticos/equipamentos eficientes consumiu 549,59 kWh/mês; Família Consciente com eletrodomésticos/equipamentos ineficientes consumiu 306,84 kWh/mês; e a Família Consciente com eletrodomésticos/equipamentos eficientes consumiu 153,33 kWh/mês. Os resultados mostram que o comportamento dos usuários interfere no consumo de energia da edificação. Nas simulações dos quatros perfis de consumo, observa-se que a alteração da eficiência dos eletrodomésticos e equipamentos reduz em 40% o consumo de energia da Família Sbanja. A alteração do comportamento dos usuários combinada com a eficiência dos eletrodomésticos e equipamentos reduz o consumo de energia em 83%.

Além dos elementos levantados nos trabalhos citados, autores como Carrico e Riemer (2011), Truelove e Parks (2012), Whitmarsh (2009), Werner *et al.* (2012), Pierce *et al.* (2010), Riche *et al.* (2010) e Roetzel *et al.* (2010) abordaram a influência dos usuários no consumo de energia a partir dos fatores psicológicos.

2.2. A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico da edificação

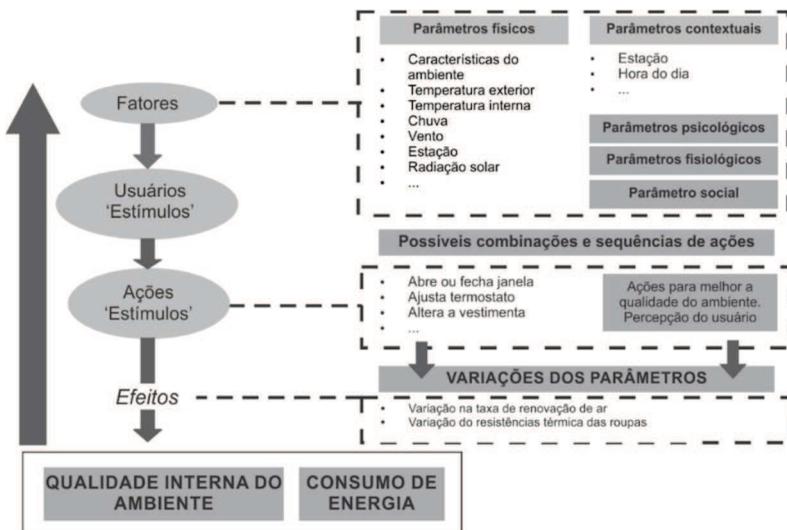
Pesquisadores investigaram a influência do comportamento dos usuários em edificações nas últimas décadas. Avaliaram a interação dos usuários com os dispositivos e os sistemas de condicionamento ambiental: condicionamento artificial, condicionamento natural (ventilação natural), janelas, cortinas, luminárias, sombreamento e

outros. A maioria dos estudos compartilha uma característica em comum, que é a ligação entre as ações de controle do usuário com os parâmetros ambientais mensurados no interior ou exterior da edificação.

Os parâmetros ambientais podem influenciar nas tomadas de decisões dos usuários e na operação da edificação. As variáveis ambientais que podem influenciar na tomada de decisão do usuário são: temperatura, umidade, velocidade do ar, chuva, ruído, iluminação, odores e a qualidade do ar. Por sua vez, os ambientes das edificações possuem variáveis que influenciam indiretamente no comportamento dos usuários: características da edificação, orientação dos ambientes, propriedades da envoltória, sistemas e equipamentos instalados na edificação.

Fabi *et al.* (2012) apresentam um diagrama com os cinco parâmetros que influenciam no comportamento do usuário: parâmetros físicos, contextuais, psicológicos, fisiológicos e social (Figura 3). As interações de controle dos usuários podem ser divididas em ações para melhorar o conforto - por exemplo, abrir e fechar janela, alterar a temperatura do termostato - ações para adaptarem-se às condições do ambiente - como trocar de vestimenta - e ações que proporcionam efeitos indiretamente no ambiente.

Figura 3 – Diagrama dos parâmetros que influenciam no comportamento do usuário



Fonte: Adaptado de Fabi *et al.* (2012).

Em relação aos cinco parâmetros, Fabi *et al.* (2012) identificaram os principais fatores que influenciam no comportamento do usuário na operação das aberturas para ventilação, em edificações residenciais (Tabela 2).

Tabela 2 – Principais fatores que influenciam no comportamento do usuário na operação das janelas

Fisiológico	Psicológico	Social	Físico	Contextual
Idade	Percepção iluminação	Fumante	Temperatura externa Temperatura interna	Tipo da edificação Tipo do ambiente
Sexo	Preferência térmica	Presença na residência	Radiação solar Velocidade do vento Concentração de CO ₂	Orientação do ambiente Tipo de ventilação Sistema de aquecimento Estação Hora do dia

Fonte: Adaptado de Fabi *et al.* (2012).

Andersen *et al.* (2009) realizaram um levantamento do controle dos usuários de edificações residenciais na Dinamarca durante os períodos de setembro a outubro de 2006 e de fevereiro a março de 2007. O levantamento foi realizado através de questionários enviados para as residências. Em todos os domicílios foram identificadas as características construtivas da edificação. Também foram coletadas informações referentes ao controle das aberturas (janela aberta ou fechada), aquecimento (ligado ou desligado), iluminação (ligada ou desligada) e sombreamento solar (em uso ou não está em uso). As informações foram analisadas separadamente por meio de regressão múltipla a fim de quantificar a influência dos fatores e do comportamento dos usuários. Os resultados mostraram que o comportamento de abrir a janela estava fortemente relacionado com a temperatura externa. As características construtivas da edificação também impactaram na abertura da janela. Os autores mencionam que este levantamento foi uma primeira tentativa de identificar as influências dos usuários no desempenho das edificações residenciais. Os resultados das análises estatísticas formam uma base para a definição de padrão de comportamentos dos usuários. Através dessa base pode ser calculado o consumo energético das edificações com maior precisão.

Segundo Cheng *et al.* (2005), em climas que apresentam grande amplitude térmica, as edificações residenciais possuem potencial para utilizar o efeito da inércia térmica nas estações quentes. Porém, os autores alertam que o resultado vai depender das circunstâncias do modo de operação e do padrão de ocupação. Os critérios de escolha das propriedades térmicas dos componentes da fachada devem levar em conta os usos e hábitos de ocupação.

Para Yun *et al.* (2009) a ação de abrir uma janela é a resposta mais intuitiva e simples de controlar o superaquecimento em um ambiente. No entanto, esta ação depende da interação do usuário em explorar o potencial da estratégia passiva possibilitando ambientes mais confortáveis. A compreensão do comportamento dos usuários é importante para a concepção e avaliação de edifícios naturalmente ventilados.

Hoes *et al.* (2009) analisaram a sensibilidade do comportamento do usuário em um escritório. As análises foram realizadas através de simulação computacional de 150 casos com o programa ESP-r. Foram analisados diferentes comportamentos dos usuários e diferentes parâmetros construtivos (inércia térmica, área de abertura). Os resultados mostraram que o comportamento do usuário tem menor influência em uma edificação com baixa inércia térmica e grande área de aberturas. Em uma edificação com alta inércia térmica e pequena área de aberturas, o comportamento do usuário é importante no desempenho do ambiente.

De Meester *et al.* (2013) analisaram a influência do comportamento do usuário no desempenho termoenergético de uma edificação padrão da Bélgica. A pesquisa investigou a influência de três parâmetros relacionados ao comportamento humano (padrão de ocupação, tamanho da família e a operação do sistema de aquecimento). Em relação às propriedades termofísicas da envoltória foram analisados sete níveis de isolamento da envoltória. As simulações termoenergéticas foram realizadas com o programa *Thermal Analysis Software* (TAS), com

o arquivo climático da cidade de Bruxelas. Os resultados mostraram que quanto mais isolada a envoltória, maior a influência do estilo de vida nos consumos de aquecimento. Os autores sugerem que para reduzir o consumo de energia para aquecimento durante o ciclo de vida da edificação é importante adaptar a área condicionada e o padrão de ocupação em função da evolução do tamanho da família. Entre todos os parâmetros analisados, o isolamento térmico da envoltória é fundamental para reduzir o consumo de energia para aquecimento.

O impacto das estratégias de ventilação natural combinadas com diferentes componentes construtivos da envoltória em edificações residenciais foram investigados por Liping e Hien (2007). A influência de quatro estratégias de ventilação com diferentes combinações de materiais dos componentes da envoltória, sombreamento e áreas de janela foram analisados através de simulações realizadas através do programa *Thermal Analysis Software* (TAS), para o clima de Singapura. Foram testados 14 tipos de paredes, com diferentes valores de condutividade, inércia térmica e quatro estratégias de ventilação (constante, não ventilado, diurna e noturna). A estratégia de ventilação constante foi a que apresentou menor número de horas de desconforto. Os resultados indicaram que os componentes do envelope não isolados e com inércia térmica são escolhas ideais para edificações ventiladas naturalmente em climas quentes e úmidos. O estudo possui uma limitação em relação à taxa de renovação de ar: a taxa de apenas uma renovação de ar embasou a conclusão dos autores. Porém, com o aumento da taxa de renovação de ar, a inércia térmica pode prejudicar o desempenho da edificação em clima quente e úmido.

Silva e Ghisi (2014) investigaram a incerteza do resultado do desempenho termoenergético em uma edificação residencial unifamiliar (de baixa renda), a partir do comportamento do usuário e dos parâmetros termofísicos da envoltória. O estudo foi desenvolvido por simulação termoenergética, com o programa *EnergyPlus*. Os resultados foram analisados por meio do método de análise de sensibilidade, utilizando o coeficiente de regressão padrão. Os parâmetros

termofísicos da envoltória apresentaram uma incerteza de até 17,2%, já os parâmetros do comportamento do usuário foram de 21,5% para os graus-hora de aquecimento. Para os graus-hora de resfriamento a incerteza foi de 15,2% para os parâmetros físicos e de 6,6% para os parâmetros do comportamento do usuário. Em relação ao consumo de energia para condicionamento artificial as incertezas foram maiores, 19,5% para os parâmetros termofísicos e 36,5% para os parâmetros do usuário no consumo de aquecimento. No consumo de resfriamento a incerteza do usuário foi de 38%, e 43,5% para os parâmetros termofísicos da envoltória da edificação. O estudo apresenta a limitação de analisar as incertezas para um único modelo de edificação residencial de baixa renda, a geometria da edificação e a disponibilidade de dispositivos de sombreamento pode alterar as incertezas.

Herkel *et al.* (2005) analisaram o comportamento dos usuários em relação ao controle de abertura das janelas de ocupação e as condições climáticas externas e internas. A análise do comportamento do usuário revelou uma forte correlação entre o percentual de janelas abertas com a estação do ano, a temperatura exterior e os padrões de ocupação. A abertura da janela está mais relacionada com a chegada de mais uma pessoa no ambiente.

Nicol (2001) analisou o comportamento dos usuários em edificações ventiladas naturalmente do Reino Unido, Paquistão e países da Europa. Foram observadas as interações dos usuários com os sistemas de controle de iluminação, persianas, aquecedores e ventiladores. Os resultados abrangem uma variedade de climas e culturas da Europa e do Paquistão. O resultado do estudo apresenta probabilidades em que os usuários das edificações ventiladas naturalmente irão interagir com os controles da edificação em função da temperatura externa. O comportamento dos usuários apresentou algumas semelhanças nas ações como a abertura das janelas para ventilação e o uso de ventiladores, que foram similares para todos os climas em relação à temperatura externa. A utilização de persianas é praticamente independente da temperatura externa nos escritórios estudados.

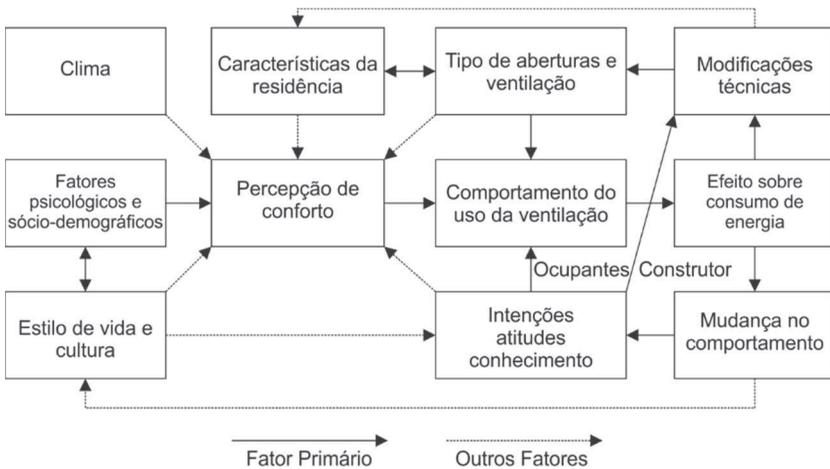
Yun e Steemers (2008) investigaram a interação dos usuários no controle de abertura das janelas no Reino Unido. As temperaturas internas dos ambientes não apresentaram grandes variações em função da interação dos usuários com o controle de abertura das janelas, analisando para as mesmas condições climáticas. Porém, as diferenças eram significativas nos padrões de comportamento de abertura das janelas de acordo com a hora do dia. O autor menciona que os resultados do estudo podem ser uma base para avaliações mais realistas do desempenho térmico de edifícios ventilados naturalmente, e também compreender melhor os padrões de comportamento dos usuários com ventilação natural no período de verão.

O comportamento dos usuários em relação à ventilação natural e seus efeitos no desempenho térmico de edifícios ventilados naturalmente foram explorados também por Yun *et al.* (2009), que desenvolveu um algoritmo probabilístico que procura representar o comportamento dos ocupantes. Este algoritmo pode ser usado nas ferramentas dinâmicas de simulação de desempenho térmico e energético. A validação do algoritmo foi realizada através da comparação do padrão de comportamento dos usuários previstos com o comportamento monitorado, o qual mostrou uma boa correlação.

O estudo da IEA – ECBCS Annex 8 (DUBRUL, 1988) que avaliou o comportamento do usuário com relação à ventilação nos países Alemanha, Bélgica, Suíça, Holanda e Reino Unido, utilizou uma combinação de métodos para analisar o comportamento do usuário na operação do ambiente: questionários, livro de registro, observações, registros fotográficos e instalação de sensores. O estudo mostrou que o tipo da edificação (casa ou apartamento), orientação, tipo do ambiente, tamanho e o tipo da abertura interferem no comportamento do usuário. O tempo que a abertura permanece aberta tem uma correlação forte com o tipo da edificação (casa ou apartamento). Este estudo foi desenvolvido em países com clima frio. No entanto, o comportamento dos usuários em climas quentes deve ser diferente. Neste caso, poucas cidades brasileiras possuem as mesmas condições climáticas do estudo.

São muitos os parâmetros que podem influenciar o usuário a interagir nos controles da edificação. No estudo da IEA – ECBCS Annex 8 (DUBRUL, 1988) foram elencados alguns parâmetros que motivam o usuário a interagir nos controles da edificação para melhorar as condições de conforto térmico. O estudo menciona que a influência no microclima da edificação é predominantemente determinada pela temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa, vestimenta e pela atividade metabólica dos usuários. Também cita que outros fatores podem influenciar no microclima da edificação, conforme as categorias: temporal (estação do ano, dia da semana, padrão biorritmo durante o dia); espacial relacionada ao ambiente (volume, superfícies em contato com o exterior, nível de iluminação, cor, mobília, posição e tipo de janelas e portas); relativo ao ambiente (qualidade interna do ar, olfato, ocupação do ambiente, uso do ambiente, controle do microclima); humano (sensação do bem estar, fatores socioculturais); e externos (nível desenvolvimento técnico, clima externo). As principais variáveis que interferem nas decisões dos usuários são apresentadas na Figura 4. Observa-se que o comportamento dos usuários está fortemente relacionado com a percepção de conforto térmico no ambiente. Em outras palavras, o conforto térmico é a condição predominante que motiva o usuário a interagir com os dispositivos de ventilação da edificação. As interações dos usuários estão relacionadas com os fatores psicológicos (idade, sexo, saúde); sociais (número de moradores); disponibilidade de recursos (dinheiro, conhecimento e estilo de vida); características da residência (aberturas, ventilação, sistema condicionamento artificial); e o clima (temperatura, umidade, radiação).

Figura 4 – Esquema das principais variáveis que influenciam na decisão do usuário.



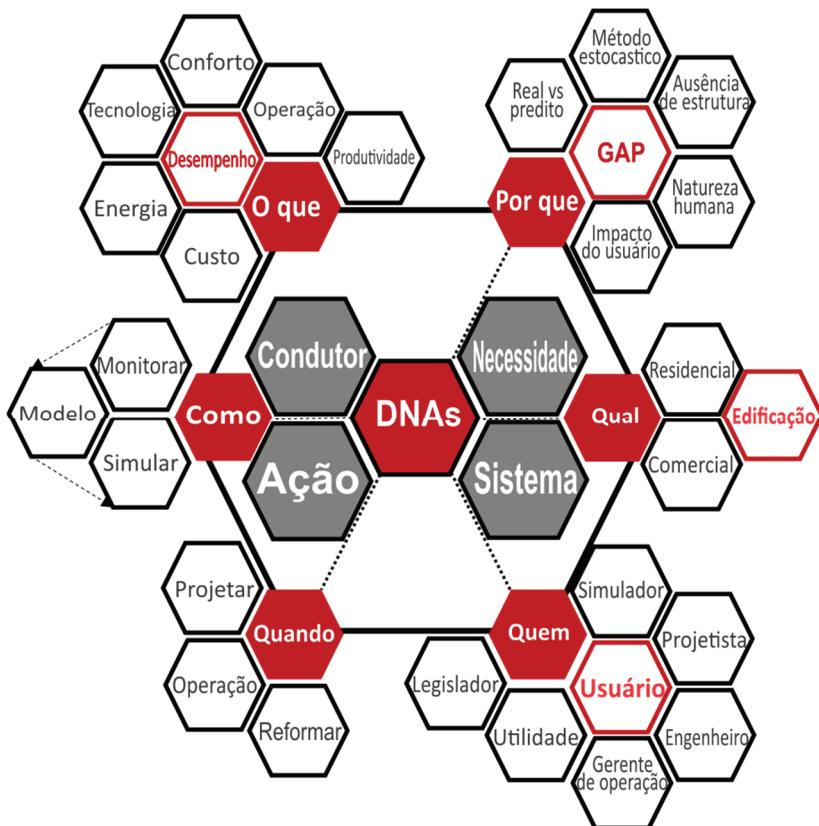
Fonte: Adaptado de Dubrul (1998).

O estudo de Dubrul (1988) também sugere que o tipo da edificação (casa ou apartamento) tem influência na interação do usuário com o controle da abertura. A influência está relacionada com o tempo e o horário que as janelas permanecem abertas. Outro aspecto que o estudo menciona é referente à qualidade interna do ar: este deveria receber uma atenção especial, pois é um fator importante que pode influenciar no desempenho das habitações. Atualmente é um parâmetro importante, pois com a crescente poluição nas grandes cidades, a qualidade do ar pode ser um parâmetro que limita o uso da ventilação natural para melhorar o desempenho térmico e energético das edificações. Outro parâmetro que também pode influenciar é a poluição sonora.

Na pesquisa de Hong *et al.* (2015) foram revisados 130 artigos que tratam do comportamento do usuário. Os estudos revisados abrangem todas as regiões geográficas do mundo. Observaram que há falta de padronização e consistência, dificultando a comparação dos estudos. Os

autores apresentaram uma proposta da ontologia do comportamento do usuário no desempenho termoenergético das edificações (Figura 5).

Figura 5 - Ontologia do comportamento do usuário no desempenho termoenergético das edificações



Fonte: Adaptado de Hong *et al.* (2015)

A estrutura do DNAs do comportamento do usuário está dividida em quatro pontos principais: os condutores do comportamento dos usuários que influenciam no desempenho termoenergético; as necessidades dos usuários que devem ser cumpridas para tornar o usuário satisfeito e o ambiente confortável; as ações que os usuários podem realizar para satisfazer as necessidades; e os sistemas da

edificação que os interagem usuários e reflete no desempenho termoenergético. Descrever ou prever as influências do comportamento dos usuários no desempenho termoenergético é uma tarefa desafiadora devido à natureza estocástica dos seres humanos. A proposta busca padronizar uma representação sistemática do comportamento dos usuários no desempenho termoenergético das edificações, a nível internacional. O objetivo é desenvolver modelos comportamentais mais precisos para as ferramentas de simulações termoenergéticas de edificações, fornecendo resultados mais confiáveis (HONG *et al.*, 2015).

2.3. Condições de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente

O conforto térmico é um dos fatores predominantes que motiva os usuários a interagir com os sistemas das edificações operadas da forma híbrida (ventilação e condicionamento artificial) (DUBRUL, 1988). Segundo Olesen (2007) os critérios para avaliação do conforto térmico em edificações condicionadas naturalmente devem ser diferentes dos critérios adotados para edificações com condicionamento artificial devido às diferentes expectativas e adaptações dos usuários.

Alguns modelos de conforto adaptativo propõem uma correlação entre a temperatura do interior da edificação e a temperatura externa do ar, considerando que os usuários se adaptam às variações sazonais e ao clima local. O modelo adaptativo está baseado em correlações medidas entre a impressão subjetiva de conforto descrita pelos ocupantes e a temperatura interior em centenas de edificações reais. Segundo De Dear e Brager (2002) as teorias dos modelos adaptativos estabelecem, além dos fatores físicos e fisiológicos, a importância da expectativa e as preferências térmicas dos ocupantes do ambiente. A satisfação da sensação térmica e aceitabilidade são influenciadas pela equiparação entre uma expectativa do clima do ambiente com um contexto particular, relacionada com as condições existentes.

As normas mais conceituadas que adotam o modelo de conforto adaptativo são a ASHRAE Standard 55 e a EN 15251. Foram desenvolvidas com base em pesquisas de conforto térmico em edificações reais sem condicionamento artificial.

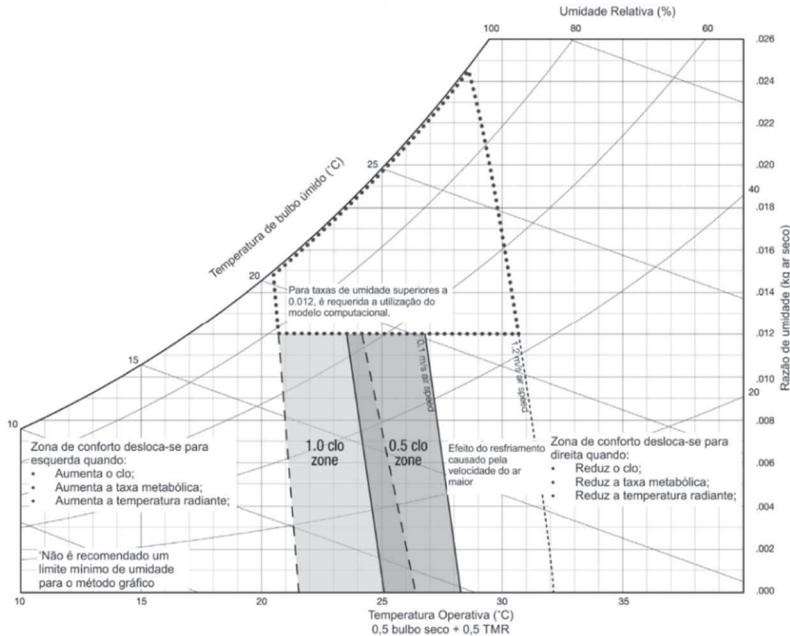
A ASHRAE Standard 55 apresenta dois métodos para avaliação do conforto térmico nas edificações: o método da aceitabilidade térmica baseado no PMV e o método da aceitabilidade térmica para ambientes condicionados naturalmente.

A zona de conforto é definida em relação à variação da temperatura operativa, que resulta na aceitabilidade térmica do ambiente. A percepção térmica do usuário é uma combinação da temperatura do ar e temperatura radiante média. A norma adota o método de conforto térmico proposto por Povl Ole Fanger - PMV-PPD (*Predicted mean vote e Predicted percentage of dissatisfied*). A aplicabilidade do método é limitada a ambientes que atividade metabólica do usuário esteja entre 1,0 e 1,3 met, o isolamento térmico das roupas entre 0,5 e 1,0 e a velocidade do ar no ambiente menor que 0,2 m/s (ASHRAE, 2013).

A ASHRAE Standard 55 (2013) define que é uma relação das condições do ambiente e os fatores pessoais que determinam a aceitabilidade dos usuários. O modelo é baseado nas trocas de calor entre o ambiente e o corpo humano, assumindo que as sensações térmicas são influenciadas exclusivamente por quatro fatores no ambiente, a temperatura do ar, temperatura radiante, umidade e velocidade do ar, como também, são considerados dois fatores pessoais: a atividade e o isolamento térmico das roupas (DE DEAR e BRAGER, 2002).

A Figura 6 apresenta as duas zonas de conforto com base na temperatura operativa do ambiente. As zonas de conforto estão definidas pelo isolamento térmico das roupas, sendo uma para verão (0,5 clo) e outra para inverno (1,0 clo). Nestas zonas, prevê-se uma aceitabilidade de 80% dos usuários, considerando que 10% dos usuários estariam insatisfeitos devido ao desconforto localizado e os outros 10% insatisfeitos com os limites do PMV/PPD.

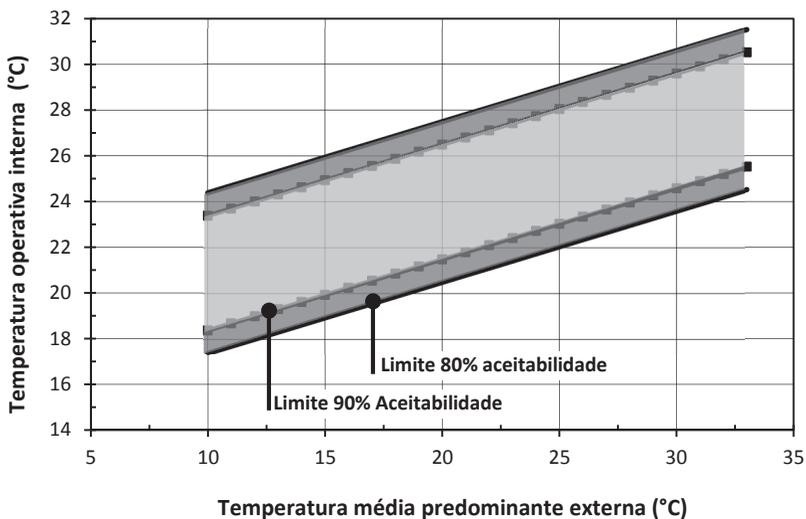
Figura 6 - Zonas de conforto para os ambientes condicionados artificialmente



Fonte: Adaptado da ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2013).

O método da aceitabilidade térmica para ambientes condicionados naturalmente da ASHRAE *Standard* 55 (2013) é aplicável quando a média da temperatura externa entre 10°C e 33,5°C. As condições de conforto devem atender aos limites estabelecidos na norma sem o uso de sistemas de resfriamento e aquecimento. A zona de conforto é relacionada apenas com a temperatura média predominante do exterior (bulbo seco), não apresentando limitações para valores de umidade e velocidade do ar. A faixa de temperatura de conforto varia de 17°C a 31°C para aceitabilidade de 80%, e de 18,5°C a 30,5°C para 90% de aceitabilidade, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Limites da zona de conforto da ASHRAE 55.



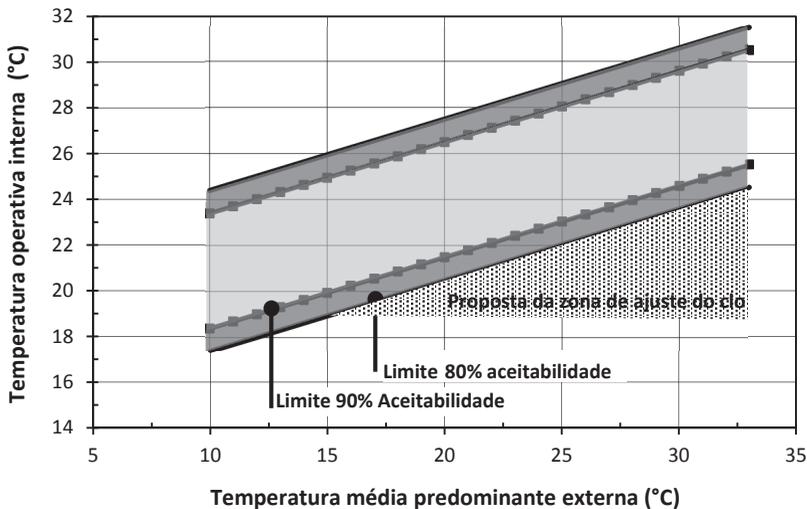
Fonte: Adaptado da ASHRAE Standard 55 (2013)

A ASHRAE 55 apresenta diferentes métodos para calcular a temperatura média predominante do exterior, o método linear e o exponencial. A média diária da temperatura do ar externo deve ser calculada através da média aritmética simples, considerando as 24 horas do dia da temperatura de bulbo seco. De Vecchi *et al.* (2014a) analisaram a influência dos métodos linear e exponencial para dois climas brasileiros (Florianópolis e Belém). Para o método exponencial foram analisados dois coeficientes de ponderação “ α ” (0,6 e 0,8) e para o método linear dois períodos de tempo diferentes (7 e 30 dias). Os resultados mostraram que a escolha do método linear ou exponencial é indiferente em climas com pequenas amplitudes, mas pode apresentar diferentes limites de aceitabilidade quando as variações de temperatura estão presentes. O método linear para o período de 7 dias apresentou um comportamento próximo ao método exponencial com α de 0,6.

De Vecchi *et al.* (2014b) observaram que muitos dos votos abaixo do limite inferior de conforto são erroneamente classificados como desconforto por frio. Estas condições ocorrem especialmente durante as

mudanças de estação (de verão para o outono). Os autores apresentaram uma proposta de uma zona de ajuste do clo, para resolver o problema. Nestas condições o usuário pode ajustar o clo para evitar o desconforto por frio, não sendo necessário o uso de um sistema de condicionamento artificial para aquecimento do ambiente. A Figura 8 apresenta a zona de adaptação do clo proposta por De Vecchi et al. (2014b).

Figura 8 - Limites da zona de conforto da ASHRAE 55 com a proposta da zona de adaptação do clo



Fonte: Adaptado de De Vecchi *et al.* (2014b).

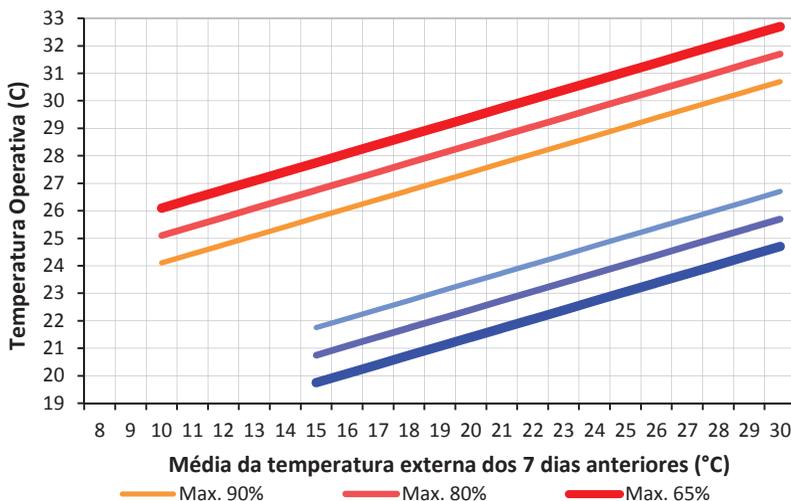
A norma EN 15251 (EUROPEAN STANDARD, 2007) define critérios de conforto térmico para as edificações em três categorias: a primeira categoria para alto nível de expectativa, que é recomendada para ambientes ocupados por pessoas sensíveis e frágeis; a segunda categoria para o nível normal de expectativa, deve ser aplicada para novas edificações; e a terceira categoria para o nível moderado de expectativa que deve ser utilizada para edificações existentes.

A EN 15251 apresenta a zona de temperaturas de conforto para edificações sem sistemas de condicionamento artificial, calculada

através da média da temperatura externa do ar dos sete dias anteriores, como também pode-se considerar o efeito da velocidade do ar para o conforto dos usuários. A norma é válida para edificações de escritórios, habitações ou edificações com características semelhantes de ocupação, cujas atividades principais sejam sedentárias ou com taxas metabólicas variando de 1,0 a 1,3 met. Também é importante que os usuários possam se adaptar às condições do ambiente, trocando as vestimentas e interagindo com as aberturas que proporcionam a ventilação.

A EN 15251 estabelece três faixas de temperaturas de conforto, uma para cada nível de expectativa, oscilando de 21,7°C a 30,7°C para aceitabilidade de 90%; de 20,35°C a 31,7°C para 80%; e de 19,75°C a 32,7°C para 65% de aceitabilidade, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados da EN 15251.



Fonte: Adaptada da EN 15251 (2007).

No verão, quando o ambiente possuir temperatura operativa maior que 25°C, podem-se compensar as condições de conforto com o aumento da

velocidade do ar interno, por meio de sistemas de ventiladores que permitam ao usuário ajustar a velocidade do ar. O aumento está limitado à velocidade máxima do ar em 0,8 m/s, que amplia a temperatura de conforto em até 2,7°C.

A ASHRAE 55 e a EN 15251 adotam diferentes critérios para calcular a média da temperatura dos sete dias anteriores. A EN 15251 recomenda o uso do α de 0,8 para o cálculo da média da temperatura externa dos sete dias anteriores. A temperatura é calculada através da equação (1).

$$\theta_{ext} = (1-\alpha) * \{ \theta_{dia\ 1} + \alpha * \theta_{dia\ 2} + \alpha^2 * \theta_{dia\ 3} + \alpha^3 * \theta_{dia\ 4} + \alpha^4 * \theta_{dia\ 5} + \alpha^5 * \theta_{dia\ 6} + \alpha^6 * \theta_{dia\ 7} \} \quad (1)$$

No qual:

ϑ_{ext} é a média da temperatura externa dos sete dias anteriores;

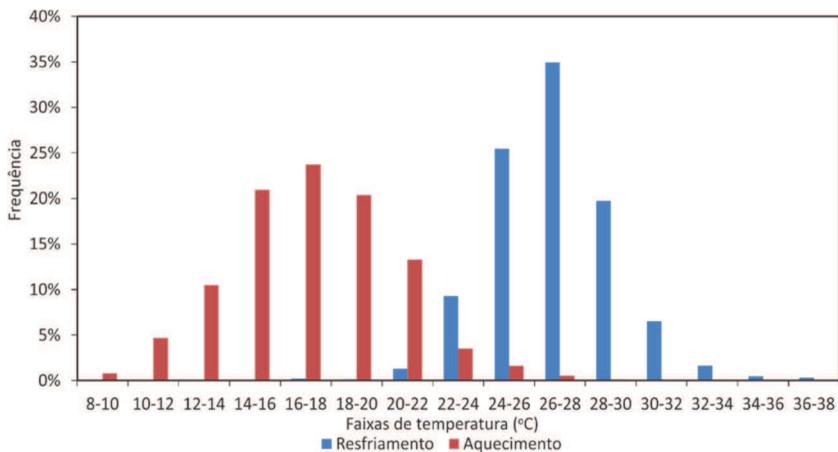
ϑ_{dia} é a temperatura média do dia;

α é a constante varia de 0 a 1;

De Dear *et al.* (2015)¹ analisaram as condições de conforto térmico e o uso de sistema de condicionamento artificial em ambientes residenciais na Austrália. Os resultados mostram que as temperaturas mais frequentes em que os usuários ligaram o sistema de condicionamento artificial foram de 16 a 18°C para aquecimento e de 26 a 28 °C para resfriamento. O estudo monitorou 45 residências. A Figura 10 apresenta a frequência das temperaturas em que os usuários acionaram o sistema de condicionamento artificial.

¹ Palestra ministrada pelo Prof. Richard de Dear na Universidade Federal de Santa Catarina, no dia 23 de fevereiro de 2015.

Figura 10 – Frequência das temperaturas que os usuários acionaram o sistema de condicionamento artificial



Fonte: Adaptado de De Dear *et al.* (2015)

O Brasil não possui norma de conforto térmico para edificações. Um grupo de pesquisadores está elaborando uma proposta para a primeira norma brasileira de conforto térmico humano em edificações (LAMBERTS *et al.*, 2013). A proposta da norma está sendo desenvolvida com base na norma internacional ASHRAE Standard 55 (2013).

2.4. Normas de desempenho e regulamentos de eficiência energética

2.4.1. Normas brasileiras de desempenho térmico de edificações residenciais

No Brasil, atualmente, vigoram duas normas de desempenho térmico para edificações residenciais, a NBR 15220 (ABNT, 2005) e a NBR 15575 (ABNT, 2013b). A NBR 15220 está dividida em cinco partes, que se referem aos métodos de cálculo e medição de propriedades térmicas dos componentes construtivos das edificações. A terceira parte apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro e as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

A NBR-15220-3 (ABNT, 2005) propõe diretrizes construtivas para edificações residenciais unifamiliares de interesse social através de recomendações de estratégias bioclimáticas para cada zona bioclimática brasileira. As estratégias bioclimáticas recomendadas pela NBR 15220-3 foram baseadas na carta bioclimática de Givoni (1992) e também nas planilhas de Mahoney (KOENIGSBERGER *et al.*, 1971). As recomendações estão baseadas em propriedades térmicas dos componentes construtivos, tamanho de aberturas, dispositivos de sombreamento e estratégias de condicionamento térmico passivo, como: ventilação cruzada; resfriamento evaporativo; inércia térmica; aquecimento solar passivo; umidificação; entre outras. As paredes e coberturas são caracterizadas termicamente a partir dos valores de resistência térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar.

Recentemente, foi aprovada a norma NBR 15575, que preconiza o desempenho de edificações habitacionais, dividida em seis partes. A primeira parte dessa norma estabelece requisitos gerais. A quarta e a quinta partes tratam dos requisitos para os sistemas de vedações verticais e dos sistemas de coberturas, respectivamente, nas quais também são determinados os limites das propriedades térmicas desses elementos.

Em seu método simplificado de avaliação, a NBR 15575 (ABNT, 2013b) adota praticamente as mesmas recomendações de propriedades térmicas da NBR 15220, que são a transmitância térmica, a absorptância e a capacidade térmica dos elementos construtivos.

Para os sistemas construtivos que não atendem os critérios do método simplificado, deve-se avaliar através do método de simulação ou medição *in loco* (ABNT, 2013a). A avaliação é realizada através de limites de temperatura do ar no interior da edificação (nos ambientes de permanência prolongada - sala ou dormitório), para o verão e inverno. A norma recomenda avaliar o ambiente mais crítico do ponto de vista térmico, com maior número de paredes expostas para o exterior: no verão, o ambiente com a abertura orientada para Oeste, de preferência,

e no inverno, o ambiente com abertura orientada para Sul. A avaliação é realizada para um dia típico de projeto, sem cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e com uma renovação de ar constante durante as 24h.

O método de simulação computacional da NBR 15575 foi analisado por Sorgato *et al.* (2013), que concluíram que o método avalia inadequadamente o desempenho térmico das edificações residenciais por desconsiderar as cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e o comportamento do usuário, simulando a edificação fora da realidade de uso e em condições extremas.

Salienta-se que as diretrizes construtivas da NBR-15220 são aplicadas para habitações unifamiliares de interesse social e que a NBR-15575 é aplicada para todo tipo de edificação residencial. As normas apresentam diferenças no percentual de abertura para ventilação dos ambientes de permanência prolongada e, também, pequenas diferenças nos limites das propriedades térmicas dos componentes construtivos de paredes e coberturas.

2.4.2. Regulamento de Eficiência Energética em Edificações Residenciais

Muitos países possuem normas de eficiência energética para edificações, como: Estados Unidos, Canadá, Austrália, Alemanha, Portugal, Espanha entre outros. Recentemente, no Brasil foram lançadas as medidas de eficiência energética para as edificações comerciais e residenciais, um passo importante para racionalizar o consumo de energia das edificações.

A primeira versão do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) foi publicada em 2010 no Brasil. O RTQ-R (BRASIL, 2012) avalia a eficiência energética de edificações residenciais, sendo dividida em três partes: unidades habitacionais autônomas, que compreendem edificações residenciais unifamiliares e unidades autônomas de edificações multifamiliares;

edificações multifamiliares e áreas de uso comum de condomínios residenciais.

Na unidade habitacional são avaliados o desempenho da envoltória dos ambientes de permanência prolongada e o sistema de aquecimento de água. Para as edificações multifamiliares é avaliado o desempenho da envoltória e áreas de uso comum, o desempenho do sistema de aquecimento de água, dos sistemas de iluminação e ventilação natural e artificial e dos equipamentos. Os níveis de eficiência variam de “A” (mais eficiente) até “E” (menos eficiente). A classificação geral da edificação é calculada por meio das eficiências individuais de cada requisito, ponderado conforme o zoneamento bioclimático brasileiro.

A classificação do nível de eficiência da envoltória compreende requisitos de área das aberturas para iluminação e ventilação, das condições de sombreamento, orientação das fachadas e propriedades térmicas das paredes e coberturas, localização do ambiente, entre outras (VERSAGE e LAMBERTS, 2011). O método de classificação é baseado no índice de graus-hora de resfriamento (GH_R), para o desempenho de verão e consumo relativo de aquecimento (C_A), para o desempenho de inverno. Também é avaliado o desempenho da envoltória da edificação quando condicionada artificialmente (C_R), sendo que esta avaliação é informativa, não faz parte da classificação da eficiência da edificação.

O desempenho da envoltória pode ser avaliado por dois métodos: o Método Prescritivo, no qual os indicadores do desempenho da envoltória, o GH_R e o C_A , são calculados por meio de equações de regressão linear de acordo com a zona bioclimática; e o Método de simulação, onde os indicadores são obtidos através da simulação térmica e energética.

A avaliação pelo método prescritivo é realizada através de equações que aferem o desempenho da envoltória da edificação. As equações estimam o indicador de graus-hora de resfriamento, o indicador de consumo relativo para aquecimento e o indicador de consumo relativo para refrigeração para os ambientes de permanência prolongada.

No método de simulação, o desempenho da envoltória da edificação é simulado para condição de condicionamento natural (ventilação natural). Os resultados fornecem a classificação da envoltória para a condição de verão.

No método de simulação a envoltória da edificação é avaliada por meio de dois procedimentos: simulação da edificação ventilada naturalmente e a simulação da edificação condicionada artificialmente. A simulação da edificação ventilada naturalmente avalia o desempenho da envoltória para verão. O resultado da simulação quantifica o desconforto do ambiente por meio do método dos graus-hora de resfriamento. A simulação da edificação condicionada artificialmente avalia o desempenho da envoltória para o inverno e quando refrigerada artificialmente.

De acordo com Scalco *et al.* (2012), o método proposto no RTQ-R incentiva o uso das estratégias bioclimáticas no projeto da edificação, buscando reduzir o consumo de energia requerida para condicionamento artificial. Diferente de outros países, no qual as avaliações são baseadas na redução do consumo de energia dos sistemas de condicionamento artificial.

O método do RTQ-R não garante uma avaliação adequada de que os ambientes proporcionem condições confortáveis termicamente. As edificações que possuem um envelope com baixo desempenho apresentam mais horas de desconforto nos ambientes. Seria importante que o método do RTQ-R avaliasse o desempenho da envoltória considerando o desempenho térmico e o consumo de energia para condicionamento artificial nas horas em que os ambientes não atendem às condições de conforto térmico.

No desenvolvimento do RTQ-R foi considerado um padrão típico de ocupação e comportamento dos usuários. De acordo com Korjenic e Bednar (2011), procedimentos que consideram o comportamento de usuários padrão muitas vezes não refletem o comportamento na prática, comprometendo, de certa forma, a avaliação do desempenho da edificação.

Para a classificação da envoltória da edificação, na ponderação dos níveis de eficiência da envoltória para verão e inverno, os pesos variam de acordo com a zona bioclimática, da zona 1 a 4. Para as zonas bioclimáticas 5 a 8, a eficiência da envoltória é determinada pela eficiência da envoltória para o verão.

2.5. Ferramentas de simulação computacional térmica e energética de edificações

Atualmente, existem diversos programas para simulação do desempenho térmico e energético de edificações. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013a) apresenta uma lista de programas computacionais para simulação e avaliação de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edificações. Atualmente, estão disponíveis 367 programas de simulação de edificações.

Segundo Mendes *et al.* (2005), os programas de simulação de desempenho térmico e energético podem auxiliar significativamente nos escritórios de engenharia e arquitetura, ajudando na concepção do projeto de edificações com estratégias passivas de condicionamento ambiental. As simulações podem disponibilizar uma série de informações preditivas sobre a operação da edificação, ainda na fase de projeto, antes mesmo que seja construída.

A simulação do desempenho de edificações é um recurso importante que possibilita simular a interação dinâmica dos fenômenos de calor, de luz, de massa e do som nas edificações; estimando o desempenho térmico e ambiental da edificação exposta ao clima, usuários, sistemas de condicionamento artificial e natural e as fontes de ruídos (CRAWLEY, 2003). Através da introdução dos recursos computacionais é possível simular os processos físicos da edificação com baixo custo e tempo reduzido (HENSEN, 2004).

Os programas de simulação do desempenho térmico e energético de edificações devem ser considerados como ferramentas importantes na fase de concepção da edificação, pois auxiliaram os projetistas na tomada de decisão. Atualmente, o uso de simulação do desempenho térmico e energético é aplicado somente na etapa de finalização dos projetos. Struck e Hensen (2004) discutem como melhorar a utilidade dos programas de simulação nas fases iniciais do projeto. Desta forma, a análise pode focar principalmente na melhoria da previsão nas interações dos usuários com os sistemas e dispositivos de operação da edificação.

A simulação dinâmica possibilita simular em detalhes o desempenho térmico e energético das edificações em relação às características arquitetônicas, propriedades termofísicas dos materiais construtivos, condições climáticas, padrões de uso dos sistemas de iluminação, condicionamento ambiental e comportamento dos usuários. Entretanto, é prática comum representar o comportamento dos usuários como um padrão estático. A maioria das ferramentas de simulação computacional adotam formas simplificadas para definir o padrão de ocupação, considerando somente condições ambientais e que os usuários não interagem na operação da edificação. O comportamento estático pode representar uma média histórica, mas não tem a capacidade de reproduzir fielmente as diferentes interações e preferências dos usuários para as condições climáticas do ambiente. Por exemplo, em uma edificação ventilada naturalmente o desempenho é altamente dependente da forma de que a edificação é operada. As condições de conforto dos ambientes estão relacionadas às ações e interações dos usuários com o sistema que permite a ventilação. As decisões dos usuários podem influenciar diretamente no desempenho térmico e energético das edificações.

No Brasil, os programas de simulação para análises de eficiência energética ainda são pouco difundidos entre os profissionais de engenharia e arquitetura, não fazendo parte das ferramentas de trabalho na rotina diária dos escritórios. Para Westphal e Lamberts (2005), as principais causas são a complexidade dos programas, a

dificuldade de utilização e a demora para se formar um simulador. Também é destacado que a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios requer uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações, o que exige do usuário conhecimentos técnicos em diferentes áreas.

Atualmente, o *EnergyPlus* é um dos programas de simulação de edificações bastante utilizado mundialmente. Esse programa calcula as trocas térmicas, os índices de iluminação e de consumo energético das edificações a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (DOE, 2013b).

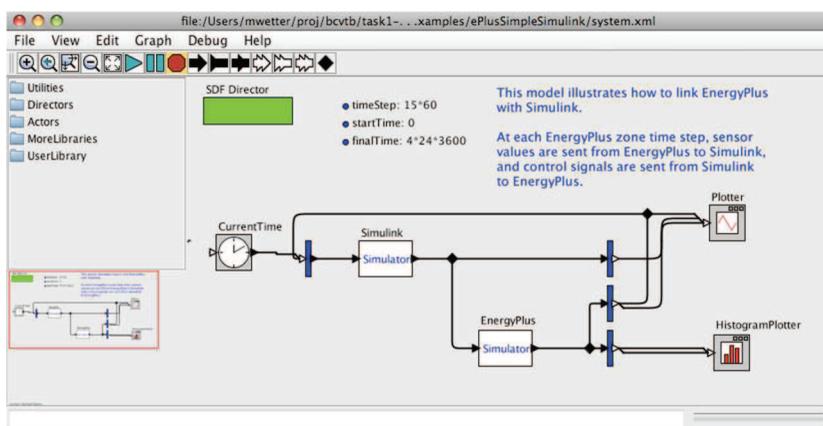
2.5.1. Recursos de controles avançados em simulação termoenergética

Os programas de simulação computacional de desempenho termoenergético de edificações não possibilitam os controles avançados, como a integração do sistema de condicionamento artificial com a estratégia passiva de ventilação natural. Uma forma de resolver este problema é a utilização da co-simulação (*co-simulation*) ou *Energy Management System (EMS)*, pois permitem a integração de diferentes estratégias durante o processo de simulação. A co-simulação é um recurso para integrar dois programas de simulação para resolver um sistema algébrico de equações, realizando a troca de informações entre os simuladores em cada passo de tempo (TRČKA *et al.*, 2010). O EMS permite realizar controles avançados durante o processo de simulação. Os controles são definidos por meio de algoritmos simplificados no arquivo de simulação (idf).

A co-simulação pode ser realizada através do *Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)*, recurso desenvolvido por Haves e Xu (2007) que permite criar um ambiente de conexão entre diferentes programas. O BCVTB é uma ferramenta que pode auxiliar na tomada de decisão, possibilita uma análise mais eficiente de sistemas complexos.

O programa BCVTB foi desenvolvido com base no programa orientado a atores chamado Ptolemy II. O BCVTB permite, por exemplo, realizar a simulação de uma edificação com sistema de condicionamento artificial e ventilação natural no *EnergyPlus* e simular a operação do sistema através do Modelica ou MATLAB/Simulink. O programa controla a troca de informações dos simuladores (WETTER, 2013). A Figura 11 apresenta a interface do BCVTB, mostrando a ligação entre o *EnergyPlus* e o Simulink.

Figura 11 – Interface do BCVTB.



Fonte: WETTER (2013).

O Ptolemy II é um programa livre de código aberto, desenvolvido em Berkeley pela Universidade da Califórnia. O Ptolemy II é orientado a atores e tem uma organização em blocos, sendo que cada bloco representa uma função, por exemplo, uma operação matemática. O programa realiza desde cálculos simples até funções matemáticas mais complexas, e também possibilita a montagem de gráficos durante a simulação (WETTER, 2008).

Wetter (2008) menciona que o BCVTB é uma ferramenta que permite avaliar o desempenho de sistemas complexos de operação, integrando diferentes programas de simulação com sistemas de automação de edificações. Este recurso permite avaliar o desempenho do algoritmo de controle entre *hardware* e *software* em um ambiente emulado,

verificando as condições de controle antes da implantação na edificação. No exemplo apresentado pelo autor, a simulação da edificação é realizada por meio do *EnergyPlus*. O controle da ventilação natural é realizado através do Matlab/Simulink por meio da interface do BCVTB. O controle da abertura das janelas é realizado por meio da diferença da temperatura interna do ambiente e a temperatura exterior. No Matlab/Simulink é realizada a leitura dos relatórios de temperaturas do *EnergyPlus* para definir a condição de controle da ventilação.

Wen *et al.* (2011) realizaram um estudo com o algoritmo de controle de iluminação através da integração com rede de sensores e atuadores. O algoritmo de controle foi implementado no Matlab, que conecta-se aos programas de simulação *EnergyPlus* e Radiance através do BCVTB. Os sensores de iluminância no plano de trabalho e o sensor de iluminância exterior fornecem as informações para o algoritmo de controle no Matlab. O objetivo do algoritmo de controle é proporcionar 500 lux no plano de trabalho das 6h às 18h, com a integração do controle elétrico da iluminação e das persianas motorizadas, almejando a maior eficiência. O algoritmo de controle proporcionou que em 70% do tempo a iluminação no plano de trabalho fosse de 500 lux, sendo que em 30% do tempo a iluminação variou de 400 a 600 lux. A variação ocorreu devido às mudanças rápidas das condições do exterior (condição do céu). Os resultados mostraram uma redução de 57% no consumo de iluminação e de 21% no pico de carga de refrigeração quando comparada com o caso de referência, que tem persiana fixa e sistema de iluminação com dimerização. O algoritmo de controle da persiana e do sistema de iluminação artificial demonstrou potencial para reduzir o consumo de energia.

