



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INVESTIGAÇÃO DA VIABILIDADE DA REDUÇÃO DO  
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM EDIFICAÇÕES  
RESIDENCIAIS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE  
SOLUÇÕES DE CONFORTO AMBIENTAL PASSIVO**

**JOSIANE RESCHKE PIRES**

São Leopoldo, Fevereiro de 2013.

P667i

Pires, Josiane Reschke.

Investigação da viabilidade da redução do consumo de energia elétrica em edificações residenciais através da aplicação de soluções de conforto ambiental passivo / Josiane Reschke Pires. – 2013.

228 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2013.

"Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González."

1. Engenharia civil. 2. Desempenho térmico. 3. Análise do ciclo de vida. 4. Energia incorporada. 5. Selo Procel. 6. EnergyPlus. I. Título.

CDU 624

JOSIANE RESCHKE PIRES

**INVESTIGAÇÃO DA VIABILIDADE DA REDUÇÃO DO  
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM EDIFICAÇÕES  
RESIDENCIAIS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES  
DE CONFORTO AMBIENTAL PASSIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González

**Banca examinadora:** Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Manuela de  
Oliveira Guedes de Almeida  
Prof. Dr. Roberto Lamberts

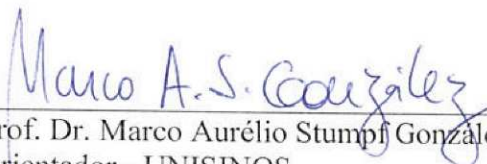
São Leopoldo, Fevereiro de 2013.

**JOSIANE RESCHKE PIRES**

**“INVESTIGAÇÃO DA VIABILIDADE DA REDUÇÃO DO  
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM EDIFICAÇÕES  
RESIDENCIAIS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES  
DE CONFORTO AMBIENTAL PASSIVO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 21 de março de 2013.