Zhang e Lam (2011) avaliaram o impacto de duas estratégias de controle de sombreamento das aberturas (persianas internas) na carga térmica e na iluminação artificial de uma edificação de escritório, para quatro climas dos Estados Unidos (*Boston, Los Angeles, Miami, Phoenix*). Os algoritmos de controle desenvolvidos e avaliados foram o algoritmo ideal e o exequível. O objetivo dos algoritmos é maximizar o ganho de calor e minimizar a perda de calor para a edificação que está na condição

de aquecimento, e o oposto quando a edificação está na condição de arrefecimento. A geometria da edificação é retangular, com as dimensões de 48,7 m × 73,1 m. Cada pavimento da edificação foi modelado com cinco zonas térmicas, sendo quatro perimetrais (4,5 m de profundidade) e uma central (dimensões 39,7 m × 64,1 m). Os materiais da edificação atendem aos requisitos da ASHRAE 90.1, sendo que o fator solar do vidro é 0,39 e a transmitância visível é de 0,31 para a cidade de *Boston*. Para os outros climas foram 0,25 o fator solar e 0,11 a transmitância visível. Os algoritmos de controle foram implementados por meio do Ptolemy, controlado pelo BCVTB para cada passo de tempo da simulação. O dispositivo de sombreamento interno proporcionou uma redução de 6,68% nas cargas totais para Los Angeles quando comparada com o caso sem controle de sombreamento nas zonas perimetral. Os algoritmos de controle de sombreamento (ideal) apresentaram pequena redução em relação ao algoritmo exequível.

O trabalho de Zhang e Lam (2011) demonstrou que os algoritmos de controle do sombreamento apresentaram uma pequena redução na carga térmica da edificação. Isso ocorre devido às características dos vidros utilizados no estudo: a edificação foi simulada com vidros de fator solar baixo, parâmetro que reduz significativamente os ganhos de calor provenientes das áreas envidraçadas, reduzindo, desta forma, o impacto do dispositivo de sombreamento.

Hoes *et al.* (2012) investigaram o impacto de controle avançado do sistema de aquecimento do piso e sombreamento das aberturas no desempenho de uma edificação na fase de projeto. O estudo foi desenvolvido através de simulação térmica e energética no ESP-r e o controle avançado do sistema por meio do Matlab, sendo que a comunicação entre os programas é realizada pelo BCVTB. O sistema de aquecimento do piso apresenta um desempenho termicamente lento. Para esta característica é importante ter um controle que é capaz de antecipar os eventos futuros, garantindo um bom desempenho do sistema. Por meio do Matlab foi investigado o modelo preditivo de controle do sistema de aquecimento e sombreamento, desenvolvido através de algoritmo genético. O objetivo do controle era minimizar a

demanda de energia para aquecimento da edificação. Os resultados demonstram que é possível analisar os impactos mútuos de controles avançados dos sistemas na fase de projeto.

Pang *et al.* (2012) analisaram o desempenho real de uma edificação com o desempenho esperado em tempo real. O desempenho térmico e energético foi simulado através do programa *EnergyPlus*, sendo que o controle da operação da edificação foi realizado por meio do BCVTB com as informações adquiridas do sistema de Gestão e Controle de Energia da Edificação (base de dados do BACnet). O resultado da simulação do *EnergyPlus* fornece o desempenho esperado da edificação que é comparado com o desempenho real da edificação. O trabalho foi desenvolvido e testado em uma edificação real. Os resultados demonstraram que o conceito pode ser aplicado na operação da edificação.

O BCVTB é uma ferramenta que oferece novos recursos e flexibilidades para avaliar o desempenho de sistemas complexos nas edificações, por meio de simulação computacional. Todo programa de simulação tem limitações; uma forma de eliminar as limitações é a utilização de co-simulação, que permite integrar diferentes programas de simulação para avaliar o desempenho da edificação.

O *Energy Management System* (EMS) é um recurso que possibilita controles avançados durante o processo da simulação no *EnergyPlus*. O EMS realiza a leitura e a troca de informações durante o processamento da simulação a cada passo de tempo (ELLIS *et al.*, 2007). As condições de controle são definidas no arquivo de simulação (idf), por meio da sintaxe *EnergyPlus Runtime Language*. O EMS pode controlar diferentes sistemas no processo de simulação das edificações, como o sistema de condicionamento artificial, ventilação, aquecimento de água, iluminação artificial, geração de energia local, automação de dispositivos de sombreamento e atuadores de janelas (UIUC, 2013).

Os principais componentes do Energy Management System são apresentados na lista abaixo:

- *Energy Management System:Sensor*

- *Energy Management System:Actuator*
- *Energy Management System:Program*
- *Energy Management System:Program List*
- *Energy Management System:Subroutine*
- *Energy Management System:Global Variable*
- *Energy Management System:Report Variable*

O objeto *SENSOR* fornece informações para o algoritmo de controle. Normalmente as informações são derivadas dos relatórios de saída do *EnergyPlus*. Os relatórios de saída permite uma ampla variedade de dados de entrada. Também é possível importar dados externos por meio do sensor, neste caso pode-se testar um algoritmo proposto pelo EMS com dados experimentais (UIUC, 2013).

O objeto *ACTUATOR* altera as condições programadas no arquivo de entrada da simulação (*idf*). O *ACTUATOR* não está disponível para todos os objetos do *EnergyPlus*. Os recursos são suficientes para objetos do sistema de condicionamento artificial, iluminação, equipamentos, termostatos, dispositivos de controle de sombreamento e ventilação natural. No arquivo *EDD* são apresentadas as informações referente aos *ACTUATOR* disponíveis no programa. Caso não esteja disponível, a única forma de criar um *ACTUATOR* é modificando o código fonte do *EnergyPlus*. A cada nova versão do *EnergyPlus* são adicionados novos *Actuators* (UIUC, 2013).

No objeto *PROGRAM*, são determinadas as condições de controle. A linguagem de programação dos algoritmos é simplificada. Utilizando os comandos de sintaxes como: *set*, *if*, *elseif*, *else*, *endif*, *run* e *exit*. Todos os objetos programados são automaticamente executados pelo *EnergyPlus* durante o processo de simulação, a cada passo de tempo. Múltiplos algoritmos de controle podem ser programados, podendo interagir ou interferir um no outro. O objeto *PROGRAM LIST* determina a ordem que serão executados os algoritmos (ELLIS *et al.*, 2007).

O objeto *SUBROUTINE* é utilizado para encapsular parte do código que pode fazer parte de outros algoritmos. O objeto *GLOBAL VARIABLE* declara uma variável do EMS para todos os outros objetos do programa.

O *REPORT VARIABLE* possibilita criar um relatório personalizado para qualquer variável do EMS. A variável do relatório personalizado é apresentada nos resultados da simulação (ELLIS *et al.*, 2007).

Kwak *et al.* (2011) utilizaram o EMS para controlar a temperatura de condensação da água do sistema de condicionamento artificial central. O estudo utilizou um algoritmo que relaciona a temperatura de bulbo úmido com a temperatura de condensação da água do sistema. Os resultados mostraram que controlar a temperatura de condensação com base na variação mensal da temperatura de bulbo úmido, pode resultar em até 6,6% de economia de energia para resfriamento.

Wang e Hong (2012) modelaram problemas de manutenção do sistema de condicionamento artificial por meio do EMS. O objetivo era identificar e quantificar o impacto dos problemas no consumo de energia do sistema. Os problemas modelados por meio dos recursos do EMS foram os filtros sujos e o controle de renovação do ar externo. Outros problemas foram modelados no estudo, por meio da alteração do código fonte do *EnergyPlus*.

Os recursos do EMS permitem estabelecer condições de controle avançadas e personalizadas, transcendendo as opções de condições de controle tradicionais que são encontradas no *EnergyPlus*.

2.6. Algoritmos de comportamento dos usuários e padrões de uso

Nas avaliações do desempenho térmico e energético de edificações é comum adotar padrões de uso e de operação das edificações baseadas em suposições ou observações de usuários. O resultado da simulação é uma estimativa do desempenho da edificação, sendo que em muitas situações podem prever erroneamente o desempenho da edificação.

A causa do problema é que o comportamento do usuário e suas atividades têm uma grande variação. Consequentemente, os simuladores tendem a padronizar o comportamento dos usuários para otimizar o desempenho da edificação. A suposição de um

comportamento dos usuários mediano pode resultar em discrepâncias entre o desempenho da edificação real com o modelo da simulação (ZIMMERMAN, 2007).

Reinhart (2004) desenvolveu um algoritmo de predição da interação dos usuários com o sistema de iluminação artificial e com dispositivo de sombreamento (Lightswitch-2002). Os níveis de ocupação foram baseados e adaptados do modelo estocástico de Newsham's (NEWSHAM, 1995). O algoritmo prevê a variabilidade na presença dos usuários em relação aos diferentes perfis, que é repetido para todos os dias da semana. O algoritmo não considera o impacto do controle manual da iluminação artificial, nem as necessidades de aquecimento e resfriamento do ambiente.

Virote e Neves-Silva (2012) apresentaram um método para estimar o consumo de energia das edificações baseado no comportamento dos usuários. A proposta dos autores é utilizar um algoritmo baseado no modelo de cadeia de Markov, por meio de métodos estocásticos, estima-se o comportamento do usuário no ambiente. Os resultados mostraram que é importante considerar diferentes padrões de comportamento dos usuários, sendo uma forma confiável de prever o consumo de energia da edificação com diferentes cenários. Os autores mencionam que o comportamento estático realiza previsões limitadas; desta forma, o algoritmo dinâmico através da cadeia de Markov pode ser um recurso interessante para prever a eficiência energética da edificação através de simulação computacional.

Page *et al.* (2007) desenvolveram um algoritmo por meio de métodos estocásticos para simulação da presença e do comportamento dos usuários, estimando o uso de equipamentos, iluminação artificial e operação das janelas. O estudo não tinha como objetivo reproduzir o comportamento real dos usuários, mas entender a influência do comportamento do usuário das edificações no consumo de energia. Por meio do método da cadeia de Markov, desenvolveram o algoritmo considerando que a presença de cada ocupante é independente. A operação do usuário de abrir e fechar a janela está relacionada com os estímulos físicos de temperatura e concentração de poluentes no ar. Os

autores concluem que o algoritmo possibilita simular as múltiplas influências dos usuários no consumo de energia; e também mencionam as vantagens de usar o modelo estocástico de usuário em vez dos modelos de comportamento estático.

Wang *et al.* (2005) investigaram a ocupação em um edifício de pequenos escritórios, localizado em São Francisco – Califórnia. Para prever a ocupação e os intervalos de quando os escritórios estão desocupados, os autores desenvolveram um modelo não homogêneo baseado em Poisson, com duas distribuições exponenciais diferentes para estimar a ocupação dos escritórios. Os períodos em que os escritórios permanecem vazios são exponencialmente distribuídos, ao contrário do período em que os escritórios estão ocupados. Os resultados relatados estão baseados em apenas um edifício de escritório, portanto, é possível que o comportamento dos usuários seja diferente em outra edificação. Em outras palavras, o modelo proposto por Wang não reproduziu toda a complexidade da ocupação dos escritórios.

Yu (2010) pesquisou a ocupação de cinco pequenos escritórios baseados em dados de monitoramento através de sensor de presença. Para estimar a presença ou ausência dos usuários nos escritórios aplicaram a programação do algoritmo genético. Nos testes realizados para os cinco diferentes escritórios, os resultados mostraram que o método do algoritmo genético prevê os períodos em que os escritórios estão ocupados e vazios com precisão de 80% e 83%, respectivamente. A variável que teve maior influência no perfil de ocupação foi o dia da semana.

Widén *et al.* (2009) desenvolveram um modelo estocástico para estimar a demanda de energia para iluminação residencial com base na ocupação e nos dados de radiação solar da Suécia. O modelo foi baseado em dados estatísticos das residências suecas. Os padrões de ocupação foram gerados através do método de cadeia de Markov não homogêneo com três etapas. A disponibilidade de luz natural foi estimada por meio de dados de irradiação solar, que por meio de uma equação simples prevê a demanda de iluminação artificial por edificação. O modelo de

cadeia de Markov foi testado e validado, apresentou um bom desempenho, permitindo uma estimativa realista dos padrões de ocupação das residências.

Em uma continuação do trabalho de Reinhart (2004) e Nicol (2001), Bourgeois *et al.* (2006) desenvolveram um modelo de controle baseado na ocupação sub horária (*sub-hourly occupancy-based control model – SHOCC*), que integra modelos de comportamento avançado de usuários em programas de simulação térmica e energética de edificações. O modelo SHOCC foi implementado no programa de simulação ESP-r (ESRU, 2013). Por meio do SHOCC é possível quantificar o impacto do controle manual da iluminação natural e dos dispositivos de sombreamento. Os resultados mostraram que os usuários ativos, que aproveitam a iluminação natural, podem reduzir em até 40% a demanda de energia da zona perimetral quando comparados com os usuários que utilizam a iluminação artificial constante. Os autores mencionam que são necessários mais estudos de campo para entender o comportamento dos usuários em diferentes situações, pois não é recomendado generalizar o comportamento dos usuários para todos os tipos de edificações.

Tabak (2008) desenvolveu o algoritmo USSU (*user simulation of space utilisation*) que estima o comportamento dos usuários no ambiente de escritório. O algoritmo tem dados detalhados sobre as atividades dos usuários para avaliação do desempenho da edificação. O algoritmo prevê a interação entre usuários e a incorporação de atividades como reuniões, fornecendo um padrão de horários e atividades que são realizadas no escritório. A validação do USSU foi realizada através da comparação das atividades diárias e o monitoramento dos ambientes em uma edificação real. Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas entre o previsto e observado no comportamento das atividades. A validação do USSU mostrou que o algoritmo estima com precisão a ocupação dos ambientes de uma empresa.

Nos últimos anos foram desenvolvidos diversos modelos e algoritmos para controlar a abertura das janelas, alguns com base nas temperaturas

interior e exterior (WARREN e PARKINS, 1984; FRITSCH *et al.*, 1990; NICOL, 2001; RAJA *et al.*, 2001; NICOL e HUMPHREYS, 2004; HERKEL *et al.*, 2005; PFAFFEROTT e HERKEL, 2007; HERKEL *et al.*, 2008; YUN *et al.*, 2009). Fritsch *et al.* (1990) desenvolveram um modelo baseado em cadeia de Markov, que estima abertura da janela baseada em probabilidades de operação. Pfafferott e Herkel (2007), por meio do método estocástico Monte Carlo, simularam várias situações para prever o comportamento do usuário. Herkel *et al.* (2008) desenvolveram um modelo de abertura de janela com base na temperatura exterior e nos níveis de ocupação. Nos estudos apresentados, observaram-se diferentes soluções para estimar a interação dos usuários em relação à abertura das janelas, não sendo recomendado generalizar o comportamento do usuário em relação a este quesito.

Os algoritmos são recursos que podem ser utilizados nas simulações do desempenho térmico e energético de edificações para avaliar o impacto de diferentes comportamentos de usuários, mas não devem ser utilizados para provar uma situação real.

2.7. Análise de sensibilidade

Nas pesquisas recentes de desempenho térmico e energético de edificações, observa-se que o método de análise de sensibilidade vem sendo aplicado para quantificar o impacto das variáveis que afetam o desempenho nas edificações. Esta ferramenta é importante para auxiliar na tomada de decisão, ajudando a definir quais os parâmetros que devem ser investigados nas pesquisas.

Existem dois métodos para desenvolver uma análise de sensibilidade: análise de sensibilidade local e análise de sensibilidade global.

Na análise de sensibilidade local há uma variação de um parâmetro em cada caso, sendo que neste método todos os outros parâmetros permanecem fixos. Normalmente, na análise de sensibilidade local define-se um caso base para a comparação. O método é simples em comparação com o método de análise de sensibilidade global, o que

facilita a aplicação e a interpretação dos resultados. No entanto, este método apresenta algumas limitações: explora apenas uma variação de parâmetros em uma amostra limitada e as inter-relações entre os parâmetros não são consideradas (SALTELLI *et al.*, 1993).

A análise de sensibilidade global é realizada por meio de técnicas de regressão, que são simples de usar e fáceis de entender. A análise pode ser realizada através de vários indicadores, tais como: o coeficiente de regressão padronizado - SRC (*Standardised Regression Coefficients*); o coeficiente de correlação parcial – PCC (*Partial Correlation Coefficients*); a ordem do coeficiente de regressão padronizado – SRRC (*Standardized Rank Regression Coefficient*); e a ordem do coeficiente de correlação parcial – PRCC (*Partial Rank Correlation Coefficient*). Os coeficientes de correlação SRC e PCC são aplicados para modelos lineares, e a ordem dos coeficientes de correlação (SRRC e PRCC) pode ser usada para funções não lineares.

Hygh *et al.* (2012) investigaram o consumo de energia de edifícios de escritório em quatro cidades dos Estados Unidos, por meio de simulação computacional com o programa *EnergyPlus* e análise de sensibilidade através do coeficiente de regressão padronizado. Os resultados mostraram que os parâmetros de projeto influenciam no consumo de energia da edificação de acordo com as diferentes zonas climáticas. Os parâmetros que influenciaram foram a área da edificação, percentual de abertura na fachada e a transmitância térmica das aberturas.

Breesch e Janssens (2010) analisaram a sensibilidade dos parâmetros que influenciam no conforto térmico em edificações de escritórios com ventilação noturna da Bélgica. Os autores encontraram que, para os escritórios orientados para Sul, as cargas internas (impacto positivo) e a infiltração (impacto negativo) foram os principais parâmetros que impactaram no conforto térmico dos ambientes. O peso dos parâmetros foi analisado através do coeficiente de regressão padronizado.

Hyun *et al.* (2008) investigaram o desempenho da ventilação natural em 15 apartamentos na Coreia do Sul. Os parâmetros que apresentaram maior impacto na ventilação natural são, em ordem decrescente, a

velocidade do vento, a área de abertura por pessoa e o coeficiente de rugosidade do terreno. A pesquisa foi desenvolvida utilizando o método de Morris.

O método de Morris também foi utilizado no estudo desenvolvido por Corrado e Mechri (2009), que identificaram os principais fatores que impactam no consumo de energia de uma residência na Itália. Dentre os 129 parâmetros investigados, os resultados da análise de sensibilidade mostraram que cinco têm influência significativa no consumo de energia: a temperatura do ambiente, a taxa de renovação de ar, o número de ocupantes, a taxa metabólica e os ganhos de calor através dos equipamentos internos.

Yildiz e Arsan (2011) identificaram os parâmetros de uma edificação multifamiliar que influenciaram no desempenho energético, nas cargas térmicas de aquecimento e resfriamento estimadas por simulação termoenergética. O estudo foi realizado para um clima quente-úmido na Turquia, da cidade de Izmir.. A análise de sensibilidade foi desenvolvida no programa SIMLAB por meio do Coeficiente de Regressão Ordenado Padronizado (SRRC), e a amostragem pelo método do Hipercubo Latino. Os resultados mostraram que a geometria da edificação é importante no consumo de energia para aquecimento e resfriamento; a razão entre comprimento e largura tem papel importante no consumo de energia. Dentre os parâmetros analisados, a orientação solar foi o que apresentou maior impacto no consumo de energia para aquecimento e resfriamento. Para as unidades habitacionais com a mesma orientação, a área da janela, a transmitância térmica da janela, e o fator solar do vidro apresentaram as maiores influências no desempenho energético dos apartamentos.

Outro estudo de Yildiz *et al.* (2012) apresentam orientações para auxiliar arquitetos projetar edificações de baixo consumo de energia para condicionamento artificial. O estudo foi desenvolvido pelo método da análise de sensibilidade global, com o indicador da ordem do coeficiente de regressão padronizado (SRRC). Os resultados mostraram que para edificações de baixo consumo de energia para resfriamento os

parâmetros mais influentes foram a ventilação natural, a área da janela e o fator solar do vidro. Para um clima quente é importante analisar o impacto de sombrear as áreas envidraçadas. Os parâmetros mais influentes podem alterar quando considerar as áreas envidraçadas sombreadas.

Silva *et al.* (2014) investigaram a incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 na classificação do desempenho térmico de uma habitação para o clima de Florianópolis-SC. Foram analisadas as variáveis indispensáveis para a definição de um dia típico, variáveis desconsideradas pelo método de simulação da norma. A pesquisa foi desenvolvida por meio de um projeto de experimento estatístico com combinação fatorial para analisar a incerteza nos resultados e a sensibilidade das variáveis no desempenho térmico. Os resultados mostraram que as variáveis desconsideradas pelo método de simulação da NBR15575-1 exercem considerável influência nos resultados do desempenho térmico, interferindo nos resultados.

Outro estudo realizado por Silva e Ghisi (2013) analisou a sensibilidade global dos parâmetros termofísicos do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). No estudo foram considerados 15 parâmetros do RTQ-R. Foram simulados 500 casos aleatórios, gerados por meio do método de amostragem Hipercubo Latino. Os autores relatam que os parâmetros mais influentes são diferentes para o desempenho de verão e inverno, o que dificulta a proposta de soluções para o melhor desempenho. Os parâmetros que apresentaram as maiores influências foram a absorvância solar e a emissividade da cobertura. Atualmente, a baixa emissividade da cobertura na superfície externa pode ser considerada como um parâmetro teórico. Os próprios autores comentam que a manutenção da emissividade é complexa. Assim, o parâmetro da emissividade da cobertura na superfície externa deve ser desconsiderado.

Os parâmetros considerados nos métodos prescritivo e por simulação termoenergética do RTQ-R foram investigados por meio da análise de sensibilidade global (VAN DER KNAAP, 2011). O estudo adotou o método

Spearman Coefficients com base em uma amostragem pelo Hipercubo Latino. Os resultados indicaram que o método simplificado tem alta sensibilidade para a capacidade térmica da envoltória. Entretanto, no método de simulação a capacidade térmica da envoltória não apresentou alta sensibilidade.

Tian (2013) recomenda dois programas para realizar análise de sensibilidade, o SimLab e o R, ambos distribuídos gratuitamente. O SimLab (SIMLAB, 2011) é um programa desenvolvido pela *Joint Research Center of the European Commission*, baseado no algoritmo de Andrea Saltelli e Tomishitsu Homma. O programa foi desenvolvido para análise de sensibilidade e incerteza, e permite analisar um conjunto de parâmetros de entrada selecionados por meio de métodos estocásticos.

O R é um programa de código aberto utilizado para analisar dados e visualizar gráficos. O R permite que o usuário escreva algoritmos e desenvolva pacotes de funções. Também há uma ampla biblioteca de modelos estatísticos. A linguagem de programação é em S, código inventado em 1980 no Bell Labs. Um aspecto importante da linguagem é a facilidade de programar, que inclui condicionais, loops e funções recursivas, ao contrário das linguagens como Fortran e C (ZUUR *et al.*, 2009).

2.8. Considerações finais sobre a revisão de literatura

No Brasil, há evidências que vêm aumentando a porcentagem de edificações residenciais que possuem sistema de condicionamento artificial. Desta forma, é importante ter normas de desempenho térmico e regulamentos de eficiência energética em edificações que avaliem o desempenho com condições de uso próximas do real.

As normas vigentes de desempenho térmico e o regulamento de eficiência energética para edificações residenciais não consideram a influência do comportamento do usuário nas avaliações do desempenho. No entanto, a literatura mostrou que o comportamento do usuário é um parâmetro importante no desempenho térmico e

energético das edificações residenciais. Uma forma de avaliar a influência do comportamento do usuário é através de simulação termoenergética, que possibilita avaliar uma gama de parâmetros. A simulação tem a vantagem do baixo custo em relação a experimentos *in loco*.

Alguns estudos mostraram que o comportamento do usuário está fortemente relacionado com a percepção de conforto térmico, definindo como uma condição predominante que motiva o usuário a interagir com dispositivos de controle da edificação. Muitas das interações dos usuários podem estar relacionadas com outros fatores, tais como psicológicos, social, físicos e fisiológicos.

A simulação é uma ferramenta que pode ser utilizada para avaliar a influência do comportamento do usuário no desempenho da edificação; na literatura foram identificadas pesquisas que estão utilizando a simulação para avaliar as influências dos usuários. Alguns estudos desenvolveram algoritmos de predição do comportamento dos usuários para uso em programas de simulação.

Os métodos de análise de sensibilidade foram utilizados em muitos estudos para avaliar o impacto do comportamento do usuário, no desempenho térmico e energético. A análise de sensibilidade permite identificar as variáveis que afetam o desempenho térmico e energético da edificação.

3. MÉTODO

O presente capítulo apresenta o método proposto para o desenvolvimento da pesquisa. Para atender o objetivo da pesquisa de avaliar a influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais, o método foi estruturado em três etapas: desenvolvimento de cenários dos comportamentos dos usuários, simulações térmicas e energéticas de edificações unifamiliares e multifamiliares, e a análise da influência do comportamento dos usuários no desempenho térmico e energético de edificações residenciais.

3.1. Análise da influência do usuário no desempenho termoenergético

A análise da influência do usuário no desempenho termoenergético de edificações residenciais foi realizado através de simulações computacionais. Para analisar o impacto do usuário em diferentes situações, foram propostos quatro modelos hipotéticos de edificações residenciais: dois modelos de edificações residenciais unifamiliares e dois modelos de edificações residenciais multifamiliares.

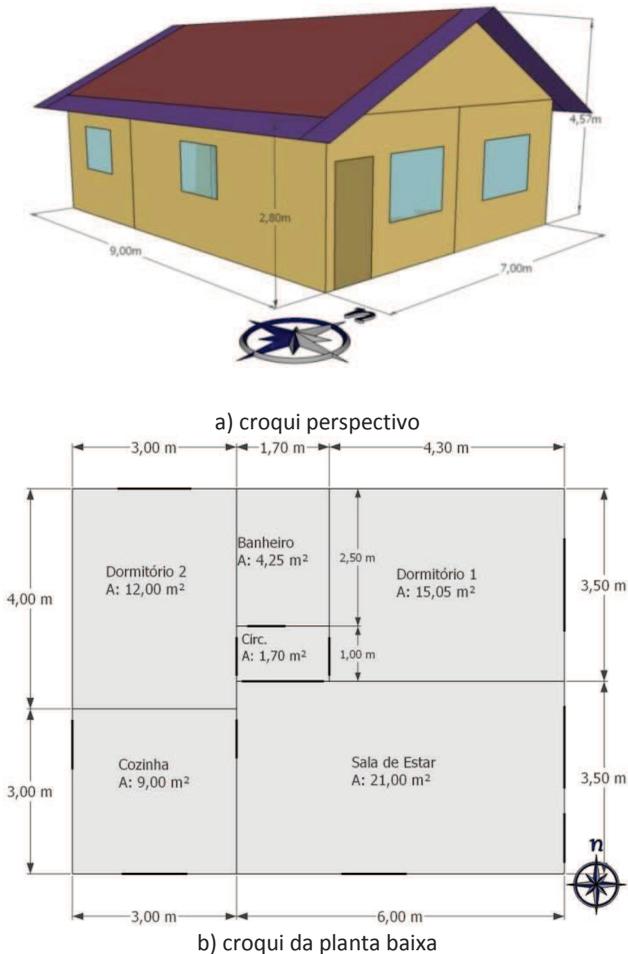
Os quatro modelos de edificações residenciais propostos para o desenvolvimento da pesquisa buscam atender os principais tipos de domicílios no país. Atualmente, no Brasil, 86% das edificações residenciais são unifamiliares e 13% multifamiliares (IBGE, 2011).

O modelo da edificação 1 representa uma unidade habitacional unifamiliar com dois dormitórios, e o modelo da edificação 2 representa uma unidade habitacional unifamiliar com três dormitórios. Os modelos de edificações 3 e 4 representam unidades habitacionais de edificações multifamiliares de dois e três dormitórios, respectivamente.

3.1.1. Modelo da edificação 1

O modelo da edificação 1 representa uma residência unifamiliar com área de 63 m² (com as dimensões 7,0 m × 9,0 m × 2,8 m), possuindo dois dormitórios, sala, cozinha e banheiro. Na Figura 12 são apresentados os croquis perspectivo (Figura 12a) e o da planta baixa do modelo (Figura 12b).

Figura 12 - Croqui perspectivo e croqui da planta baixa do modelo unifamiliar 1



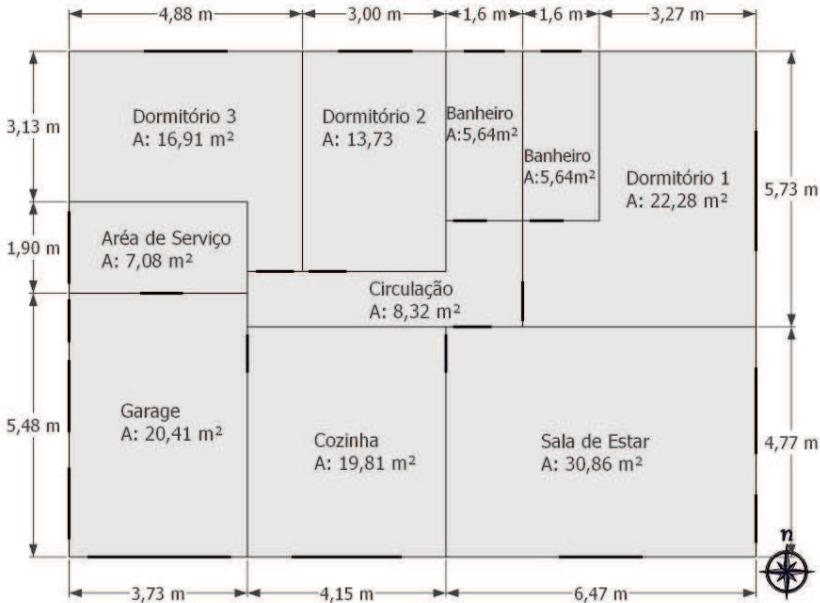
3.1.2. Modelo da edificação 2

O modelo 2 representa uma residência unifamiliar com área de 150,0 m² (com dimensões de 10,5 m × 14,35 m × 2,8 m), dividido em três dormitórios, dois banheiros, sala, cozinha, área de serviço e garage. O croqui perspectivo pode ser observado na Figura 13 e o croqui da planta baixa, na Figura 14.

Figura 13 - Croqui perspectivo do modelo unifamiliar 2



Figura 14 - Croqui da planta baixa do modelo unifamiliar 2



3.1.3. Modelo da edificação 3

O modelo 3 representa uma unidade habitacional de uma edificação multifamiliar. A unidade habitacional é constituída por uma sala de estar, dois dormitórios, cozinha e área de serviço, com área construída de 72,6 m². Na Figura 15 é apresentado o croqui perspectivo e na Figura 16 é apresentado o croqui da planta baixa. A unidade habitacional foi modelada como um apartamento do pavimento intermediário. As paredes divisórias entre as unidades habitacionais e as lajes entre pavimentos foram consideradas como componentes adiabáticos. As paredes adiabáticas foram traçadas com linhas na cor vermelha (Figura 16).

Figura 15 - Croqui perspectivo da unidade habitacional do modelo multifamiliar 3

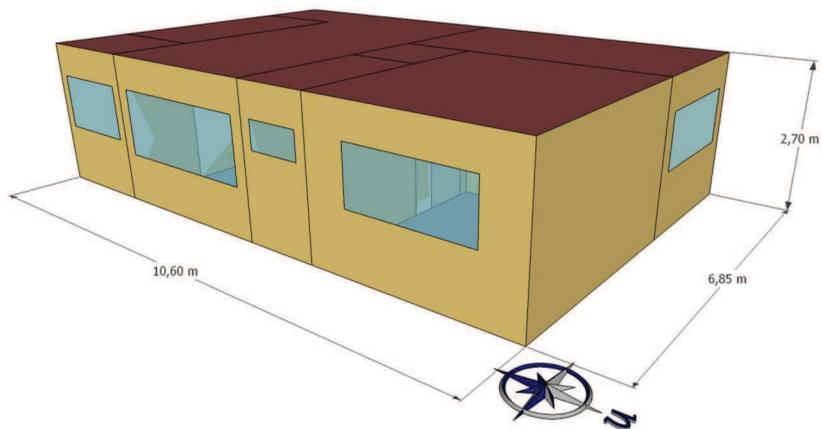
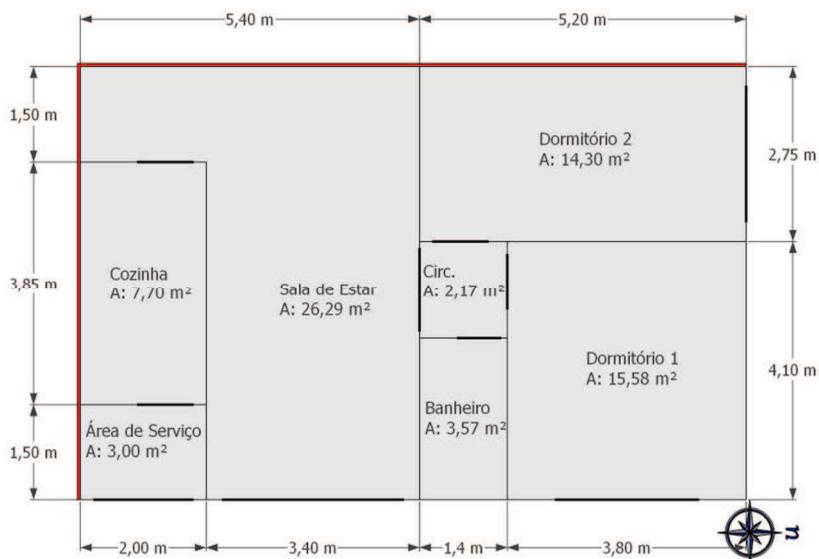


Figura 16 - Croqui da planta baixa da unidade habitacional do modelo multifamiliar 3



3.1.4. Modelo da edificação 4

O modelo 4 representa uma unidade habitacional de uma edificação multifamiliar. A unidade habitacional é composta por uma sala de estar, suíte máster, suíte, dormitório, banheiro, cozinha e área de serviço, com área construída de aproximadamente 173,5 m². A Figura 17 apresenta o croqui perspectivo e a Figura 18, o croqui da planta baixa da unidade habitacional. Na mesma condição do modelo multifamiliar 3, a unidade foi modelada como um apartamento do pavimento intermediário. As paredes divisórias entre as unidades habitacionais e as lajes entre pavimentos foram consideradas como componentes adiabáticos. As paredes adiabáticas foram traçadas com linhas na cor vermelha (Figura 18).

Figura 17 - Croqui perspectivo da unidade habitacional do modelo multifamiliar 4

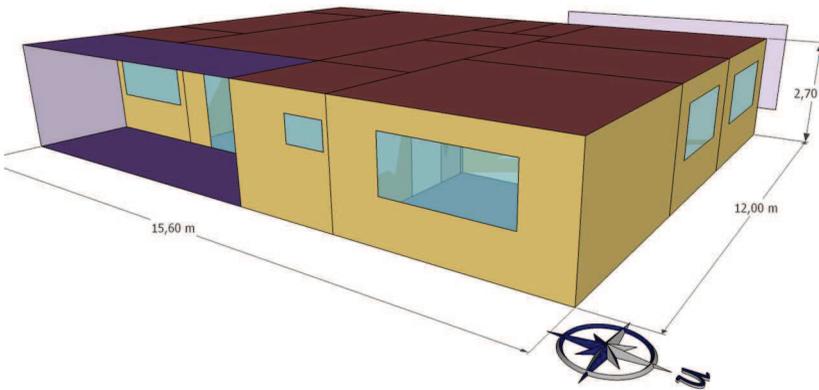
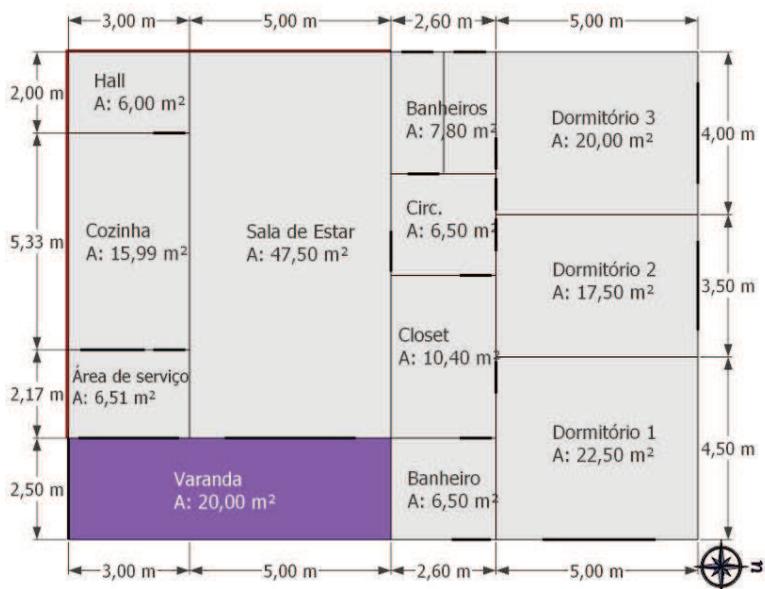


Figura 18 - Croqui da planta baixa da unidade habitacional do modelo multifamiliar 4



3.1.5. Área de janela e ventilação dos modelos

Todos os ambientes de permanência prolongada dos quatro modelos possuem a área de janela de 15% da área do piso do ambiente. Nos ambientes de curta permanência, o percentual da área de janela foi de 10% da área do piso do ambiente. A área de iluminação natural (área de vidro) foi considerada como 100% da área da janela e a área destinada à ventilação foi considerada 50% da área da janela, para todos os ambientes.

Segundo Matos (2007) e Sorgato *et al.* (2011) o percentual de 15% da área de janela em relação ao piso do ambiente, foi o que apresentou o melhor desempenho para o clima da cidade de Florianópolis, considerando a área de ventilação de 100%. Quando a área de ventilação foi reduzida em 50%, o desempenho é inferior em aproximadamente

30%. A área de ventilação de 50% da área da abertura foi definida com base nas esquadrias mais utilizadas nas edificações, que adotam o sistema de correr.

3.2. Cenários dos usuários

O comportamento dos usuários pode ser definido como uma ação humana consciente ou inconsciente para controlar os parâmetros físicos do ambiente que estão ocupando. Os parâmetros físicos podem estar relacionados aos sentidos básicos de percepção do ser humano: tato (térmico), visão (visual), audição (sonoro) e olfato. Esta pesquisa concentra-se no comportamento dos usuários relacionado com a sensação térmica em edificações residenciais. A pesquisa foi desenvolvida com base em três cenários de usuários, representando o usuário com estilo de vida contemporâneo, o usuário com estilo de vida tradicional e o usuário com estilo de vida flexível. O termo estilo de vida estabelece diferentes rotinas de ocupação nas edificações. Os cenários buscaram reproduzir a diversidade do comportamento dos usuários, combinados com diferentes parâmetros termofísicos da envoltória da edificação, para avaliar o impacto do comportamento no desempenho.

Os cenários propostos exploram situações ou suposições que podem acontecer na operação de uma edificação residencial. Este tipo de cenário é útil quando se pretende avaliar as consequências de diferentes situações e operações nas edificações residenciais.

3.2.1. Cenário do usuário com estilo de vida contemporâneo

O cenário do usuário com estilo de vida contemporâneo apresenta características nas quais os usuários da unidade habitacional trabalham ou permanecem fora da residência durante o período diurno (das 8h às 18h), retornando para a residência somente no período noturno.

No usuário contemporâneo, o padrão de ocupação da edificação é durante o período das 19h às 7h. Neste período foi considerado somente

o período que os usuários permanecem nos ambientes de permanência prolongada (dormitórios e sala de estar). A ocupação dos ambientes de permanência prolongada foi definida com base no tamanho da família, que é abordado no item 3.4.

Os padrões de uso da iluminação artificial nos ambientes de permanência prolongada foram vinculados com os padrões de ocupação dos ambientes. No cenário do usuário com estilo de vida contemporâneo foi considerada a utilização da iluminação artificial nos ambientes no período noturno (19h às 23h) e no período matutino (6h às 7h). Os padrões de ocupação, de iluminação e de equipamentos do usuário com estilo de vida contemporânea são apresentados no Apêndice A.

3.2.2. Cenário do usuário com estilo de vida tradicional

O cenário do usuário com estilo de vida tradicional representa uma família na qual parte dos moradores permanecem na unidade habitacional durante o período diurno (8h às 18h). Entretanto, no período noturno (19h às 7h) todos os integrantes da família permanecem na unidade habitacional.

No cenário do usuário com estilo de vida tradicional a unidade habitacional é ocupada durante todo o dia (24h). Durante o período diurno, há ocupação nos ambientes da sala de estar e cozinha. A ocupação nos dormitórios é restrita ao período noturno. O número de usuários e a ocupação dos ambientes de permanência prolongada foram definidos com base no tamanho da família.

O padrão de uso da iluminação artificial e de equipamentos dos ambientes de permanência prolongada foi vinculado ao padrão de ocupação dos ambientes. No cenário do comportamento do usuário tradicional, foi considerado que usuários utilizam a iluminação artificial e os equipamentos nos ambientes no período noturno (das 19h às 23h).

No Apêndice B são apresentados os padrões de ocupação, iluminação artificial e de equipamentos do usuário com estilo de vida tradicional.

3.2.3. Cenário do usuário com estilo de vida flexível

O cenário do usuário com estilo de vida flexível representa uma família na qual os moradores permanecem na unidade habitacional em horários alternados. No cenário do usuário com estilo de vida flexível parte dos moradores permanecem na unidade habitacional até as 10h no período matutino. No período vespertino parte dos moradores retorna para a unidade habitacional às 15h. Considerou-se que a ocupação da unidade habitacional é de 50% até as 22h. O número de usuários e a ocupação dos ambientes de permanência prolongada foram definidos com base no tamanho da família, definido no item 3.4.

O padrão de uso da iluminação e equipamentos nos ambientes de permanência prolongada está vinculado com o padrão de ocupação dos ambientes. Neste cenário foi considerado que os usuários utilizam a iluminação artificial e os equipamentos no período noturno (das 19h às 23h). Os padrões de ocupação, de iluminação e equipamentos do usuário com estilo de vida flexível são apresentados no Apêndice C.

3.3. Comportamento do usuário

As edificações foram simuladas com três padrões de comportamento de operação dos usuários: comportamento ativo, comportamento intermediário e comportamento passivo.

3.3.1. Comportamento do usuário ativo

O comportamento do usuário ativo tem como meta o melhor desempenho térmico e energético para edificações residenciais, buscando explorar o uso das estratégias de ventilação natural e de aquecimento solar passivo, para minimizar o consumo de energia para condicionamento artificial. Este comportamento representa uma edificação com automação residencial, no qual controla a ventilação e os dispositivos de sombreamento das aberturas.

O comportamento ativo controla a operação da ventilação durante 24h e a operação dos dispositivos de sombreamento. A interação do usuário no controle da ventilação natural é realizada pelo critério da diferença de temperatura do ambiente para o exterior. O controle da ventilação natural foi realizado por meio da estratégia de ventilação seletiva, que permite abrir as janelas conforme os critérios de temperatura. As condições de controle da ventilação natural foram:

1. Verificar se a temperatura operativa do ambiente é igual ou superior à temperatura de ventilação ($T_{Amb} \geq T_{Vent}$). A temperatura de ventilação adotada no comportamento ativo é de 23°C;
2. Verificar se a temperatura operativa do ambiente é superior à temperatura externa ($T_{Amb} \geq T_{Ext}$);
3. Verificar se a temperatura operativa do ambiente é maior que a temperatura do limite superior da condição de conforto térmico ($T_{Amb} < T_{Con}$).

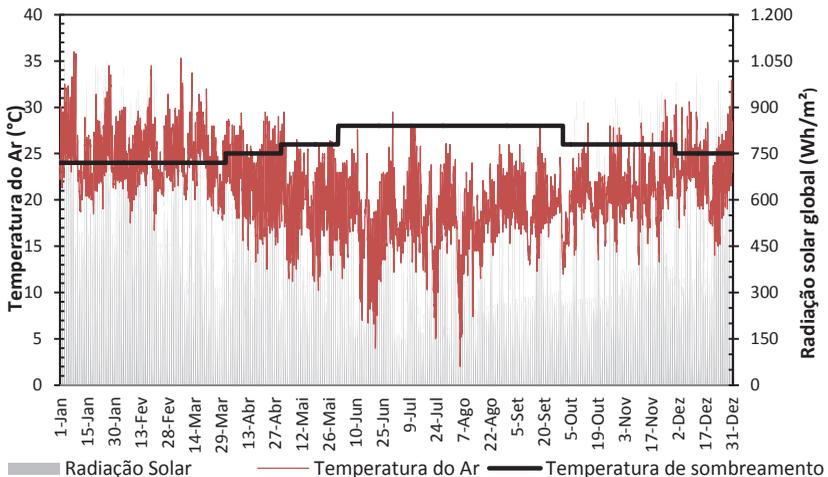
Na Figura 19 são apresentados os critérios e a sequência das condições de controle da ventilação natural do usuário com comportamento ativo. As condições de controle foram aplicadas para os ambientes de permanência prolongada das unidades habitacionais.

Figura 19 – Critérios para habilitar a ventilação natural do usuário com comportamento ativo



No usuário com comportamento ativo, os dispositivos de sombreamento foram controlados pela temperatura externa. Para o controle dos dispositivos de sombreamento (venezianas), adotou-se uma temperatura de controle para cada mês do ano, buscando sombrear os períodos quentes e garantir os ganhos de calor nos períodos frios. Na Figura 20 são apresentadas as temperaturas de acionamento dos dispositivos de sombreamento para o comportamento do usuário ativo.

Figura 20 - Temperaturas de acionamento dos dispositivos de sombreamento no usuário ativo



3.3.2. Comportamento do usuário intermediário

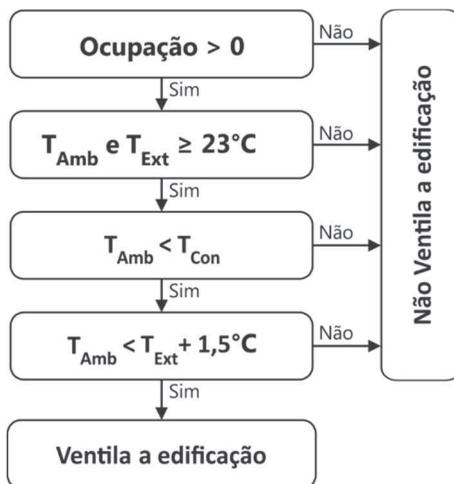
No comportamento do usuário intermediário, o usuário ventila a edificação buscando a sensação térmica do movimento do ar. O usuário intermediário controlará os dispositivos de sombreamento durante o período de ocupação. No período em que não há ocupação na edificação as venezianas (dispositivos de sombreamento) permanecem abertas.

No comportamento intermediário, o controle da ventilação natural é realizado por meio dos seguintes critérios:

1. Verificar se há ocupação na edificação. A edificação é ventilada somente durante o período de ocupação;
2. Verificar se a temperatura operativa do ambiente e a temperatura externa são superiores a 23°C;
3. Verifica se a temperatura operativa do ambiente é inferior à temperatura do limite superior da condição de conforto térmico ($T_{Amb} < T_{Con}$);
4. Verificar se a temperatura operativa do ambiente é inferior à temperatura externa + 1,5°C ($T_{Amb} < T_{Ext} + 1,5^{\circ}C$).

O fluxograma dos critérios para habilitar a ventilação natural do usuário com comportamento intermediário é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Critérios para habilitar a ventilação natural do usuário com comportamento intermediário



Para o usuário com comportamento intermediário os dispositivos de sombreamento foram controlados pela temperatura externa. As temperaturas de controle adotadas foram as mesmas consideradas para o usuário com comportamento ativo. No comportamento intermediário,

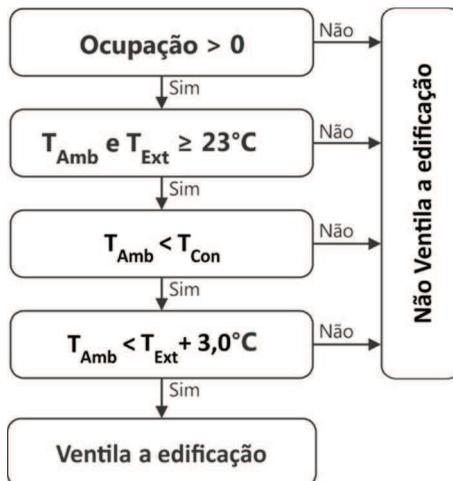
as venezianas foram fechadas somente nos períodos em que edificação é ocupada.

3.3.3. Comportamento do usuário passivo

O comportamento do usuário passivo representa pessoas que não estão preocupadas com as condições térmicas do ambiente. O usuário passivo ventila a edificação em condições inadequadas e não utiliza adequadamente os dispositivos de sombreamento (venezianas).

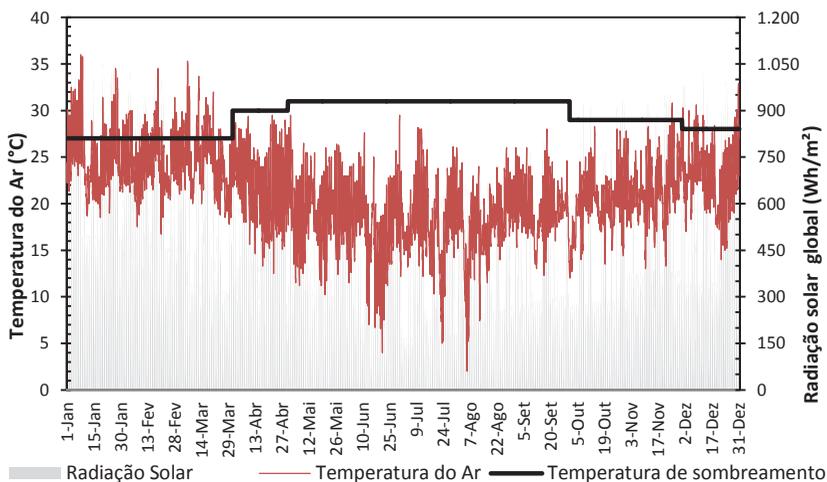
Os critérios de ventilação do usuário com comportamento passivo são semelhantes aos critérios do usuário com comportamento intermediário. A diferença nos critérios é que o usuário com comportamento passivo ventila a edificação até quando a temperatura externa é 3,0°C superior à temperatura interna. Quando a temperatura operativa do ambiente exceder o limite superior da condição de conforto térmico, a edificação não é ventilada. A Figura 22 apresenta o fluxograma dos critérios que habilitam a ventilação natural do comportamento do usuário passivo.

Figura 22 – Critérios para habilitar a ventilação natural do comportamento do usuário passivo



No usuário com comportamento passivo o controle dos dispositivos de sombreamento foi realizado por meio da temperatura externa. Os critérios foram semelhantes ao dos usuários com comportamentos ativo e intermediário. Os dispositivos de sombreamento foram acionados no período de ocupação nas unidades habitacionais. As temperaturas de acionamento dos dispositivos de sombreamento são apresentadas na Figura 23, para o comportamento do usuário passivo. A diferença na temperatura de acionamento do comportamento intermediário e passivo é de 3,0°C (superior).

Figura 23 – Temperaturas de acionamento dos dispositivos de sombreamento no usuário passivo



3.4. Tamanho da família

O tamanho da família brasileira pode apresentar grandes variações. As variações estão relacionadas com a região do país e a renda familiar (IBGE, 2010). Para analisar o impacto do tamanho da família no desempenho termoenergético das edificações residenciais, foram propostos diferentes cenários do tamanho da família para o desenvolvimento da pesquisa. O tamanho da família está relacionado

com o número de dormitórios da unidade habitacional. Para as unidades habitacionais com três dormitórios foi considerado o limite mínimo de um morador e o limite máximo de três moradores por dormitório. Para as unidades habitacionais com três dormitórios o cenário da maior família possui nove moradores. Para as unidades habitacionais com dois dormitórios o menor cenário do tamanho da família é de um morador e o maior cenário do tamanho da família é de 5 moradores. No cenário da maior família foram considerados dois moradores no dormitório principal e três moradores no dormitório secundário.

Na Tabela 3 são apresentados os cenários com os diferentes tamanhos da família e a distribuição dos usuários nos ambientes de permanência prolongada, para os modelos com dois dormitórios (Modelo unifamiliar 1 e Modelo multifamiliar 3). Para os modelos com dois dormitórios foram considerados seis cenários de tamanho da família. A família 2.1 representa uma família com dois moradores, no qual cada usuário ocupa um dormitório.

Tabela 3 – Tamanho da família e a distribuição dos usuários nos ambientes de permanência prolongada dos modelos unifamiliar e multifamiliar com dois dormitórios.

Tamanho da família	Usuários na Sala de Estar	Usuários no Dormitório 1	Usuários no Dormitório 2
1	1	1	0
2	2	2	0
2.1	2	1	1
3	3	2	1
4	4	2	2
5	5	2	3

Os cenários do tamanho da família e a distribuição dos usuários nos ambientes de permanência prolongada do modelo unifamiliar 3 (três dormitórios) são apresentados na Tabela 4. Para o modelo unifamiliar 2 foram considerados 13 cenários do tamanho da família. As famílias 3.1,

4.1 e 5.1 apresentam ocupação nos três dormitórios, diferente das famílias com o mesmo tamanho 3, 4, e 5, que apresentam ocupação somente em dois dormitórios.

Tabela 4 – Tamanho da família e o número de usuários nos ambientes de permanência prolongada do modelo unifamiliar 2.

Tamanho da família	Usuários na Sala de Estar	Usuários no Dormitório 1	Usuários no Dormitório 2	Usuários no Dormitório 3
1	1	1	0	0
2	2	2	0	0
2.1	2	1	1	0
3	3	2	1	0
3.1	3	1	1	1
4	4	2	2	0
4.1	4	2	1	1
5	5	2	3	0
5.1	5	2	2	1
6	6	2	2	2
7	7	2	2	3
8	8	2	3	3
9	9	3	3	3

Na Tabela 5 são apresentados os cenários do tamanho da família e a distribuição dos usuários nos ambientes de permanência prolongada do modelo multifamiliar 4 (3 dormitórios). Neste modelo foram considerados 11 cenários do tamanho da família.

Tabela 5 – Tamanho da família e o número de usuários dos ambientes de permanência prolongada do modelo multifamiliar 4.

Tamanho da família	Usuários na Sala de Estar	Usuários no Dormitório 1	Usuários no Dormitório 2	Usuários no Dormitório 3
1	1	1	0	0
2	2	2	0	0
2.1	2	1	1	0
3	3	2	1	0
4	4	2	2	0
5	5	2	3	0
5.1	5	2	2	1
6	6	2	2	2
7	7	2	2	3
8	8	2	3	3
9	9	3	3	3

3.5. Condições de conforto e aceitabilidade dos usuários

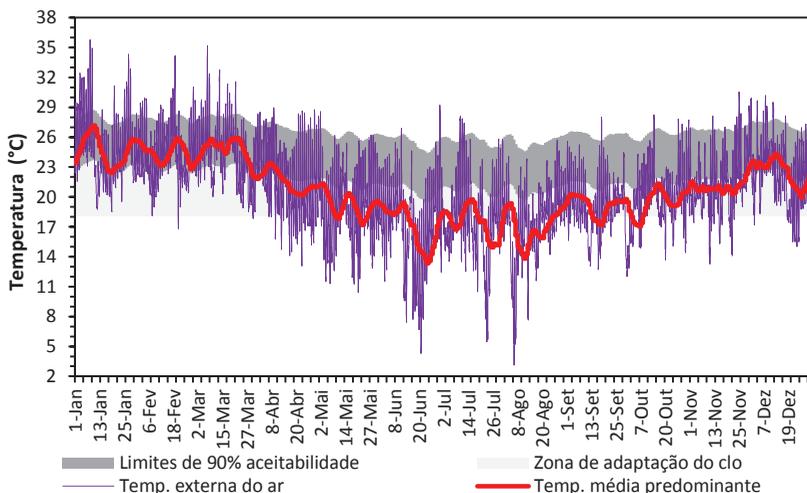
Nesta pesquisa a avaliação do desempenho térmico e energético das edificações residenciais visa maximizar as estratégias passivas, buscando minimizar a demanda de energia para condicionamento artificial. No estudo, pressupõe-se que os usuários das edificações residenciais aceitam os limites de conforto térmico adaptativo quando os ambientes são condicionados naturalmente.

Neste trabalho foram avaliados três condições de conforto térmico e aceitabilidade dos usuários, o método de conforto térmico adaptativo da norma ASHRAE *Standard* 55/2013 (ASHRAE, 2013), o método de conforto térmico adaptativo da EN 15251 (2007) e o modelo de conforto térmico do PMV (carta psicrométrica).

O método da ASHRAE *Standard* 55-2013 possibilita avaliar as edificações ventiladas naturalmente, devido aos usuários tolerarem maiores flutuações nas condições ambientais. O método é aplicado desde que o

usuário possa se adaptar às condições do ambiente. As simulações foram realizadas para o limite superior de 90% de aceitabilidade dos usuários em conforto térmico, que foi calculado por meio da temperatura média predominante da semana anterior. Para o limite inferior foi adotada a temperatura de 18°C, considerando que os usuários ajustam o clo para minimizar o desconforto pelo frio. A zona de ajuste no clo foi proposta por De Vecchi *et al.* (2014b). A Figura 24 apresenta a zona de conforto térmico com a proposta de ajuste do clo.

Figura 24 – Limites de conforto térmico de 90% aceitabilidade da ASHRAE 55-2013, com a proposta da zona de adaptação do clo



O cálculo da temperatura média predominante foi realizado através de uma planilha eletrônica, pois o programa de simulação *EnergyPlus* (versão 8.1) calcula a temperatura média predominante incorretamente. O programa considera a temperatura dos dias da pré-simulação, resultando em um valor de temperatura média predominante errada no início da simulação.

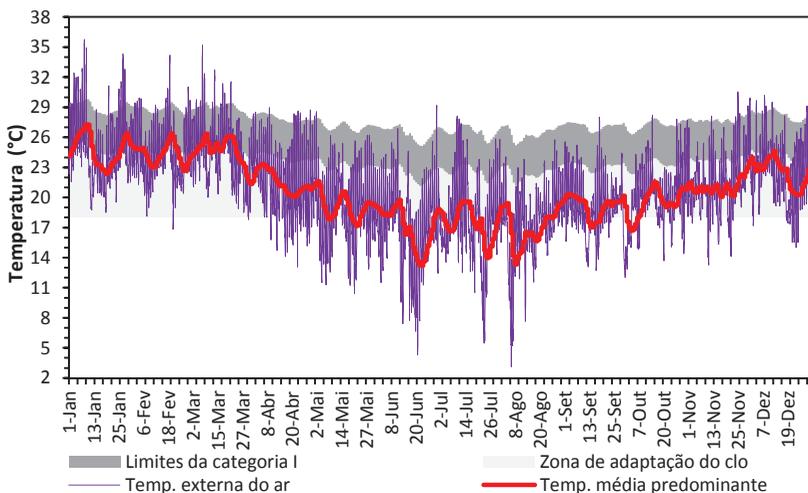
A segunda condição de conforto térmico adaptativo analisada foi a da EN 15251 (2007). O limite superior da zona de conforto térmico foi calculado com base na temperatura média predominante da semana anterior, conforme a equação (2). O valor do coeficiente de ponderação

“ α ” considerado para o cálculo da temperatura média predominante foi de 0,8, recomendado pela EN 15251. Para o limite inferior adotou-se as mesmas condições da zona de adaptação do clo.

$$\theta_{ext} = (1-\alpha) * \{ \theta_{dia 1} + \alpha * \theta_{dia 2} + \alpha^2 * \theta_{dia 3} + \alpha^3 * \theta_{dia 4} + \alpha^4 * \theta_{dia 5} + \alpha^5 * \theta_{dia 6} + \alpha^6 * \theta_{dia 7} \} \quad (2)$$

Na Figura 25 são apresentados os limites da zona de conforto térmico para a EN 15251, com a zona de adaptação do clo e a temperatura externa do arquivo climático TRY de Florianópolis.

Figura 25 – Limites de conforto térmico da categoria I da EN 15251, com a proposta da zona de adaptação do clo



A terceira condição analisada foi o método do PMV, apresentado na ASHRAE 55-2013 como método da zona gráfica de conforto. Para a condição de verão, período de resfriamento, considerou-se que o

usuário está em uma atividade leve ($60,0 \text{ W/m}^2 - 1,0 \text{ met}$)², o isolamento térmico das roupas é de 0,45 clo, a umidade relativa é de 50%, a velocidade do ar de 0,2 m/s e a temperatura operativa do ambiente é de 28,2°C. Para a condição de inverno, período de aquecimento, considerou-se que o usuário está com uma taxa metabólica de 70 W/m^2 (1,2 met), o isolamento térmico das roupas é de 1,20 clo, a umidade relativa de 50%, a velocidade do ar de 0,05 m/s e a temperatura operativa do ambiente de 18°C. Os limites da zona de conforto foram de 28,2°C para o limite superior e de 18°C para o limite inferior da zona de conforto térmico.

O estudo analisou a influência dos diferentes limites superiores de conforto térmico, da ASHRAE 55-2013, EN 15251 e o do método da carta psicrométrica. Os valores dos limites superiores de conforto térmico foram adotados para acionar o sistema de condicionamento artificial nos ambientes, no período de ocupação do ambiente. Para o limite inferior de conforto térmico, foi adotada a mesma condição para os três métodos analisados.

3.6. Propriedades Térmicas dos Componentes da Envoltória

Os componentes da envoltória (paredes, cobertura, aberturas e piso) das edificações que separam o ambiente interior do exterior são importantes para a determinação dos ganhos e perdas de calor entre o ambiente exterior e o interior. As propriedades termofísicas dos materiais, a forma arquitetônica, a orientação das paredes e aberturas determinam o desempenho térmico em relação ao ambiente exterior e interior.

As propriedades termofísicas e ópticas dos vidros foi modelada uma única composição de vidro para todos os cenários. O vidro adotado é um

² Taxa metabólica em função da área superficial de pele da pessoa.

vidro simples claro (4 mm), com transmitância térmica de $5,85 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, transmitância visível de 0,89 e o fator solar de 0,87.

Para o componente construtivo do piso também foi modelado uma única composição. O componente construtivo modelado é composto por uma camada de piso cerâmico (1,0 cm), argamassa de nivelamento (2,0 cm) e laje armada de blocos cerâmicos (12,0 cm). A resistência térmica do componente é de $0,1187 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$, valor sem as resistências superficiais.

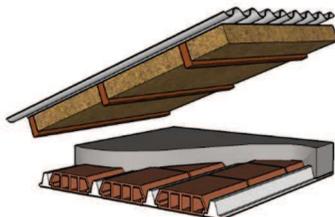
Foram modeladas seis composições de cobertura e oito composições de paredes externas. Os componentes foram divididos em dois grupos, com capacidade térmica média e baixa. Os componentes construtivos modelados atendem as recomendações da NBR-15220 (ABNT, 2005) e NBR-15575 (ABNT, 2013b; c) no critério de transmitância térmica para a zona bioclimática 3, na qual se enquadra a cidade de Florianópolis – SC. Os componentes construtivos com capacidade térmica baixa não atendem aos critérios da norma NBR-15575-4 em relação à capacidade térmica. Os componentes construtivos com capacidade térmica baixa possuem a mesma transmitância térmica dos componentes com capacidade térmica média. Os componentes construtivos (paredes e coberturas) foram simulados com três absorvâncias à radiação solar: 0,3 (cor clara), 0,5 (cor média) e 0,7 (cor escura).

3.6.1. Características das coberturas

Foram modeladas seis composições de cobertura, três com capacidade térmica média e três com capacidade térmica baixa:

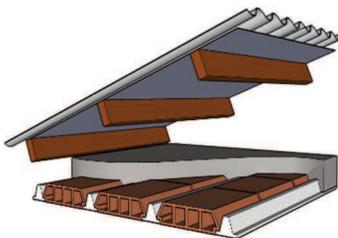
1. Cobertura com transmitância térmica de $0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $113,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 26). O componente construtivo é composto por telha de fibrocimento (0,7 cm), lâ de vidro (6,5 cm), laje armada de blocos cerâmicos (12,0 cm) e argamassa de revestimento interna (2,5 cm).

Figura 26 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $Ct_{Cob} 113,0 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$.



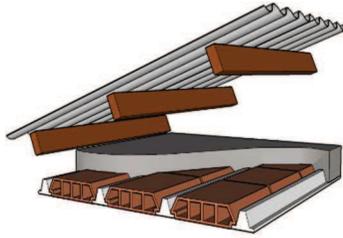
2. Cobertura com transmitância térmica de $1,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e a capacidade térmica de $113,0 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ (Figura 27). A cobertura é composta por telha de fibrocimento (0,7 cm), lâmina de alumínio polido (0,01 cm), laje de blocos cerâmicos (12,0 cm) e argamassa de revestimento interno (2,5 cm).

Figura 27 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 1,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $Ct_{Cob} 113,0 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$.



3. Cobertura com transmitância térmica de $1,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e a capacidade térmica de $113,0 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ (Figura 28). O componente construtivo é composto por telha de fibrocimento (0,7 cm), laje de blocos cerâmicos (12,0 cm) e argamassa de revestimento interna (2,5 cm).

Figura 28 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 1,9 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Cob} 113,0 \text{ kJ/m}^2.K$.



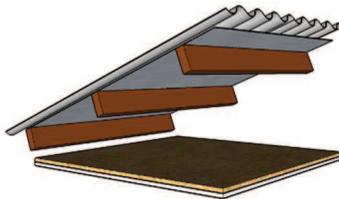
4. Cobertura com transmitância térmica de $0,50 \text{ W/m}^2.K$ e a capacidade térmica de $27,0 \text{ kJ/m}^2.K$ (Figura 29). A cobertura é composta por telha de fibrocimento ($0,7 \text{ cm}$), lã de vidro ($6,5 \text{ cm}$), chapa de madeira OSB (*Oriented Strand Board*) estrutural ($1,2 \text{ cm}$) e chapa de gesso acartonado ($1,0 \text{ cm}$).

Figura 29 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 0,50 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Cob} 27,0 \text{ kJ/m}^2.K$



5. Cobertura com transmitância térmica de $1,0 \text{ W/m}^2.K$ e a capacidade térmica de $27,0 \text{ kJ/m}^2.K$ (Figura 30). A cobertura é composta por telha de fibrocimento ($0,7 \text{ cm}$), lâmina de alumínio polido ($0,01 \text{ cm}$), chapa de madeira OSB (*Oriented Strand Board*) estrutural ($1,2 \text{ cm}$) e chapa de gesso acartonado ($1,0 \text{ cm}$).

Figura 30 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 1,0 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Cob} 27,0 \text{ kJ/m}^2.K$



6. Cobertura com transmitância térmica de $1,9 \text{ W/m}^2.K$ e a capacidade térmica de $27,0 \text{ kJ/m}^2.K$ (Figura 31). A cobertura é composta por telha de fibrocimento (0,7 cm), chapa de madeira OSB (*Oriented Strand Board*) estrutural (1,2 cm) e chapa de gesso acartonado (1,0 cm).

Figura 31 – Croqui da cobertura com $U_{Cob} 1,9 \text{ W/m}^2.K$ e $Ct_{Cob} 27,0 \text{ kJ/m}^2$.



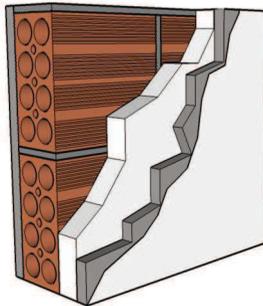
3.6.2. Características das paredes

Foram modeladas oito composições de parede, quatro com capacidade térmica média e quatro com capacidade térmica baixa:

1. Parede com transmitância térmica de $0,5 \text{ W/m}^2.K$ e a capacidade térmica de $146,0 \text{ kJ/m}^2.K$ (Figura 32). A parede é composta por argamassa de revestimento externa (2,5 cm), poliestireno expandido (5,0 cm), tijolo cerâmico de oito furos ($10,0 \times 20,0 \times 20,0 \text{ cm}$) assentados na menor dimensão,

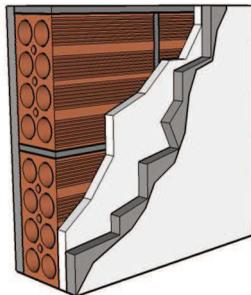
argamassa de revestimento interna (2,5 cm) e argamassa de assentamento (1,0 cm).

Figura 32 – Parede de tijolo cerâmico de oito furos; $U_{\text{ParExt}} 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $C_{\text{tPar}}.146,0 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$



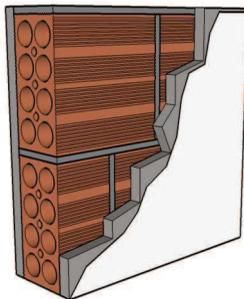
2. Parede com transmitância térmica de $1,0 \text{ W/m}^2.\text{K}$ e a capacidade térmica de $146,0 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Figura 33). O componente construtivo é composto por argamassa de revestimento externa (2,5 cm), poliestireno expandido (1,8 cm), tijolo cerâmico de oito furos ($10,0 \times 20,0 \times 20,0 \text{ cm}$) assentados na menor dimensão, argamassa de revestimento interna (2,5 cm) e argamassa de assentamento (1,0 cm).

Figura 33 – Parede de tijolo cerâmico de oito furos; $U_{\text{ParExt}} 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $C_{\text{tPar}}.146,0 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$



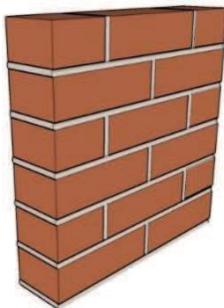
- Parede com transmitância térmica de $2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $146,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 34). A parede é composta por argamassa de revestimento externa (2,5 cm), tijolo cerâmico de oito furos ($10,0 \times 20,0 \times 20,0 \text{ cm}$), assentado na menor dimensão, argamassa de revestimento interna (2,5 cm) e argamassa de assentamento (1,0 cm).

Figura 34 – Parede de tijolo cerâmico de oito furos; $U_{\text{ParExt}} 2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $C_{\text{tPar}} 146,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$



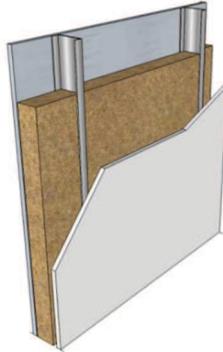
- Parede com transmitância térmica de $3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $158,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 35). A parede é composta por tijolo cerâmico maciço ($10,0 \times 5,0 \times 20,0 \text{ cm}$), assentado na menor dimensão. A espessura total da parede é de 10 cm.

Figura 35 – Parede de tijolos cerâmicos maciços; $U_{\text{ParExt}} 3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $C_{\text{tPar}} 158,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.



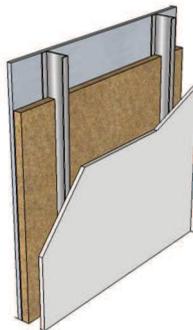
5. Parede de *steel frame* com transmitância térmica de $0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $10,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 36). A parede é composta por uma placa de fibrocimento (1,25 cm), lã de vidro (8,0 cm), perfil de aço galvanizado e placa de gesso acartonado (1,25 cm).

Figura 36 – Parede de *steel frame*; $U_{\text{ParExt}} 0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $C_{\text{tPar}} 10,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.



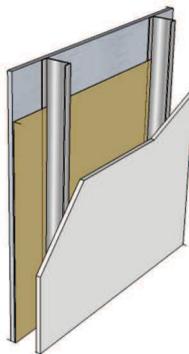
6. Parede de *steel frame* com transmitância térmica de $1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $10,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 37). A parede é composta por uma placa de fibrocimento (1,25 cm), lã de vidro (3,4 cm), perfil de aço galvanizado e placa de gesso acartonado (1,25 cm).

Figura 37 – Parede de *steel frame*; $U_{\text{ParExt}} 1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $C_{\text{tPar}} 10,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.



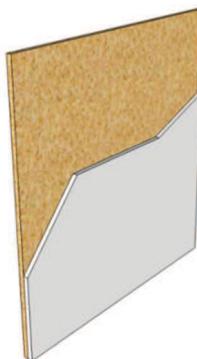
7. Parede de *steel frame* com transmitância térmica de $2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $10,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 38). A parede é composta por uma placa de fibrocimento (1,25 cm), espuma de poliuretano (0,4 cm), perfil de aço galvanizado e uma placa de gesso acartonado (1,25 cm).

Figura 38 – Parede de *steel frame*; $U_{\text{ParExt}} 2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $C_{\text{tPar}} 10,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$



8. Parede com transmitância térmica de $3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica de $27,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura 39). A parede é composta por uma placa de fibrocimento (1,2 cm), espuma de poliuretano (0,2 cm) e uma placa de gesso acartonado (1,25 cm).

Figura 39 – Parede com capacidade térmica baixa; $U_{\text{ParExt}} 3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $C_{\text{tPar}} 27,0 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$



3.7. Simulação do desempenho térmico e energético dos modelos

Os programas de simulação computacional são ferramentas importantes para avaliar o desempenho termoenergético das edificações. Para analisar a influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético das edificações residenciais foi adotado o programa *EnergyPlus* na versão 8.1.0 (ENERGYPLUS, 2013). As edificações foram simuladas com ventilação natural durante os períodos que os ambientes atenderam às condições de conforto térmico analisadas. Entretanto, nos períodos em que os ambientes não atenderam as condições de conforto térmico, os ambientes foram simulados com sistema de condicionamento artificial.

Na Tabela 6 são apresentadas as informações referentes as configurações e algoritmos utilizados na simulação.

Tabela 6 – Informações referente as configurações e algoritmos da simulação.

Parâmetro	Valor ou algoritmo adotado
Algoritmo de distribuição solar	<i>FullInteriorAndExteriorWithReflections</i>
Algoritmo de convecção das superfícies internas	TARP
Algoritmo de convecção das superfícies externas	TARP
Algoritmo de transferência de calor	<i>ConductionTransferFunction</i>
Passo de tempo	12 por hora (a cada 5 minutos)

3.7.1. Modelagem da ventilação natural

A ventilação natural foi modelada por meio do modelo de rede, que é baseado na concepção de que cada zona da edificação é representada por um nó de pressão. O ambiente externo à edificação também é representado por nós, que são interligados pelas aberturas que

representam os caminhos dos fluxos de ar. Com os valores de pressão em cada abertura é possível calcular o fluxo de ar pela edificação.

O *EnergyPlus* adota a rotina de cálculo do programa *AIRNET*, que foi desenvolvido por Walton (1989). O módulo de simulação da ventilação natural do *EnergyPlus* é o *AirFlowNetwork*. Para a modelagem da rede de ventilação natural é necessária a definição de alguns parâmetros, como coeficiente de pressão (C_p), coeficiente de descarga (C_D), coeficiente de fluxo de ar pelas frestas (C_a) e rugosidade do entorno (α). A Tabela 7 apresenta a especificação dos parâmetros adotados na modelagem da rede de ventilação natural. A escolha dos parâmetros foi baseada em Sorgato e Lamberts (2012).

Tabela 7 – Parâmetros adotados na modelagem da rede de ventilação natural.

Parâmetros	Valores adotados
Coefficiente de pressão	TNO – CP Generator e Akins (1979)
Coefficiente de descarga	0,60
Coefficiente de frestas quando a janela está fechada	0,001; n=0,65
Rugosidade do entorno	0,33

Para as edificações unifamiliares foram adotados os coeficientes de pressão do TNO *CP Generator*. Para as unidades habitacionais das edificações multifamiliares foram adotados os coeficientes de pressão da equação de Akins (1979).

3.7.2. Modelagem do sistema de condicionamento artificial

O sistema de condicionamento artificial (ar condicionado) foi modelado através do sistema *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP). O sistema modelado reproduz o desempenho de condicionadores de ar do modelo Split, funcionando com os fundamentos de bomba de calor.

Os detalhes da modelagem do sistema de condicionamento artificial são apresentados na Tabela 8, como: a temperatura do termostato de

resfriamento e aquecimento, a taxa de fluxo de ar por pessoa, o modo de operação do ventilador, a eficiência do ventilador, a pressão do ventilador, a capacidade de refrigeração e aquecimento, e a razão entre o calor retirado ou fornecido para o ambiente em relação à energia consumida pelo equipamento de condicionamento (COP – *Cooling Coil Rated, Heat Pump Heating Coil Rated*).

Tabela 8 – Detalhes da modelagem do sistema de condicionamento artificial

Parâmetro	Condição
Termostato de resfriamento	24°C (diurno) e 25°C (noturno)
Termostato de aquecimento	21°C
Taxa de fluxo de ar por pessoa	0,0075 (m ³ /s)
Modo de operação do ventilador	Contínuo
Eficiência do ventilador	0,7
Pressão do ventilador	75 (Pa)
Capacidade de refrigeração	Auto dimensionamento
Capacidade de aquecimento	Auto dimensionamento
COP de Refrigeração	3,5 W/W
COP de Aquecimento	3,5 W/W

Por meio dos recursos de controles avançados do *Energy Management System* (EMS), será realizado o controle da integração da estratégia de condicionamento passivo com o sistema de condicionamento artificial.

3.7.3. Controle de integração da ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial

Os recursos tradicionais de controle do programa *EnergyPlus* não possibilitam o controle avançado da integração da ventilação natural com o sistema de condicionamento artificial. Não é possível estabelecer

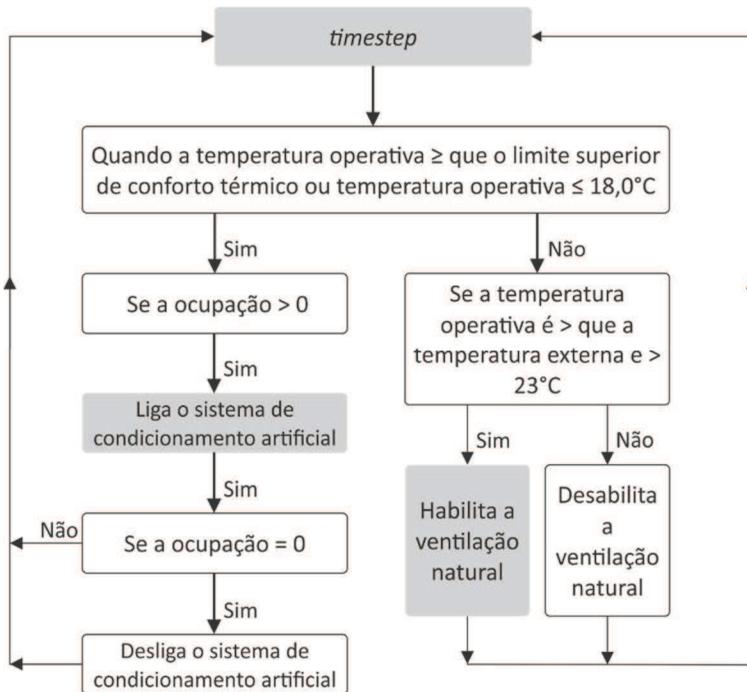
uma segunda condição para definir quando será desligado o sistema de condicionamento artificial. Nesta pesquisa foi considerado que após o acionamento do sistema de condicionamento artificial, o usuário desliga o sistema quando termina a ocupação do ambiente. Para modelar esta condição no programa de simulação é necessário utilizar os recursos de controles avançados.

No *EnergyPlus* existem dois recursos para realizar controles avançados, o recurso da co-simulação e o recurso do *Energy Management System* (EMS). A co-simulação possibilita integrar diferentes ferramentas de simulação, bem como a integração de algoritmos externos para controlar a simulação (TRČKA *et al.*, 2009). Com o EMS é possível escrever algoritmos de controle no próprio arquivo de simulação (ELLIS *et al.*, 2007).

O recurso do EMS foi adotado para controlar a integração do sistema de ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial no *EnergyPlus*. No período que a temperatura interna do ambiente exceder os limites da zona de conforto térmico, o algoritmo interrompe a simulação da estratégia de condicionamento natural, altera as condições da simulação, prosseguindo a simulação com o sistema de condicionamento artificial. O desligamento do sistema de condicionamento artificial foi vinculado ao término da ocupação do ambiente.

A Figura 40 apresenta o fluxograma do algoritmo de controle do sistema de ventilação natural e condicionamento artificial.

Figura 40 – Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial



O EMS possibilita a leitura e a troca de informações durante o processamento da simulação a cada *timestep*. A troca de informações é realizada através do *Output:Variable* no arquivo de resultados (formato csv). O algoritmo foi desenvolvido conforme as recomendações do *EnergyPlus Runtime Language* (ERL).

3.7.4. Cargas internas de equipamentos, pessoas e iluminação artificial

No Brasil, o estudo oficial com informações referentes ao consumo de energia e a posse e uso de equipamentos é a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos em Consumidores Residenciais

(ELETROBRAS, 2007). A pesquisa apresenta dados escassos e de baixa confiabilidade. O estudo de Fedrigo *et al.* (2009) comparou o consumo estimado com o intervalo de consumo real fornecido pela concessionária e concluiu que apenas 41% das residências apresentaram consumo dentro do intervalo de consumo real. Outros estudos também analisaram os consumos por meio das informações da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Aparelho Elétricos em Consumidores Residenciais e obtiveram resultados bastante distintos (ALMEIDA *et al.*, 2001; GHISI *et al.*, 2007; ACHÃO e SCHAEFFER, 2009).

Com base nas incertezas e na baixa confiabilidade dos dados da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos em Consumidores Residenciais, optou-se por simplificar as cargas internas de equipamentos. Neste trabalho foram consideradas cargas internas somente nos dormitórios e nas salas de estar. O estudo foi desenvolvido com dois níveis de cargas internas, carga interna baixa e carga interna média. Na Tabela 9 são apresentados os níveis de cargas internas de equipamentos e a fração radiante considerada para os equipamentos dos ambientes de permanência prolongada.

Tabela 9 – Cargas internas de equipamentos dos ambientes de permanência prolongada.

Ambiente	Níveis de carga interna ($C_{I_{equ}}$)	Potência (W)	Fração Radiante (%)
Dormitório	Média	120,0	50
Dormitório	Baixa	60,0	50
Sala de Estar	Média	240,0	50
Sala de Estar	Baixa	120,00	50

Os padrões de uso dos equipamentos foram baseados no padrão de ocupação dos ambientes, os padrões de uso dos equipamentos considerados nos cenários são apresentados nos Apêndices A, B e C.

As cargas internas provenientes da ocupação foram baseadas nas atividades desempenhadas nos ambientes de permanência prolongada e da cozinha. Na Tabela 10 são apresentadas as taxas metabólicas e o calor produzido por pessoa para cada atividade. Os valores recomendados para essas taxas foram baseados na ASHRAE (2009),

considerando uma área de pele média de 1,80m². As taxas metabólicas foram aplicadas para todos os cenários desta pesquisa.

Tabela 10 - Taxas metabólicas para cada atividade.

Zona	Atividade desempenhada	Calor produzido [W/m ²]	Calor produzido por pessoa [W]
Cozinha	Preparando refeição	95	171
Sala	Sentado ou assistindo tv	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Na cozinha somente uma pessoa estará com a taxa metabólica de 95 W/m² quando o ambiente está ocupado por mais de uma pessoa. Para as demais pessoas foi considerado a taxa metabólica de 60 W/m².

Para as cargas térmicas referentes ao sistema de iluminação artificial dos ambientes de permanência prolongada e da cozinha adotou-se uma densidade de potência de iluminação de 5 W/m², com fração radiante de 0,42 e a fração visível de 0,18. A baixa densidade de potência de iluminação em razão do uso de lâmpadas fluorescentes compactas no contexto residencial brasileiro. A densidade de potência de iluminação foi aplicada para todos os cenários da pesquisa.

3.7.5. Modelagem dos dispositivos de sombreamento das aberturas

Os dispositivos de sombreamento das aberturas foram modelados por meio de uma veneziana horizontal externa. No programa *EnergyPlus* a modelagem da veneziana foi realizada por meio do componente *Exterior Blind*. Na Tabela 11 são apresentados os detalhes da modelagem da veneziana (*Exterior Blind*).

Tabela 11 – Parâmetros da modelagem dos dispositivos de sombreamento.

Parâmetros	Valores adotados
Largura das aletas	0,025 m
Distância entre aletas	0,020 m
Espessura das aletas	0,002 m
Ângulo das aletas	45°
Refletância na superfície externa	0,5
Refletância na superfície interna	0,5
Distância do vidro da janela	0,100 m

3.7.6. Modelagem da temperatura do solo nos modelos unifamiliares

Para os modelos unifamiliares a temperatura do solo é um parâmetro importante, devido a troca de calor entre o piso e o solo. As temperaturas do solo foram calculadas por meio do algoritmo do *Slab*, que está vinculado ao *EnergyPlus*. Na Tabela 12 são apresentadas as temperaturas do solo consideradas para os modelos unifamiliares 1 e 2.

Tabela 12 – Temperaturas do solo dos modelos unifamiliares 1 e 2.

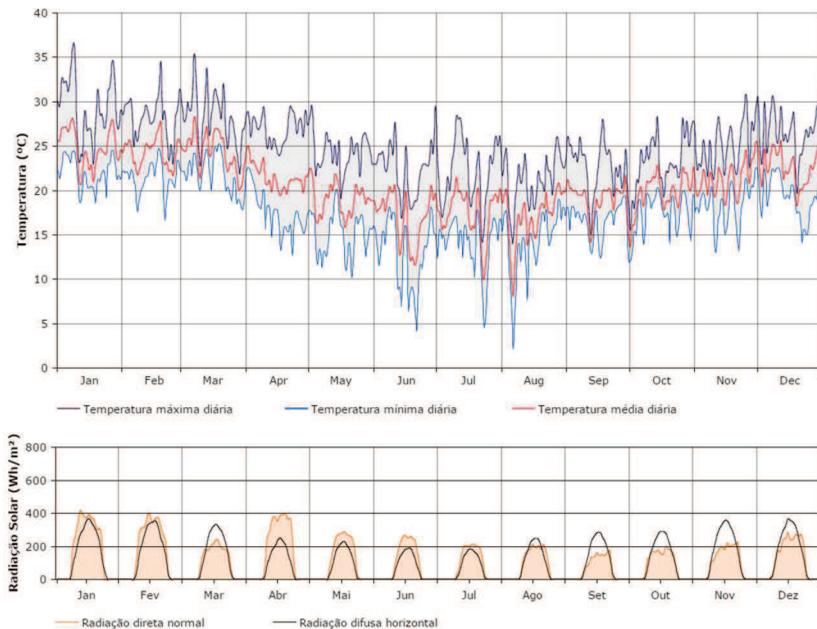
Mês	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
Temperatura do solo (°C)	23,8	23,9	23,8	22,5	21,0	19,4	18,1	19,0	20,00	19,9	21,0	22,0

3.8. Características do clima de Florianópolis

Para o desenvolvimento da pesquisa foi adotado o clima da cidade de Florianópolis. A cidade localiza-se na latitude 27,7° S e longitude 48,5° W, a uma altitude de referência de 7m. O clima é classificado como mesotérmico úmido, com estações do ano bem definidas: altas temperaturas no verão e temperaturas moderadas no inverno.

Atualmente para a cidade de Florianópolis estão disponíveis três arquivos climáticos para simulação através do programa *EnergyPlus*. Neste trabalho foi adotado o arquivo climático do tipo TRY (*Test Reference Year*). A Figura 41 apresenta os dados das temperaturas mínima, média, máxima diária, e a média mensal da radiação direta e difusa do arquivo climático de Florianópolis.

Figura 41 – Dados do arquivo climático da cidade de Florianópolis.



3.9. Casos para simulação

Existem diversas técnicas de amostragem para representar as características de todo o conjunto de parâmetros analisados. A escolha da técnica adequada para gerar resultados satisfatórios é importante. O

método adotado para o desenvolvimento da pesquisa foi o hipercubo latino, que seleciona valores aleatoriamente, dentre uma distribuição de faixas previamente distribuídas, selecionando um valor pertencente a cada uma das faixas. A amostragem por meio do hipercubo latino proporcionou uma redução do número de casos que foram simulados, sem reduzir a confiabilidade dos resultados finais.

Os parâmetros considerados na amostragem da pesquisa foram: perfil do usuário; comportamento do usuário; tamanho da família; condições de conforto térmico; propriedades termofísicas da envoltória; e as cargas internas de equipamentos dos ambientes. Na Tabela 13 são apresentados os parâmetros considerados no modelo unifamiliar 1 (dois dormitórios). Para o modelo unifamiliar 1 foram selecionados 5.000 casos, com base no método do hipercubo latino.

Tabela 13 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo unifamiliar 1 (dois dormitórios).

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Usuário	-	1. Contemporâneo	0,333334	1.667
		2. Tradicional	0,333333	1.667
		3. Flexível	0,333333	1.666
Comportamento do usuário	-	1. Ativo	0,333334	1.667
		2. Intermediário	0,333333	1.666
		3. Passivo	0,333333	1.667
Tamanho da família	Pessoas	1. Um morador	0,166666	833
		2. Dois moradores	0,166667	833
		2.1. Dois moradores	0,166666	834
		3. Três moradores	0,166667	833
		4. Quatro moradores	0,166667	833
Condições de conforto térmico	°C	5. Cinco moradores	0,166667	834
		1. ASHRAE	0,333334	1.667
		2. EN 15251	0,333333	1.667
		3. PMV	0,333333	1.666
		Transmitância da cobertura e Capacidade térmica da cobertura	W/m ² .K kJ/m ² .K	1. 0,5 – 113,0
2. 1,0 – 113,0	0,166667			833
3. 1,9 – 113,0	0,166667			834
4. 0,5 – 27,0	0,166666			834
5. 1,0 – 27,0	0,166667			833
6. 1,9 – 27,0	0,166667			833

“continua”

Continuação da Tabela 13 da página anterior.

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Absortância da cobertura	-	1. 0,3	0,333333	1.666
		2. 0,5	0,333334	1.668
		3. 0,7	0,333333	1.666
Transmitância térmica da parede externa e Capacidade térmica da parede externa	W/m ² .K kJ/m ² .K	1. 0,5 – 146,0	0,125000	625
		2. 1,0 – 146,0	0,125000	625
		3. 2,2 – 146,0	0,125000	625
		4. 3,6 – 158,0	0,125000	625
		5. 0,5 – 10,5	0,125000	625
		6. 1,0 – 10,5	0,125000	625
		7. 2,2 – 10,5	0,125000	625
		8. 3,6 – 27,0	0,125000	625
Absortância da parede externa	-	1. 0,3	0,333333	1.666
		2. 0,5	0,333334	1.668
		3. 0,7	0,333333	1.666
Carga interna de equipamentos	W	1. 60 - 120	0,500000	2.500
		2. 120 - 240	0,500000	2.500

Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros considerados para amostragem dos casos do modelo unifamiliar 2 (três dormitórios). A combinação de todos os parâmetros resultou em 303.264 casos. A amostra selecionada por meio do método do hipercubo latino foi de 10.831 casos.

Tabela 14 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo unifamiliar 2 (três dormitórios).

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Usuário	-	1. Contemporâneo	0,333334	3.611
		2. Tradicional	0,333333	3.611
		3. Flexível	0,333333	3.609
Comportamento do usuário	-	1. Ativo	0,333334	3.610
		2. Intermediário	0,333333	3.610
		3. Passivo	0,333333	3.611

“continua”

Continuação da Tabela 14 da página anterior.

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Tamanho da família	Pessoas	1. Um morador	0,076909	833
		2. Dois moradores	0,076909	833
		2.1. Dois moradores	0,077001	834
		3. Três moradores	0,076909	833
		3.1 Três moradores	0,076909	833
		4. Quatro moradores	0,076909	833
		4.1 Quatro moradores	0,076909	833
		5. Cinco moradores	0,077001	834
		5.1 Cinco moradores	0,076909	833
Níveis de Conforto	°C	1. ASHRAE	0,333334	3.611
		2. EN 15251	0,333333	3.610
		3. PMV	0,333333	3.610
Transmitância da cobertura e Capacidade térmica da cobertura	W/m ² .K kJ/m ² .K	1. 0,5 – 113,0	0,166651	1.805
		2. 1,0 – 113,0	0,166651	1.805
		3. 1,9 – 113,0	0,166743	1.806
		4. 0,5 – 27,0	0,166651	1.805
		5. 1,0 – 27,0	0,166651	1.805
		6. 1,9 – 27,0	0,166651	1.805
Absortância da cobertura	-	1. 0,3	0,333210	3.609
		2. 0,5	0,333580	3.613
		3. 0,7	0,333210	3.609
Transmitância térmica da parede externa e Capacidade térmica da parede externa	W/m ² .K kJ/m ² .K	1. 0,5 – 146,0	0,125011	1.354
		2. 1,0 – 146,0	0,125011	1.354
		3. 2,2 – 146,0	0,125011	1.354
		4. 3,6 – 158,0	0,125011	1.354
		5. 0,5 – 10,5	0,125011	1.354
		6. 1,0 – 10,5	0,125011	1.354
		7. 2,2 – 10,5	0,124919	1.353
		8. 3,6 – 27,0	0,125011	1.354
Absortância da parede externa	-	1. 0,3	0,333333	3.610
		2. 0,5	0,333334	3.611
		3. 0,7	0,333333	3.610
Carga interna de equipamentos	W	1. 60 - 120	0,500000	5.416
		2. 120 - 240	0,500000	5.415

No modelo multifamiliar 3 (unidade habitacional com 2 dormitórios) foram considerados os parâmetros da Tabela 15. Os parâmetros combinados resultaram em 15.552 casos. Foram selecionados 5.000 casos por meio do método hipercubo latino.

Tabela 15 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo multifamiliar 3 (unidade habitacional com dois dormitórios).

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Usuário	-	1. Contemporâneo	0,333334	1.667
		2. Tradicional	0,333333	1.667
		3. Flexível	0,333333	1.666
Comportamento do usuário	-	1. Ativo	0,333334	1.667
		2. Intermediário	0,333333	1.666
		3. Passivo	0,333333	1.667
Tamanho da família	Pessoas	1. Um morador	0,166666	833
		2. Dois moradores	0,166667	833
		2.1. Dois moradores	0,166666	834
		3. Três moradores	0,166667	833
		4. Quatro moradores	0,166667	833
		5. Cinco moradores	0,166667	834
		1. ASHRAE	0,333334	1.667
		2. EN 15251	0,333333	1.667
		3. PMV	0,333333	1.666
		Capacidade térmica do forro	kJ/m ² .K	1. 113,0
2. 27,0	0,500000			2.500
Transmitância térmica da parede externa e Capacidade térmica da parede externa	W/m ² .K kJ/m ² .K	1. 0,5 – 146,0	0,125000	625
		2. 1,0 – 146,0	0,125000	625
		3. 2,2 – 146,0	0,125000	625
		4. 3,6 – 158,0	0,125000	625
		5. 0,5 – 10,5	0,125000	625
		6. 1,0 – 10,5	0,125000	625
		7. 2,2 – 10,5	0,125000	625
		8. 3,6 – 27,0	0,125000	625
Absortância da parede externa	-	1. 0,3	0,333333	1.666
		2. 0,5	0,333334	1.668
		3. 0,7	0,333333	1.666
Carga interna de equipamentos	W	1. 60 - 120	0,500000	2.500
		2. 120 - 240	0,500000	2.500

Na Tabela 16 são apresentados os parâmetros considerados para amostragem do modelo multifamiliar 4 (unidade habitacional com três dormitórios). A combinação de todos os parâmetros resultou em 28.512 casos. Foram simulados 10.831 casos.

Tabela 16 – Parâmetros considerados para a amostragem dos casos simulados do modelo multifamiliar 4 (unidade habitacional com três dormitórios).

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Usuário	-	1. Contemporâneo	0,333334	3.611
		2. Tradicional	0,333333	3.611
		3. Flexível	0,333333	3.609
Comportamento do usuário	-	1. Ativo	0,333334	3.610
		2. Intermediário	0,333333	3.610
		3. Passivo	0,333333	3.611
Tamanho da família	Pessoas	1. Um morador	0,0769088	833
		2. Dois moradores	0,0769088	833
		2.1. Dois moradores	0,0770012	834
		3. Três moradores	0,0769088	833
		4. Quatro moradores	0,0769088	833
		5. Cinco moradores	0,0770012	834
		5.1. Cinco moradores	0,1076539	1.166
		6. Seis moradores	0,1076539	1.166
		7. Sete moradores	0,1077462	1.167
Níveis de Conforto	°C	1. ASHRAE	0,333334	3.611
		2. EN 15251	0,333333	3.610
		3. PMV	0,333333	3.610
Capacidade térmica do forro	kJ/m ² .K	1. 113,0	0,500000	2.500
		2. 27,0	0,500000	2.500
Transmitância térmica da parede externa e Capacidade térmica da parede externa	W/m ² .K	1. 0,5 – 146,0	0,125011	1.354
		2. 1,0 – 146,0	0,125011	1.354
		3. 2,2 – 146,0	0,125011	1.354
		4. 3,6 – 158,0	0,125011	1.354
	kJ/m ² .K	5. 0,5 – 10,5	0,125011	1.354
		6. 1,0 – 10,5	0,125011	1.354
		7. 2,2 – 10,5	0,124919	1.353
		8. 3,6 – 27,0	0,125011	1.354
Absortância da parede externa	-	1. 0,3	0,333333	3.610
		2. 0,5	0,333334	3.611
		3. 0,7	0,333333	3.610

“continua”

Continuação da Tabela 16 da página anterior.

Parâmetro	Unid.	Valores	Probabilidade de ocorrência	Número de casos
Carga interna de equipamentos	W	3. 60 – 120 ³	0,500000	5.416
		4. 120 – 240	0,500000	5.415

3.10. Análise do desempenho térmico e energético

As análises do desempenho térmico e energético de edificações residenciais foram realizadas por meio do consumo de energia para condicionamento artificial (consumo anual de resfriamento e de aquecimento) e do percentual de horas de conforto térmico dos ambientes de permanência prolongada.

Os resultados da pesquisa são apresentados por meio de uma análise estatística descritiva dos resultados das simulações; análise dos indicadores de eficiência energética; análise de sensibilidade dos parâmetros simulados; análise da influência do comportamento do usuário; análise da influência dos principais parâmetros no desempenho da edificação; e a comparação do desempenho termoenergético da família de 4 pessoas.

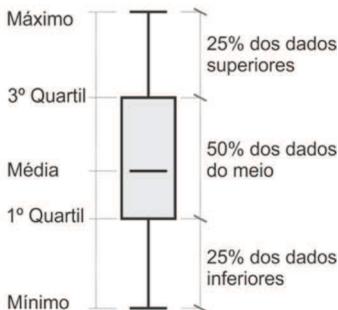
3.10.1. Análise estatística dos casos simulados

Os resultados das simulações foram analisados através dos recursos da estatística descritiva, apresentando os resultados de valores mínimos, valores máximos, média e desvio padrão. A dispersão dos resultados foi apresentada por meio do diagrama de caixa, dividindo os resultados em 4 partes: no primeiro quartil os 25% dos casos com melhor desempenho,

³ O primeiro valor refere-se a carga interna de equipamentos dos dormitórios (60 W) e o segundo valor refere-se a carga interna da sala (120 W).

no segundo e terceiro quartis são apresentados os 50% dos casos mais prováveis e no quarto quartil apresenta os resultados dos casos (25%) com pior desempenho (Figura 42).

Figura 42 - Esquema do diagrama de caixa



A análise estatística dos casos simulados foi realizada com base nos resultados de consumo anual de energia para resfriamento, consumo anual de energia para aquecimento, consumo anual do sistema de condicionamento artificial (somatório de aquecimento e resfriamento) e o percentual de horas de conforto térmico dos ambientes de permanência prolongada.

3.10.2. Análise dos indicadores de eficiência energética

Os indicadores de eficiência energética são mecanismos para avaliar consumo de energia para um determinado processo. Devem apresentar informações para realizar uma análise comparativa do consumo de energia das edificações, possibilitando identificar o consumo de energia eficaz. Os indicadores são ferramentas de análise que permitem quantificar a eficiência energética das edificações, com o objetivo do consumo racional de energia.

Nesta pesquisa foram avaliados quatro indicadores de eficiência energética: o indicador com base na área da edificação; o indicador com base na área dos ambientes condicionados artificialmente; o indicador

com base no consumo *per capita*; e o indicador com base no consumo *per capita* em função do tempo de uso da edificação.

1. Indicador de eficiência energética com base na área da edificação

O indicador pela unidade de área da edificação é obtido da razão do consumo anual de energia para condicionamento artificial, pela área da edificação (3).

$$kWh/m^2 = \frac{\text{Consumo CA}}{\text{Área da edificação}} \quad (3)$$

No qual:

Consumo CA refere-se ao somatório da energia consumida pelo sistema de condicionamento artificial da edificação, expresso em kWh.ano;

Área da edificação refere-se ao somatório das áreas de todos os ambientes da edificação, expresso em m²;

kWh/m² é o indicador de eficiência energética com base na área da edificação, expresso em kWh/m²;

2. Indicador de eficiência energética com base na área dos ambientes com sistema de condicionamento artificial

O indicador pela área dos ambientes com sistema de condicionamento é calculado em razão do consumo anual de energia para condicionamento artificial, dividido pelo somatório da área dos ambientes com sistema de condicionamento artificial (4).

$$kWh/m^2CA = \frac{\text{Consumo CA}}{\text{Área dos ambientes CA}} \quad (4)$$

No qual:

Consumo CA refere-se ao somatório da energia consumida pelo sistema de condicionamento artificial da edificação, expresso em kWh.ano;

Área dos ambientes CA refere-se ao somatório das áreas de todos os ambientes da edificação com sistema de condicionamento artificial, expresso em m²;

kWh/m²CA é o indicador de eficiência energética com base na área dos ambientes com sistema de condicionamento artificial, expresso em kWh/m²CA;

3. Indicador de eficiência energética com base no consumo *per capita*

O indicador de eficiência *per capita* foi calculado em razão do consumo anual de energia para condicionamento artificial, pelo número de moradores na edificação (5).

$$kWh/pessoa = \frac{\text{Consumo CA}}{\text{Número de moradores}} \quad (5)$$

No qual:

Consumo CA refere-se ao somatório da energia consumida pelo sistema de condicionamento artificial da edificação, expresso em kWh.ano;

Número de moradores refere-se ao somatório de moradores da edificação;

kWh/pessoa é o indicador de eficiência energética com base no número de moradores da edificação, expresso em kWh/pessoa;

4. Indicador de eficiência energética com base no consumo *per capita* em função do padrão de ocupação da edificação

O indicador de eficiência energética *per capita* em função da ocupação da edificação é a razão do consumo anual de energia para condicionamento artificial, pelo número de moradores da edificação em função da média diária das horas de ocupação da residência (6).

$$kWh/pessoa/horas = \frac{\text{Consumo CA}}{\frac{\text{Numero pessoas}}{\text{Média diária de horas de uso}}} \quad (6)$$

No qual:

Consumo CA refere-se ao somatório da energia consumida pelo sistema de condicionamento artificial da edificação, expresso em kWh.ano;

Número de moradores refere-se ao somatório de moradores da edificação;

Média diária de horas de uso refere-se a média diária de uso dos ambientes de permanência prolongada da edificação, expresso em horas;

kWh/pessoa/horas é o indicador de eficiência energética com base no número de moradores da edificação, expresso em kWh/pessoa/horas;

A média diária de horas de uso foi calculada por meio do somatório das horas ocupadas de todos os ambientes de permanência prolongada, dividido pelo número de dias do ano (365 dias).

A comparação dos diferentes indicadores de eficiência energética subsidiou a seleção do indicador que apresentou a melhor forma de comparar o consumo de energia para condicionamento artificial em função dos benefícios.

3.10.3. Análise de sensibilidade dos parâmetros simulados

A análise de sensibilidade tem sido amplamente utilizada para avaliar o desempenho térmico e energético de edificações (HOPFE e HENSEN, 2011; TIAN e DE WILDE, 2011; HYGH *et al.*, 2012; SPITZ *et al.*, 2012; TIAN, 2013).

A análise de sensibilidade foi realizada no programa SimLab, versão 2.2.1 (2011), por meio dos métodos: Coeficientes de regressão padronizados (SRC - *Standardized Regression Coefficients*); e Coeficientes de correlação parcial ordenados (PRCC - *Partial Rank Correlation Coefficient*).

Em razão da escolha do método de amostragem do hiper-cubo latino, que gera uma amostragem aleatória, não podem ser utilizados os métodos baseados na variância para analisar a sensibilidade dos parâmetros.

Com a análise de sensibilidade é possível identificar os parâmetros que impactam significativamente no consumo de energia para

condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico das edificações residenciais.

3.10.4. Análise da influência do comportamento do usuário no consumo de energia e no percentual de horas de conforto térmico

A influência do comportamento do usuário no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico foi analisada com base na estatística descritiva. Os resultados foram apresentados por meio dos diagramas de caixa. O diagrama permite analisar a dispersão do consumo de energia e do percentual de conforto térmico nos diferentes cenários simulados.

No diagrama de caixa são apresentados os valores extremos (máximo e mínimo), a média e os limites entre o segundo e terceiro quartil (caixa do diagrama). Em resumo, a caixa do diagrama apresenta os 50% dos resultados mais prováveis.

3.10.5. Análise da influência dos principais parâmetros no desempenho da edificação e frequência

A análise da influência dos principais parâmetros no desempenho termoenergético das edificações residenciais foi realizada por meio de uma análise de frequência de ocorrência nos estilos de vida e comportamento dos usuários que apresentaram as maiores e menores dispersões no consumo de energia para condicionamento artificial ou no percentual de horas de conforto térmico.

A análise da frequência de ocorrência foi realizada com base nos resultados do diagrama de caixa, apresentando os resultados para primeiro e quarto quartis separadamente, e os resultados do segundo e terceiro quartis foram agrupados. As frequências de ocorrência foram calculadas conforme a equação abaixo.

$$\text{Frequência} = \frac{N^{\circ} \text{ de ocorrência do parâmetro}}{N^{\circ} \text{ de casos no quartil}} * 100$$

No qual:

Nº de ocorrência do parâmetro refere-se ao número de casos do parâmetro analisado no quartil;

Nº de casos no quartil refere-se total de casos do quartil;

Frequência é a percentual de casos do parâmetro analisado, expresso em %;

3.10.6. Análise do desempenho térmico e energético da família de 4 pessoas

No Brasil, a média de moradores por unidade habitacional é de 3,3, com uma variação entre 3,1 a 4,0 moradores, dependendo da região do país (IBGE, 2010). Para analisar o desempenho térmico e energético de uma família padrão brasileira, foram selecionados os casos simulados com uma família de 4 pessoas, considerando esta família como a padrão brasileira.

As análises da família padrão brasileira foram realizadas com base no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico das edificações. Os resultados foram apresentados por meio de gráficos de dispersão, no eixo “x” o percentual de horas de conforto térmico e no eixo “y” o consumo de energia para condicionamento artificial (kWh/pessoa/horas).

4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações termoenergéticas realizadas para investigar a influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais. Foram simulados 31.662 casos para o clima da cidade de Florianópolis, resultando em aproximadamente 3.750 horas de processamento computacional. A influência do comportamento do usuário foi analisada por meio do consumo de energia para condicionamento artificial (aquecimento e resfriamento) e do percentual de horas de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada. Os resultados da pesquisa foram divididos em seis análises. Análise estatística dos resultados das simulações termoenergética, apresentando os consumos do sistema de condicionamento artificial (aquecimento, resfriamento e o consumo anual do sistema de condicionamento artificial) e os percentuais de horas de conforto térmico. Foram analisados quatro indicadores de eficiência energética para edificações residenciais. A análise da influência dos parâmetros termofísicos e do comportamento do usuário foram desenvolvidas por meio do método de análise de sensibilidade, identificando os principais parâmetros que influenciam no desempenho das edificações residenciais. Também foi analisada a influência dos diferentes cenários de usuário e comportamento no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico. Para os cenários que apresentaram os maiores e menores consumos, foram analisadas as características termofísicas da envoltória e a influência do tamanho da família. A última análise comparou o desempenho térmico e energético dos quatro modelos de edificações residenciais com uma família de 4 pessoas.

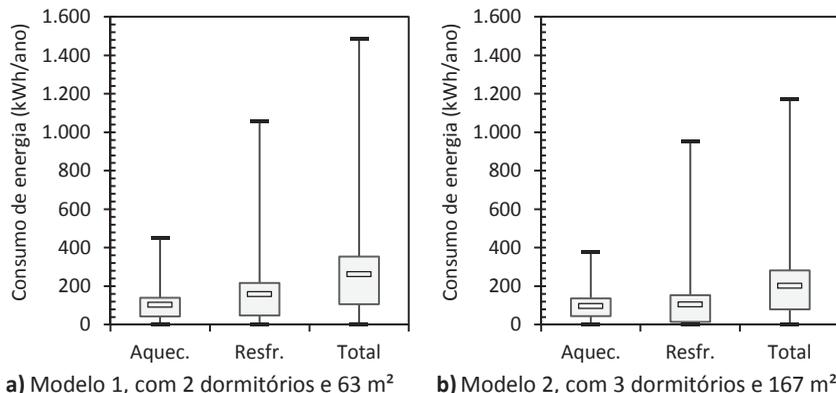
4.1. Análise estatística dos resultados das simulações

4.1.1. Modelos das edificações unifamiliares

A Figura 43 apresenta a variação do uso final de energia para condicionamento artificial dos modelos 1 e 2: consumo de aquecimento, consumo de resfriamento e o somatório do consumo de aquecimento e resfriamento (consumo total). O diagrama de caixa apresenta distribuição do consumo em quatro partes. A caixa do diagrama (2º e 3º quartil) contempla os resultados de 50% dos casos. A barra linear superior apresenta os resultados entre o 3º quartil e o valor máximo, a barra linear inferior apresenta os resultados entre 1º quartil e o valor mínimo, as barras superior e inferior representam 50% dos casos. O valor da média é apresentado com um “traço” na caixa do diagrama.

Os resultados mostram que a edificação unifamiliar com menor área (modelo unifamiliar 1 - Figura 43a) apresentou maior amplitude no consumo de energia para condicionamento artificial, quando comparada ao modelo unifamiliar 2 (Figura 43b) que tem maior área. O aumento da área construída da edificação não significa um aumento no consumo de energia para condicionamento artificial da edificação. Os resultados mostram que a edificação com maior área construída apresentou menores consumos de energia para condicionamento artificial. A redução no consumo de energia para condicionamento artificial ocorre devido as melhores condições de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada. As melhores condições de conforto térmico são proporcionadas devido a menor influência da envoltória e das cargas internas de ocupação no desempenho dos ambientes, em razão da menor área de superfícies expostas ao exterior pelo volume do ambiente.

Figura 43 – Resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial, aquecimento, resfriamento e o consumo total⁴ dos modelos unifamiliares 1 e 2.

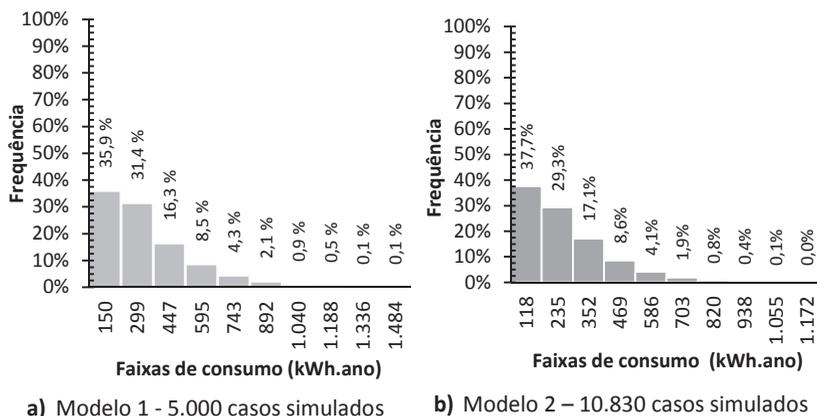


No modelo unifamiliar 1 foram simulados 5.000 casos. O consumo de energia para condicionamento artificial apresentou uma amplitude de 1.482 kWh.ano. No modelo 1, o caso que apresentou o menor consumo foi de 2,2 kWh.ano e o maior consumo foi de 1.484 kWh.ano, a média de consumo 1 foi de 261 kWh.ano (Figura 43a). Para o modelo 2 foram simulados 10.831 casos, que apresentaram uma amplitude do consumo de 1.171 kWh.ano. No modelo 2, o menor consumo foi de 0,6 kWh.ano e o maior consumo de 1.171 kWh.ano. A média do consumo foi de 160 kWh.ano (Figura 43b). Observa-se que há uma maior variação no consumo de energia para resfriamento nos dois modelos, já em relação ao consumo de energia para aquecimento, o modelo 1 apresenta uma amplitude maior em relação ao modelo 2. O modelo 1 é mais sensível as cargas térmicas, devido a maior razão da envoltória por volume.

⁴ No eixo das abcissas são apresentados os consumos de condicionamento artificial para aquecimento, resfriamento e o consumo total. O consumo total é somatório do consumo de energia para condicionamento artificial de aquecimento e resfriamento.

A Figura 44 apresenta o histograma do consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos 1 e 2. Observa-se que 67% dos casos simulados do modelo 1 encontram-se entre as faixas de consumo de 150 a 299 kWh.ano. Apenas 3,7% dos casos apresentaram consumo de energia para condicionamento artificial superior a 892 kWh.ano (Figura 44a). No modelo 2 também há uma concentração de casos entre as faixas de consumo de 118 a 352 kWh.ano, representado 84% dos casos simulados (Figura 44b).

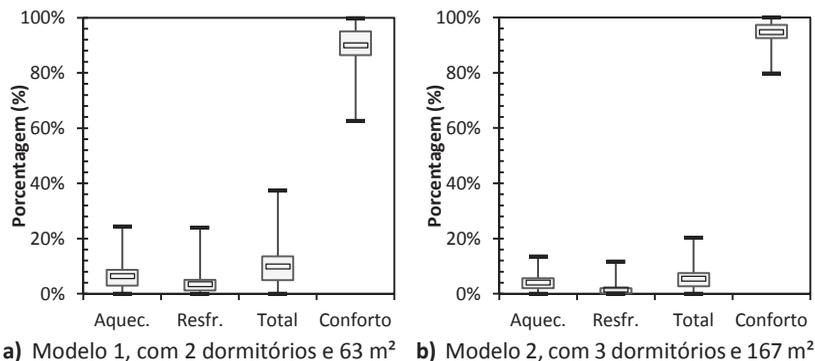
Figura 44 – Histograma do consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos unifamiliares 1 e 2.



Além do consumo de energia para condicionamento artificial também foi analisado o percentual de horas de conforto térmico durante o período de ocupação da edificação. O modelo unifamiliar 1 apresentou uma variação no percentual de horas de conforto térmico de 66% a 100%, a média foi de 90% (Figura 45a). No modelo 2, o percentual de horas de conforto térmico variou de 80% a 100%, apresentado uma média de 95% das horas ocupadas em conforto térmico (Figura 45b). O percentual de uso do sistema de condicionamento artificial é apresentado na Figura 45, separados em percentual de horas para aquecimento e resfriamento. A média de uso do sistema de condicionamento artificial foi de 10% no modelo 1, a média de aquecimento resultou em 6% e resfriamento de 4% das horas ocupadas

(Figura 45a). A maior demanda de condicionamento artificial no modelo 1 foi de 37% das horas ocupadas. O modelo 2 apresentou uma demanda menor de uso do sistema de condicionamento artificial, quando comparado com o modelo 1. A média de uso do sistema de condicionamento artificial foi de 5% das horas ocupadas e o maior percentual de uso foi de 20% (Figura 45b). No modelo 2, a maior demanda de uso do sistema de condicionamento artificial é para aquecimento, a demanda de resfriamento é baixa.

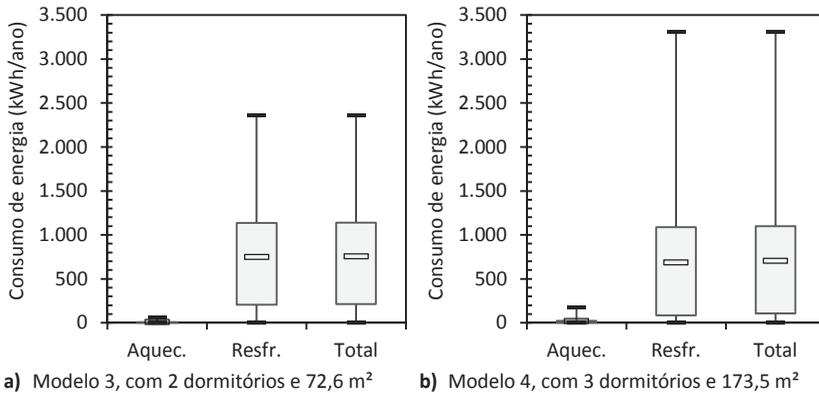
Figura 45 – Resultados do percentual de uso do sistema de condicionamento artificial e do percentual de horas de conforto adaptativo dos modelos unifamiliares 1 e 2.



4.1.2. Modelos multifamiliares 3 e 4

A variação dos consumos de energia para condicionamento artificial (aquecimento e resfriamento) dos modelos multifamiliares 3 e 4 é apresentada na Figura 46. Observa-se que o consumo de energia para condicionamento artificial é predominante para resfriamento, em ambos os modelos multifamiliares. O consumo de energia para aquecimento foi baixo em ambos os modelos. A redução no consumo de energia para aquecimento deve-se a menor área de paredes expostas ao exterior, minimizando as perdas de calor através da envoltória da edificação.

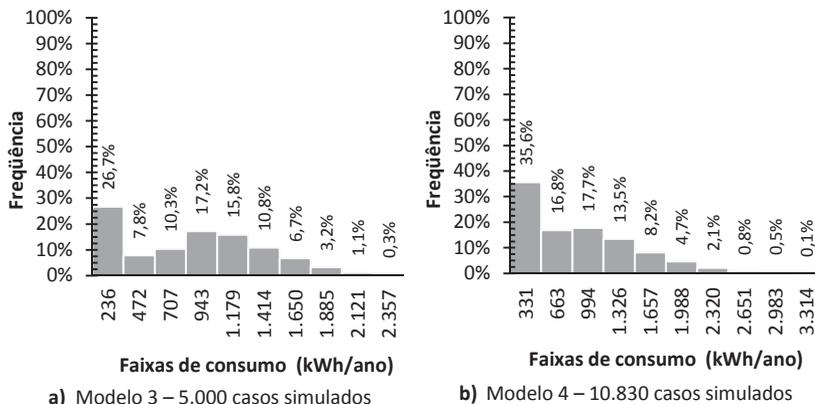
Figura 46 - Resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial, aquecimento, resfriamento e total dos modelos multifamiliares 3 e 4.



O modelo multifamiliar 4 (Figura 46b) apresentou uma dispersão maior no consumo de energia para condicionamento artificial (0 a 3.314 kWh.ano), quando comparado com a dispersão do consumo (0,5 a 2.357 kWh.ano) do modelo multifamiliar 3 (Figura 46a). Observa-se que nos casos com menores consumos do modelo multifamiliar 4 (1º quartil) apresentaram baixa amplitude. Entretanto, nos casos com os maiores consumos a amplitude é maior (4º quartil), variando de 1.098 a 3.314 kWh.ano (Figura 46b). A média de consumo de energia do sistema de condicionamento artificial foi de 702,9 kWh.ano para o modelo multifamiliar 4 e de 755,9 kWh.ano para o modelo multifamiliar 3.

Os histogramas do consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos multifamiliares 3 e 4 são apresentados na Figura 47. Observa-se que no modelo 3 há uma distribuição dos casos simulados entre as faixas de 236 a 1.885 kWh.ano (Figura 47a), a maior concentração encontra-se na faixa de consumo de até 236 kWh.ano. No modelo 4, 35,6% dos casos consumiram até 331 kWh.ano e 96,5% dos casos simulados consumiram até 1.988 kWh.ano (Figura 47b).

Figura 47 - Histograma do consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos multifamiliares 3 e 4.

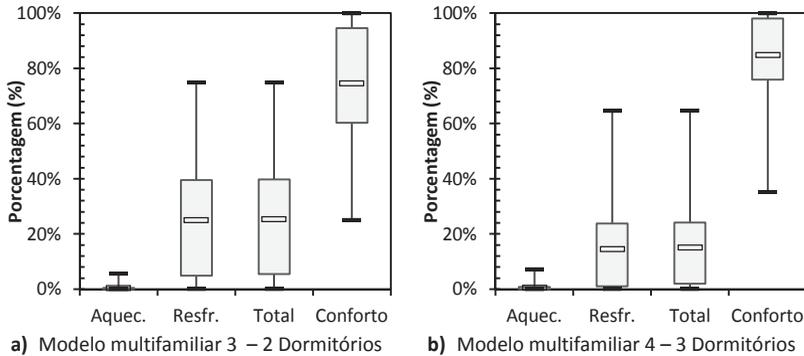


Na Figura 48 apresenta-se o tempo de uso do sistema de condicionamento artificial e o percentual de horas de conforto térmico, com base nos métodos de conforto térmico. A unidade habitacional com maior área construída (modelo multifamiliar 4) apresentou menor amplitude no percentual de horas de uso do sistema de condicionamento artificial, em relação ao modelo multifamiliar 3. Em relação às horas de uso do sistema de condicionamento artificial, observa-se que ambos os modelos apresentam poucas horas de uso para aquecimento. O uso do sistema de condicionamento artificial é predominante para resfriamento, no qual a média do tempo de uso no modelo 3 foi de 25% (Figura 48a) e no modelo 4 foi de 15% (b). Os casos que apresentaram o maior tempo de uso do sistema de condicionamento artificial foram de 75% das horas ocupadas no modelo 3 e de 65% no modelo 4.

Em relação ao percentual de horas de conforto térmico, observa-se que o modelo multifamiliar 3 apresentou uma variação entre 25% a 100% das horas ocupadas (Figura 48a), com um valor médio de 75%. No modelo multifamiliar 4 a média de horas em conforto foi de 85%, o

menor percentual foi de 35% e o maior de 100% das horas ocupadas em conforto térmico (Figura 48b).

Figura 48 - Resultados do tempo de uso do sistema de condicionamento artificial e horas de conforto adaptativo dos modelos multifamiliares 3 e 4.



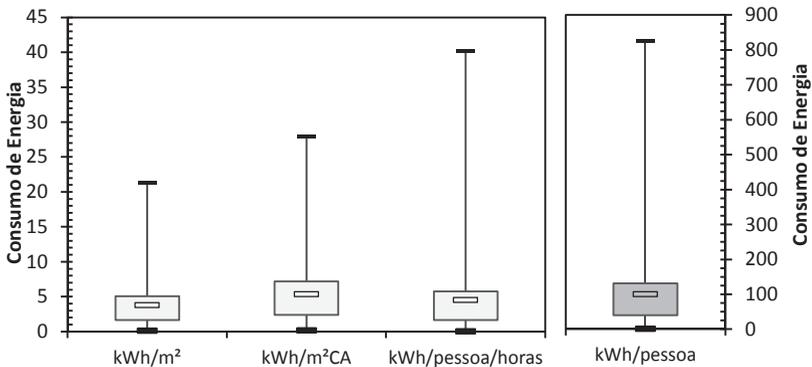
O modelo multifamiliar 4 apresentou menor amplitude no percentual de horas de conforto térmico, quando comparado com o modelo multifamiliar 3. Observa-se que o modelo 4 resultou em menor percentual de uso do sistema de condicionamento artificial. Entretanto, apresentou maior amplitude no consumo de energia para condicionamento artificial, que o modelo 3. O aumento da área da edificação (modelo 4) proporcionou melhores condições de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada, porém em alguns casos do modelo 4 apresentaram os maiores consumos de energia para condicionamento artificial (4º quartil). Para alguns casos, o aumento da área proporcionou um aumento no consumo de energia, devido ao maior volume dos ambientes condicionados artificialmente.

4.2. Análise do indicador de eficiência energética

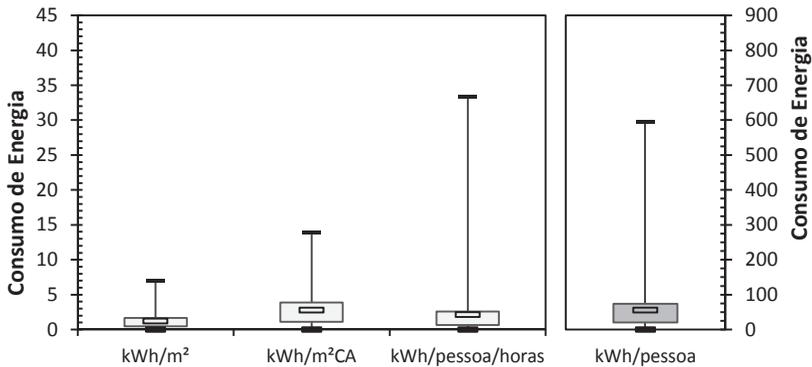
4.2.1. Análise do indicador de eficiência energética dos modelos unifamiliares

Foram analisados diferentes indicadores de eficiência energética: consumo por m^2 (kWh/m^2), consumo por m^2 da área com sistema de condicionamento artificial (kWh/m^2CA), consumo per capita ($kWh/pessoa$) e o consumo per capita por horas de ocupação da edificação ($kWh/pessoa/horas$). A Figura 49 apresenta os diferentes indicadores de eficiência energética para os modelos unifamiliares (1 e 2). Observa-se que o indicador de eficiência energética kWh/m^2 do modelo 1 (Figura 49a) apresenta o consumo máximo de energia do sistema de condicionamento artificial de 21,28 kWh/m^2 . O consumo máximo no indicador de kWh/m^2CA foi de 27,90. No modelo 2 (Figura 49b), os maiores consumos nos indicadores de eficiência foram de 7,02 kWh/m^2 e 13,98 kWh/m^2CA . Para os indicadores de consumo por pessoa ($kWh/pessoa$) e consumo por pessoa nas horas ocupadas ($kWh/pessoa/horas$), observa-se que os maiores valores foram de 825,9 $kWh/pessoa$ e 40,1 $kWh/pessoa/horas$ no modelo1. No modelo 2, os maiores valores foram de 595,7 $kWh/pessoa$ e 33,4 $kWh/pessoa/horas$. Os consumos médios foram de 55,9 $kWh/pessoa$ e 2,14 $kWh/pessoa/horas$.

Figura 49 – Análise dos indicadores de eficiência energética nos modelos unifamiliares



a) Modelo unifamiliar 1, com dois dormitórios e área construída de 67,0 m².



b) Modelo unifamiliar 2, com três dormitórios e área construída de 167,0 m².

A Tabela 17 apresenta a comparação dos casos com os maiores valores de consumos nos indicadores de eficiência energética dos modelos unifamiliares 1 e 2. Observa-se que o modelo 2 (1.171,81 kWh.ano) apresenta uma redução de 12,6% no consumo anual de energia para condicionamento artificial em relação ao modelo 1 (1.340,67 kWh.ano). Quando analisado através do indicador de eficiência energética kWh/m², a redução no indicador é de 67% entre os modelos. O modelo 2 tem

maior área (104,0 m²) que o modelo 1, desta forma impacta significativamente o indicador de eficiência energética kWh/m². Comparando os casos através do indicador kWh/m²CA também há uma diferença de aproximadamente 50% entre os modelos, enquanto a diferença no consumo anual é de apenas 12,6%. Os indicadores kWh/m² e kWh/m²CA não expressaram uma relação adequada para avaliar a eficiência energética em edificações que possuem diferentes áreas. Em relação aos indicadores de kWh/pessoa e kWh/pessoa/horas, os maiores valores são referentes aos casos com padrão de ocupação de 1 pessoa. O consumo do modelo 1 foi de 825,9 kWh/pessoa e de 40,14 kWh/pessoa/horas. No modelo 2 o consumo foi de 595,80 kWh/pessoa e de 33,35 kWh/pessoa/horas. No modelo 1, a média de horas de ocupação dos ambientes de permanência prolongada é de 20h34 e no modelo 3 é de 17h51. O desempenho dos casos está relacionado à combinação dos parâmetros, do comportamento do usuário e das propriedades termofísicas da envoltória da edificação. A edificação apresentou uma demanda de uso do sistema de condicionamento artificial de 33,2% das horas ocupadas.

Tabela 17 - Comparação entre os casos que apresentaram os maiores valores nos indicadores de consumo dos modelos unifamiliares 1 e 2.

Modelos	Casos ⁵	Indicadores de eficiência				Consumo anual
		kWh/m ²	kWh/m ² CA	kWh/pessoa/horas	kWh/pessoa	kWh.ano
Modelo 1	c00718	21,28	27,90	14,62	446,89	1.340,67
	c04276	13,11	22,91	40,14	825,93	825,93
Modelo 2	c05472	7,02	13,98	3,29	130,20	1.171,81
	c03386	3,57	11,20	33,35	595,80	595,80

4.2.2. Análise do indicador de eficiência energética nos modelos multifamiliares

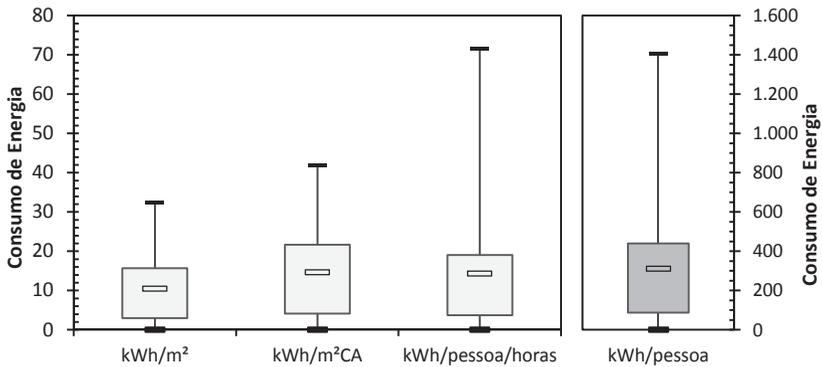
No modelo multifamiliar 3 (Figura 50a) observa-se que o consumo médio de energia para condicionamento artificial nos indicadores que consideram a área construída e a área condicionada foram de 10,41 kWh/m² e de 14,63 kWh/m²CA. No modelo 4 os consumo médios foram de 4,36 kWh/m² e de 6,78 kWh/m²CA. Nota-se que no modelo 4 há uma redução significativa nos consumos médios em relação ao modelo 3, resultando em 58% no indicador kWh/m² e 54% no indicador kWh/m²CA. No modelo 3 o valor máximo foi de 32,46 kWh/m² e no modelo 4 (Figura 50b) foi de 20,56 kWh/m², resultando em uma diferença de 36%. Quando se compara o consumo total, o modelo 3 apresentou um consumo anual de 2.356 kWh.ano e o modelo 4 de 3.314 kWh.ano,

⁵ Características dos casos apresentados da Tabela 17.

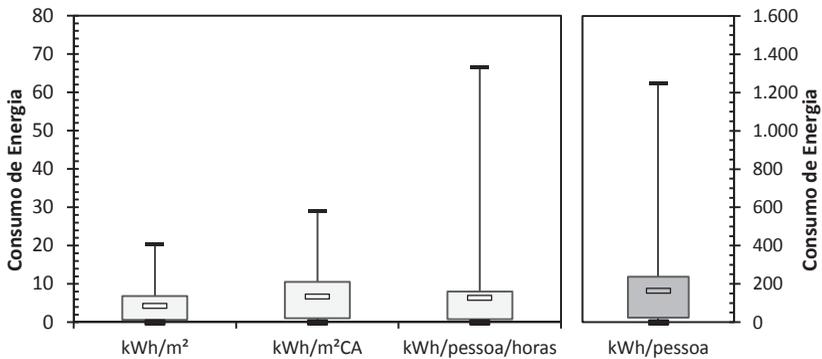
Caso	Usuário	Família	Comportamento	Conforto	U _{ParExt}	C _{tPar}	α _{Par}	U _{Cob}	C _{tCob}	α _{Cob}	C _{Equ}
c00718	Tradicional	3	Passivo	ASHRAE	3,6	27,0	0,7	1,9	27,0	0,7	60/120
c04276	Tradicional	1	Intermediário	ASHRAE	2,2	11,0	0,7	1,9	27,0	0,7	120/240
c03386	Flexível	1	Passivo	ASHRAE	3,6	27,0	0,7	1,9	113,0	0,7	60/120
c05472	Tradicional	9	Intermediário	ASHRAE	3,6	27,0	0,7	1,9	113,0	0,7	60/120

pode-se observar que no modelo 4 o consumo é 40% superior ao modelo 3. O indicador kWh/m²CA apresenta a mesma inconsistência do indicador kWh/m². Os indicadores kWh/pessoa e kWh/pessoa/horas apresentam uma maior dispersão nos casos entre o terceiro quartil e o valor máximo (que corresponde a 25% do total dos casos simulados), a maior dispersão ocorre no modelo 4. O modelo 4 apresentou um consumo máximo de 1.249 kWh/pessoa, no modelo 3 o consumo foi 11,5% superior ao do modelo 4. No indicador kWh/pessoa/horas a diferença no consumo máximo foi de aproximadamente 7% entre os modelos. O modelo 3 apresentou o maior consumo, que foi de 71,67 kWh/pessoa/horas. No modelo 3, os consumos médios foram de 311,23 kWh/pessoa e de 14,33 kWh/pessoa/horas, enquanto no modelo 4 foram de 164,48 kWh/pessoa e de 6,43 kWh/pessoa/horas. O modelo 4 apresenta consumos médios menores (kWh/pessoa e kWh/pessoa/horas), em função do modelo ter 3 dormitórios e maior número de pessoas ocupando a edificação.

Figura 50 – Análise dos indicadores de eficiência energética nos modelos multifamiliares.



a) Modelo multifamiliar 3, com dois dormitórios e área construída de 72,6 m².



b) Modelo multifamiliar 4, com três dormitórios e área construída de 173,5 m².

Os indicadores de eficiência energética apresentados na Tabela 18 permitem algumas observações interessantes sobre como avaliar o desempenho das edificações residenciais. Observa-se que o modelo 4 (caso c10630) apresentou valores menores nos indicadores de kWh/m² e kWh/m²CA, as diferenças para o modelo 3 foram de 11,9 kWh/m² (de 32,46 kWh/m² para 20,56 kWh/m²) e de 12,75 kWh/m²CA (de 41,95 kWh/m²CA para 29,20 kWh/m²CA). Nos indicadores de kWh/m² e kWh/m²CA quanto maior a área da edificação menor o valor do

indicador. Esta interferência também foi observada nos modelos unifamiliares. Observa-se que não há uma relação entre os indicadores de eficiência energética kWh/m² e kWh/m²CA com os indicadores de kWh/pessoa e kWh/pessoa/horas. Os casos que apresentaram baixo desempenho nos indicadores kWh/pessoa e kWh/pessoa/horas (c02096 e c03885) resultaram em um desempenho mediano nos indicadores kWh/m² e kWh/m²CA.

Tabela 18 - Comparação entre os casos que apresentaram os maiores indicadores de consumo dos modelos multifamiliares.

Modelos	Casos ⁶	Indicadores de eficiência				Consumo anual
		kWh/m ²	kWh/m ² CA	kWh/pessoa/horas	kWh/pessoa	kWh.ano
Modelo 3	c01729	32,46	41,95	15,42	471,32	2.356,61
	c02096	17,63	30,58	71,67	1.280,22	1.280,22
Modelo 4	c10630	20,56	29,20	9,30	368,23	3.314,09
	c03885	7,39	15,68	66,70	1.191,46	1.191,46

A análise dos diferentes indicadores de eficiência energética possibilitou identificar qual é o melhor indicador para avaliar o desempenho energético das edificações residenciais.

Os indicadores kWh/m² e kWh/m²CA não expressaram uma relação adequada para a avaliação da eficiência energética em edificações que possuem diferentes áreas construídas. Os resultados mostraram que não há relação entre consumo e área da edificação. As edificações com

⁶ Características dos casos apresentados na Tabela 18.

Caso	Usuário	Família	Comportamento	Conforto	U _{ParExt}	Ct _{Par}	α _{Par}	Ct _{For}	Ci _{Equ}
c01729	Tradicional	5	Passivo	ASHRAE	0,5	11,0	0,7	113,0	120/240
c02096	Flexível	1	Passivo	ASHRAE	0,5	146,0	0,7	113,0	120/240
C10630	Tradicional	9	Passivo	ASHRAE	0,5	11,0	0,5	113,0	120/240
c05472	Tradicional	5	Passivo	PMV	3,6	146,0	0,7	27,0	60/120

maior área apresentam indicadores de kWh/m² e kWh/m²CA menores que as edificações com menor área. A área da edificação impacta significativamente nos resultados dos indicadores kWh/m² e kWh/m²CA.

Os indicadores de eficiência energética kWh/pessoa e kWh/pessoa/horas relacionam o desempenho da habitação com base na sua função, garantindo as condições de habitabilidade, com ambientes confortáveis para os moradores.

Entre os diferentes indicadores analisados, o indicador kWh/pessoa/horas foi o que apresentou a maior amplitude, permitindo melhor avaliação do consumo da edificação em função dos benefícios proporcionados para os usuários.

O consumo de energia per capita representa melhor a demanda de energia das edificações residenciais, pois muitas edificações podem ter baixa taxa de ocupação e grande área construída. Para expressar melhor o consumo per capita é importante considerar o tempo de ocupação da edificação, desta forma pode-se afirmar que o indicador kWh/pessoa/horas apresenta a melhor relação de consumo de energia para a função das edificações residenciais.

4.3. Análise de sensibilidade dos parâmetros simulados

Os resultados da análise de sensibilidade mostram a variabilidade do consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico. A análise de sensibilidade identificou as variáveis independentes que mais influenciaram nos resultados das simulações.

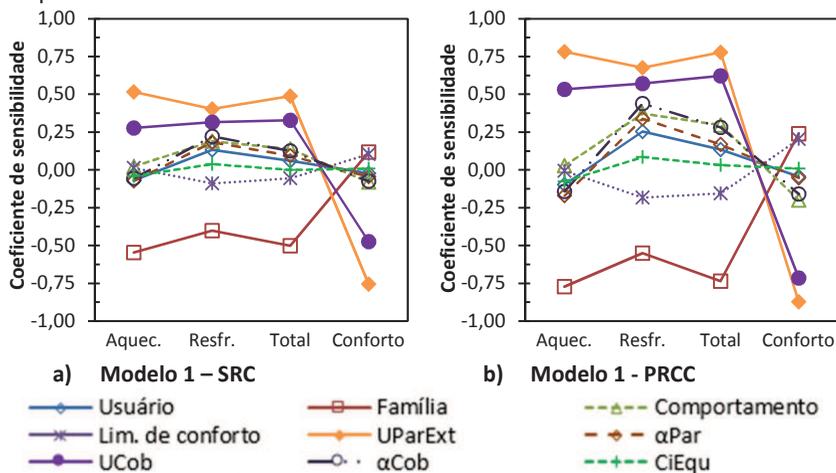
A Figura 51 apresenta os coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para os modelos unifamiliares 1 e 2, que representam a influência dos parâmetros de entrada no consumo de energia para condicionamento artificial (aquecimento, resfriamento e total) e no percentual de horas de conforto adaptativo. Os coeficientes negativos indicam que, quando ocorre um aumento no valor do parâmetro, há uma redução na variável

dependente. Inversamente, o coeficiente positivo indica que quando aumenta o valor do parâmetro, aumenta a variável dependente.

Os dois parâmetros mais influentes no consumo total do modelo 1 foram a transmitância térmica da parede (U_{ParExt}) e da cobertura (U_{Cob}) da edificação (Figura 51a, b). No consumo de energia para resfriamento, a absorvância da cobertura (α_{Cob}) e a absorvância da parede (α_{Par}) foram o terceiro e quarto parâmetros, respectivamente, que mais influenciaram no consumo. Observa-se que o maior coeficiente negativo refere-se ao tamanho da família. Isso ocorre em razão do indicador de eficiência ser calculado pelo consumo per capita (kWh/pessoa/horas). A carga interna de equipamentos foi a variável independente que apresentou a menor influência na análise de sensibilidade, devido ao padrão de uso de equipamento estabelecer um período pequeno de uso.

No indicador percentual de horas de conforto, observa-se que a influência é inversamente proporcional ao consumo. Quanto maior a transmitância térmica da parede e da cobertura proporcionaram uma redução nas horas de conforto, já no parâmetro família, quanto menor proporciona maior percentual de horas de conforto na edificação.

Figura 51 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 1



Na Tabela 19 apresenta-se a ordem de classificação de cada variável independente em relação às quatro variáveis dependentes (aquecimento, resfriamento, total e % horas de conforto térmico). Os métodos SRC e PRCC apresentaram a mesma ordem de classificação dos parâmetros mais influentes nas variáveis dependentes de consumo para aquecimento e conforto. No consumo de resfriamento houve uma troca na ordem de classificação entre o segundo e o terceiro parâmetro (Família e U_{Cob}). No consumo do sistema de condicionamento artificial também houve uma troca entre o primeiro e o segundo parâmetro (Família e U_{ParExt}). Os coeficientes de determinação (R^2) no método SRC variaram entre 0,54 a 0,81; o menor valor foi para o consumo de resfriamento e o maior valor para a variável dependente do percentual de horas de conforto térmico. No método PRCC os coeficientes de determinação variaram entre 0,68 a 0,81; apresentando o coeficiente de determinação no consumo de resfriamento e maior no percentual de horas de conforto térmico.

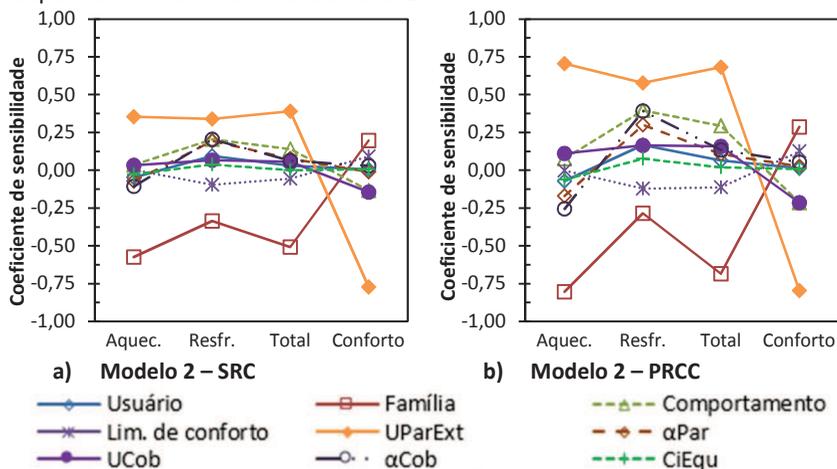
Tabela 19 – Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 1.

Parâmetros	Aquecimento		Resfriamento		Total		Conforto	
	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC
Usuário	5	6	6	6	7	8	9	9
Família	1	1	2	3	1	2	3	3
Comportamento	8	8	7	7	5	5	6	5
Lim. de conforto	9	9	8	8	8	7	4	4
U_{ParExt}	2	2	1	1	2	1	1	1
α_{Par}	4	4	5	5	6	6	8	8
U_{Cob}	3	3	3	2	3	3	2	2
α_{Cob}	6	5	4	4	4	4	5	6
Ci_{Equ}	7	7	9	9	9	9	7	7
R^2	0,64	0,77	0,55	0,70	0,63	0,77	0,81	0,81

No modelo unifamiliar 2, observa-se que os parâmetros mais influentes foram a transmitância térmica das paredes externas (positiva) e a família (negativamente) para as variáveis de consumo (Figura 52). No percentual de horas de conforto, observa-se que os parâmetros da transmitância térmica das paredes externas e da família apresentam

desempenho inversamente proporcional ao consumo. O coeficiente do parâmetro da família passou a ser positivo (0,19 no SRC e 0,28 no PRCC) e a transmitância térmica da parede passou a ser negativo (-0,77 no SRC e -0,79 no PRCC). Na análise de sensibilidade realizada pelo método SRC (Figura 52a) observa-se pequenas diferenças entre os coeficientes da segunda à nona ordem de classificação nas quatro variáveis dependentes. No método PRCC as diferenças entre os coeficientes são maiores. O parâmetro da carga interna de equipamentos (Ci_{Equ}) foi o que apresentou menor sensibilidade às variáveis dependentes, para os dois métodos de análise de sensibilidade (SRC e PRCC).

Figura 52 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 2



Os métodos SRC e PRCC apresentaram a mesma ordem de classificação para os principais parâmetros do modelo unifamiliar 2 (Tabela 20). Na análise de sensibilidade do consumo de resfriamento ocorreu alteração na ordem de classificação entre o segundo e o oitavo parâmetro. Os coeficientes de determinação da análise de sensibilidade do consumo pelo método SRC foram de 0,47 no consumo de aquecimento, de 0,37 no resfriamento e de 0,44 no consumo total. Os coeficientes de determinação (R^2) do método PRCC variaram entre 0,53 a 0,74;

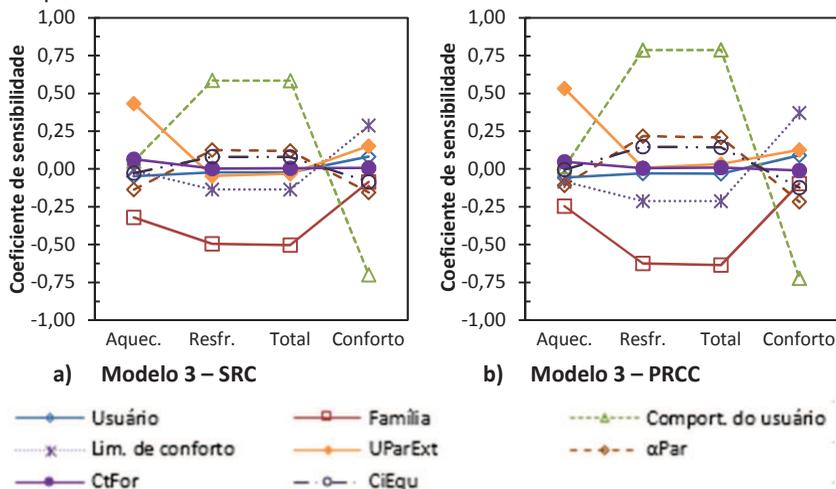
apresentando o menor coeficiente de determinação no consumo de resfriamento e o maior no consumo de aquecimento.

Tabela 20 - Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo unifamiliar 2

Variáveis independentes	Aquecimento		Resfriamento		Total		Conforto	
	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC
Usuário	5	7	7	6	8	8	9	8
Família	1	1	2	5	1	1	2	2
Comportamento	6	6	3	2	3	3	4	3
Lim. de conforto	9	9	6	8	7	6	5	5
U_{ParExt}	2	2	1	1	2	2	1	1
α_{Par}	4	4	5	4	4	7	7	7
U_{Cob}	7	5	8	7	6	4	3	4
α_{Cob}	3	3	4	3	5	5	6	6
Ci_{Equ}	8	8	9	9	9	9	8	9
R^2	0,47	0,74	0,37	0,53	0,44	0,66	0,67	0,65

No modelo multifamiliar 3 (Figura 53), observa-se que há uma alteração nas variáveis mais influentes em relação aos modelos unifamiliares. Os parâmetros mais influentes no consumo de resfriamento e no total (coeficiente positivo) foi o comportamento do usuário, já o maior coeficiente negativo foi o parâmetro da família. As variáveis independentes mais influentes no consumo de aquecimento foram a transmitância térmica das paredes (coeficiente positivo), a família e a absorvância solar das paredes (coeficientes negativos). Em relação ao percentual de horas de conforto térmico, os maiores coeficientes de sensibilidade (positivos) foram o parâmetro do limite de conforto e da transmitância térmica das paredes. Os parâmetros mais influentes (negativamente) foram o comportamento do usuário e a absorvância solar das paredes. O parâmetro da transmitância térmica da parede apresentou baixa sensibilidade nas variáveis dependentes de consumo de resfriamento, no total e no percentual de horas de conforto térmico.

Figura 53 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo multifamiliar 3



No modelo multifamiliar 3 os métodos de análise de sensibilidade SRC e PRCC apresentaram a mesma ordem de classificação até o terceiro nível, exceto no consumo de resfriamento que houve uma alteração entre o terceiro e quarto parâmetro (

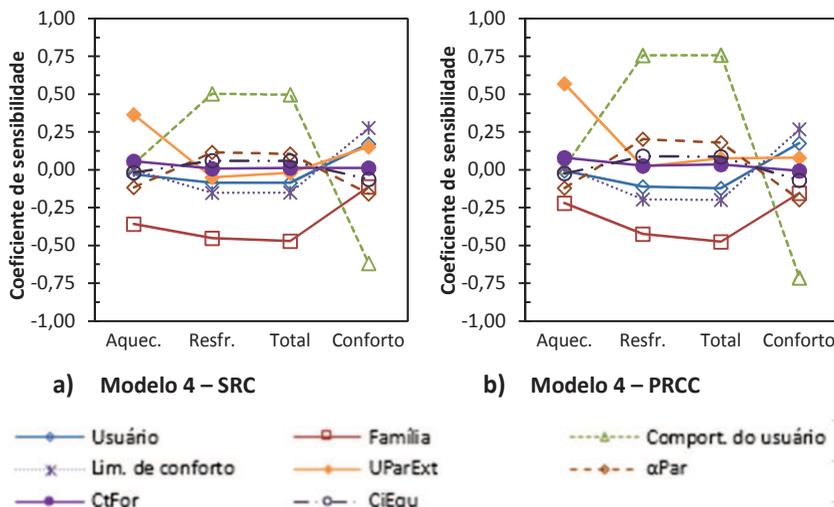
Tabela 21). A análise do consumo para aquecimento apresentou os menores coeficientes de determinação (R^2) do modelo multifamiliar 3, foram de 0,31 para o método SRC e 0,32 para PRCC. O baixo valor do coeficiente de determinação indica a não linearidade no consumo de aquecimento. No consumo de resfriamento, total e no percentual de horas de conforto, os coeficientes de determinação foram superiores a 0,6.

Tabela 21 - Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo multifamiliar 3.

Variáveis independentes	Aquecimento		Resfriamento		Total		Conforto	
	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC
Usuario	6	5	7	6	7	7	7	7
Família	2	2	2	2	2	2	5	6
Comportamento	5	7	1	1	1	1	1	1
Lim. de conforto	8	4	3	4	3	3	2	2
U_{ParExt}	1	1	6	7	6	6	4	4
α_{Par}	3	3	4	3	4	4	3	3
CtFor	4	6	8	8	8	8	8	8
Ci_{Equ}	7	8	5	5	5	5	6	5
R^2	0,31	0,32	0,63	0,70	0,64	0,71	0,64	0,57

Na Figura 54 são apresentadas as análises de sensibilidade pelos métodos SRC e PRCC do modelo multifamiliar 4. As análises de sensibilidade apresentaram as mesmas tendências do modelo multifamiliar 3. Os parâmetros mais influentes foram o comportamento dos usuários (positivo) e a família (negativo) no consumo de energia para resfriamento e no consumo total. No consumo de aquecimento, as variáveis independentes que apresentaram maior sensibilidade foram a transmitância térmica das paredes (positiva) e a família (negativa).

Figura 54 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PRCC do modelo multifamiliar 4.



No modelo multifamiliar 4 os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,50 a 0,64. Observa-se que há uma redução nos valores dos coeficientes de determinação (R^2) das variáveis dependentes do modelo multifamiliar 4 em relação ao modelo 3 (Tabela 22). O aumento da área construída e o volume da edificação reduz a importância das propriedades térmicas da envoltória, apresentando uma correlação fraca entre os parâmetros da envoltória com o consumo de energia para condicionamento artificial da edificação.

Tabela 22 - Ordem de classificação dos métodos SRC e PRCC para as quatro variáveis dependentes do modelo multifamiliar 4

Variáveis independentes	Aquecimento		Resfriamento		Total		Conforto	
	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC	SRC	PRCC
Usuário	6	8	5	5	5	5	3	4
Família	2	2	2	2	2	2	6	5
Comportamento	5	6	1	1	1	1	1	1
Lim. de conforto	8	7	3	4	3	3	2	2
U_{ParExt}	1	1	7	8	7	7	5	6
α_{Par}	3	3	4	3	4	4	4	3
CtFor	4	4	8	7	8	8	8	8
Ci_{Equ}	7	5	6	6	6	6	7	7
R^2	0,50	0,63	0,51	0,64	0,51	0,64	0,54	0,54

Por meio da análise de sensibilidade foi possível identificar os parâmetros que mais influenciaram no consumo de condicionamento artificial e nas horas de conforto térmico dos quatro modelos adotados nesta pesquisa.

Percebe-se que os parâmetros mais influentes são diferentes para edificações unifamiliares e multifamiliares. Outro ponto é a complexidade na definição das estratégias de eficiência energética, pois os parâmetros mais influentes são diferentes para cada variável dependente analisada (consumo de aquecimento, resfriamento, artificial e % horas de conforto térmico). No caso das edificações unifamiliares, a transmitância térmica das paredes e cobertura são os parâmetros que mais impactaram no consumo de energia para condicionamento artificial. Nos modelos multifamiliares, a transmitância térmica das paredes apresentou pouca influência no consumo para resfriamento e no consumo de energia para condicionamento artificial, influenciando apenas no consumo de energia para aquecimento.

As propriedades termofísicas da envoltória apresentam desempenhos diferentes para os consumos de energia para aquecimento, resfriamento e no percentual de horas de conforto. Estas diferenças dificultam a definição de soluções que proporcionem a redução no consumo de energia da edificação.

No Brasil, as normas que regulamentam o desempenho térmico de edificações residenciais estabelecem limites para as propriedades termofísicas da envoltória. A pesquisa mostrou a complexidade na definição das propriedades termofísicas para a envoltória. As soluções são diferentes para consumo de energia para aquecimento, resfriamento e para as condições de conforto térmico, dependendo do comportamento do usuário, do padrão de ocupação e do tipo da edificação (unifamiliar e multifamiliar). Os recursos da simulação termoenergética podem auxiliar os arquitetos e engenheiros na escolha das propriedades termofísicas da envoltória para o uso racional de energia, considerando a influência do usuário e da geometria da edificação no desempenho.

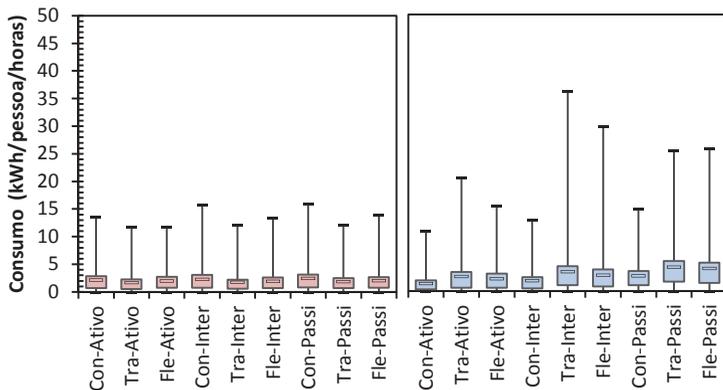
4.4. Análise da influência do comportamento do usuário

4.4.1. Análise da influência do comportamento do usuário nos modelos de edificações unifamiliar

Foram realizadas análises para identificar a influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético das edificações. Para avaliar o desempenho das edificações foi considerado o consumo de energia para condicionamento artificial (soma de aquecimento e resfriamento) e o percentual de horas de conforto térmico.

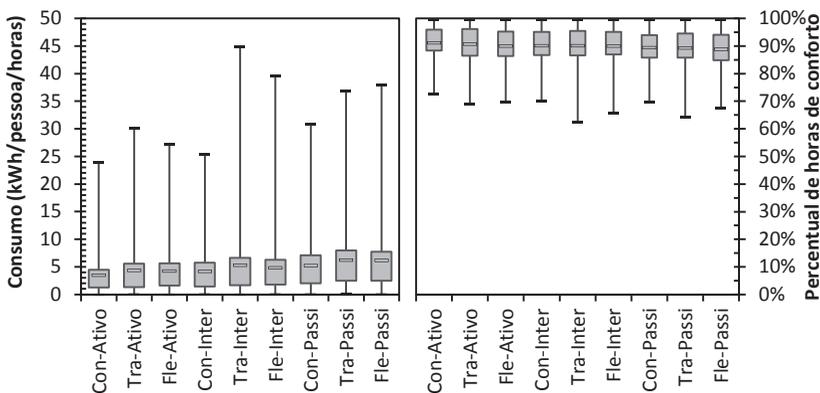
A Figura 55 apresenta os resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial do modelo 1. No eixo “X” dos gráficos são apresentadas as informações em relação ao usuário e ao comportamento do usuário. A nomenclatura “Con-Ativo” refere-se ao usuário com estilo de vida contemporâneo e comportamento ativo. O “Tra” refere-se ao usuário com estilo de vida tradicional e o “Fle” o usuário com estilo de vida flexível. Em relação à nomenclatura do comportamento, o “Inter” refere-se ao comportamento intermediário e o “Passi” refere-se ao comportamento passivo.

Figura 55 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo unifamiliar 1



a) Consumo de aquecimento

b) Consumo de resfriamento



c) Consumo total do Sist. de Cond. artificial

d) Percentual de horas de conforto

Observa-se que a média do consumo de energia para aquecimento (Figura 55a) não apresentou grandes variações no modelo unifamiliar 1 (75% dos casos consumiram até 3,48 kWh/pessoa/horas). O usuário com estilo de vida contemporâneo e comportamento passivo foi o que apresentou o maior consumo de aquecimento

(16,05kWh/pessoa/horas)⁷. O percentual de horas de conforto térmico do caso com maior consumo foi de 71,3% das horas ocupadas (com base nos limites do método PMV).

Os cenários dos usuários contemporâneos (Ativo, Intermediário e Passivo) apresentaram maiores amplitudes no consumo de energia para aquecimento (Figura 55a), quando comparados ao consumo de energia para resfriamento (Figura 55b). A maior amplitude no consumo de energia para aquecimento é reflexo do padrão de ocupação noturno nos cenários contemporâneos.

O usuário com estilo de vida contemporâneo/ativo (Con-Ativo) foi o que apresentou a menor dispersão no consumo de energia para resfriamento (Figura 55b), o valor mínimo foi de 0,23 e o máximo foi de 10,15 kWh/pessoa/horas. Entretanto, o usuário que apresentou a maior dispersão foi aquele com estilo de vida tradicional/intermediário (Tra-Inter), o consumo mínimo foi de 0,82 e o máximo de 31,16 kWh/pessoa/horas.

Em relação ao consumo do sistema de condicionamento artificial (Figura 55c), observa-se que o comportamento é semelhante ao consumo de resfriamento, apresentando os mesmos estilos de vida com maior e menor dispersão (tradicional/intermediário e contemporâneo/ativo). A menor média de consumo de energia para resfriamento foi de 3,56 kWh/pessoa/horas para o estilo de vida contemporâneo/ativo e a maior média foi de 5,11 kWh/pessoa/horas para o estilo de vida flexível/passivo, resultando em uma diferença de 43%.

A média de horas ocupadas em conforto foi de aproximadamente 90% para os três estilos de vida e comportamento do usuário (Figura 55d). O estilo de vida tradicional/intermediário (Tra-Inter) foi o que apresentou a maior dispersão, o valor mínimo foi de 63% e o máximo de 100% das

⁷ Usuário/Comportamento	Família	Conforto	U_{par}	Ct_{par}	α_{par}	U_{cob}	Ct_{cob}	α_{cob}	Ci_{equ}	Aquec.	Resfr.	Total	Conforto
Contemporâneo-Passivo	1	PMV	3,6	27,0	0,5	1,9	27,0	0,7	120	16,05	14,92	30,97	71,3%

horas ocupadas em conforto. A menor dispersão ocorreu no estilo de vida contemporâneo/ativo (Con-Ativo), que foi de 73% a 100% das horas ocupadas em conforto térmico.

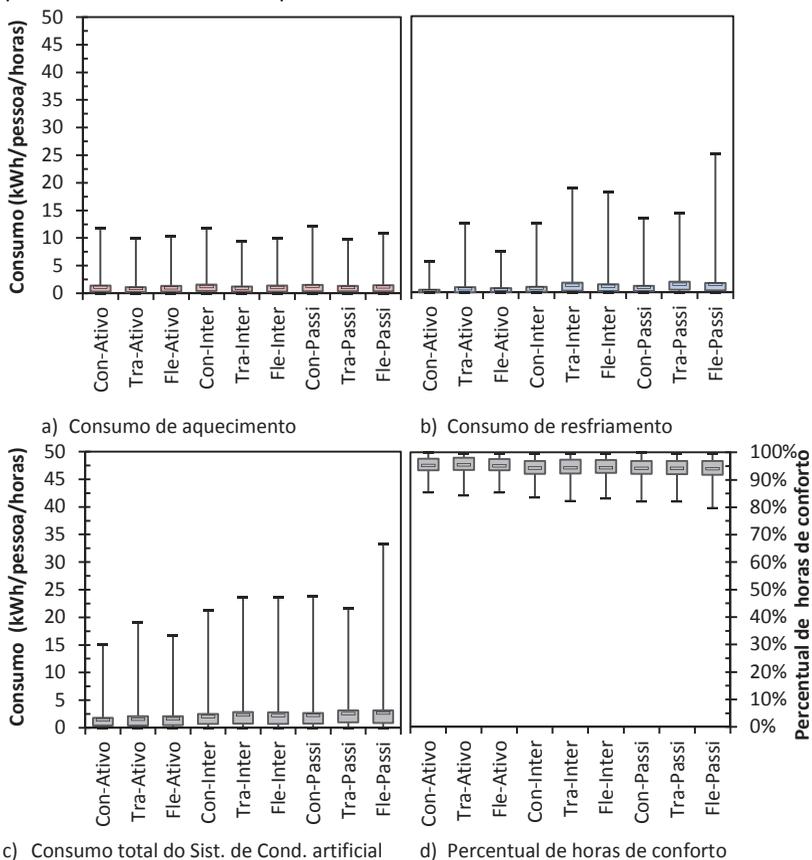
Os resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial do modelo unifamiliar 2 são apresentados na Figura 56. No consumo de energia para aquecimento (Figura 56a) o estilo de vida contemporâneo foi o que apresentou a maior dispersão, nas três condições de comportamento simuladas (ativo, intermediário, passivo). O consumo máximo foi de aproximadamente 12,0 kWh/pessoa/horas no usuário contemporâneo. A média de consumo para aquecimento variou entre 0,95 a 1,34 kWh/pessoa/horas. Em relação ao consumo de energia para resfriamento (Figura 56b), observa-se que a média de consumo variou entre 0,35 a 1,53 kWh/pessoa/horas. O modelo unifamiliar 2 apresentou um consumo médio para resfriamento menor que o consumo médio para aquecimento. O maior consumo de resfriamento (25,20 kWh/pessoa/horas) ocorreu no usuário com estilo de vida flexível e comportamento passivo. No usuário com estilo de vida flexível/passivo (Fle-Passi) 25% dos casos apresentaram consumo de resfriamento entre 1,68 a 25,20 kWh/pessoa/horas. Os usuários com estilo de vida contemporâneo/ativo e flexível/ativo apresentaram uma dispersão menor no consumo de energia para resfriamento, em relação ao consumo de aquecimento.

A média de consumo total de energia para condicionamento artificial (Figura 56c) variou de 1,52 a 2,71 kWh/pessoa/horas. O usuário com estilo de vida contemporânea/ativo (Con-Ativo) foi o que apresentou a menor média. A maior média refere-se ao usuário com estilo de vida flexível/passivo (Fle-Passi), que também apresentou a maior dispersão no consumo de energia para condicionamento artificial.

Os resultados em relação ao percentual de horas de conforto térmico do modelo unifamiliar 2 são apresentados na Figura 56d. O percentual mínimo de horas em conforto térmico no modelo unifamiliar 2 foi de 80% das horas ocupadas, no usuário com estilo de vida flexível e comportamento passivo (Fle-Passi). A menor variação nas horas de

conforto ocorreu no usuário com estilo de vida contemporâneo/ativo (Con-Ativo), o mínimo foi de 86% das horas ocupadas em conforto térmico. A diferença entre os usuários com menor e maior dispersão no percentual de horas em conforto é de 6%. A diferença no consumo total de energia para condicionamento artificial foi maior, podendo alcançar o dobro do consumo máximo. A média de conforto em todos os cenários foi de 95% das horas ocupadas. A média de conforto do modelo unifamiliar 2 foi 5% superior ao modelo unifamiliar 1, refletindo em uma redução no consumo de energia para condicionamento artificial da edificação.

Figura 56 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo unifamiliar 2



Observa-se que as médias de consumo total do sistema de condicionamento artificial do modelo unifamiliar 2 foram menores que as médias do modelo unifamiliar 1. A edificação com maior área (modelo unifamiliar 2) apresentou consumos menores de energia para condicionamento artificial em relação à edificação com menor área (modelo unifamiliar 1).

Os resultados mostraram que nas edificações unifamiliares os usuários contemporâneos apresentaram as menores dispersões no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico, para os três comportamentos (ativo, intermediário e passivo). Exceto o usuário contemporâneo/passivo (Con-Passi) do modelo unifamiliar 2. Entretanto, os usuários tradicionais apresentaram as maiores dispersões no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico. Exceto o cenário do usuário tradicional/passivo (Tra-Passi) do modelo unifamiliar 2. Os usuários flexíveis apresentaram dispersões superiores aos usuários contemporâneos e inferiores na maioria dos usuários tradicionais, para os três comportamentos. O usuário flexível/passivo (modelo unifamiliar 2) foi a única situação que apresentou a maior dispersão, em relação ao usuário tradicional e contemporâneo.

Em relação ao comportamento do usuário (ativo, intermediário, passivo), observa-se que para o mesmo estilo de vida do usuário o comportamento ativo apresentou as menores dispersões no consumo de energia para condicionamento artificial dos modelos unifamiliares 1 e 2.

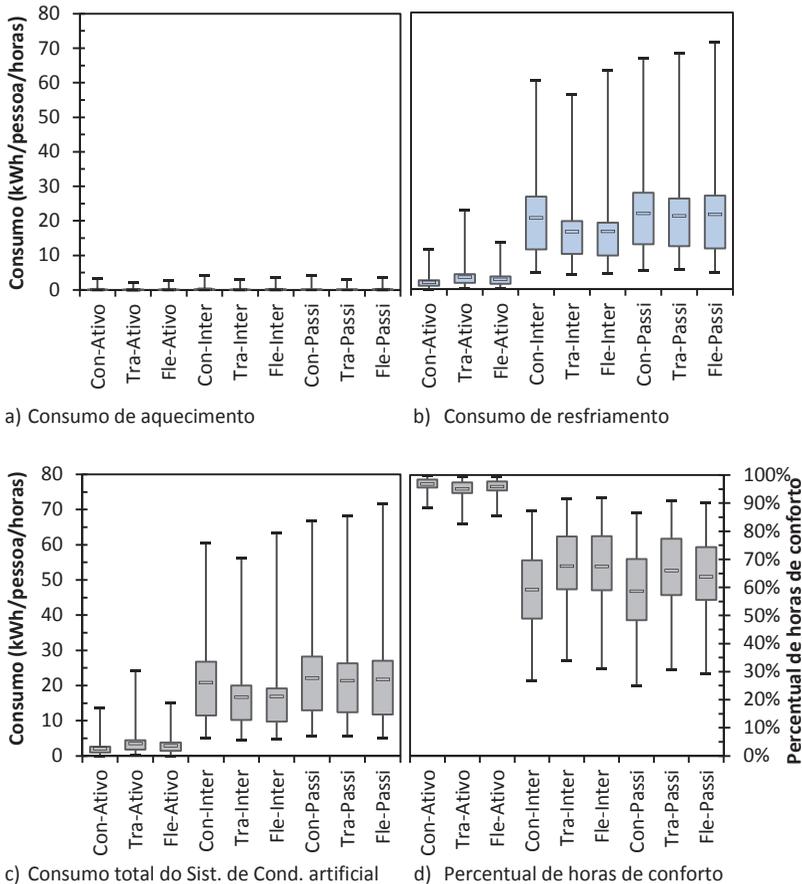
4.4.2. Análise da influência do comportamento do usuário nos modelos de edificações multifamiliares

No modelo multifamiliar 3, o consumo de energia para aquecimento (Figura 57a) é baixo, quando comparado com o consumo de energia para resfriamento. O consumo máximo de energia para aquecimento foi de 4,39 kWh/pessoa/horas no usuário com estilo de vida contemporâneo/passivo (Con-Passi).

Em relação ao consumo de energia para resfriamento (Figura 57b), observa-se que os usuários com comportamento ativo apresentaram as menores dispersões no consumo. O usuário com estilo de vida contemporâneo/ativo (Com-Ativo) apresentou a menor dispersão entre todos os cenários. Entretanto, o usuário com estilo de vida flexível/passivo (Fle-Passi) foi o que apresentou a maior dispersão no consumo de resfriamento. No consumo de energia para condicionamento artificial (Figura 57c) apresenta o mesmo comportamento do consumo para resfriamento, devido ao consumo de resfriamento predominar no uso final de energia para condicionamento artificial.

Em relação ao percentual de horas de conforto (Figura 57d), observa-se que os usuários que apresentaram as menores dispersões no consumo de resfriamento foram os que apresentaram as melhores condições de conforto térmico. O usuário com estilo de vida contemporânea/ativo (Con-Ativo) foi o que apresentou a menor variação no percentual de conforto térmico, com o mínimo de 89% das horas ocupadas em conforto. Porém, o usuário com estilo de vida contemporânea/passivo (Con-Passi) foi o que apresentou o menor percentual de horas de conforto térmico, resultando em 25% das horas ocupadas.

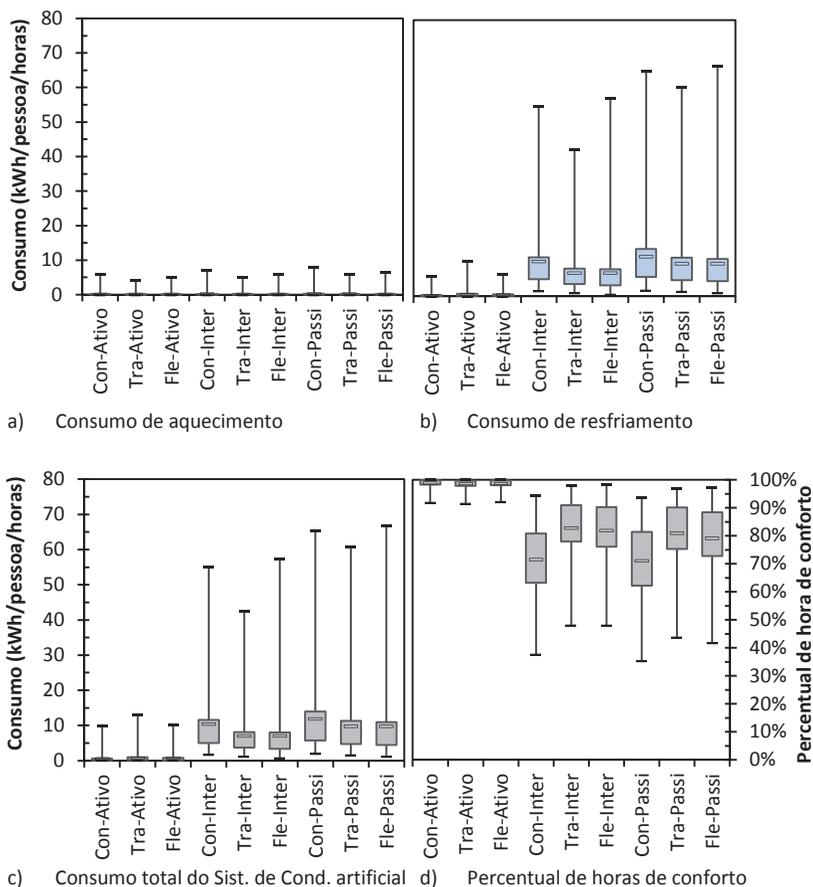
Figura 57 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo multifamiliar 3



Os comportamentos intermediários (Inter) e passivos (Passi) impactaram significativamente no consumo de energia para resfriamento e no percentual de horas de conforto térmico do modelo multifamiliar 3.

Na Figura 58 são apresentados os resultados da variação do consumo de energia para condicionamento artificial e do percentual de conforto térmico do modelo multifamiliar 4.

Figura 58 - Variação do consumo de energia para condicionamento artificial para os três estilos e comportamentos dos usuários – Modelo multifamiliar 4



Observa-se que o consumo de aquecimento (Figura 58a) apresentou um desempenho semelhante ao modelo multifamiliar 3, no qual todos os cenários de usuários e comportamento apresentaram consumo de aquecimento inferior ao consumo de resfriamento. O usuário com estilo de vida flexível/passivo (Fle-Passi) foi o que resultou apresentando a maior dispersão no consumo de resfriamento. O consumo mínimo foi de 0,95 e o máximo foi de 66,7 kWh/pessoa/horas. No usuário flexível/passivo 25% dos casos apresentaram consumo de resfriamento superior a 10,83

kWh/pessoa/horas (limite do terceiro quartil). Observa-se que a maioria dos casos simulados com comportamento intermediário e passivo (aproximadamente 75%) apresentaram consumos de energia para condicionamento artificial inferiores a 13,73 kWh/pessoa/horas (Figura 58c). O valor refere-se ao limite do terceiro quartil do usuário com estilo de vida contemporâneo/passivo (Con-Ativo).

Referente ao percentual de horas de conforto térmico (Figura 58d) no modelo multifamiliar 4, observa-se que os cenários com comportamento ativo foram os que apresentaram os melhores resultados. O usuário com estilo de vida contemporâneo/passivo (Con-Passi) apresentou o menor percentual de horas de conforto (35% das horas ocupadas⁸), o valor máximo do cenário foi de 94%. O baixo desempenho dos usuários contemporâneos com comportamento intermediário e passivo está vinculado à condição de sombreamento dos cenários, no qual acontece somente nas horas que há ocupação na edificação. No usuário contemporâneo não há ocupação no período diurno. A falta de sombreamento no período diurno impacta significativamente no desempenho termoenergético do modelo multifamiliar 4. Nota-se que os cenários do usuário tradicional intermediário e passivo (Tra-Inter e Tra-Passi) apresentaram menores amplitudes no consumo de energia para condicionamento artificial comparado ao usuário contemporâneo. A redução no consumo é reflexo da operação dos dispositivos de sombreamento, que para os comportamentos intermediários e passivos ocorre somente durante o período de ocupação da edificação. No usuário tradicional há ocupação durante o período diurno (8h às 18h).

Nas edificações multifamiliares (3 e 4), os usuários com comportamento ativo (contemporâneo, tradicional e flexível) apresentaram as menores dispersões no percentual de conforto térmico, resultando nas menores

⁸ Tabela com as características do caso com menor percentual de conforto térmico.

Usuário	Família	Comportamento	Conforto	U_{ParExt}	Ct_{Par}	α_{Par}	Ct_{For}	CI_{Equ}
Tradicional	9	Passivo	ASHRAE	0,5	11,0	0,7	113,0	120/240 W

dispersões no consumo de energia para condicionamento artificial. O modelo multifamiliar 4 que possui a maior área apresentou as menores dispersões no consumo e no percentual de conforto térmico. O aumento da área da edificação proporcionou maior percentual de conforto térmico nos ambientes de permanência prolongada, proporcionando menores consumos de energia para condicionamento artificial na maioria dos casos simulados. O aumento nas horas de conforto é proporcionado pela redução da importância das propriedades termofísicas da envoltória no desempenho dos ambientes, em função da área da envoltória pelo volume da edificação. No Apêndice D são apresentados os gráficos com as temperaturas internas entre os diferentes modelos.

As edificações unifamiliares e multifamiliares apresentam diferentes usos finais de energia para condicionamento artificial. Nas edificações unifamiliares o consumo de energia para aquecimento é de aproximadamente o dobro do consumo das edificações multifamiliares. Contudo, nas edificações multifamiliares o consumo de energia para aquecimento é baixo, quando comparado com o consumo de energia para resfriamento.

Os resultados mostraram que os usuários com comportamento intermediário e passivo apresentaram maior influência no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de conforto térmico das edificações multifamiliares. Isso ocorre devido a menor influência das propriedades térmicas da envoltória e a maior influência do comportamento do usuário no desempenho da edificação. No entanto, nas edificações unifamiliares os usuários com comportamento intermediário e passivo não apresentaram grande impacto no desempenho das edificações.

4.5. Análise da influência dos principais parâmetros no desempenho da edificação

Foram selecionados os principais parâmetros que influenciaram no consumo total de energia para condicionamento artificial da edificação

e nas horas de conforto térmico. Para as edificações unifamiliar os principais parâmetros analisados foram: transmitância térmica da parede e da cobertura, absorvância à radiação solar da parede e da cobertura e o tamanho da família. Nos modelos multifamiliares foram analisados os parâmetros: transmitância térmica da parede, absorvância à radiação solar da parede e o tamanho da família.

Foram analisados os principais parâmetros termofísicos da envoltória e o tamanho da família nos cenários que apresentaram as maiores e menores amplitudes no consumo de energia do sistema de condicionamento artificial. Para a edificação unifamiliar 1 os cenários analisados foram: usuário contemporâneo/ativo, usuário tradicional/intermediário. No modelo unifamiliar 2 os cenários analisados foram: usuário flexível/ativo e usuário flexível/passivo. Para o modelo multifamiliar 3 foram selecionados os cenários: usuário tradicional/ativo e usuário tradicional/passivo. No modelo multifamiliar 4 foram analisados os cenários: usuário flexível/ativo e usuário contemporâneo/passivo.

4.5.1. A influência dos principais parâmetros no desempenho dos modelos de edificações unifamiliares

A Figura 59 apresenta a análise de frequência de ocorrência das características dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida contemporânea/ativo. A análise foi realizada em função dos quartis do diagrama de caixa, apresentando os resultados de frequência de ocorrência para 4º quartil (25% dos casos), 2º e 3º quartis (50% dos casos) e para o 1º quartil (25% dos casos).

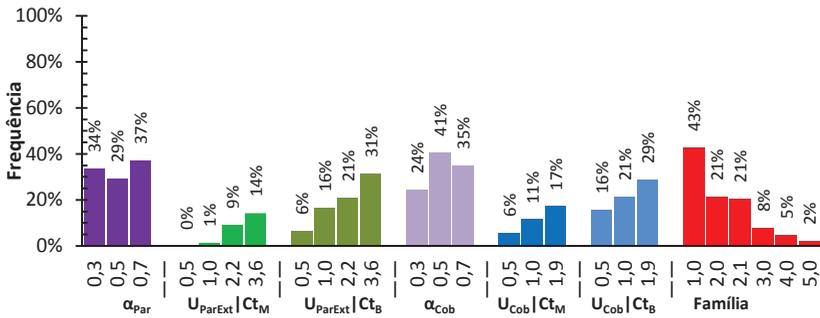
O tamanho da família foi o parâmetro que apresentou a maior frequência de ocorrência no cenário do estilo de vida contemporânea/ativo (4º quartil - Figura 59a), no qual 43% dos casos possuem apenas um morador. Em relação aos parâmetros da envoltória da edificação, observa-se que a absorvância da parede de 0,7 tem uma

ocorrência de 37% e as paredes com capacidade térmica baixa (C_{tB}) apresentaram frequência de ocorrência de 74%. No componente construtivo da cobertura, a transmitância térmica de $1,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (com C_{tB}) apresentou a maior ocorrência (29%). Nos casos com os maiores consumos as absorptâncias da cobertura com maior frequência foram 0,5 (41%) e 0,7 (35%).

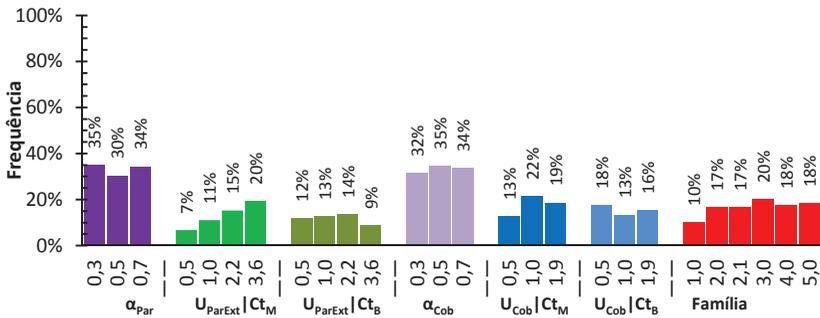
Observa-se que no 2º e 3º quartis (Figura 59b) do usuário contemporâneo/ativo há ocorrência de todos os parâmetros analisados, e pequenas diferenças entre os níveis de cada parâmetro. Os parâmetros que apresentaram as menores ocorrência foram a transmitância térmica da parede $0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com C_t média (7%) e a transmitância de $3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com C_t baixa (9%). A família com um morador apresentou ocorrência de 10%.

Os resultados dos casos com os menores consumos de condicionamento artificial do cenário (1º quartil) são apresentados na Figura 59c. Nota-se que as paredes com capacidade térmica média (C_{tM}) apresentaram ocorrência de 80%. No entanto, não houve ocorrência nos casos com os menores consumos das paredes com transmitância térmica de $3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com capacidade térmica baixa e média. A absorptância da parede com maior frequência foi 0,7 (36%) e em todos os casos a transmitância térmica da parede foi menor que $1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Em relação ao componente construtivo da cobertura, observa-se que em 80% dos casos a transmitância térmica menor ou igual a $1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e 65% das coberturas possuem capacidade térmica média nos casos do 1º quartil. As absorptâncias da cobertura de 0,3 e 0,5 apresentaram uma frequência de 73% nos casos do 1º quartil. O parâmetro da família apresenta uma tendência crescente em função do número dos moradores, com menor ocorrência para a família de um morador (3%) e maior ocorrência para a família de 5 moradores (30%).

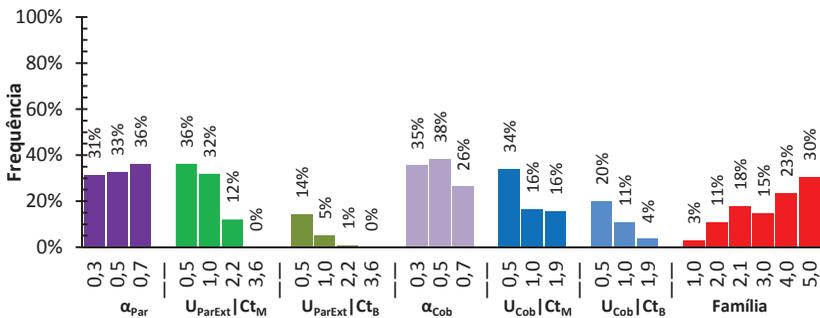
Figura 59 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida contemporâneo/ativo, modelo unifamiliar 1



a) 4º Quartil



b) 2º e 3º Quartis



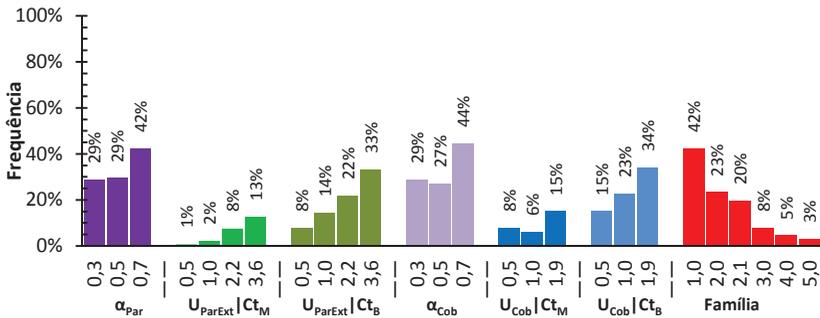
c) 1º Quartil

Os resultados mostraram que no usuário com estilo de vida contemporâneo/ativo as propriedades termofísicas da envoltória são parâmetros importantes para reduzir o consumo de energia com condicionamento artificial.

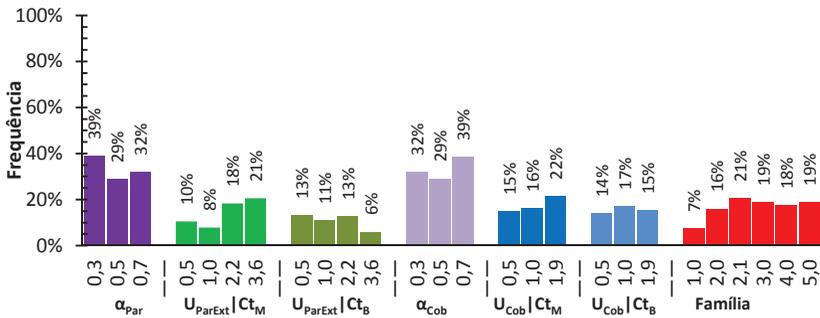
No usuário com estilo de vida tradicional/intermediário (Figura 60), observa-se que há uma maior frequência de ocorrência no 4º quartil (Figura 60a) de componentes construtivos com capacidade térmica baixa (C_{tB}). Entretanto, a maior frequência de ocorrência no 1º quartil (Figura 60c) é de componentes construtivos com capacidade térmica média.

Nos casos com os menores consumos do 1º quartil (Figura 60c), as paredes com capacidade térmica média apresentaram uma frequência de 81%, e a frequência das coberturas com capacidade térmica média foi de 65%. As absorptâncias da cobertura de 0,3 e 0,5 apresentaram uma frequência de ocorrência de 75%, e as absorptâncias da parede de 0,3 e 0,5 representam 70% nos casos com os menores consumos do usuário tradicional/intermediário. Em relação ao 2º e 3º quartil (Figura 60b), observa-se que há uma distribuição equilibrada entre as opções de paredes e coberturas com capacidade térmica baixa e média. As paredes com capacidade térmica média apresentaram uma frequência de 56%. Para a cobertura a frequência foi de 52% com capacidade térmica média e de 48% para capacidade térmica baixa. No parâmetro família, a menor ocorrência (7%) ocorreu para o cenário com um morador (Figura 60b), no entanto, para os cenários com dois a cinco moradores há uma frequência de ocorrência equilibrada, variando entre 16% a 21%.

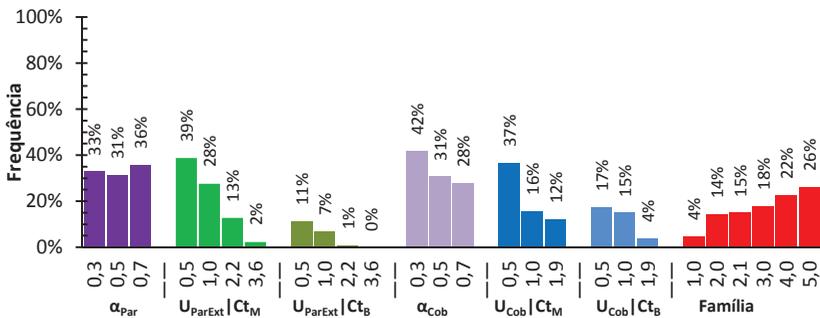
Figura 60 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/intermediário, modelo unifamiliar 1



a) 4º Quartil



b) 2º e 3º Quartis



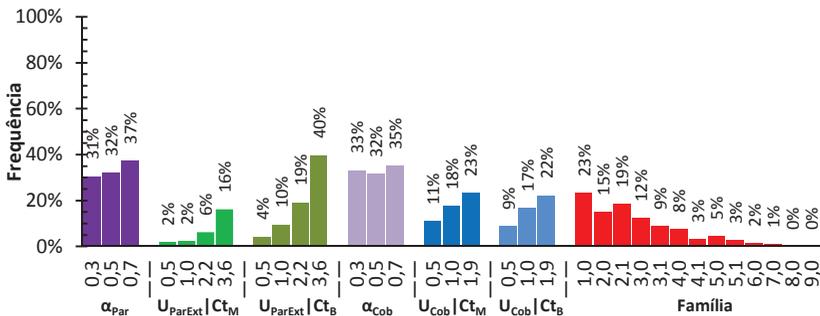
c) 1º Quartil

Para o usuário tradicional/intermediário as propriedades termofísicas da envoltória também foram importantes para reduzir o consumo de energia para condicionamento artificial, semelhante ao usuário contemporâneo/ativo. No modelo unifamiliar 1 a envoltória da edificação apresenta maior influência que o comportamento do usuário no consumo de energia para condicionamento artificial.

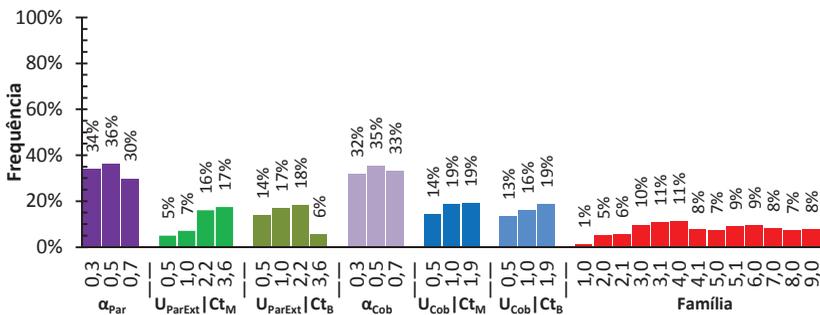
Na Figura 61 são apresentados os resultados do usuário com estilo de vida flexível/ativo do modelo unifamiliar 2. Observa-se que 56% dos casos que apresentaram os maiores consumos (4º quartil - Figura 61a) possuem transmitância térmica da parede de $3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, no qual 40% com capacidade térmica baixa. Os casos com absorptância da parede de 0,7 representam 37%; com absorptância da cobertura 0,7 representam 35%. Em relação ao parâmetro família, as maiores frequências são para os casos com menor número de moradores, entre 1 e 3 moradores.

No 2º e 3º quartil (Figura 61b), nota-se que no parâmetro tamanho da família há uma distribuição equilibrada de ocorrência entre os casos de 3 a 9 moradores. A menor ocorrência do parâmetro família foram para os casos com 1 morador (1%). Em relação ao parâmetro da transmitância térmica da cobertura (U_{Cob}), as menores ocorrências foram para as coberturas com transmitância térmica de $0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com capacidade térmica baixa (13%) e média (14%). Em relação à absorptância da cobertura, não apresentaram grandes diferenças entre os três níveis simulados, variando de 32% a 35%. Observa-se que as paredes com capacidade térmica média e transmitância térmica de 0,5 e $1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ foram menos frequentes, como também a parede com transmitância térmica $3,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com capacidade térmica baixa. A absorptância da parede (α_{Par}) mais frequente é a 0,5 (36%), a segunda mais frequente é 0,3, com 34% de ocorrência.

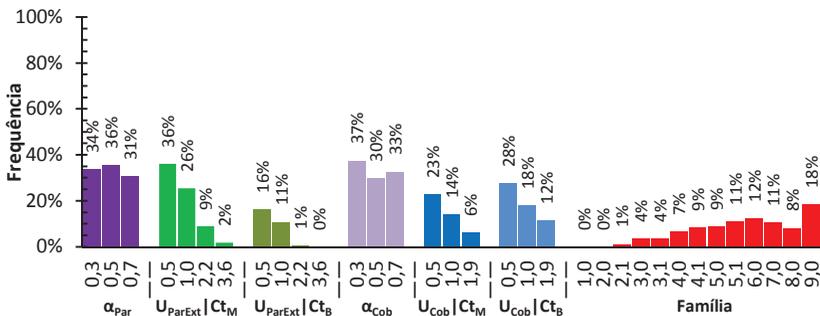
Figura 61 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/ativo, modelo unifamiliar 2



a) 4º Quartil



b) 2º e 3º Quartis



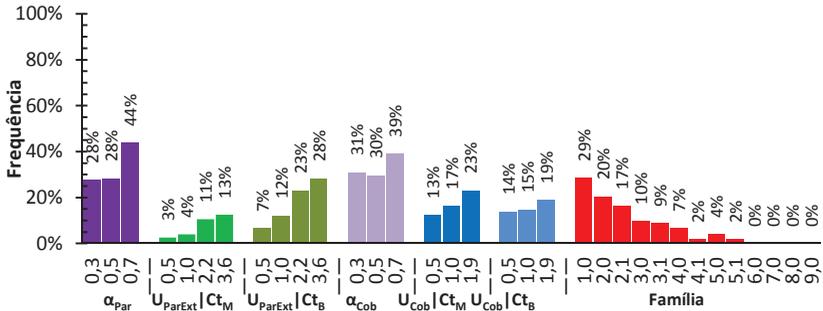
c) 1º Quartil

As características dos casos com os menores consumos de condicionamento artificial no usuário flexível/ativo são apresentadas na Figura 61c (1º quartil). Observa-se que no parâmetro da transmitância térmica da parede (U_{ParExt}), as maiores frequências de ocorrência foram para transmitância térmica de 0,5 e 1,0 W/m².K, com 36% e 25% para as paredes com capacidade térmica média, respectivamente. Para as paredes com capacidade térmica baixa, não há ocorrência na transmitância térmica da parede de 3,6 W/m².K. A absorvância da parede mais frequente é a 0,5 (36%), as absorvâncias 0,3 e 0,5 representam 70% dos casos do 1º quartil. A absorvância da cobertura com maior frequência é a 0,3 (37%). A transmitância térmica da cobertura com maior frequência (28%) foi a 0,5 W/m².K com capacidade térmica baixa. Em relação ao parâmetro família, nota-se que há uma variação de 1% a 18%.

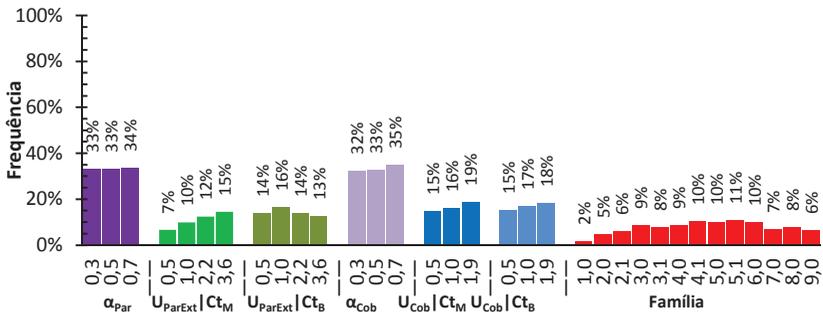
Os resultados de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/passivo do modelo unifamiliar são apresentados na Figura 62. Os maiores consumos de condicionamento artificial (4º quartil) são apresentados na Figura 62a. Observa-se que as características mais frequentes dos casos foram: absorvância da parede de 0,7 (44%); transmitância térmica da parede de 3,6 W/m².K (28%) com C_t baixa; absorvância da cobertura de 0,7 (39%); transmitância térmica da cobertura de 1,9 W/m².K (23%); e o tamanho da família com 1 morador (29%). Para as famílias com 6 a 9 moradores não houve ocorrência nos casos com os maiores consumos. A parede com transmitância térmica de 0,5 W/m².K e capacidade térmica média apresentou a menor frequência de ocorrência (3%).

Os resultados do 2º e 3º quartil (Figura 62b) mostram uma distribuição equilibrada no parâmetro da absorvância da parede e da cobertura. A transmitância térmica da parede que apresentou a menor frequência de ocorrência foi 0,5 W/m².K com capacidade térmica média. A maior ocorrência foi para a parede com transmitância térmica de 1,0 W/m².K e capacidade térmica baixa. Com relação ao parâmetro da família, a maior frequência de ocorrência foi de 11% (5 moradores) e a menor de 2% (1 morador).

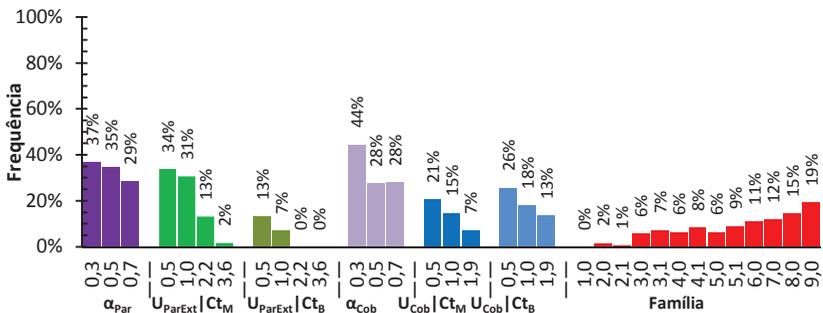
Figura 62 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/passivo, modelo unifamiliar 2



a) 4º Quartil



b) 2º e 3º Quartis



c) 1º Quartil

As características predominantes entre os casos que apresentaram os menores consumos (Figura 62c) foram: absorvância da parede de 0,3 (37%); transmitância térmica da parede de 0,5 W/m².K; absorvância da cobertura de 0,3 (44%); transmitância térmica da cobertura de 0,5 W/m².K (26%); e a família 9 moradores foi a mais frequente (19%). Observa-se que não há ocorrência da transmitância térmica da parede de 2,2 e 3,6 W/m².K com capacidade térmica baixa. No entanto, a parede com transmitância térmica de 3,6 W/m².K e capacidade térmica média a ocorrência foi de 2%.

Os resultados da análise das propriedades térmicas das edificações unifamiliares mostraram que as paredes com capacidade térmica baixa foram mais frequentes nos casos com maiores consumos de energia para condicionamento artificial, e nos casos com os menores percentuais de horas em conforto térmico. Entretanto, os componentes construtivos com capacidade térmica média foram mais frequentes nos casos com os menores consumos de condicionamento artificial, e nos casos com os maiores percentuais de horas de conforto térmico. A absorvância da parede apresenta um comportamento semelhante ao desempenho da capacidade térmica, maior frequência de absorvância 0,7 nos casos com os maiores consumos e nos casos com menores consumos maior frequência da absorvância 0,3.

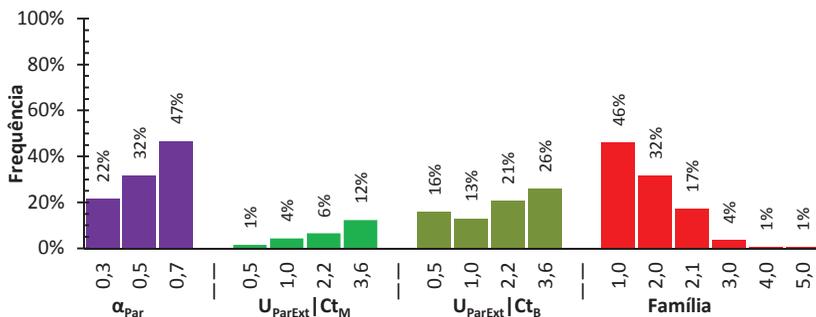
4.5.2. A influência dos principais parâmetros no desempenho dos modelos de edificações multifamiliares

Os resultados de frequência de ocorrência das características dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/ativo do modelo multifamiliar 3 são apresentados na Figura 63. Na Figura 64 são apresentados os resultados do usuário com estilo de vida tradicional/passivo do modelo multifamiliar 3.

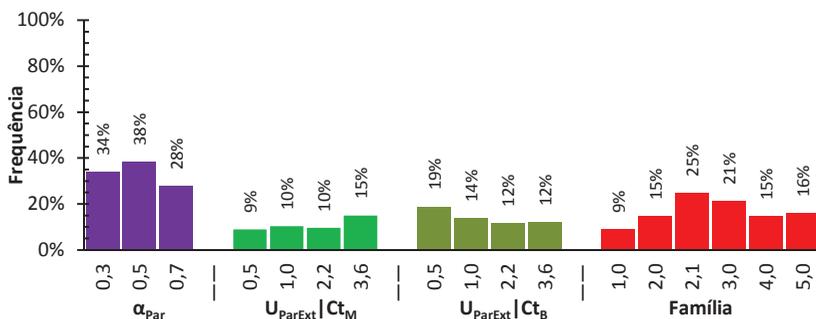
Observa-se que no usuário com estilo de vida tradicional/ativo, 76% dos casos possuem paredes com capacidade térmica baixa nos maiores consumos de energia para condicionamento artificial (4º quartil - Figura 63a). Entretanto, no usuário com estilo de vida tradicional/passivo (4º quartil - Figura 64a) a diferença de ocorrência de casos com capacidade térmica média e baixa é de 4%. As paredes com capacidade térmica média a ocorrência foi de 48% e as paredes com capacidade térmica baixa a ocorrência foi de 52%. No usuário tradicional/ativo a frequência de ocorrência da parede com transmitância térmica de $0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ é de apenas 1% (Figura 63a), já no usuário tradicional/passivo a ocorrência foi de 19% (Figura 64a). Em relação à absorvância da parede, a maior ocorrência foi para 0,7 (47%) no usuário tradicional/ativo (Figura 63a). No usuário tradicional/passivo a absorvância da parede 0,7 apresentou uma ocorrência de 42% (Figura 64a). Em relação ao tamanho da família no usuário tradicional/passivo (Figura 64a), nota-se que tamanho das famílias com 1 e 2 moradores apresentaram uma ocorrência de 72% e 27%, respectivamente. No usuário com estilo de vida tradicional/ativo (Figura 63a) a ocorrência com 1 morador foi de 46% e de 32% para a família com 2 moradores.

Os resultados do 2º e 3º quartil são apresentados na Figura 63b para o usuário com estilo de vida tradicional/ativo e na Figura 64b para o usuário tradicional/passivo. No usuário tradicional/ativo as maiores ocorrências foram: absorvância da parede de 0,5 (38%); transmitância térmica da parede $0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ com capacidade térmica baixa (19%); e o parâmetro família com dois (2.1) moradores (25%). No usuário tradicional/passivo (Figura 64b), as maiores ocorrências foram: 37% para absorvância da parede 0,7; 14% para as transmitâncias térmicas da parede de 2,2 (C_{tM}) e $0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (C_{tB} e C_{tM}); e 28% para a família com dois (2.1) moradores.

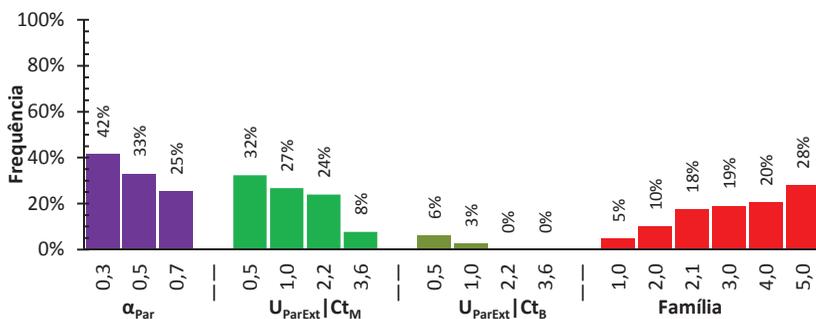
Figura 63 – Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/ativo, modelo multifamiliar 3



a) 4º Quartil

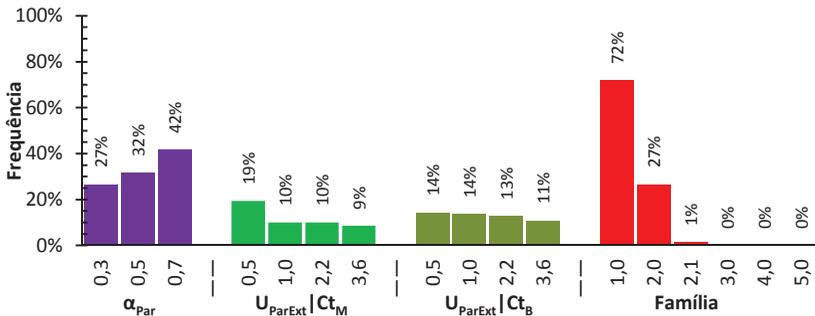


b) 2º e 3º Quartis

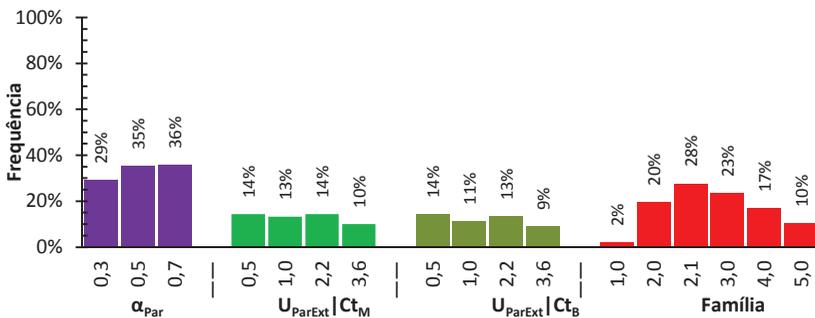


c) 1º Quartil

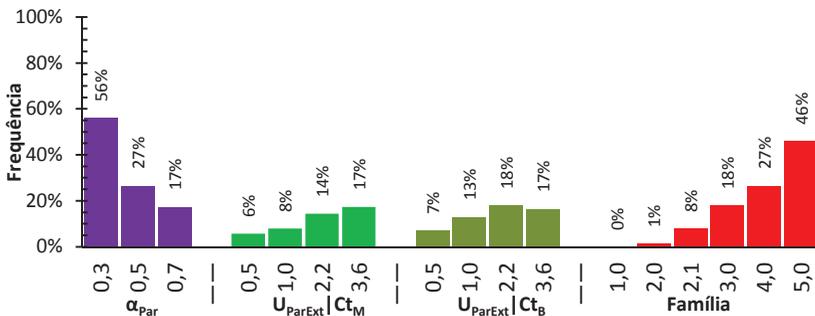
Figura 64 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida tradicional/passivo, modelo multifamiliar 3



a) 4º Quartil



b) 2º e 3º Quartis



c) 1º Quartil

Os resultados da análise de frequência da ocorrência nos casos com os menores consumos de energia para condicionamento artificial (1º quartil) do usuário tradicional/ativo são apresentados na Figura 63c e para o usuário tradicional/passivo na Figura 64c. No usuário tradicional/ativo (Figura 63c) a absorvância da parede de 0,3 apresentou ocorrência de 42%, e no usuário tradicional/passivo (Figura 64c) o parâmetro tem uma ocorrência de 56%. Em relação ao parâmetro das paredes externas, observa-se que no usuário tradicional/ativo (Figura 63c) a frequência de ocorrência de paredes com capacidade térmica média foi de 91%, apenas 9% com capacidade térmica baixa. Entretanto, no usuário tradicional/passivo (Figura 64c) a frequência de ocorrência de paredes com capacidade térmica baixa foi de 55%. No parâmetro do tamanho da família, observa-se que no usuário tradicional/ativo (Figura 63c) há ocorrência em todos os tamanhos, apresentando a maior ocorrência para a família de cinco moradores (28%). No entanto, no usuário tradicional/passivo a família com um morador não há ocorrência e na família com cinco moradores a ocorrência foi de 46%.

Na Figura 65 são apresentados os resultados de frequência de ocorrência das características dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/ativo, do modelo multifamiliar 4. Os resultados do usuário com estilo de vida contemporânea/passivo do modelo multifamiliar 4 são apresentados na Figura 66.

Os maiores consumos de energia para condicionamento artificial (4º quartil) do usuário com estilo de vida flexível/ativo são apresentados na Figura 65a. Observa-se que as absorvâncias da parede 0,5 e 0,7 representam 70% dos casos que apresentaram os maiores consumos. No usuário contemporâneo/passivo (Figura 66a) as absorvâncias da parede 0,5 e 0,7 apresentaram frequências semelhantes (73%) ao usuário flexível/ativo. Em relação à transmitância térmica da parede, nota-se que no usuário flexível/ativo (Figura 65a), 80% dos casos possuem paredes com capacidade térmica baixa, nos 20% dos casos com

capacidade térmica média, a transmitância térmica da parede de 3,6 W/m².K obteve uma frequência de 17%. Entretanto, no usuário contemporâneo/passivo a diferença de frequência entre as paredes com capacidade térmica média e baixa foi pequena (48% Ct_M e 52% Ct_B), para os casos com os maiores consumos de energia para condicionamento artificial (4º quartil – Figura 66a). Em relação ao tamanho da família, em ambos os cenários dos usuários as maiores frequências ocorrem para as famílias com um e dois moradores. A diferença é que no cenário do usuário contemporâneo/passivo não há ocorrência nas maiores famílias, entre seis e nove moradores. Porém, no cenário do usuário flexível/ativo a ocorrência variou entre 3% e 4%.

No usuário com estilo de vida flexível/ativo (2º e 3º quartil - Figura 65b), nota-se pequenas diferenças entre os três níveis de absorptância da parede simuladas. No usuário contemporâneo/passivo, a maior ocorrência (38%) é para absorptância da parede de 0,7. Em relação ao parâmetro da transmitância térmica da parede, em ambos os usuários (flexível/ativo e contemporâneo/passivo) apresentaram um equilíbrio entre as paredes com capacidade térmica média e baixa. Em relação ao tamanho da família, nota-se que ambos os usuários as maiores ocorrências foram entre 14% e 15%.

Figura 65 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida flexível/ativo, modelo multifamiliar 4

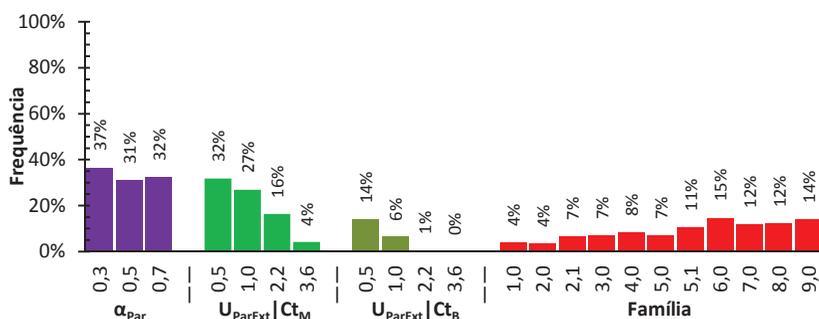
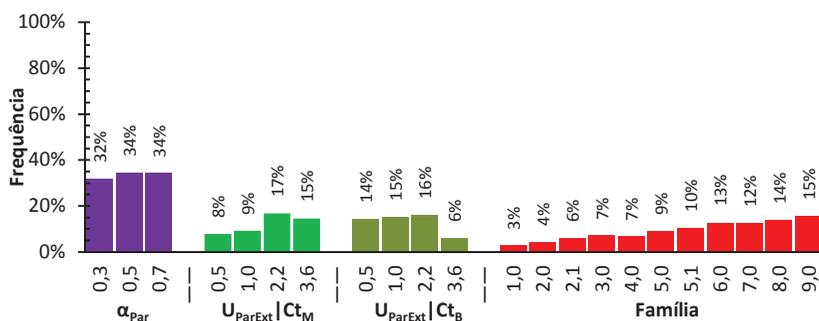
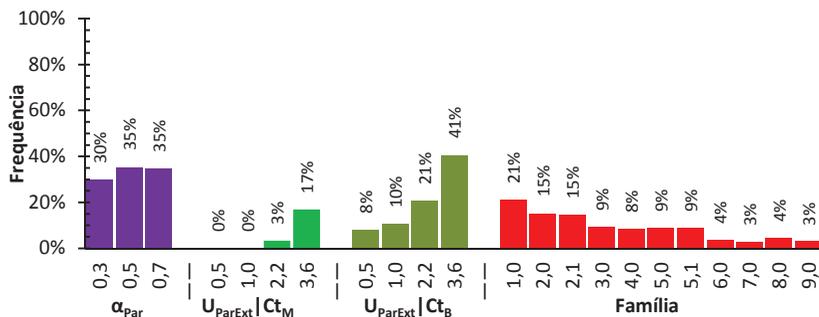
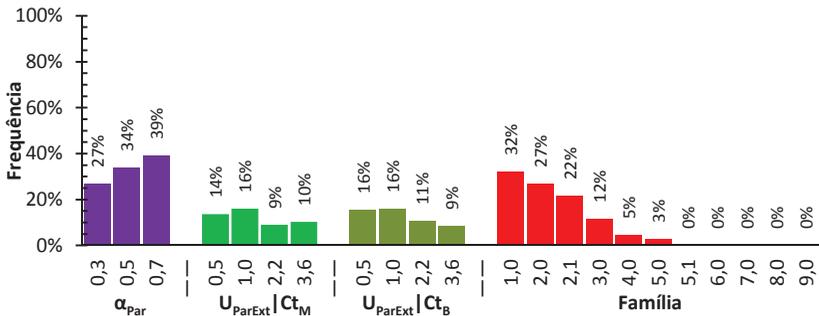
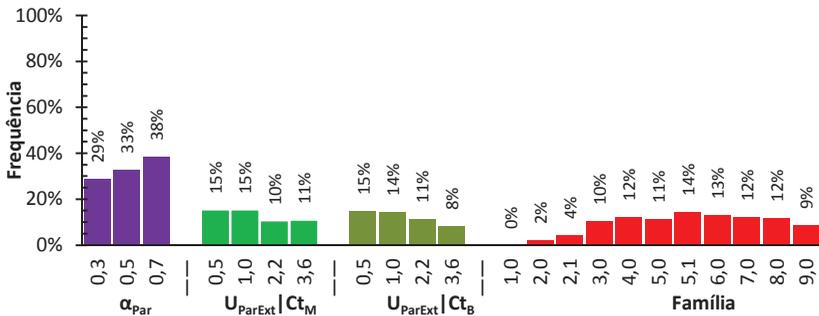


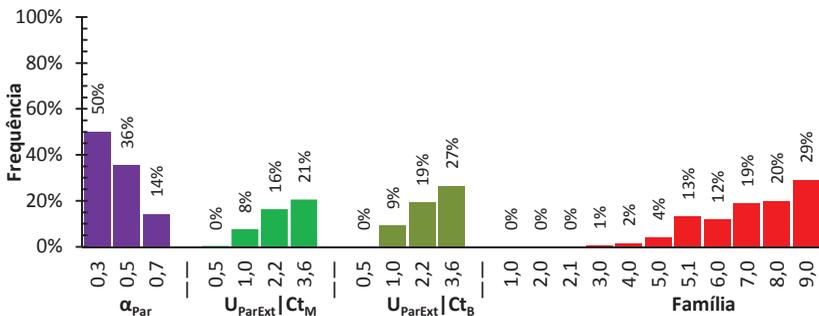
Figura 66 - Análise de frequência de ocorrência dos principais parâmetros do usuário com estilo de vida contemporâneo/passivo, modelo multifamiliar 4



a) 4º Quartil



b) 2º e 3º Quartis



c) 1º Quartil

Os resultados dos casos que apresentaram os menores consumos de condicionamento artificial são apresentados na Figura 65c para o cenário do usuário com estilo de vida flexível/ativo e na Figura 66c para o usuário contemporâneo/passivo. Observa-se que nos casos que apresentaram os menores consumos de condicionamento artificial a diferença entre os três valores de absorvância é pequena (6%) no usuário flexível/ativo (Figura 65c). No entanto, no usuário contemporâneo/passivo (Figura 66c) a diferença entre absorvância da parede de 0,3 e 0,7 foi de 36%. A absorvância da parede de 0,3 apresentou frequência de 50% (1º quartil). Em relação às propriedades térmicas das paredes, observa-se que as paredes com capacidade térmica média representaram 79% dos casos do 1º quartil do usuário flexível/ativo (Figura 65c). Para as paredes com capacidade térmica baixa as maiores ocorrências foram para as transmitâncias térmicas de 0,5 e 1,0 W/m².K. Entretanto, no usuário contemporâneo/passivo (Figura 66c) as paredes com capacidade térmica média e baixa apresentaram ocorrências de 45% e 55%, respectivamente. No usuário contemporâneo/passivo não houve ocorrência das paredes com transmitância térmica de 0,5 W/m².K (C_{tM} e C_{tB}). No entanto, a transmitância térmica 3,6 W/m².K (C_{tM} e C_{tB}) apresentaram frequência de 48%. Referente ao tamanho da família, observa-se uma tendência de crescimento de frequência em função do número de moradores, com 4% para a família com um morador e 14% para a família com nove moradores no usuário flexível/ativo (Figura 65c). No usuário contemporâneo/passivo (Figura 66c) a tendência de crescimento inicia com 1% na família com três moradores e na família com nove moradores resultou em 29%.

Nas edificações multifamiliares os resultados indicaram diferentes estratégias em função do comportamento dos usuários. Para os usuários com comportamento ativo, os resultados mostraram que as propriedades térmicas da envoltória foram parâmetros importantes para proporcionar menores consumos de energia para condicionamento

artificial. O comportamento do usuário ativo explora os benefícios dos dispositivos de sombreamento, da transmitância térmica menor e da capacidade térmica média. Os efeitos dos benefícios foram melhores condições de conforto térmico na edificação, que proporcionaram redução no consumo de energia para condicionamento artificial.

Para os usuários com comportamento passivo, os resultados mostraram a importância da absorvância da parede baixa (0,3) e da transmitância térmica da parede maior (superior $2,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). O comportamento do usuário passivo não usa adequadamente os dispositivos de sombreamento e a ventilação da edificação. Devido às condições de operação dos usuários com comportamento intermediário e passivo, é melhor ter paredes com transmitância térmica maior e absorvância baixa, para proporcionar a dissipação do calor dos ambientes para o exterior.

Os resultados mostraram que o tamanho da família é o parâmetro que impacta significativamente no consumo das edificações. As menores famílias tendem a apresentar maiores consumos, porém as maiores famílias tendem a apresentar menores consumos (per capita). Isso ocorre devido ao indicador de eficiência energética ser consumo per capita para a média de horas de ocupação (kWh/pessoa/horas). As maiores famílias apresentam uma demanda maior de energia para condicionamento artificial. Entretanto, também há ocorrência das menores famílias nos casos que apresentaram os menores consumos de energia para condicionamento artificial, porém com menor frequência.

4.6. Desempenho termoenergético dos modelos com uma família padrão brasileira

Os resultados do consumo de energia para condicionamento artificial e o percentual de horas de conforto térmico da família de 4 pessoas são apresentados na

Figura 67, na parte “a” são apresentados os resultados do modelo unifamiliar 1 e na parte “b” do modelo unifamiliar 2. Na parte superior

da figura são apresentadas as informações em relação ao cenário do usuário e a média diária do tempo de ocupação do cenário.

Observa-se que a edificação com menor área (modelo unifamiliar 1 -

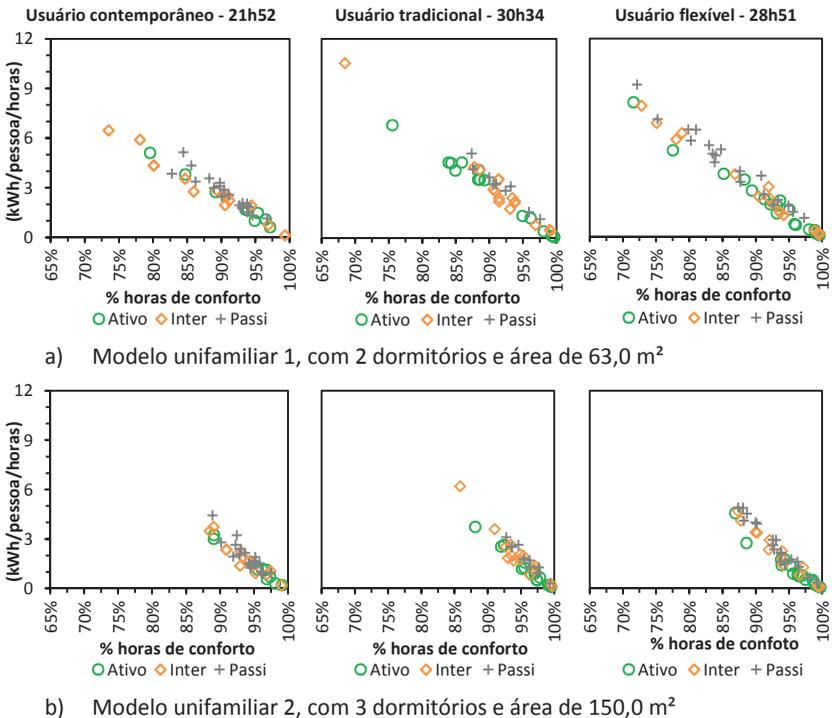
Figura 67a) apresentou uma maior dispersão no percentual de horas de conforto térmico e no consumo de energia para condicionamento artificial, quando comparada com a edificação que possui maior área (modelo unifamiliar 2 -

Figura 67b). O impacto do comportamento do usuário tem menor influência na edificação com menor área, devido à maior importância das propriedades termofísicas da envoltória no desempenho da edificação. No modelo unifamiliar 2 (

Figura 67b), nota-se a menor importância das propriedades termofísicas da envoltória no desempenho da edificação, pois os resultados apresentam menor dispersão no percentual de horas de conforto térmico e no consumo total de energia para condicionamento artificial, quando comparado com o modelo unifamiliar 1 (

Figura 67a). Observa-se que o cenário do usuário tradicional/ativo (modelo unifamiliar 1) apresentou cinco casos com os menores percentuais de conforto e os maiores consumos de energia para condicionamento artificial. Os casos possuem paredes com capacidade térmica baixa e absorvância solar das paredes superior a 0,5. Devido à técnica de amostragem adotada (hipercubo latino) os casos apresentam diferentes características das propriedades térmicas da envoltória para cada cenário do usuário com estilo de vida e comportamento.

Figura 67 – Variação do desempenho da família com 4 pessoas nos modelos unifamiliares 1 e 2.



O caso com o maior consumo resultou em 10,54 kWh/pessoa/horas e 68,4% das horas ocupadas em conforto térmico (Tabela 23), no cenário tradicional/intermediário (modelo unifamiliar 1). No modelo unifamiliar 2, o maior consumo foi de 6,21 kWh/pessoa/horas e o percentual de horas de conforto térmico foi de 85,8% das horas ocupadas. O modelo unifamiliar 1 (1.288,26 kWh.ano) apresentou um consumo de energia anual para condicionamento artificial de aproximadamente 70% superior ao consumo do modelo unifamiliar 2 (759,74 kWh.ano). No modelo unifamiliar 1, o menor consumo anual de energia para condicionamento artificial foi de 7,72 kWh/pessoa/horas (usuário

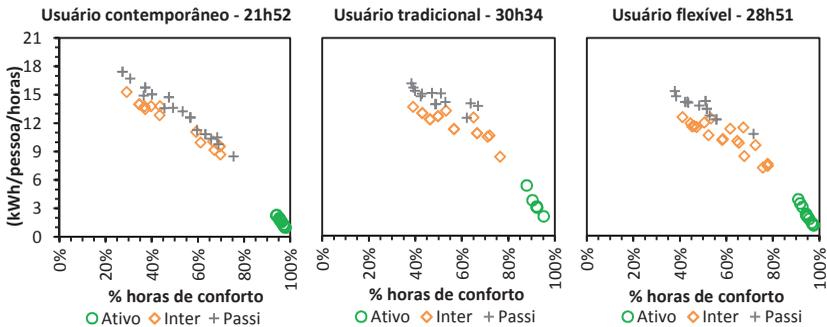
tradicional/ativo). No modelo unifamiliar 2, o menor consumo foi de 13,21 kWh/pessoa/horas. Observa-se que os casos que apresentaram os maiores consumos foram do modelo unifamiliar 1. O modelo unifamiliar 1 também apresentou os menores consumos para os casos que possuem transmitância térmica (paredes e cobertura) baixa e a absorvância solar (paredes e cobertura) baixa.

Tabela 23 – Resultados dos casos com os menores e maiores consumos dos três cenários dos modelos unifamiliares 1 e 2.

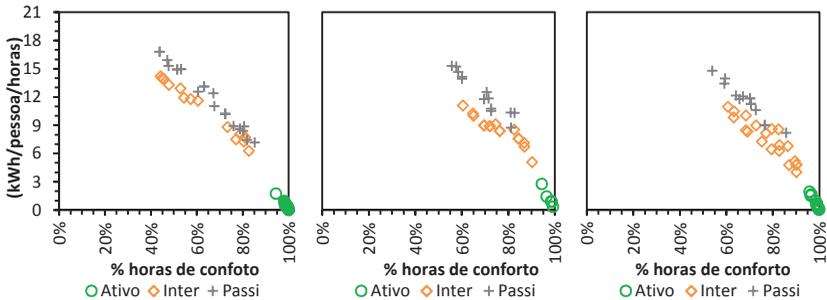
Usuário e característica do comportamento	Características da envoltória				Modelo 1			Modelo 2		
	U _{Par}	α _{Par}	U _{Cob}	α _{Cob}	Consumo	Conforto	Consumo	Conforto		
					kWh/p/h	kWh.ano	%	kWh/p/h	kWh.ano	%
Contemporâneo/Inter	3,6	0,3	1,9	0,7	6,46	565,48	73,5%	3,50	306,69	88,5%
Contemporâneo/Inter	0,5	0,3	0,5	0,3	0,12	10,39	99,3%	0,21	17,96	99,0%
Tradicional/Inter	3,6	0,7	1,0	0,7	10,54	1.288,62	68,4%	6,21	759,74	85,8%
Tradicional/Ativo	0,5	0,5	0,5	0,3	0,06	7,72	99,7%	0,11	13,21	99,5%
Flexível/Passi	2,2	0,7	1,9	0,7	9,22	1.064,85	72,1%	4,91	566,81	88,1%
Flexível/Ativo	0,5	0,5	0,5	0,7	0,39	44,64	98,9%	0,05	14,79	99,76%

A Figura 68 apresenta a variação do desempenho da família de 4 pessoas no consumo de energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico dos modelos multifamiliares 3 e 4.

Figura 68 – Variação do desempenho da família com 4 pessoas nos modelos multifamiliares 3 e 4.



a) Modelo multifamiliar (2) com 2 dormitórios e área de 72,6 m²



b) Modelo multifamiliar (4) com 3 dormitórios e área de 173,5 m²

Nas edificações multifamiliares, o comportamento do usuário apresenta maior importância, devido à menor importância das propriedades termofísicas da envoltória, proporcionada pela redução da área exposta da envoltória em relação ao volume da edificação (Figura 68). Observa-se que para todos os cenários dos usuários o comportamento ativo apresentou os melhores resultados, com os maiores percentuais de horas de conforto térmico e os menores consumos de energia para condicionamento artificial. Os resultados do modelo multifamiliar 4 (Figura 68b) apresentaram os menores consumos de energia e os maiores percentuais de conforto térmico nos três cenários de estilo de vida e comportamento do usuário.

Os cenários do usuário com estilo de vida contemporâneo apresentaram os maiores consumos e os menores percentuais de conforto térmico nos comportamentos intermediário e passivo, quando comparados com os cenários do estilo de vida tradicional e flexível. Neste cenário a ocupação da edificação ocorre no período das 18h às 7h. No período diurno não há ocupação. O baixo desempenho dos casos está relacionado à condição de sombreamento, que ocorre somente nos horários que há ocupação na edificação.

A Tabela 24 apresenta os casos com os maiores e menores consumos de energia para condicionamento artificial dos modelos multifamiliares 3 e 4. O maior consumo de energia para condicionamento artificial foi de 16,20 kWh/pessoa/horas (1.981,26 kWh.ano) no modelo multifamiliar 3 (usuário tradicional/passivo). No modelo multifamiliar 4, o consumo foi 13% menor que no modelo 3. Os consumos do modelo 4 também foram menores para os outros dois cenários.

Tabela 24 – Resultados dos casos com os menores e maiores consumos dos três cenários dos modelos multifamiliares 3 e 4.

Usuário e característica do comportamento	Características da envoltória		Modelo 3			Modelo 4		
	U _{Par}	α _{Par}	Consumo		Conforto	Consumo		Conforto
			kWh/p/h	kWh.ano	%	kWh/p/h	kWh.ano	%
Contemporâneo/Passi	0,5	0,7	17,47	1.528,69	27,25%	16,82	1.471,81	43,6%
Contemporâneo/Ativo	0,5	0,3	1,09	95,38	99,3%	0,01	1,07	99,9%
Tradicional/Passi	1,0	0,7	16,20	1.981,26	38,3%	14,14	1.729,32	60,0%
Tradicional/Ativo	2,2	0,5	2,06	251,93	95,2%	0,33	40,36	99,2%
Flexível/Passi	1,0	0,7	15,37	1.774,50	37,9%	13,42	1.539,36	59,2%
Flexível/Ativo	1,0	0,3	1,13	130,46	97,5%	0,05	5,77	99,9%

Os casos com maiores consumos de energia para condicionamento artificial apresentaram uma variação modesta (de 3% a 15%) entre os modelos 3 e 4. Entretanto, as diferenças no percentual de horas de conforto térmico foram significativas, com variações entre 55% a 60% nos percentuais de horas de conforto térmico entre os modelos.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de investigar a influência do comportamento do usuário no desempenho termoenergético de edificações residenciais. A influência do comportamento usuário foi investigada por meio de simulação termoenergética, em quatro modelos de edificações residenciais, com diferentes cenários de ocupação e de comportamento do usuário. A análise do comportamento do usuário foi desenvolvida com base no clima da cidade de Florianópolis – SC.

A análise do desempenho termoenergético das edificações residenciais mostrou que para as edificações unifamiliares o aumento da área da edificação não proporcionou aumento no consumo total de energia para condicionamento artificial (kWh.ano). O aumento da área nas edificações unifamiliares proporcionou uma redução no consumo de energia para resfriamento. Entretanto, houve um aumento no consumo de energia para aquecimento. A redução no consumo de energia é reflexo das melhores condições de conforto térmico. Para as edificações multifamiliares, o aumento da área da edificação proporcionou um aumento no consumo total de energia para condicionamento artificial, nos casos que apresentaram os maiores consumos. Nos casos com os menores consumos, o aumento da área proporcionou melhores condições de conforto térmico.

As edificações unifamiliares e multifamiliares apresentaram diferentes usos finais de energia para condicionamento artificial. As edificações unifamiliares apresentaram consumo de energia para aquecimento superior ao das edificações multifamiliares. Entretanto, as edificações multifamiliares consumiram mais energia para resfriamento, quando comparadas com as edificações unifamiliares.

Na análise dos indicadores de eficiência energética, os resultados mostraram que os indicadores kWh/m² e kWh/m²CA não são adequados para avaliar o desempenho energético de edificações que possuem diferentes áreas. As edificações com maiores áreas tendem a apresentar

menores valores nos indicadores kWh/m² e kWh/m²CA, quando comparadas com edificações que possuem áreas menores. Nesta pesquisa, o consumo de energia para condicionamento artificial não apresentou relação direta com a área da edificação. O indicador kWh/pessoa relaciona o consumo de energia com base na função das residências. O consumo de energia per capita representa melhor a demanda de energia das edificações residenciais, em razão de muitas edificações apresentarem baixa taxa de ocupação. Em função da diversidade no padrão de ocupação das edificações residenciais, o indicador de consumo de energia per capita em função do tempo de ocupação (kWh/pessoas/horas), representou melhor a demanda de energia para condicionamento artificial das edificações residenciais.

A análise de sensibilidade dos parâmetros termofísicos da envoltória e dos parâmetros comportamentais, mostrou que os parâmetros mais influentes são diferentes para edificações unifamiliares e multifamiliares.

Para as edificações unifamiliares, as propriedades termofísicas da envoltória (parede e cobertura) são parâmetros importantes para reduzir o consumo de energia para condicionamento artificial e melhorar as condições de conforto térmico. A capacidade térmica média das paredes contribui para a redução do consumo de energia. No entanto, a capacidade térmica baixa proporcionou um aumento no consumo de energia para condicionamento artificial e piorou as condições de conforto térmico nas edificações unifamiliares. Nas edificações unifamiliares, o usuário tem menor influência no desempenho termoenergético da edificação, quando comparado com as propriedades termofísicas da envoltória e os outros parâmetros analisados.

Para as edificações multifamiliares, o comportamento do usuário apresentou maior impacto no consumo total de energia para condicionamento artificial e nas condições de conforto, apresentando diferentes estratégias em função do comportamento do usuário. Para os usuários com comportamento ativo, as propriedades termofísicas da

envoltória (transmitância térmica baixa e a capacidade térmica média) foram parâmetros importantes para reduzir o consumo de energia para condicionamento artificial e melhorar as condições de conforto térmico. Para os usuários com comportamento passivo, a transmitância térmica da parede (superior a $2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) e a absorvância solar baixa (0,3) foram as propriedades mais frequentes nos menores consumos de energia para condicionamento artificial. A capacidade térmica das paredes (média ou baixa) não apresentou impacto significativo no consumo de energia para condicionamento artificial, para o usuário com comportamento passivo.

Os cenários com comportamento do usuário intermediário e passivo apresentaram maior influência no consumo de energia para condicionamento artificial e piores condições de conforto térmico para as edificações multifamiliares. No entanto, para as edificações unifamiliares a influência do comportamento intermediário e passivo foi menor no desempenho termoenergético. As edificações multifamiliares apresentaram menor influência das propriedades termofísicas da envoltória e maior influência do comportamento do usuário. Para as edificações unifamiliares ocorre o inverso, maior influência das propriedades termofísicas da envoltória e menor influência do comportamento do usuário no consumo energia para condicionamento artificial e no percentual de horas de conforto térmico.

Para as edificações com envoltória de alto desempenho (baixa transmitância térmica e capacidade térmica média), a interação do usuário no controle da ventilação natural e nos dispositivos de sombreamento foi importante para proporcionar baixo consumo. A operação inadequada da ventilação natural e do sombreamento proporcionou aumento significativo no consumo de energia para condicionamento artificial nas edificações com envoltória de alto desempenho.

No Brasil, as normas que regulamentam o desempenho térmico de edificações residenciais estabelecem limites para as propriedades termofísicas da envoltória. As recomendações das propriedades termofísicas da envoltória são as mesmas para edificações unifamiliares

e multifamiliares. Os resultados da pesquisa mostraram a complexidade em estabelecer valores para as propriedades termofísicas da envoltória, devido às diferentes soluções para o consumo de energia para aquecimento, resfriamento e para as condições de conforto térmico, que dependem do comportamento do usuário, do padrão de ocupação e do tipo da edificação (unifamiliar e multifamiliar). Os recursos da simulação termoenergética podem subsidiar os arquitetos e engenheiros na escolha das propriedades termofísicas da envoltória para o uso racional de energia, considerando a influência do usuário e da geometria da edificação no desempenho.

A pesquisa mostrou que o comportamento do usuário pode influenciar o desempenho termoenergético das edificações residenciais, com maior influência para as edificações multifamiliares. A operação e a interação do usuário com os sistemas da edificação podem alterar o desempenho de uma edificação projetada para baixo consumo. A operação de forma inadequada pode aumentar o consumo de energia, resultando em consumos superiores a edificações que não foram projetadas com estratégias para proporcionar eficiência energética.

Uma forma de reduzir a importância do comportamento do usuário pode ser com o uso dos recursos de automação, com soluções que proporcionem a eficiência energética das edificações residenciais, por meio do controle e do gerenciamento dos sistemas da edificação. Outro recurso simplificado seria um manual para usuários, com informações de como ventilar e controlar os dispositivos de sombreamento da edificação.

5.1. Limitações da pesquisa

O presente trabalho apresenta limitações que devem ser consideradas:

- As simulações termoenergéticas apresentam as limitações relacionadas aos algoritmos do programa de simulação (convecção de superfícies, transferência de calor, distribuição

solar, do sistema de condicionamento artificial, da rede ventilação natural e outros) e os dados do arquivo climático;

- Considerou-se quatro modelos de edificações residenciais, todas com a mesma orientação;
- A influência do comportamento do usuário foi analisada por meio de uma condição de teste;
- O controle da ventilação natural foi baseado em temperatura;
- As edificações unifamiliares foram simuladas com contato com o solo, o algoritmo que calculada temperatura do solo adota uma temperatura mensal;
- As edificações multifamiliares foram simuladas como uma unidade habitacional isolada, considerando as paredes divisórias e as lajes entre piso (unidade habitacional) na condição adiabática;
- O sistema de condicionamento artificial foi simulado com auto dimensionamento da capacidade do sistema;
- As edificações foram simuladas com um único componente construtivo para o piso e para as janelas.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

No desenvolvimento da pesquisa surgiram algumas indagações que podem ser investigadas em futuras pesquisas:

- Ampliar o escopo da investigação da influência do comportamento do usuário em diferentes climas do Brasil;
- Analisar a influência do comportamento do usuário nos usos finais de energia para condicionamento artificial;
- Analisar diferentes condições de operação dos dispositivos de sombreamento nas edificações residenciais;

- Analisar diferentes controles para habilitar a ventilação natural, por meio de entalpia;
- Analisar a influência do isolamento térmico no piso das edificações unifamiliares;
- Analisar a influência das propriedades térmicas e ópticas dos vidros em diferentes condições de uso das edificações residenciais;
- Compreender o comportamento dos usuários por meio do monitoramento de edificações residenciais *in loco*, avaliando as condições de conforto térmico e o consumo de energia para condicionamento artificial.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações, parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais - Desempenho: Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013a.

_____. **NBR 15575-4: Edifícios habitacionais - Desempenho: parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas.** Rio de Janeiro, 2013b.

_____. **NBR 15575-5: Edifícios habitacionais - Desempenho: parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas.** Rio de Janeiro, 2013c.

ABRAHAMSE, W. et al. A review of intervention studies aimed at household energy conservation. **Journal of Environmental Psychology**, v. 25, n. 3, p. 273-291, 2005.

ABRAVA. **Ar-Condicionado residencial evolução no mercado.** Revista ABRAVA 2014.

ACHÃO, C.; SCHAEFFER, R. Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980–2007 period: Measuring the activity, intensity and structure effects. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5208-5220, 2009.

AKINS, R. E.; PETERKA, J. A.; CERMAK, J. E. **Averaged Pressure Coefficients for Rectangular Buildings.** Fifth International Conference. ENGINEERING, W. New York: Pergamon Press 1979.

ALMEIDA, M. A.; SCHAEFFER, R.; LA ROVERE, E. L. The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil. **Energy**, v. 26, n. 4, p. 413-429, 2001.

ANDERSEN, R. V. et al. Survey of occupant behaviour and control of indoor environment in Danish dwellings. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 1, p. 11-16, 2009.

ANDERSON, K. et al. Energy consumption in households while unoccupied: Evidence from dormitories. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 335-341, 2015.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Atlanta, GA, 2009.

_____. **ANSI/ASHRAE 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2013.

BARTRAM, L.; RODGERS, J.; WOODBURY, R. Smart Homes or Smart Occupants? Supporting Aware Living in the Home. 13th IFIP TC 13 International Conference, 2011, Lisbon, Portugal. Springer Berlin / Heidelberg, September 5-9. p.52-64.

BATISTA, J. O. **Eficácia da ventilação mecânica noturna para resfriamento: Impacto de estratégias híbridas de ventilação no desempenho térmico de residência em Florianópolis-sc**. 2011. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BONINO, D.; CORNO, F.; DE RUSSIS, L. Home energy consumption feedback: A user survey. **Energy and Buildings**, v. 47, n. 0, p. 383-393, 2012.

BOURGEOIS, D.; REINHART, C.; MACDONALD, I. Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 814-823, 2006.

BRANCO, G. et al. Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 6, p. 543-555, 2004.

BRASIL. **Portaria n. 18, 16 de janeiro de 2012. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, I. E. C. E. I. N. D. M., NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Rio de Janeiro - RJ 2012.

BREESCH, H.; JANSSENS, A. Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis. **Solar Energy**, v. 84, n. 8, p. 1453-1467, 2010.

CARRICO, A. R.; RIEMER, M. Motivating energy conservation in the workplace: An evaluation of the use of group-level feedback and peer

education. **Journal of Environmental Psychology**, v. 31, n. 1, p. 1-13, 2011.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. **Solar Energy**, v. 78, n. 4, p. 528-534, 2005.

CHETTY, M.; TRAN, D.; GRINTER, R. E. **Getting to green: understanding resource consumption in the home**. Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing. Seoul, Korea: ACM: 242-251 p. 2008.

CLARKE, J. A. **Energy Simulation in Building Design**. 2nd Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. ix-x ISBN 978-0-7506-5082-3. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978075065082350000> >.

CORRADO, V.; MECHRI, H. E. Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating. **Journal of Building Physics**, v. 33, n. 2, p. 125-156, 2009.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, 2002.

DE DEAR, R. J.; CANDIDO, C.; PARKINSON, T. **New thermal comfort and air conditioning behavioral research methods for residential settings**. Universidade Federal de Santa Catarina - LabEEE, Florianópolis - SC. 23 fev. 2015.

DE MEESTER, T. et al. Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 313-323, 2013.

DE VECCHI, R. et al. Application of the adaptive model proposed by ASHRAE 55 in the Brazilian climate context: raising some issues. 8th Windsor Conference 2014: Counting the Cost if Comfort in a changing world, 2014a, Cumberland Lodge, Windsor Great Park. Network for Comfort and Energy Use in Buildings.

_____. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 93-101, 2014b.

DOE. Building Energy Software Tools Directory. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Acesso em 05 de Jul. 2013a.

_____. EnergyPlus - Energy Simulation Software. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em 05 de Jun. 2013b.

DUBRUL, C. **Inhabitant Behaviour with Respect to Ventilation - a Summary Report of IEA Annex VIII**. AIVC. 1988

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: Classe Residencial - Relatório Brasil**. PROCEL. Rio de Janeiro - RJ: ELETROBRAS 2007.

ELLIS, P. G.; TORCELLINI, P. A.; CRAWLEY, D. B. **Simulation of Energy Management Systems in EnergyPlus**. Building Simulation 2007. Beijing, China: IBPSA Internation Building Performance Simulation Association 2007.

ENERGYPLUS. v. 8.0.0.007. Energy Simulation Software.2013.

ESRU. ESP-r System for Building Energy Simulation. University of Strathclyde - Department of Mechanical Engineering. Disponível em: <<http://www.esru.strath.ac.uk/>>. Acesso em 02 de Abr. 2013.

EUROPEAN STANDARD. **EN15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. Brussels, 2007.

FABI, V. et al. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. **Building and Environment**, v. 58, n. 0, p. 188-198, 2012.

FEDRIGO, N. S.; GONÇALVES, G.; LUCAS, P. F. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. 2009. 104 Relatório de Iniciação Científica DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis.

FEDRIGO, N. S. et al. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA -

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.
Florianópolis - SC. 2009

FRITSCH, R. et al. A stochastic model of user behaviour regarding ventilation. **Building and Environment**, v. 25, n. 2, p. 173-181, 1990.

G1. Rio vive um relacionamento sério com o ar-condicionado. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2013/03/rio-vive-um-relacionamento-serio-com-o-ar-condicionado.html>>. Acesso em 10 Abr. 2013.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4107-4120, 2007.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GOSSARD, D.; LARTIGUE, B.; THELLIER, F. Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 253-260, 2013.

GUERRA-SANTIN, O.; ITARD, L. Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. **Building Research & Information**, v. 38, n. 3, p. 318-338, 2010.

HAAS, R. Energy efficiency indicators in the residential sector: What do we know and what has to be ensured? **Energy Policy**, v. 25, n. 7-9, p. 789-802, 1997.

HAVES, P.; XU, P. **The building controls virtual test bed – a simulation environment for developing and testing control algorithms, strategies and systems** Building Simulation 2007. Beijing, CH: IBPSA 2007.

HEMSATH, T. L.; ALAGHEBAND BANDHOSSEINI, K. Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use. **Renewable Energy**, v. 76, p. 526-538, 2015.

HENSEN, J. L. M. Towards more effective use of building performance simulation in design. Proceedings of the 7th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, 2004, Eindhoven. Eindhoven University of Technology, 2-5 July.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R.; NEGRAO, C. O. R. Building performance simulation at the start of the 3rd millennium. **Building and Environment**, v. 37, n. 8-9, p. 765-767, 2002.

HERKEL, S.; KNAPP, U.; PFAFFEROTT, J. **A preliminary model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings**. Building Simulation 2005. Montréal, Canada: IBPSA 2005.

HERKEL, S.; KNAPP, U.; PFAFFEROTT, J. Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 588-600, 2008.

HOES, P. et al. User behavior in whole building simulation. **Energy & Buildings**, v. 41, n. 3, p. 295-302, 2009.

HOES, P. et al. **Performance prediction of advanced building controls in the design phase using ESP-r, BCVTB and Matlab**. BSO12, Proceedings of the 1st IBPSA-England Conference Building Simulation and Optimization. Loughborough, UK: International Building Performance Simulation Association: 229-236 p. 2012.

HONG, T. et al. An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part I: Introduction to the DNAs framework. **Building and Environment**, v. 92, p. 764-777, 2015.

HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798-2805, 2011.

HYGH, J. S. et al. Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. **Building and Environment**, v. 57, n. 0, p. 165-175, 2012.

HYUN, S. H.; PARK, C. S.; AUGENBROE, G. L. M. Analysis of uncertainty in natural ventilation predictions of high-rise apartment buildings. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 29, n. 4, p. 311-326, 2008.

IBGE. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2010. (978-85-240-4187-7)

_____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 31 2011.

IOANNOU, A.; ITARD, L. C. M. Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 216-233, 2015.

JIANG, Y.; LI, Z.; QIN, R. **What are the major factors on energy consumption for cooling in Chinese residential buildings?** Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge - 5th Windsor Conference. Windsor, UK: Network for Comfort and Energy Use in Buildings 2008.

JUODIS, E.; JARAMINIENE, E.; DUDKIEWICZ, E. Inherent variability of heat consumption in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1188-1194, 2009.

KLEIN, L. et al. Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems. **Automation in Construction**, v. 22, p. 525-536, 2012.

KOENIGSBERGER, O. H.; MAHONEY, C. T.; EVANS, M. **Climate and House Design**. New York: United Nations, 1971.

KORJENIC, A.; BEDNAR, T. Impact of lifestyle on the energy demand of a single family house. **Building Simulation**, v. 4, n. 2, p. 89-95, 2011.

KWAK, Y. H. et al. **Condensing temperature control through energy management system simulaton for a large office building**. Building Simulation 2011. Sydney: IBPSA 2011.

LAMBERTS, R. et al. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. Universidade Federal de Santa Catarina - University of Sydney. Florianópolis, SC. 2013

LAMBERTS, R.; CARLO, J. C. **Uma discussão sobre a regulamentação em eficiência energética em edificações**. IV Mercofrio - Congresso de Ar-condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Curitiba, PR: ASBRAV 2004.

LIPING, W.; HIEN, W. N. The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. **Building and Environment**, v. 42, n. 12, p. 4006-4015, 2007.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de residências em florianópolis utilizando a ventilação natural**. 2007. 96

Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

MAZZARELLA, L.; PASINI, M. **Building energy simulation and object-oriented modelling: Review and reflections upon achieved results and further developments.** Building Simulation 2009. Glasgow, Scotland: IBPSA 2009.

MENDES, N. et al. **Uso de Instrumentos Computacionais Para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil.** Ambiente Construído. Porto Alegre: V.5. n.4: 47-68 p. 2005.

MOHAMMADI, A. et al. **Modeling user control of lighting and shading devices in office buildings: An empirical case study** Building Simulation 2007. Beijing, China: IBPSA 2007.

NEWSHAM, G. R. **Lightswitch: A stochastic model for predictiong office lighting energy consumption.** Proceedings of Right Light 3 - Third European Conference on Energy Efficient Lighting. Newcastle - UK: 59-66 p. 1995.

NICOL, J. F. **Characterising occupant behaviour in buildings: Towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds heaters and fans.** Bulding Simulation 2001. Rio de Janeiro, Brazil: IPBSA 2001.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563-572, 2002.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. A Stochastic Approach to Thermal Comfort--Occupant Behavior and Energy Use in Buildings. **ASHRAE Transactions**, v. 110, n. 2, p. 554-568, 2004.

OLESEN, B. W. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 7, p. 740-749, 2007.

OLIVEIRA, L. S. **AVALIAÇÃO DOS LIMITES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS FECHAMENTOS OPACOS DA NBR 15220-3, PARA HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL, DA ZONA BIOCLIMÁTICA 2.** 2012. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

PAGE, J.; ROBINSON, D.; SCARTEZZINI, J. L. **Stochastic Simulation of Occupant Presence and Behaviour in Buildings**. Buildings Simulation 2007. Beijing, China IBPSA 2007.

PANG, X. et al. A framework for simulation-based real-time whole building performance assessment. **Building and Environment**, v. 54, n. 0, p. 100-108, 2012.

PEREIRA, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, A. K. Experimentos de consumo de energia elétrica. In: LAMBERTS, R.;GHISI, E., *et al* (Ed.). **CASA EFICIENTE: Consumo e Geração de Energia**. Florianópolis - SC: UFSC/LABEEE, v.2, 2010. cap. 5, p.63 - 78.

PFAFFEROTT, J.; HERKEL, S. Statistical simulation of user behaviour in low-energy office buildings. **Solar Energy**, v. 81, n. 5, p. 676-682, 2007.

PIERCE, J.; SCHIANO, D. J.; PAULOS, E. Home, habits, and energy: Examining domestic interactions and energy consumption. 2010, Atlanta, GA. p.1985-1994.

POUEY, J. A. **PROJETO DE EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR PARA A ZONA BIOCLIMÁTICA 2 COM AVALIAÇÃO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**. 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

RAJA, I. A. et al. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 3, p. 235-244, 2001.

REINHART, C. F. Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. **Solar Energy**, v. 77, n. 1, p. 15-28, 2004.

REN, X.; YAN, D.; WANG, C. Air-conditioning usage conditional probability model for residential buildings. **Building and Environment**, v. 81, p. 172-182, 2014.

RICHE, Y.; DODGE, J.; METOYER, R. A. **Studying always-on electricity feedback in the home**. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Atlanta, Georgia, USA: ACM: 1995-1998 p. 2010.

ROETZEL, A. et al. A review of occupant control on natural ventilation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 1001-1013, 2010.

SALTELLI, A.; ANDRES, T. H.; HOMMA, T. Sensitivity analysis of model output: An investigation of new techniques. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 15, n. 2, p. 211-238, 1993.

SANTIN, O. G.; ITARD, L.; VISSCHER, H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1223-1232, 2009.

SARDIANOU, E. Estimating space heating determinants: An analysis of Greek households. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 6, p. 1084-1093, 2008.

SCALCO, V. A. et al. Innovations in the Brazilian regulations for energy efficiency of residential buildings. **Architectural Science Review**, v. 55, n. 1, p. 71-81, 2012.

SCHWEIKER, M. **Occupant Behaviour and the Related Reference Levels for Heating and Cooling**. 2010. (Doctoral dissertation). Laboratory of Building Environment, Tokyo City University, Tokio - Japan.

SCHWEIKER, M.; SHUKUYA, M. Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling. **Energy Policy**, v. 38, n. 6, p. 2976-2986, 2010.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 135-148, 2013.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 213-230, 2014.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381-391, 2014.

SILVA, A. S. et al. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 103-117, 2014.

SIMLAB. v. 2.2.1. Simulation environment for uncertainty and sensitivity analysis. Joint Research Center of the European Commission. 2011.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. (Dissertação de mestrado). PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis - SC.

SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. **Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados para a simulação computacional de ventilação natural, no desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar** XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora, MG: ANTAC 2012.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15575** XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Brasília 2013.

SORGATO, M. J.; VERSAGE, R. S.; LAMBERTS, R. **A influência da área de ventilação no desempenho térmico de edificações residenciais**. LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis - SC. 2011

SPITZ, C. et al. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. **Energy and Buildings**, v. 55, n. 0, p. 459-470, 2012.

TABAK, V. **User Simulation of Space Utilisation. System for Office Building Usage Simulation**. 2008. (Doctoral dissertation). Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, n. 0, p. 411-419, 2013.

TIAN, W.; DE WILDE, P. Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study. **Automation in Construction**, v. 20, n. 8, p. 1096-1109, 2011.

TRČKA, M.; HENSEN, J. L. M.; WETTER, M. Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 2, n. 3, p. 209-230, 2009.

_____. Co-simulation for performance prediction of integrated building and HVAC systems – An analysis of solution characteristics using a two-body system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 18, n. 7, p. 957-970, 2010.

TRUELOVE, H. B.; PARKS, C. Perceptions of behaviors that cause and mitigate global warming and intentions to perform these behaviors. **Journal of Environmental Psychology**, v. 32, n. 3, p. 246-259, 2012.

TUHUS-DUBROW, D.; KRARTI, M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. **Building and Environment**, v. 45, n. 7, p. 1574-1581, 2010.

UIUC, L. **Application Guide for EMS**. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. 2013

VAN DER KNAAP, A. N. **Building performance simulation to support building energy regulation**. 2011. Master (Master Building Services). Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

VERSAGE, R. S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS**. 2009. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

VERSAGE, R. S.; LAMBERTS, R. **Equações prescritivas para o regulamento de etiquetagem de eficiência energética de edificações residenciais**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2011

VIROTE, J.; NEVES-SILVA, R. Stochastic models for building energy prediction based on occupant behavior assessment. **Energy and Buildings**, v. 53, n. 0, p. 183-193, 2012.

- WALTON, G. N. AIRNET - A Computer Program for Building Airflow Network Modeling. 1989.
- WANG, D.; FEDERSPIEL, C. C.; RUBINSTEIN, F. Modeling occupancy in single person offices. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 2, p. 121-126, 2005.
- WANG, L.; HONG, T. **Modeling and Simulation of HVAC Faulty Operations and Performance Degradation due to Maintenance Issues**. ASim 2012 - 1st Asia conference of International Building Performance Simulation Association. Shanghai, China: IBPSA - Asia 2012.
- WANG, L.; WONG NYUK, H.; LI, S. Facade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 8, p. 954-961, 2007.
- WARREN, P. R.; PARKINS, L. M. Window-opening behaviour in office buildings. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 5, n. 3, p. 89-101, 1984.
- WEN, Y. J.; DIBARTOLOMEO, D.; RUBINSTEIN, F. **Co-simulation Based Building Controls Implementation with Networked Sensors and Actuators**. Buildsys 2011: 3rd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings. Seattle, USA: ACM: 55-60 p. 2011.
- WERNER, C. M. et al. "Lights out" in university classrooms: Brief group discussion can change behavior. **Journal of Environmental Psychology**, v. 32, n. 4, p. 418-426, 2012.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis**. BUILDING SIMULATION. Montreal: IBPSA: 1221-1228 p. 2005.
- WETTER, M. **A Modular Building Controls Virtual Test Bed for the Integrations of Heterogeneous Systems** 2008.
- WETTER, M. **Building Controls Virtual Test Bed - User Manual**. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA. 2013
- WHITMARSH, L. Behavioural responses to climate change: Asymmetry of intentions and impacts. **Journal of Environmental Psychology**, v. 29, n. 1, p. 13-23, 2009.

WIDÉN, J.; NILSSON, A. M.; WÄCKELGÅRD, E. A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 10, p. 1001-1012, 2009.

WOOD, G.; NEWBOROUGH, M. Energy-use information transfer for intelligent homes: Enabling energy conservation with central and local displays. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 4, p. 495-503, 2007.

YILDIZ, Y.; ARSAN, Z. D. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. **Energy**, v. 36, n. 7, p. 4287-4296, 2011.

YILDIZ, Y. et al. An approach for developing sensitive design parameter guidelines to reduce the energy requirements of low-rise apartment buildings. **Applied Energy**, v. 93, n. 0, p. 337-347, 2012.

YU, T. Modeling occupancy behavior for energy efficiency and occupants comfort management in intelligent buildings. 2010. p.726-731.

YUN, G. Y.; STEEMERS, K. Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer. **Building and Environment**, v. 43, n. 9, p. 1471-1482, 2008.

YUN, G. Y.; TUOHY, P.; STEEMERS, K. Thermal performance of a naturally ventilated building using a combined algorithm of probabilistic occupant behaviour and deterministic heat and mass balance models. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 5, p. 489-499, 2009.

ZHANG, R.; LAM, K. Comparison of building load performance between first principle based and implementable shading control algorithms. **Building Simulation**, v. 4, n. 2, p. 135-148, 2011.

ZIMMERMAN, G. **Modeling and simulation of individual user behavior for building performance predictions**. Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference. San Diego, California: Society for Computer Simulation International: 913-920 p. 2007.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; MEESTERS, E. H. W. G. **A Beginner's Guide to R. Use R!** New York: Springer New York 2009.

Apêndice A – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo

Figura 1 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 1 usuário

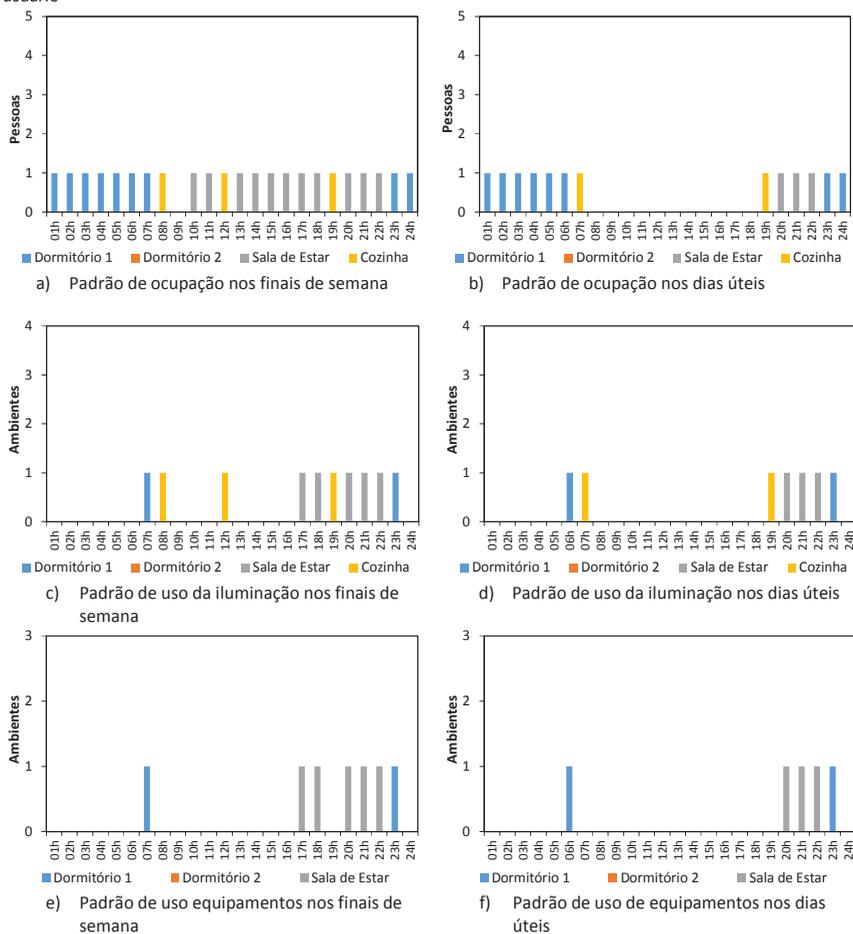


Figura 2 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 2 usuários

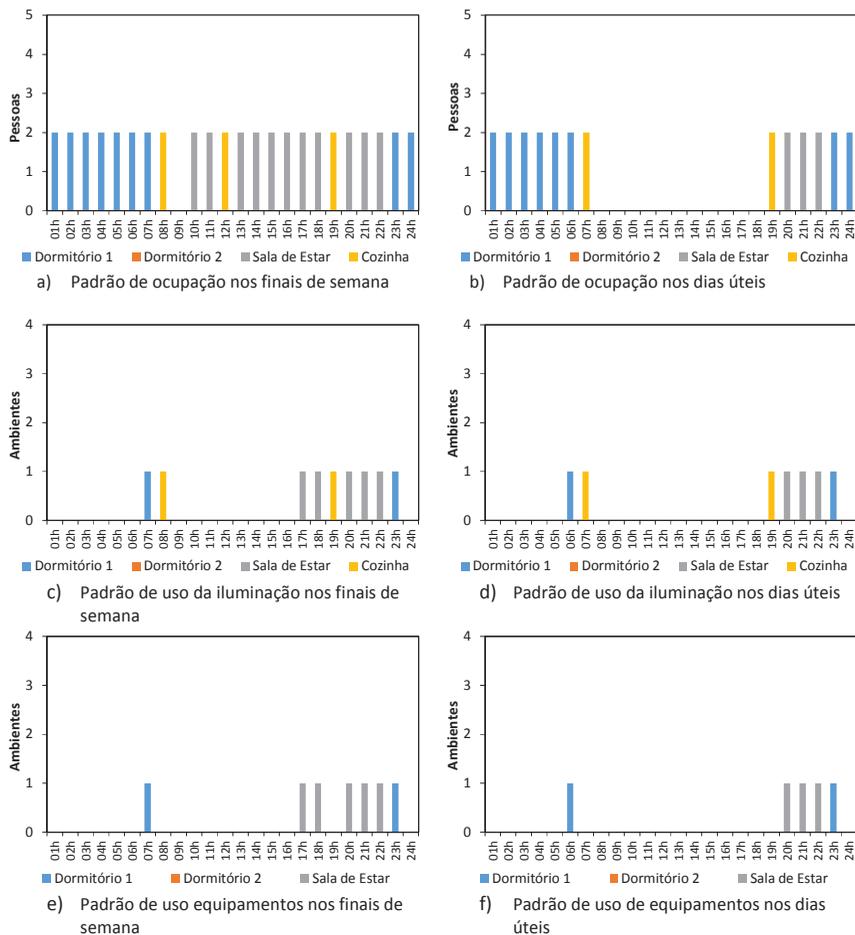


Figura 3 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família (2.1) 2 usuários

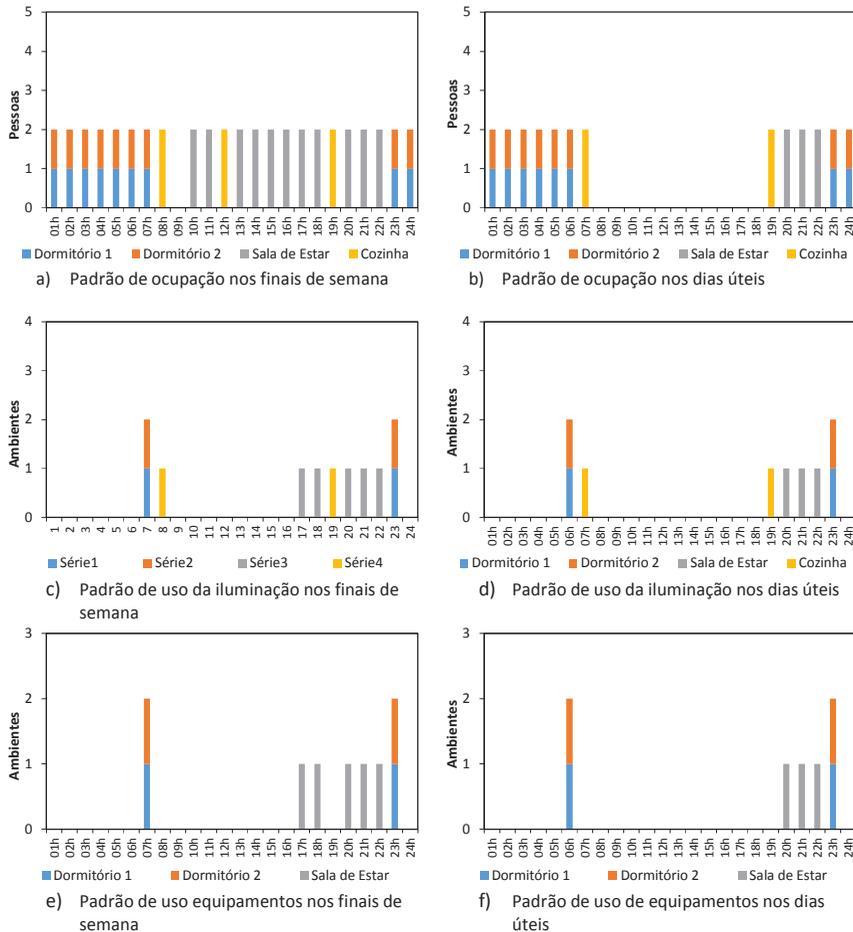


Figura 4 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 3 usuários

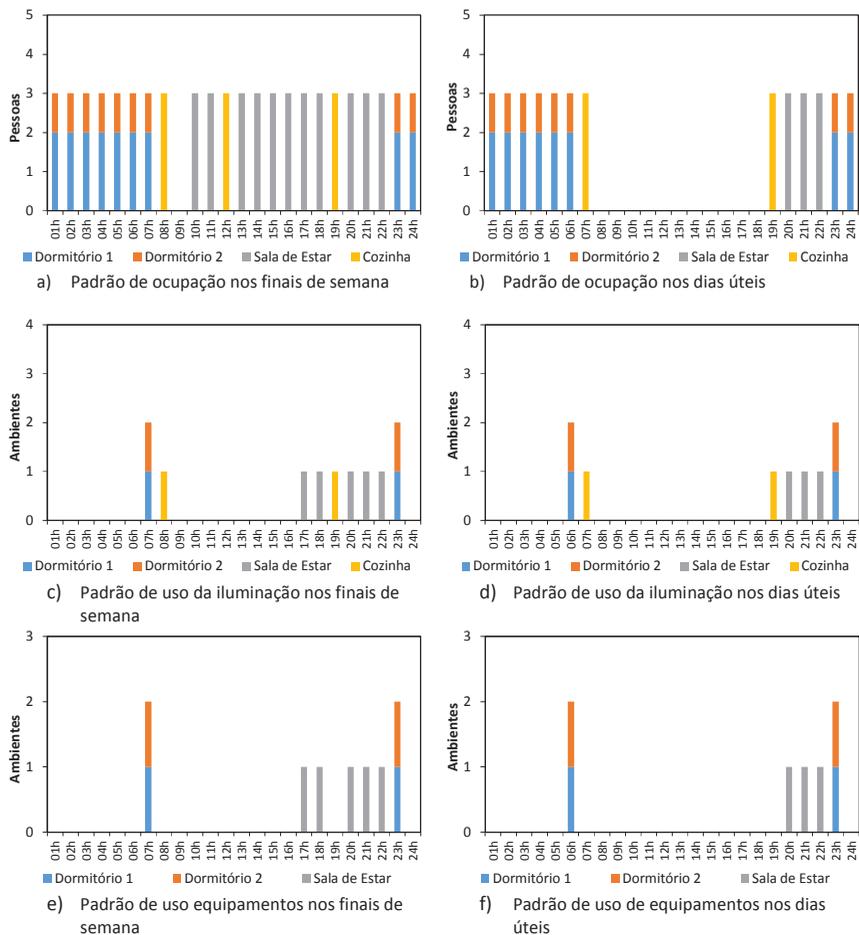


Figura 5 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família (3.1) 3 usuários

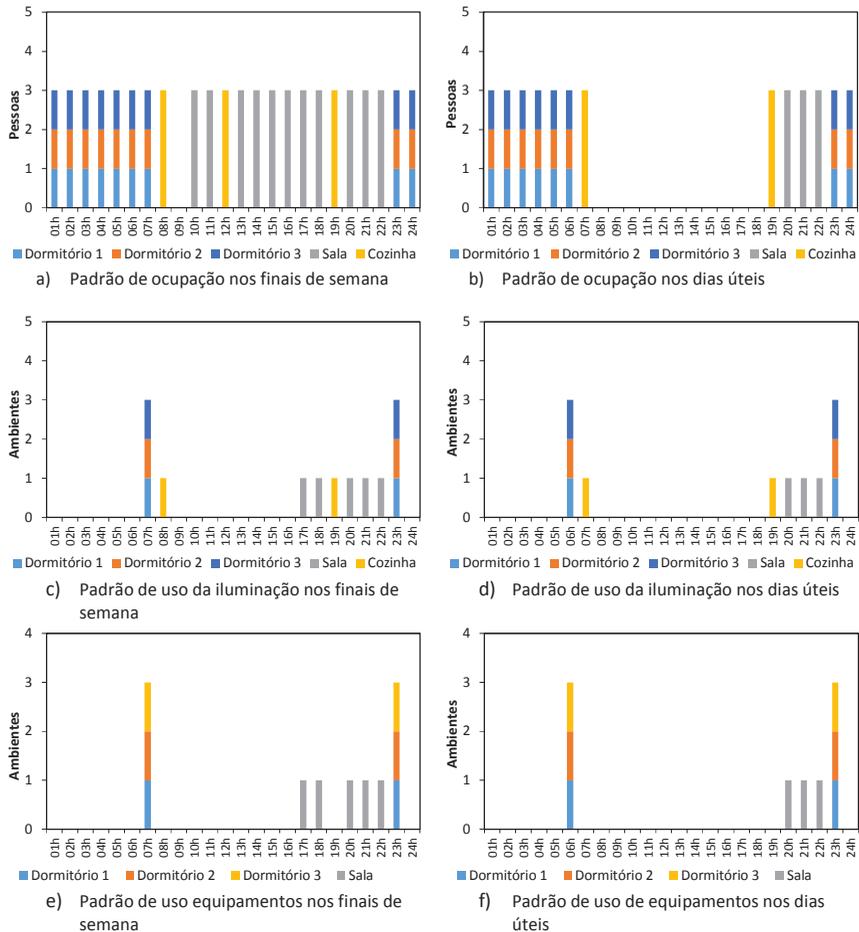


Figura 6 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 4 usuários

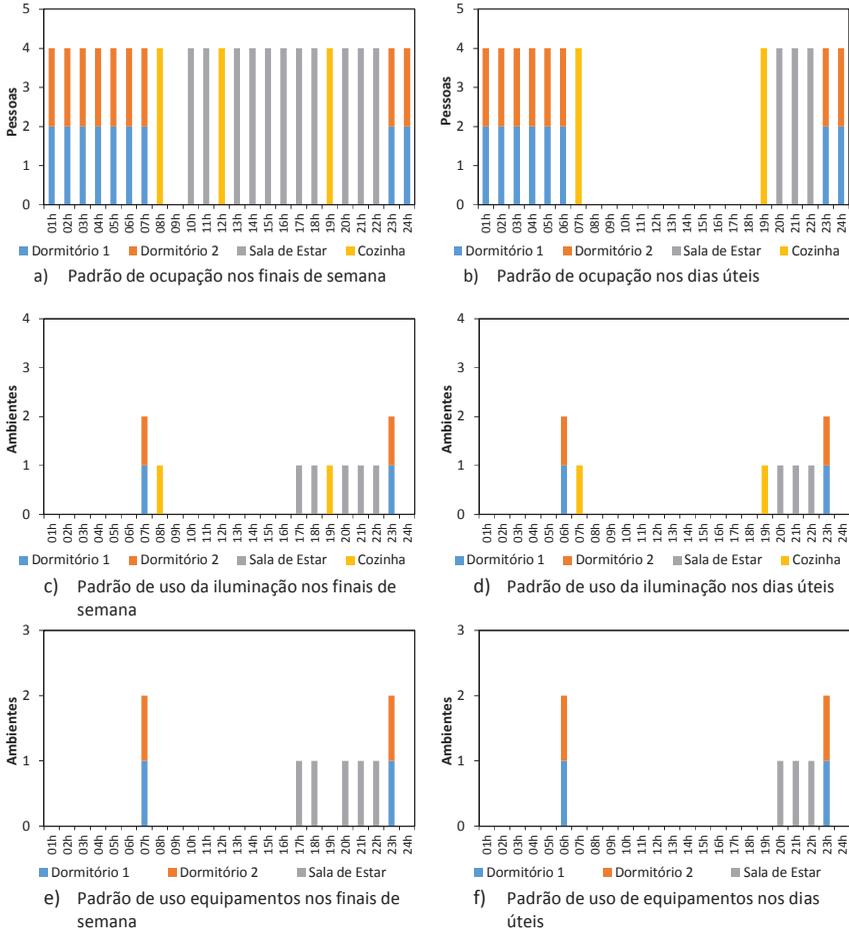


Figura 7 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família (4.1) 4 usuários

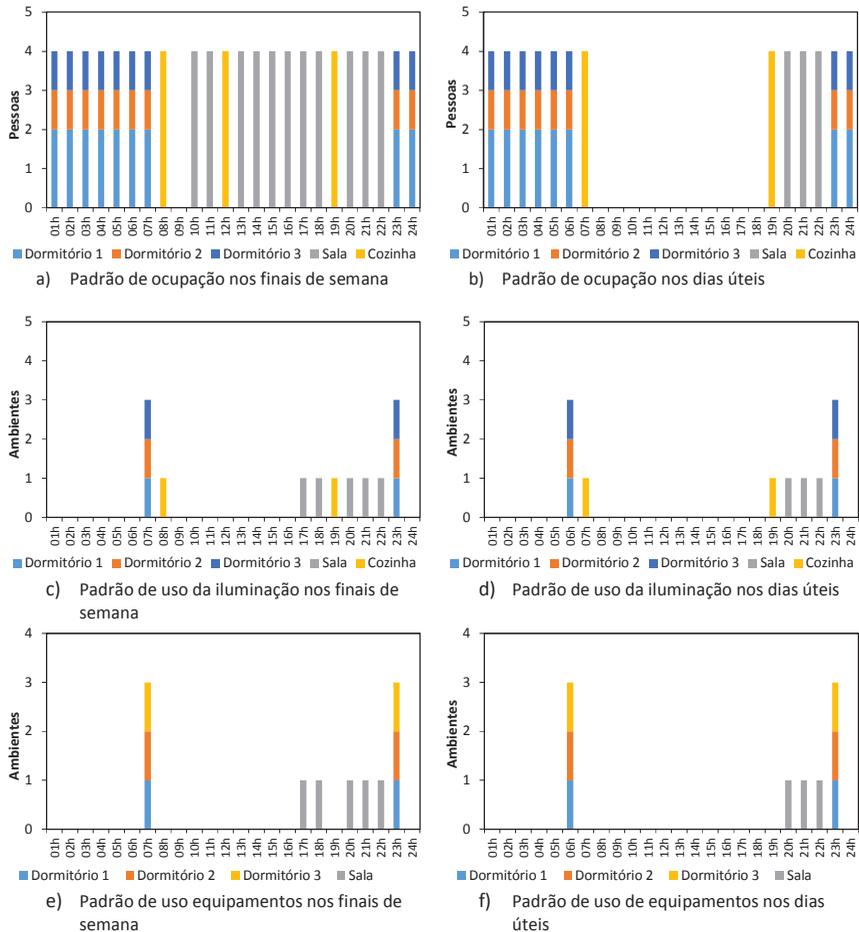


Figura 8 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 5 usuários

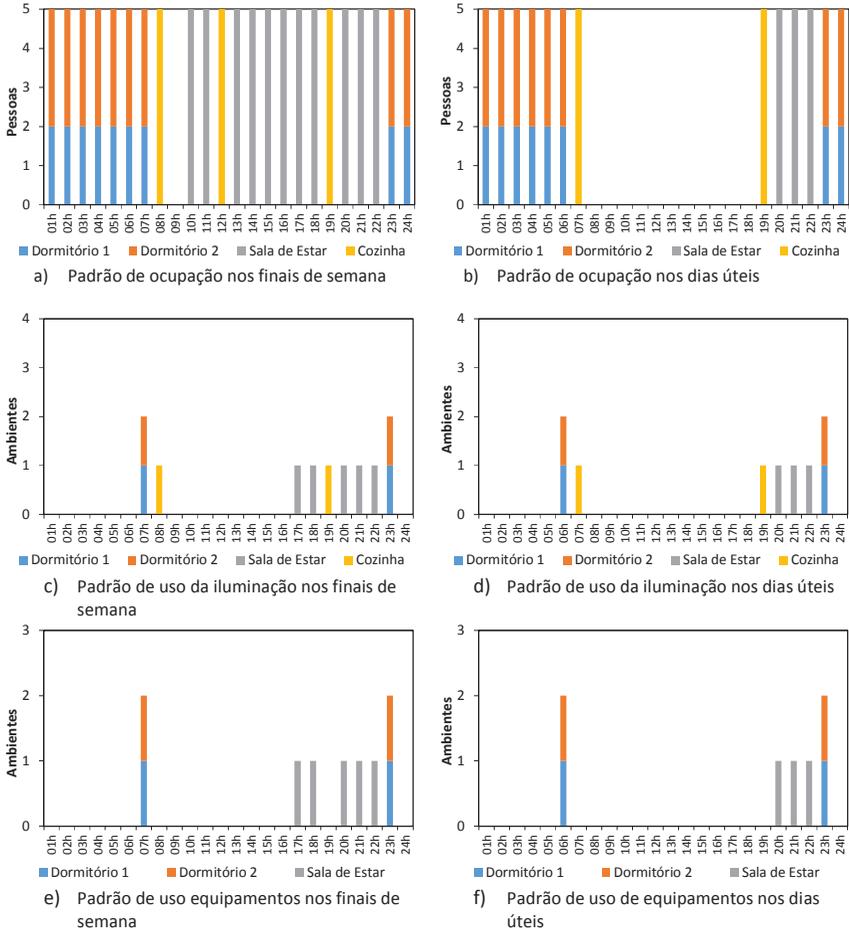


Figura 9 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família (5.1) 5 usuários

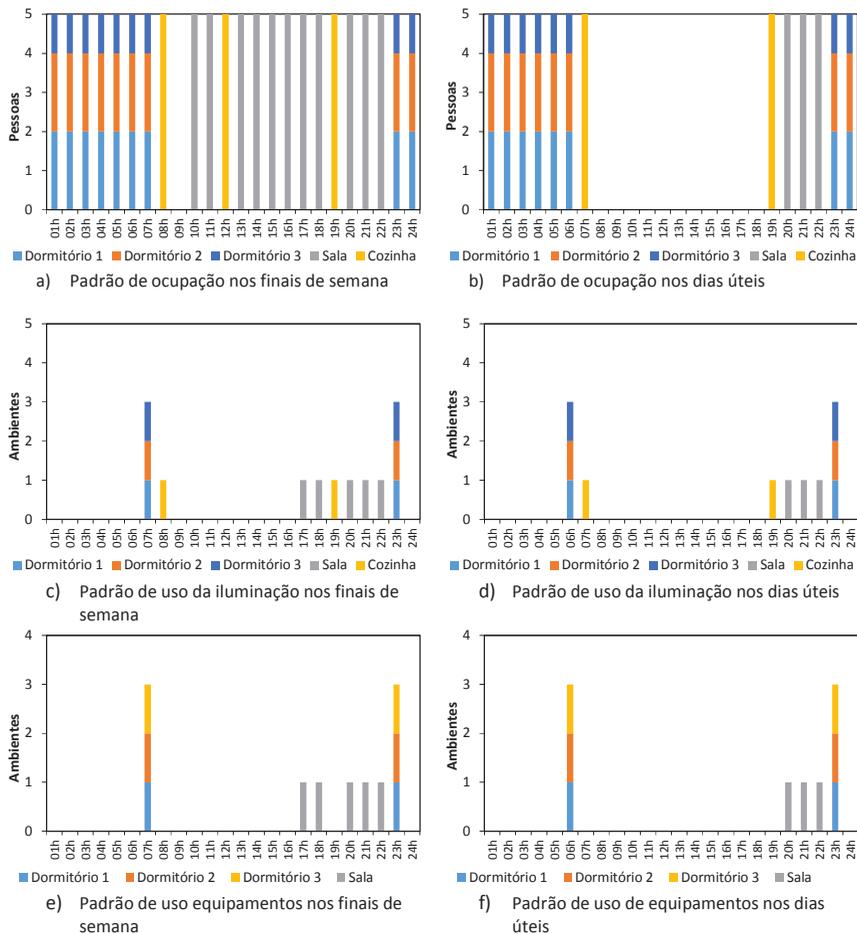
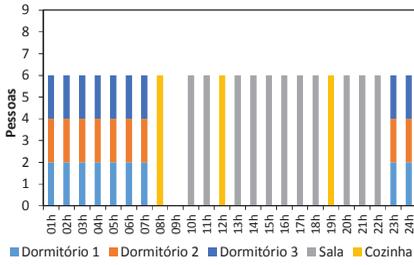
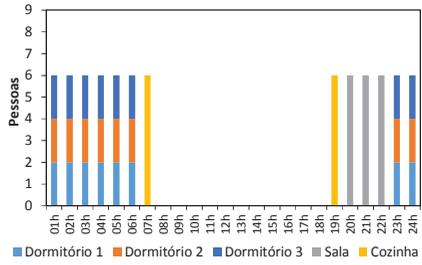


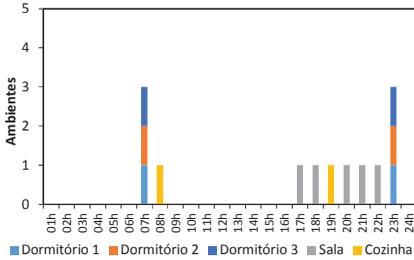
Figura 10 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 6 usuários



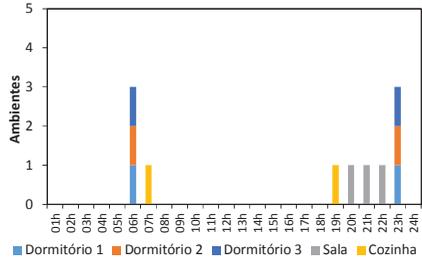
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



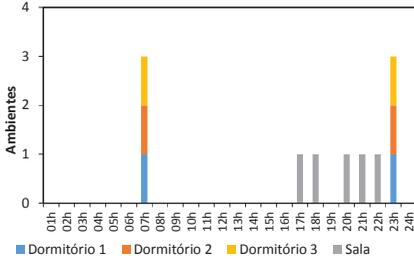
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



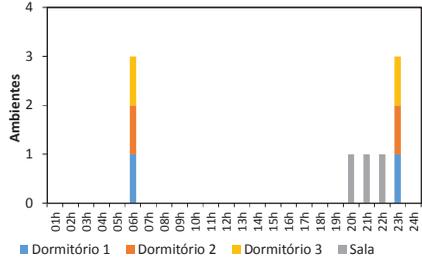
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis



e) Padrão de uso de equipamentos nos finais de semana



f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

Figura 11 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 7 usuários

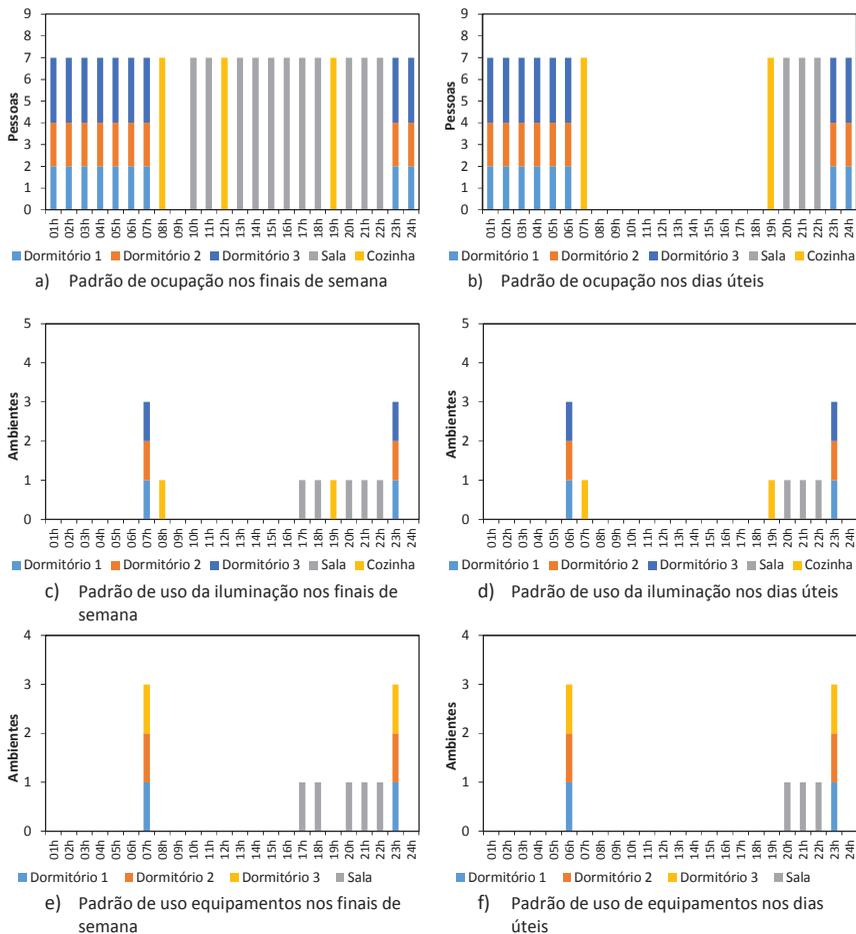
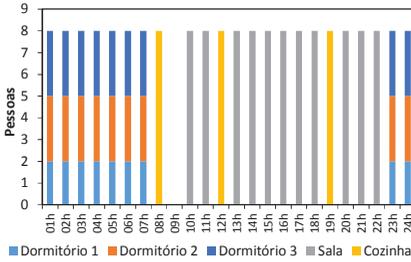
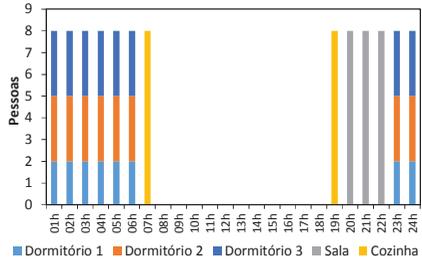


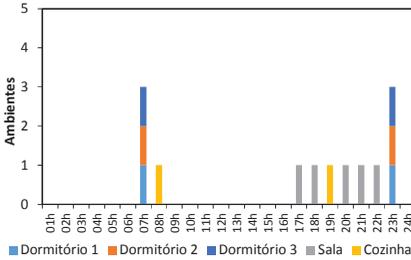
Figura 12 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 8 usuários



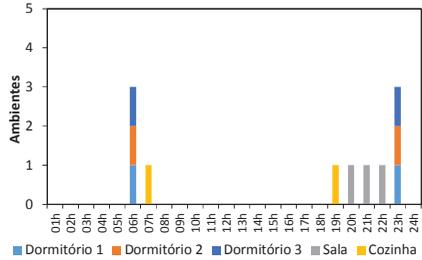
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



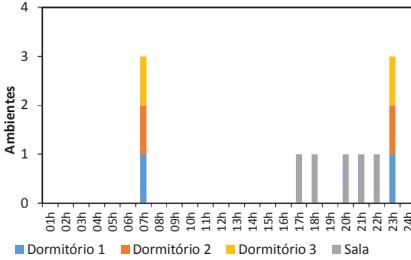
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



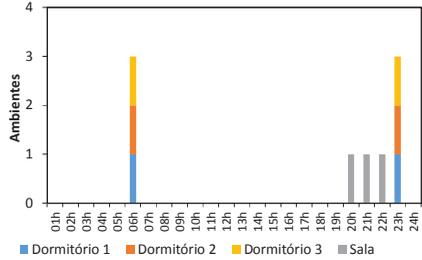
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis

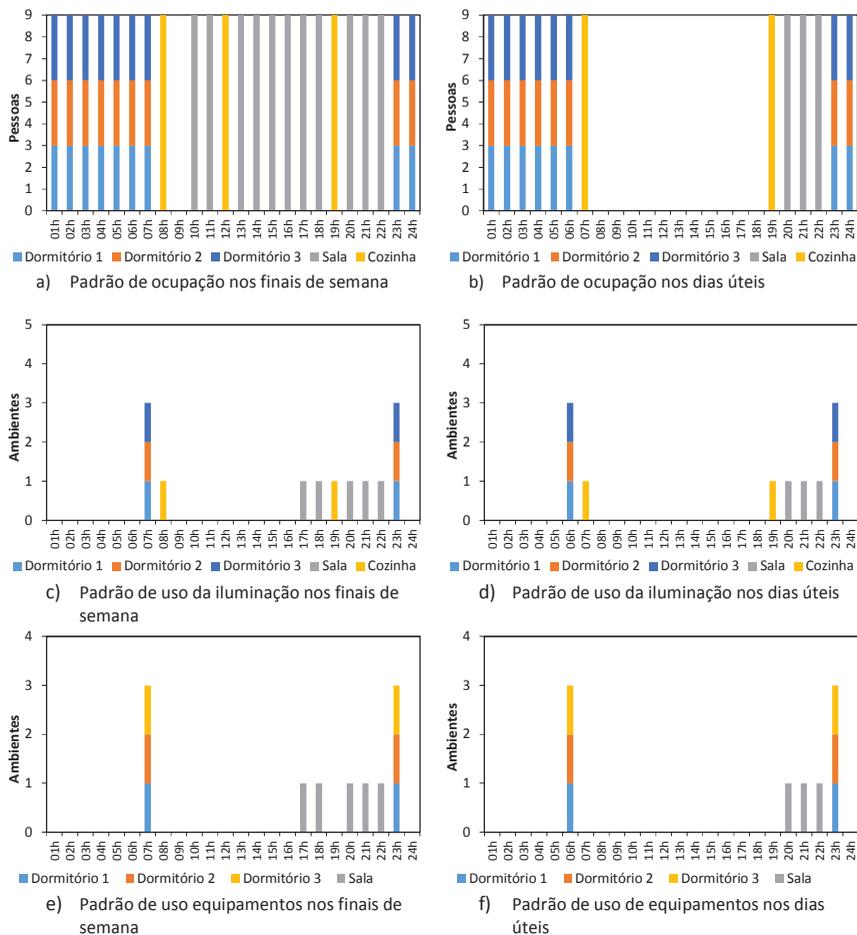


e) Padrão de uso de equipamentos nos finais de semana



f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

Figura 13 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família 9 usuários



Apêndice B – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional.

Figura 1 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 1 usuário

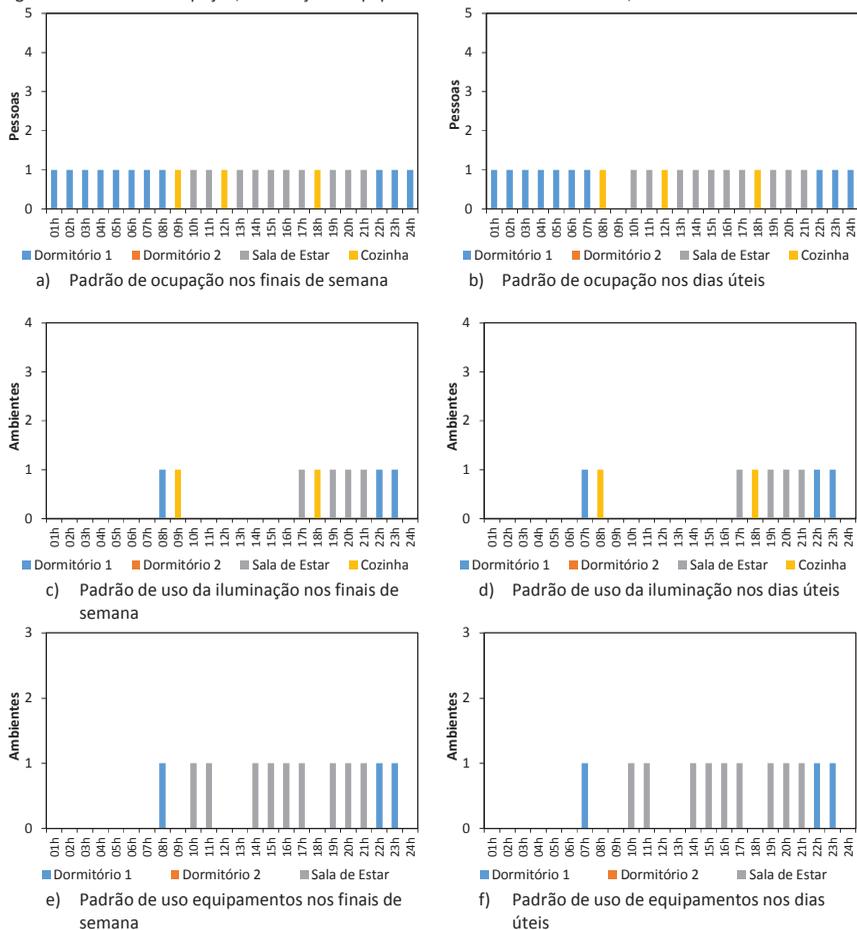
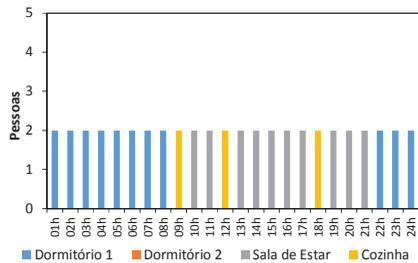
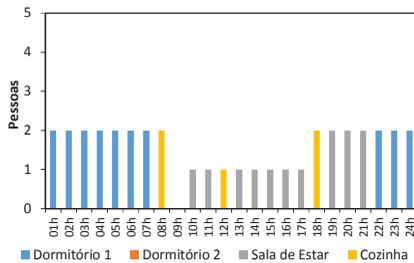


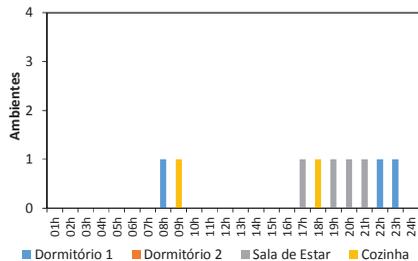
Figura 2 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 2 usuários



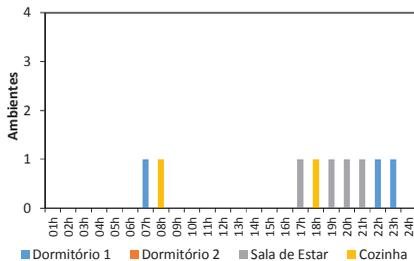
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



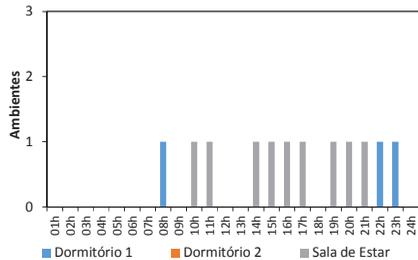
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



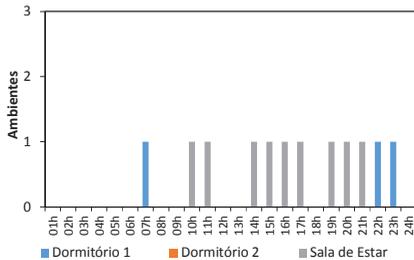
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis

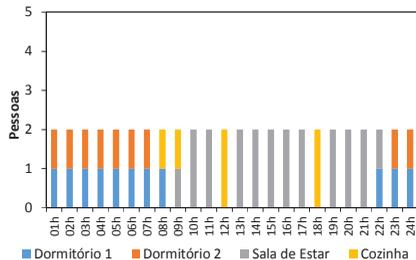


e) Padrão de uso equipamentos nos finais de semana

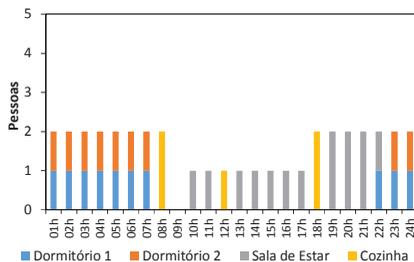


f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

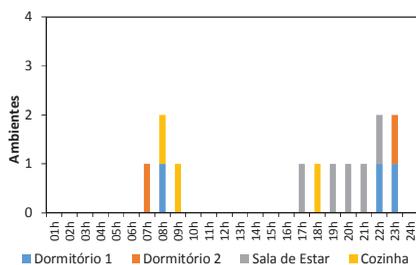
Figura 3 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário contemporâneo, tamanho da família (2.1) 2 usuários



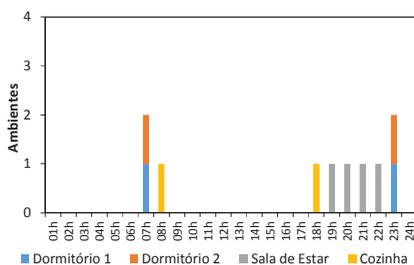
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



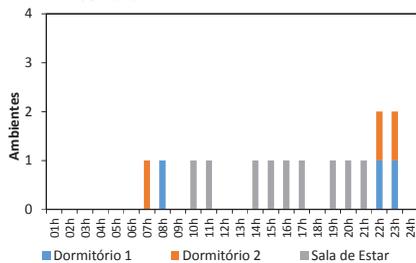
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



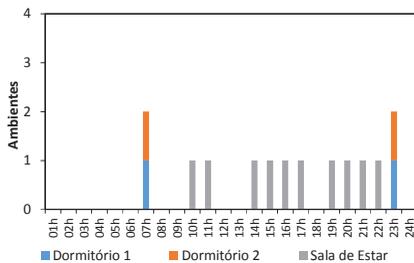
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis

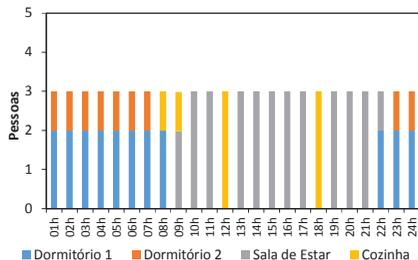


e) Padrão de uso equipamentos nos finais de semana

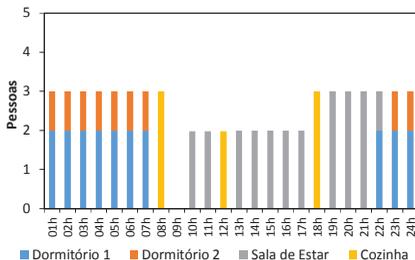


f) Padrão de uso equipamentos nos dias úteis

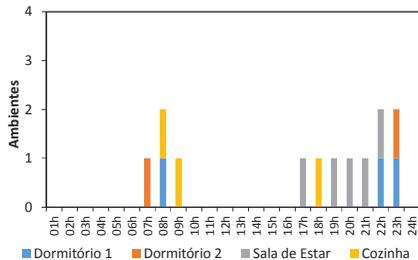
Figura 4 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 3 usuários



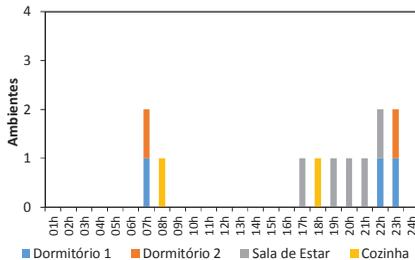
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



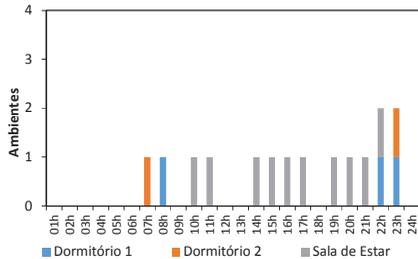
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



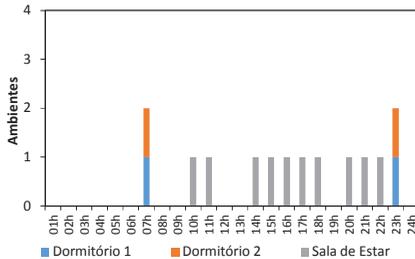
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis



e) Padrão de uso equipamentos nos finais de semana



f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

Figura 5 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família (3.1) 3 usuários

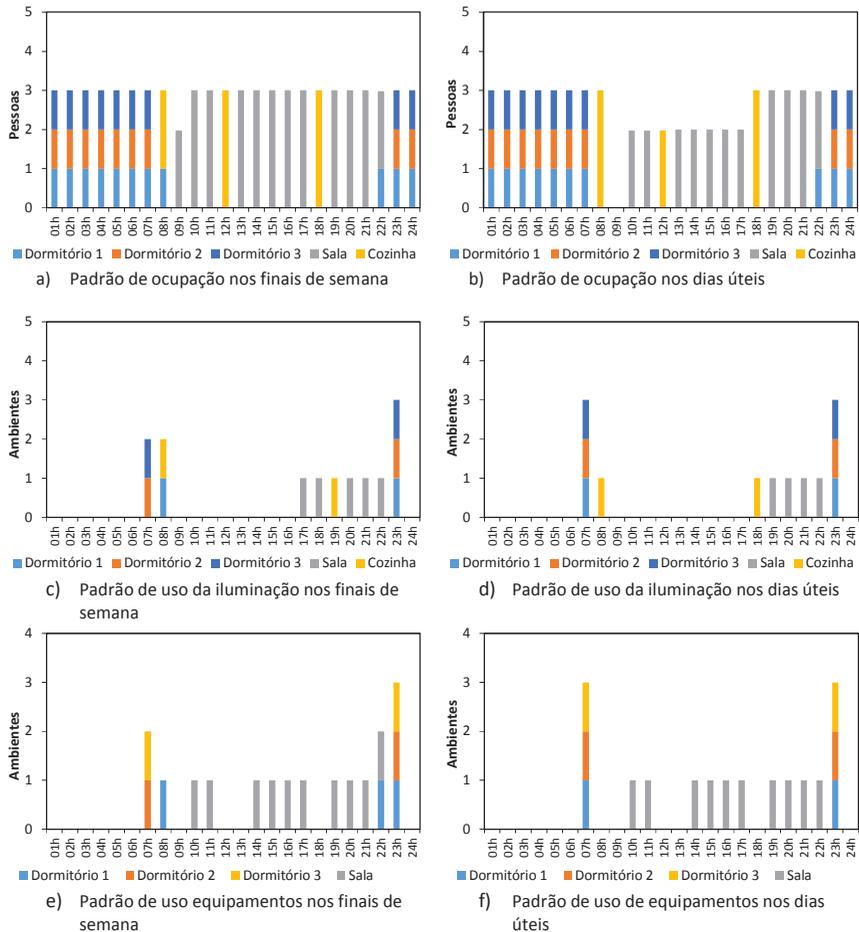


Figura 6 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 4 usuários

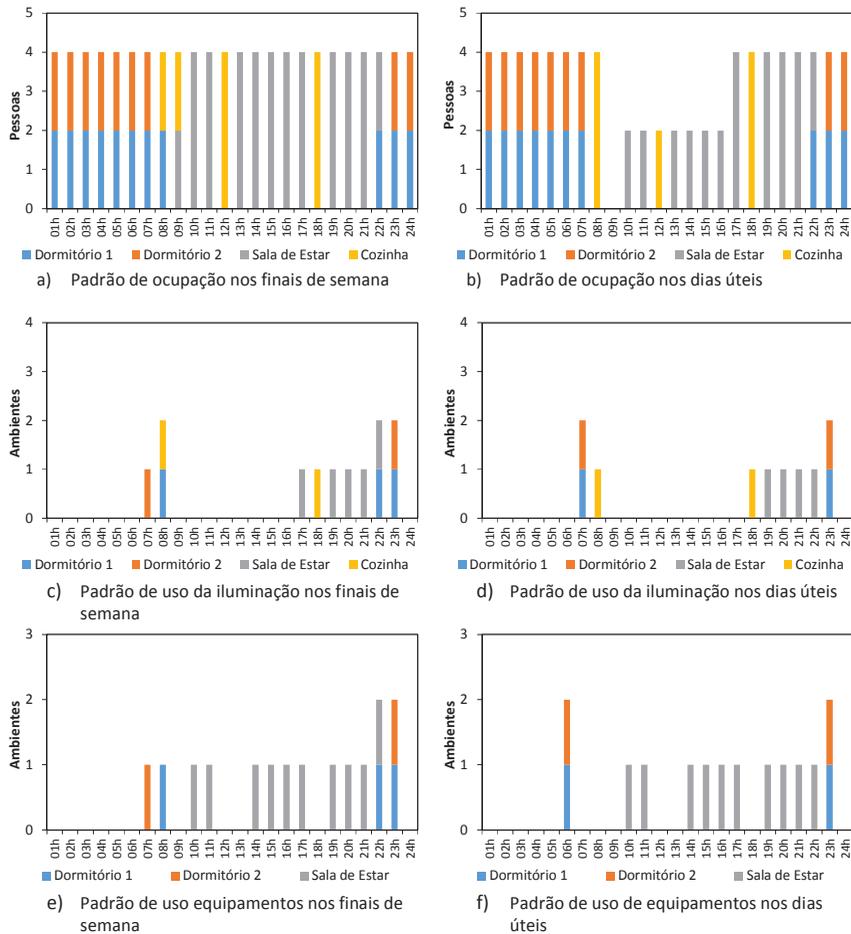


Figura 7 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família (4.1) 4 usuários

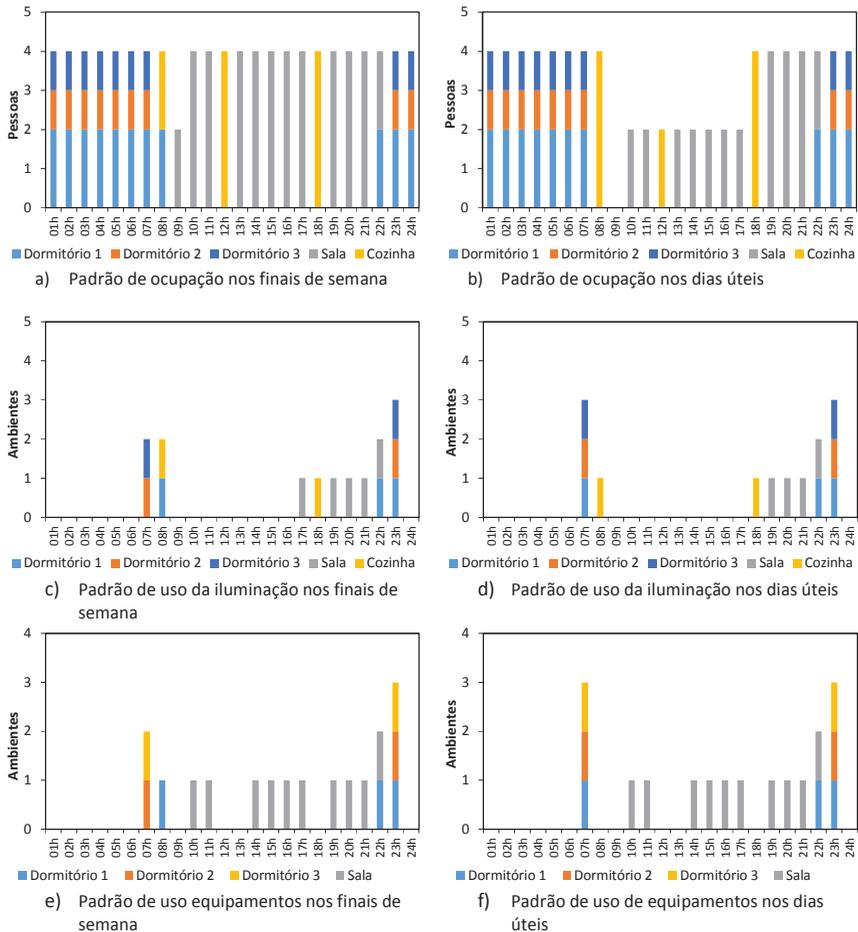


Figura 8 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 5 usuários

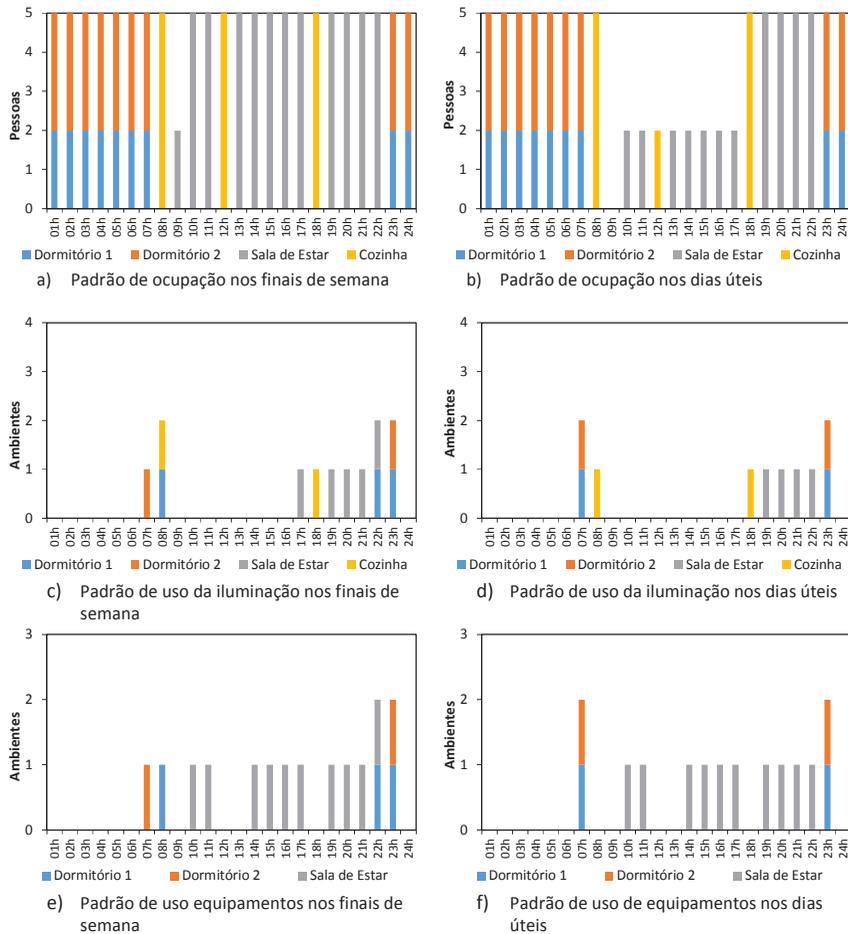


Figura 9 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família (5.1) 5 usuários

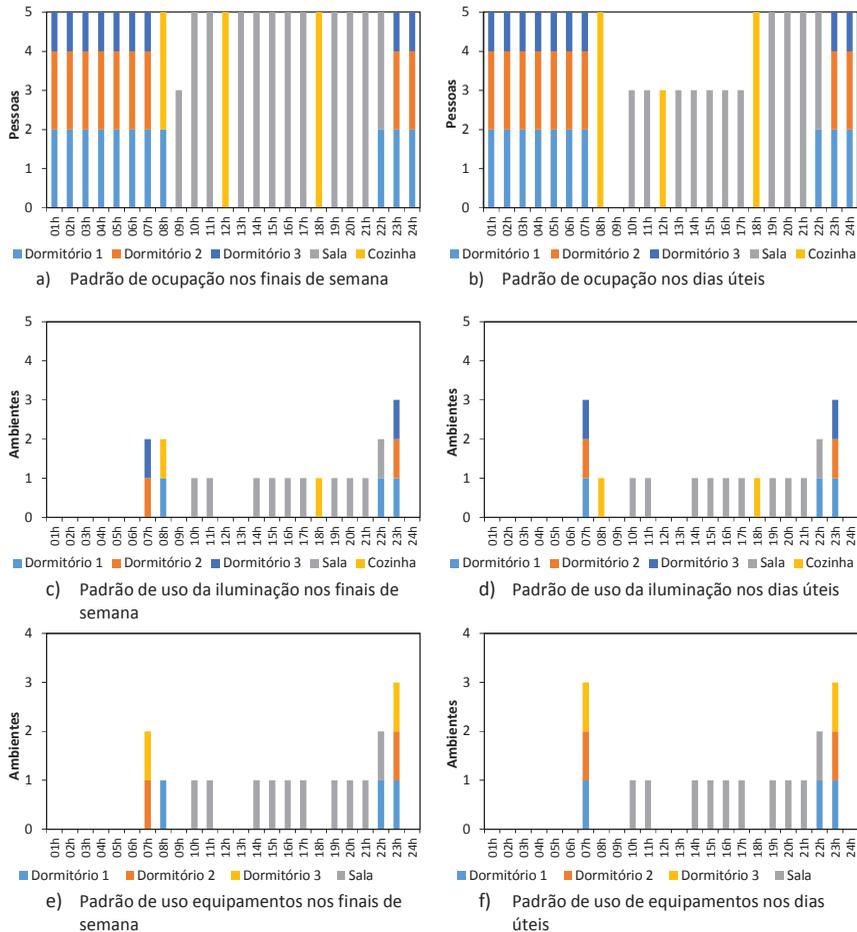
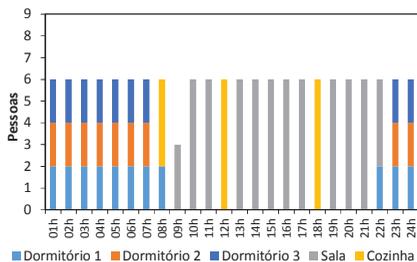
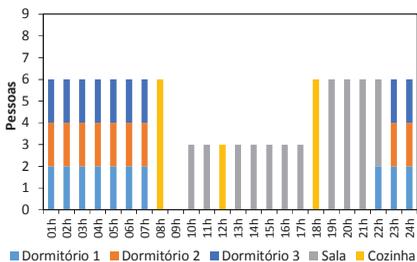


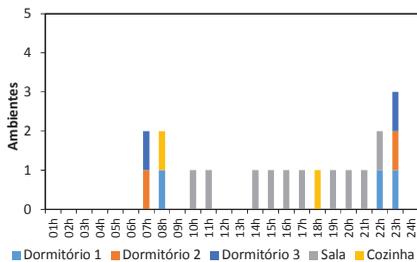
Figura 10 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 6 usuários



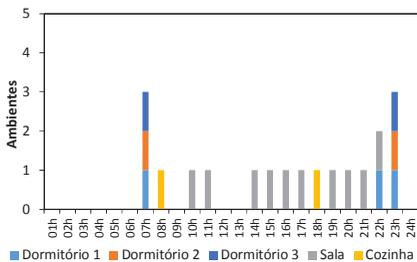
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



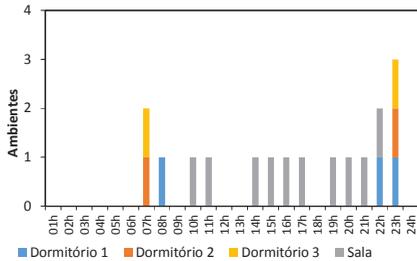
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



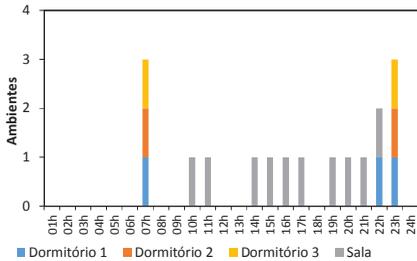
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis



e) Padrão de uso de equipamentos nos finais de semana



f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

Figura 11 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 7 usuários

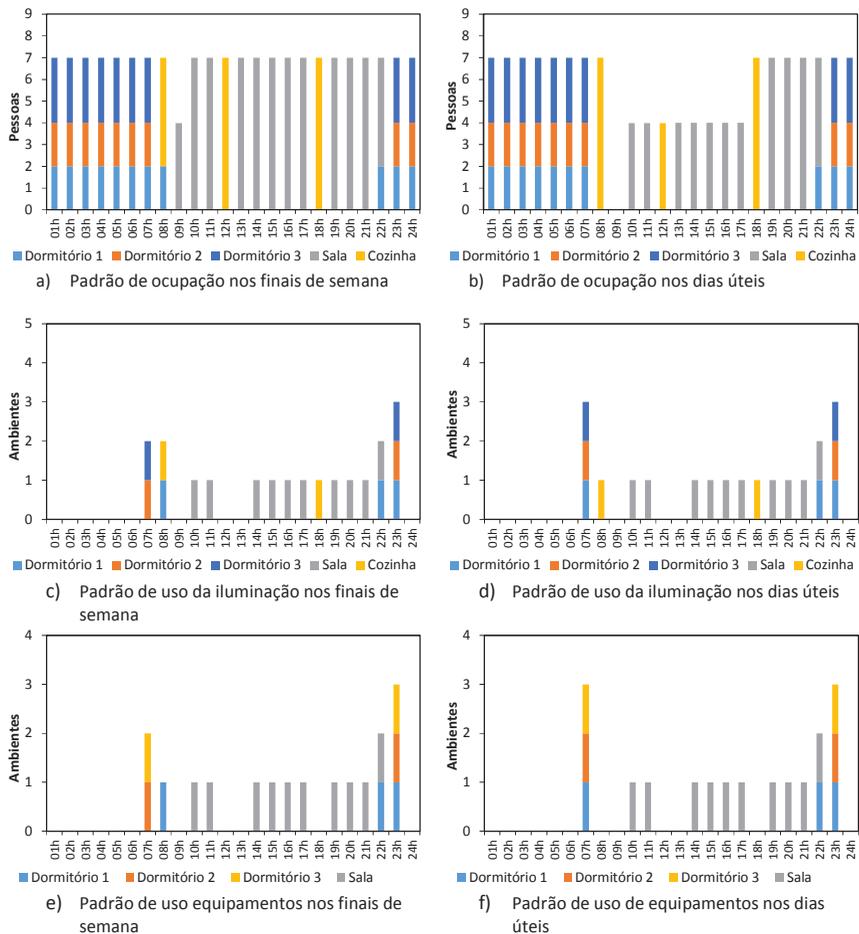
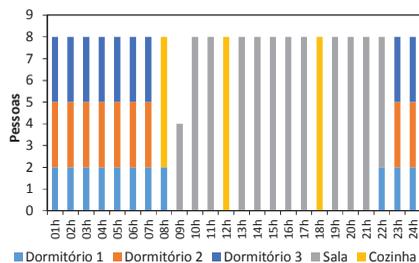
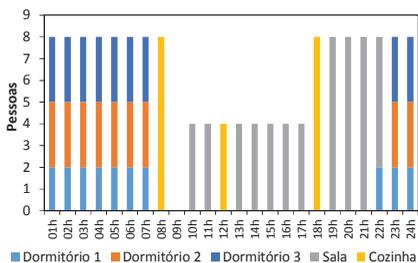


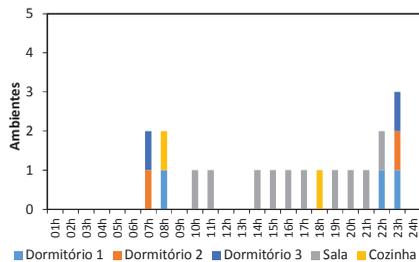
Figura 12 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 8 usuários



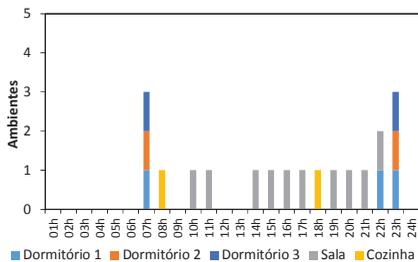
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



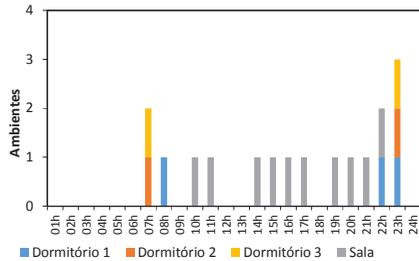
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



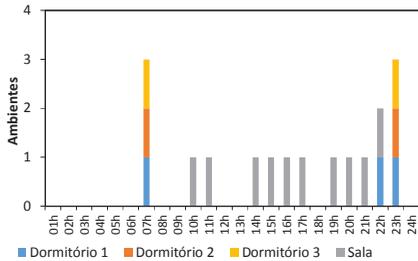
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis

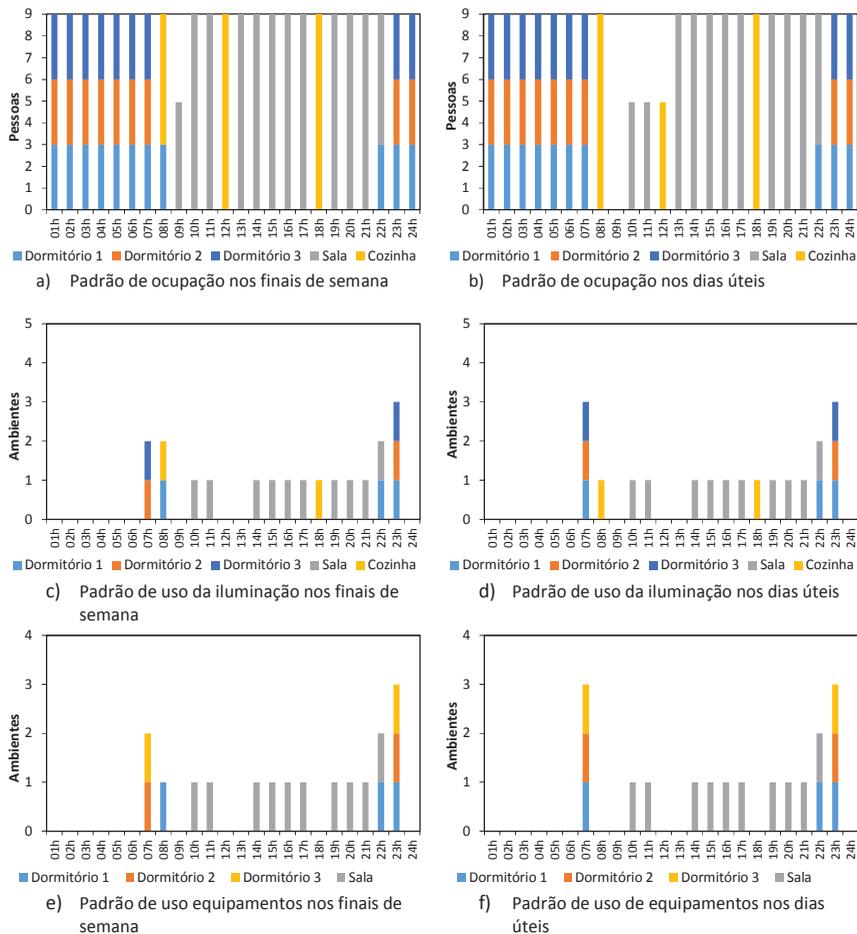


e) Padrão de uso de equipamentos nos finais de semana



f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

Figura 13 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário tradicional, tamanho da família 9 usuários



Apêndice C – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível.

Figura 1 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 1 usuário

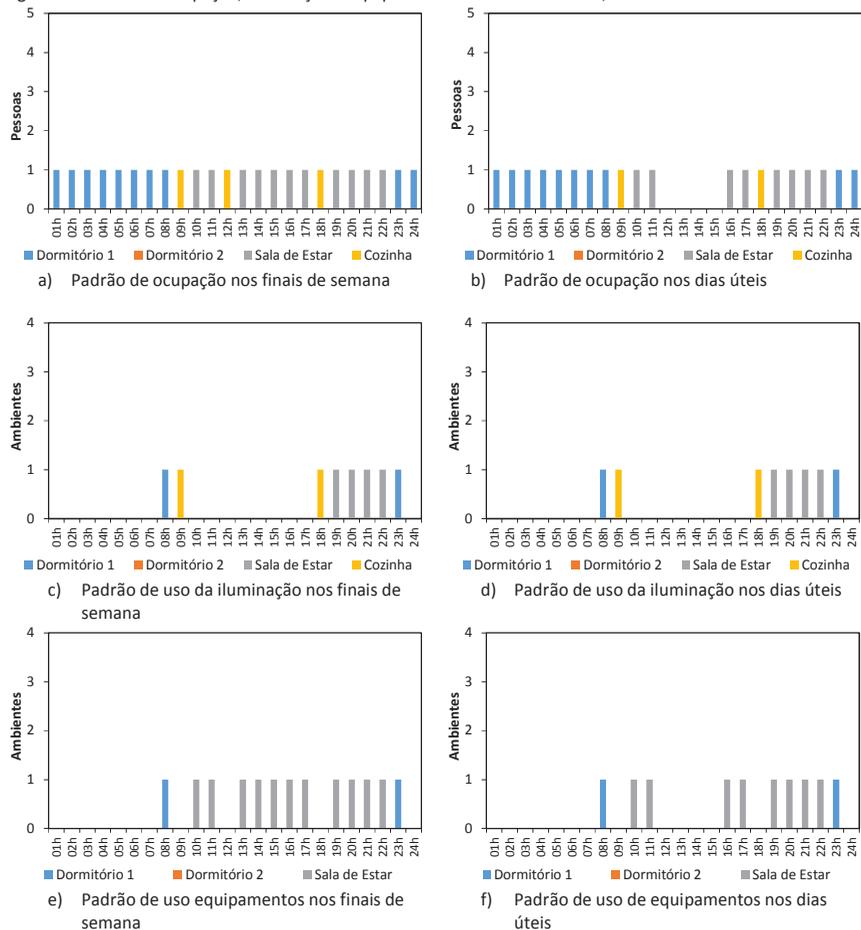


Figura 2 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 2 usuários

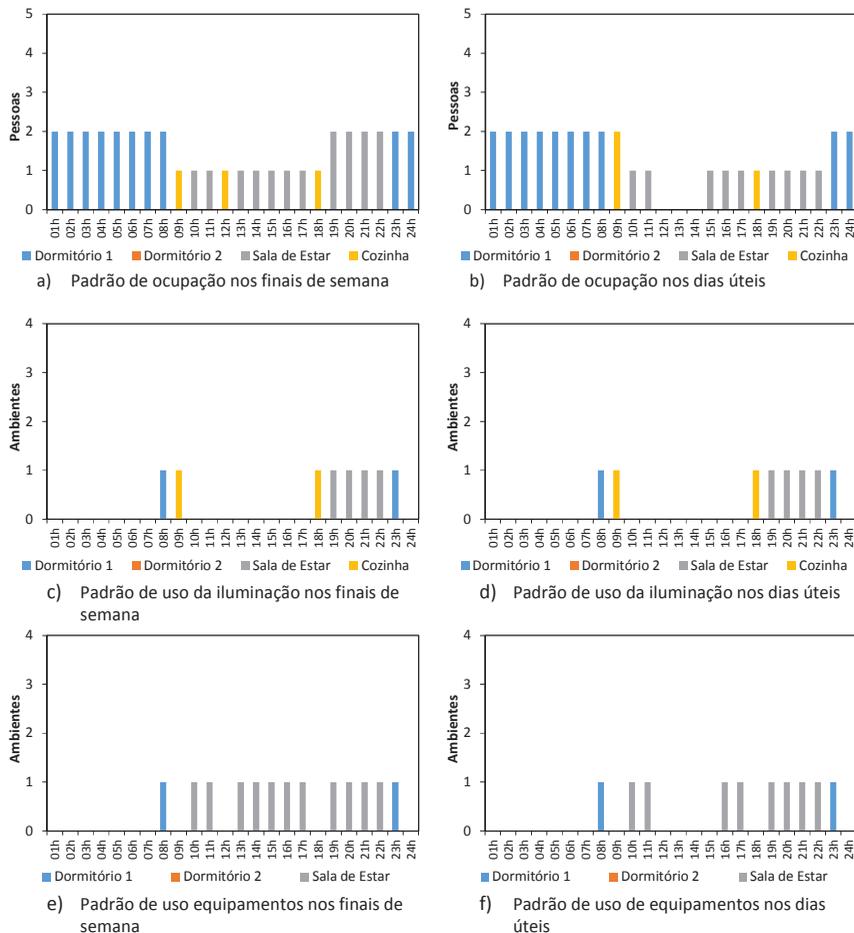


Figura 3 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família (2.1) 2 usuários

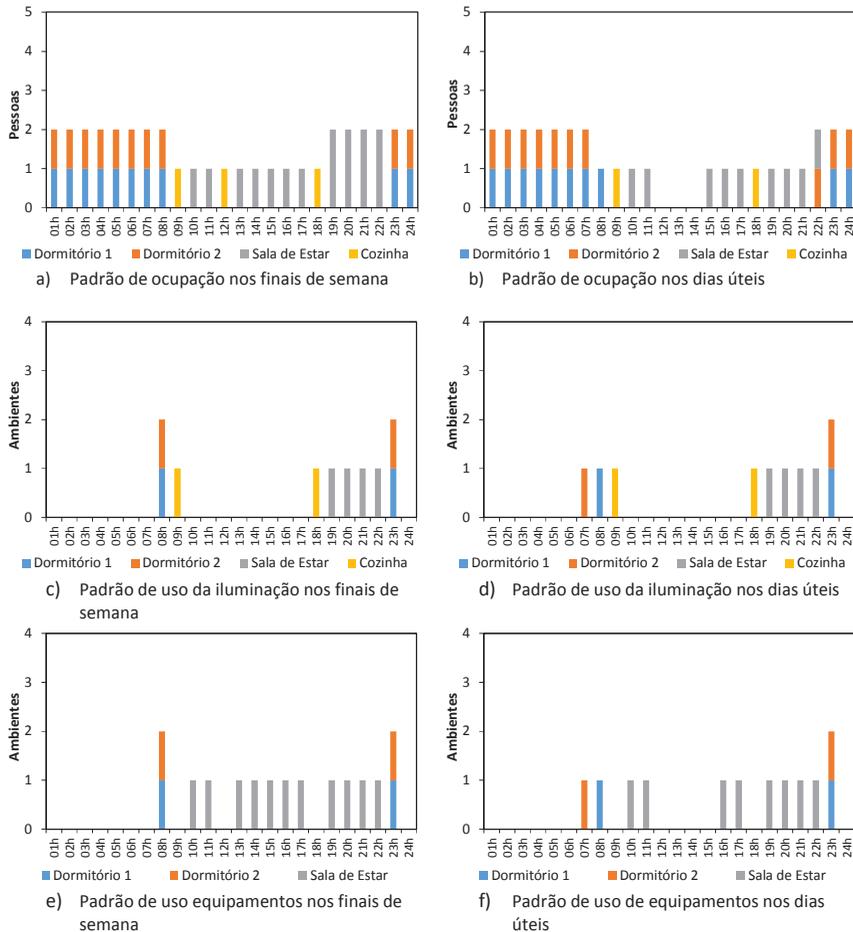
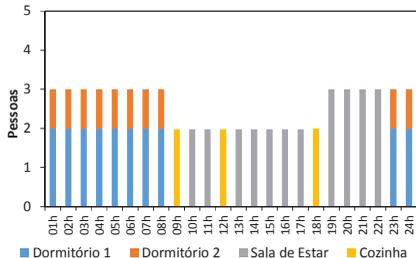
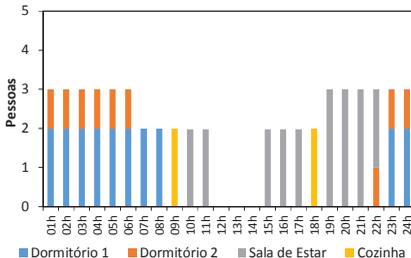


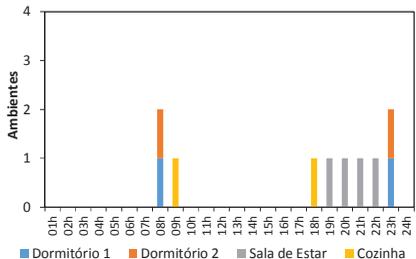
Figura 4 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 3 usuários



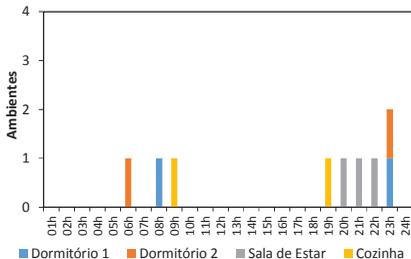
a) Padrão de ocupação nos finais de semana



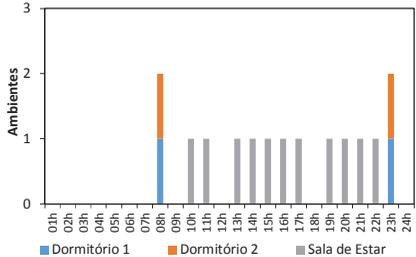
b) Padrão de ocupação nos dias úteis



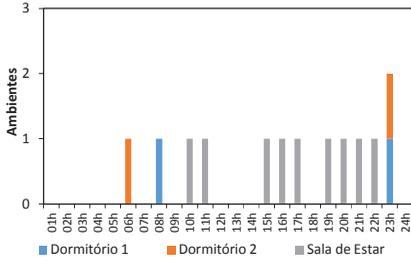
c) Padrão de uso da iluminação nos finais de semana



d) Padrão de uso da iluminação nos dias úteis



e) Padrão de uso equipamentos nos finais de semana



f) Padrão de uso de equipamentos nos dias úteis

Figura 5 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família (3.1) 3 usuários

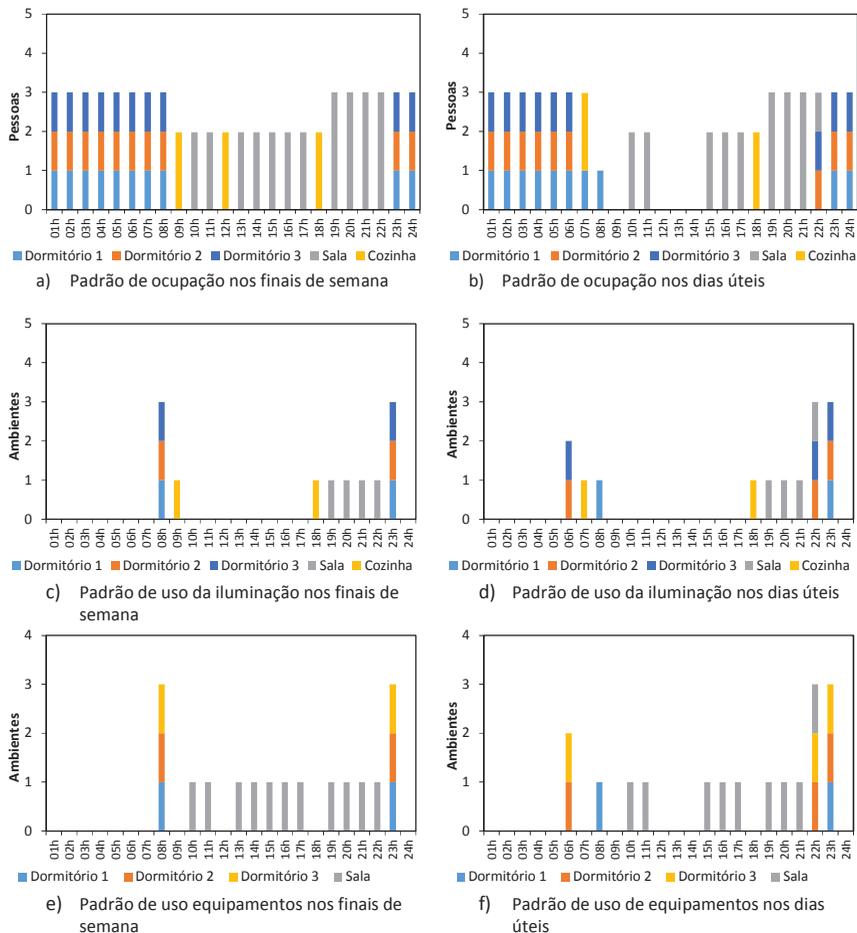


Figura 6 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 4 usuários

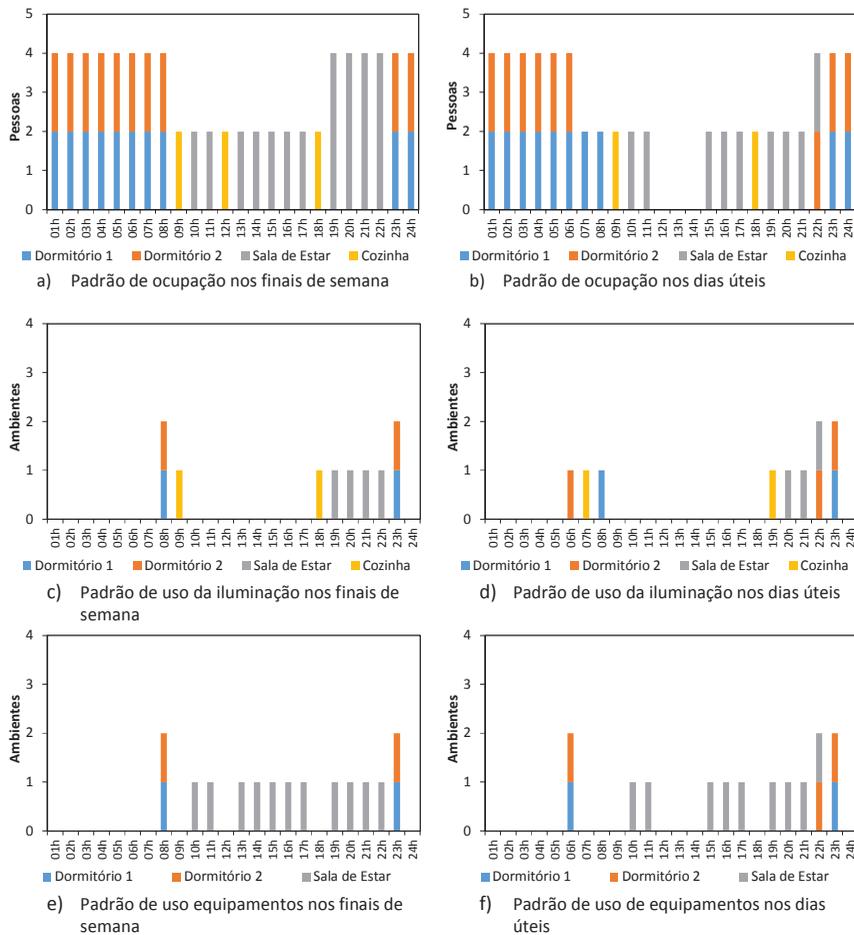


Figura 7 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família (4.1) 4 usuários

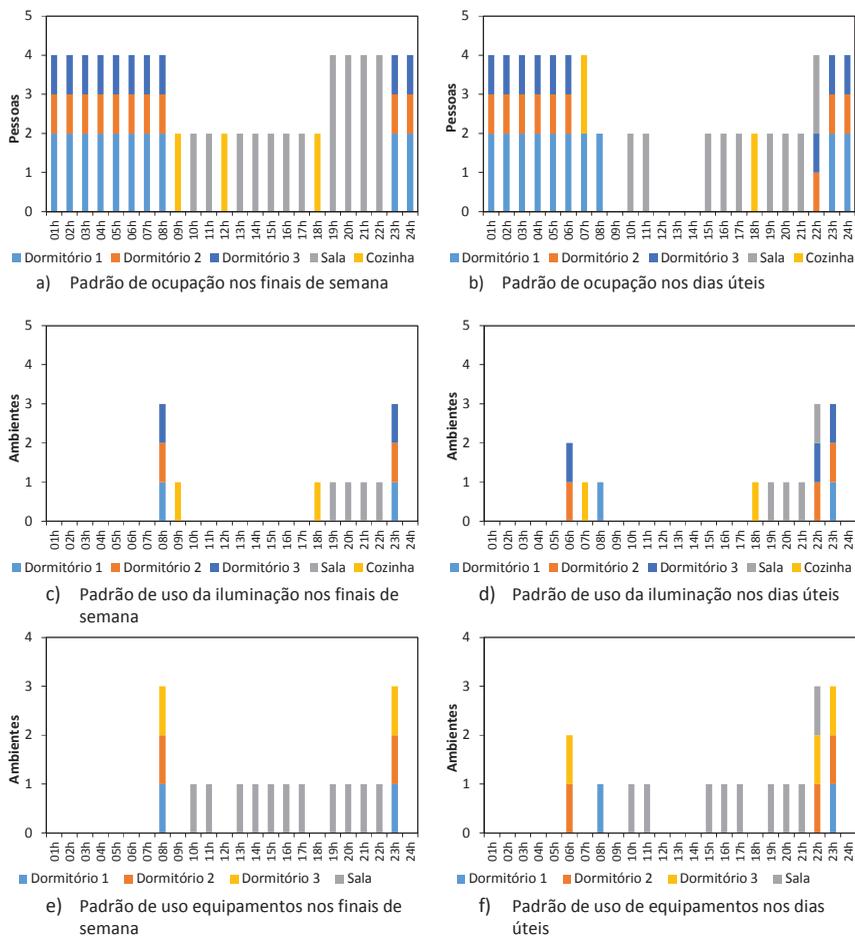


Figura 8 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 5 usuários

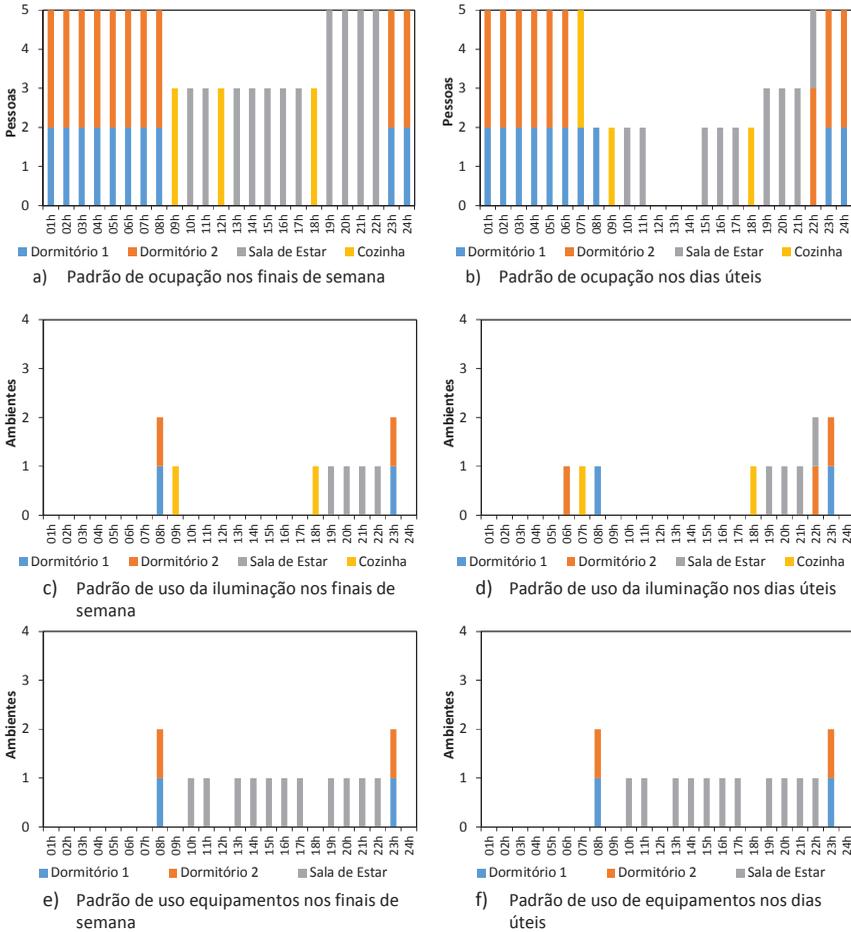


Figura 9 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família (5.1) 5 usuários

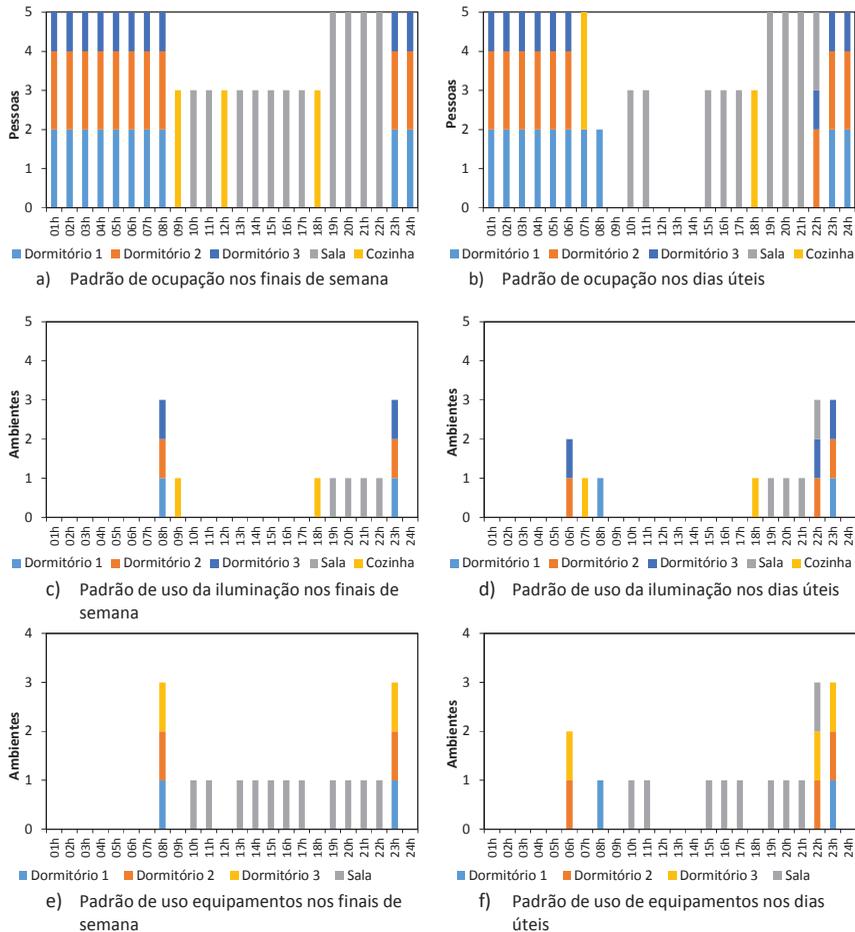


Figura 10 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 6 usuários

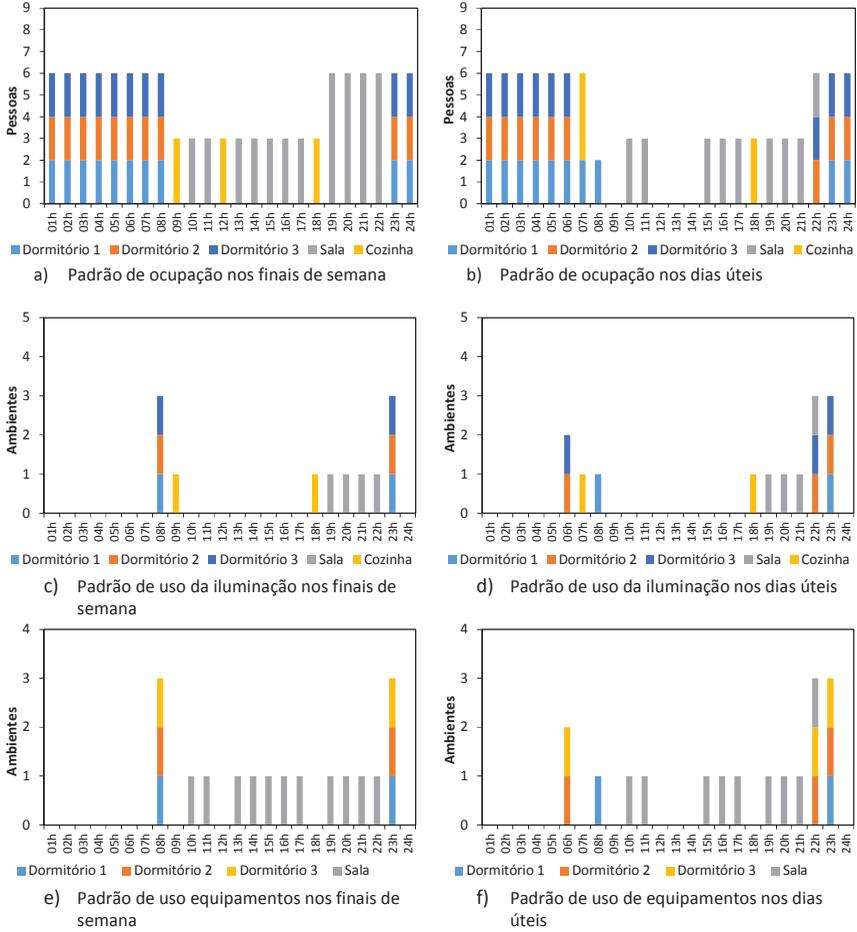


Figura 11 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 7 usuários

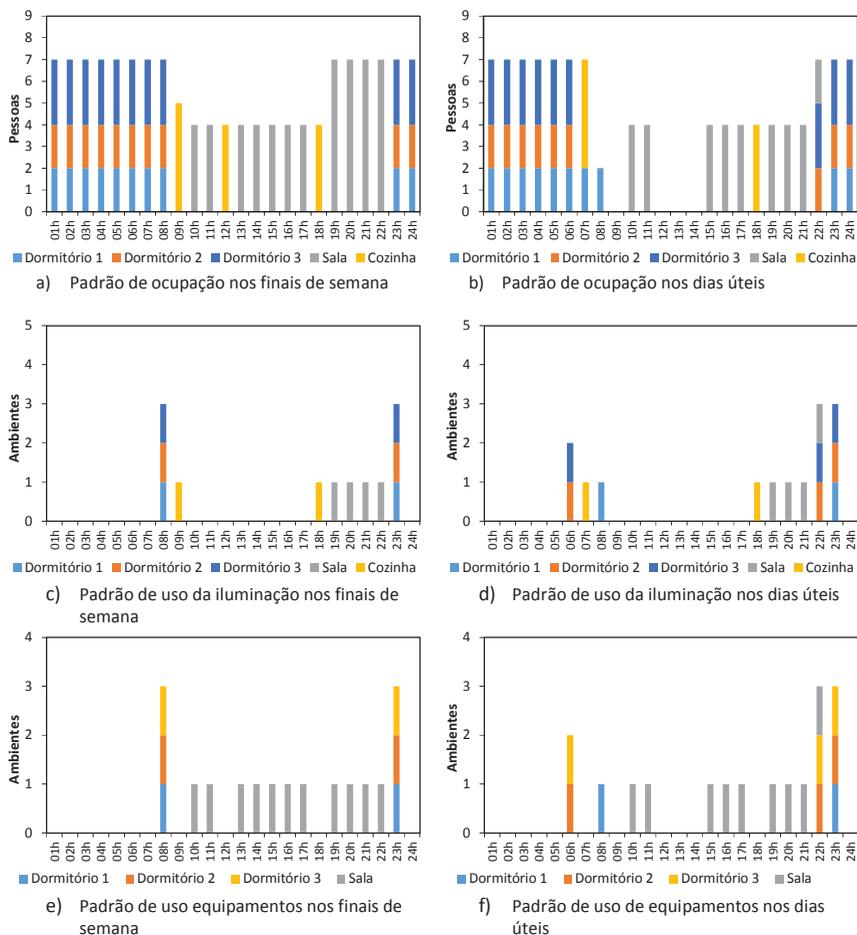


Figura 12 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 8 usuários

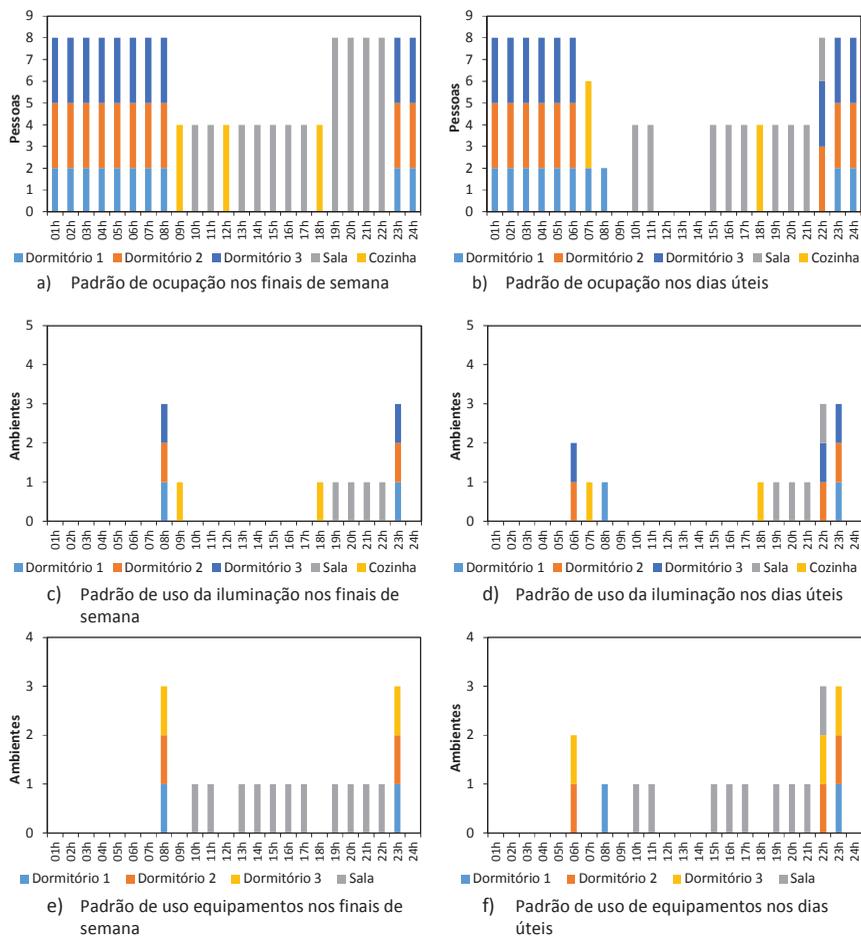
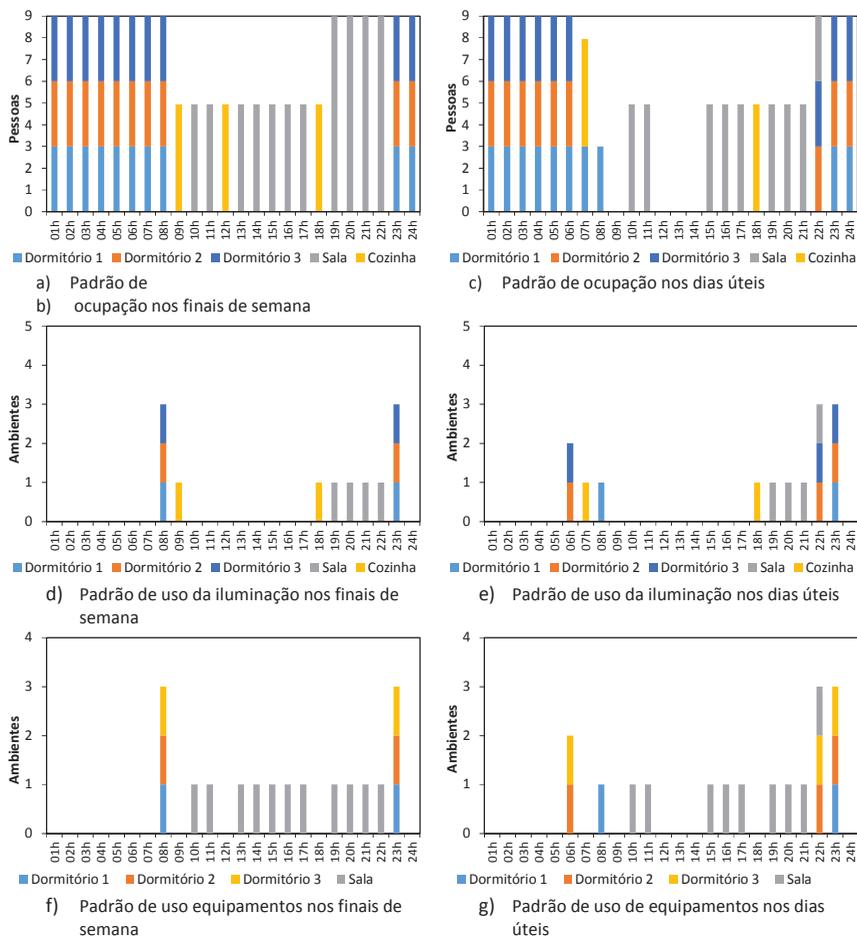


Figura 13 – Padrão de ocupação, iluminação e equipamentos do usuário flexível, tamanho da família 9 usuários

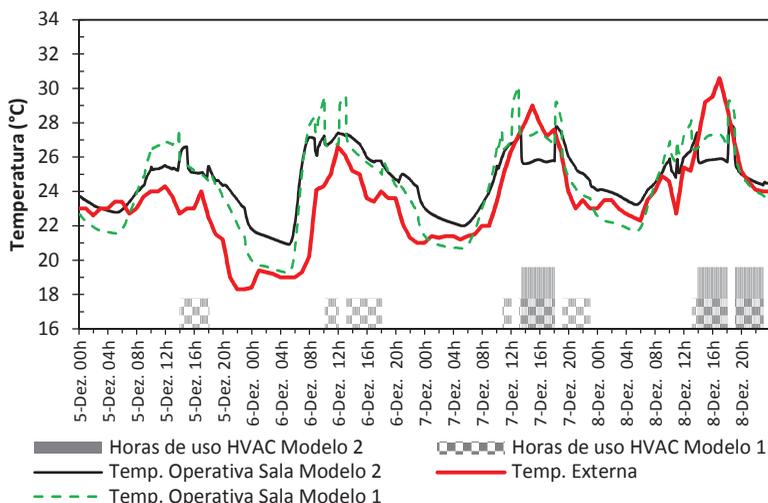


Apêndice D – Análise das temperaturas operativas dos modelos

Modelos unifamiliares 1 e 2

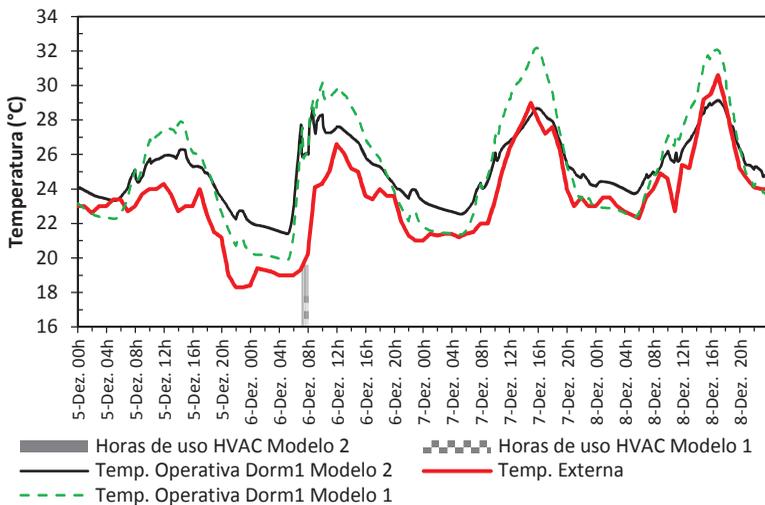
Para a análise das temperaturas operativas dos modelos unifamiliares 1 e 2 (caso c00718) foi selecionado 4 dias no mês de dezembro (de 5 de dezembro a 8 de dezembro). Observa-se na Figura 1 que o modelo unifamiliar 1 apresenta os maiores picos de temperatura operativa da sala de estar, apresentando maior amplitude da temperatura operativa quando comparado com o modelo unifamiliar 2. No modelo unifamiliar 1 a demanda de uso do sistema de condicionamento artificial da sala foi de aproximadamente 30h (em oito períodos). No modelo unifamiliar 2 a demanda de uso do sistema de condicionamento artificial foi de aproximadamente 13h (em três períodos). Com base nos resultados, pode-se afirmar que o aumento da área do ambiente proporcionou menores picos de temperatura operativa no ambiente, resultando em menor consumo de energia para condicionamento artificial do ambiente.

Figura 1 – Análise das temperaturas operativas da sala de estar e os períodos de operação do sistema de condicionamento artificial dos modelos unifamiliares 1 e 2



As temperaturas operativas do dormitório 1 apresentaram comportamento semelhante a sala de estar (caso c00718)¹. Nota-se que a temperatura operativa do modelo unifamiliar 1 apresentou maior amplitude, quando comparado com o modelo unifamiliar 2 (Figura 2). A demanda de uso do sistema de condicionamento artificial no dormitório 1 foi baixa em ambos os modelos unifamiliares (1 e 2), durante o período de 5 de dezembro a 8 de dezembro. As maiores temperaturas ocorreram no período diurno, neste período não havia ocupação no dormitório. Os resultados mostram que o modelo unifamiliar 2 que possui maior área apresentou melhor desempenho térmico no período analisado.

Figura 2 – Análise das temperaturas operativas do dormitório 1 e os períodos de operação do sistema de condicionamento artificial dos modelos unifamiliares 1 e 2

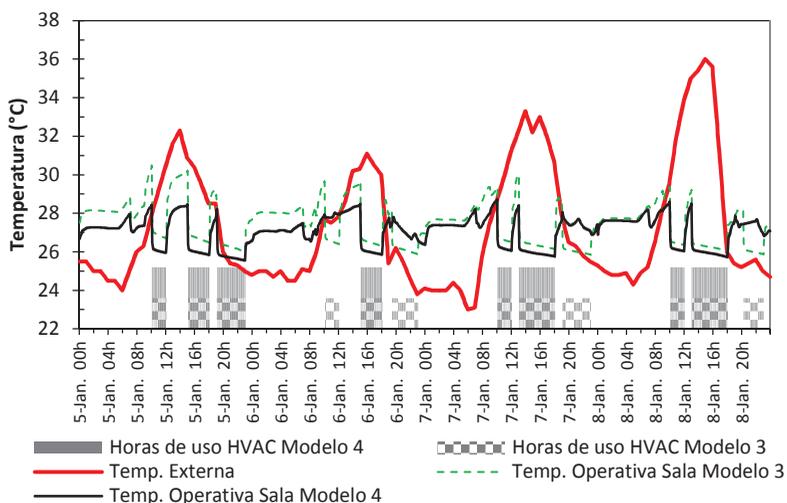


¹ Características do caso analisado nos modelos unifamiliares 1 e 2

Caso	Usuário	Família	Comportamento	Conforto	U _{ParExt}	C _{tPar}	α _{Par}	U _{Cob}	C _{tCob}	α _{Cob}	C _{iEqu}
c00718	Tradicional	3	Passivo	ASHRAE	3,6	27,0	0,7	1,9	27,0	0,7	60/120

Para os modelos multifamiliares foi selecionado o caso c01354² para realizar a análise das temperaturas operativas. Observa-se na Figura 3 que a temperatura operativa da sala de estar do modelo multifamiliar 4 é predominantemente inferior a temperatura operativa da sala de estar do modelo multifamiliar 3. O período analisado foi de quatro de janeiro a 8 de janeiro.

Figura 3 – Análise das temperaturas operativas da sala de estar e os períodos de operação do sistema de condicionamento artificial dos modelos multifamiliares 3 e 4



Em relação ao uso do sistema de condicionamento artificial, a sala de estar do modelo 3 apresentou maior uso do sistema no período, contribuindo para o maior consumo anual de energia para

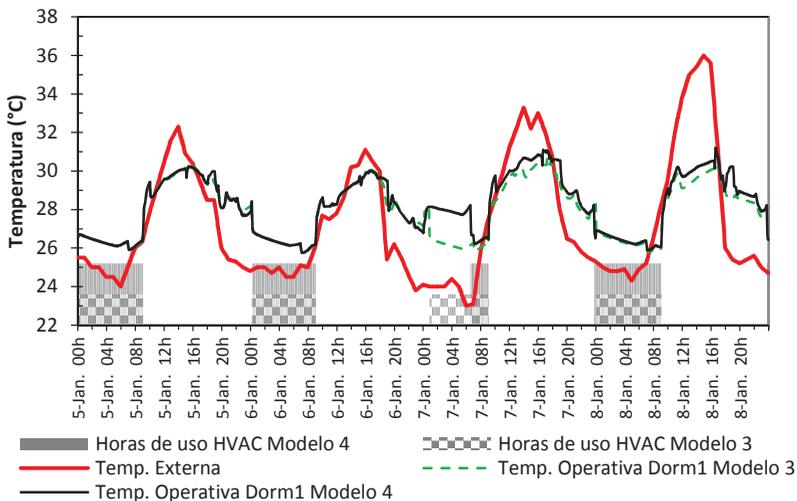
² Características do caso analisado nos modelos multifamiliares 3 e 4

Caso	Usuário	Família	Comportamento	Conforto	U_{ParExt}	Ct_{Par}	α_{Par}	Ct_{For}	Ci_{Equ}
c01354	Flexível	5	Passivo	PMV	2,2	146,0	0,3	113,0	120/240

condicionamento artificial do modelo 3, quando comparado com o modelo multifamiliar 4.

Para o dormitório 1 (Figura 4) a diferença entre as temperaturas operativas do modelo multifamiliar 3 e 4 foram pequenas para o período analisado (de 4 de janeiro a 8 de janeiro). Observa-se que o modelo multifamiliar 3 apresentou maior tempo de uso do sistema de condicionamento artificial. Em função do padrão de ocupação do dormitório 1 ser restrito no período noturno, reduz o impacto dos picos de temperatura externa do período, diferente do comportamento que ocorre na sala de estar.

Figura 4 – Análise das temperaturas operativas do dormitório 1 e os períodos de operação do sistema de condicionamento artificial dos modelos multifamiliares 3 e 4



Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Roberto Lamberts

Florianópolis, 2015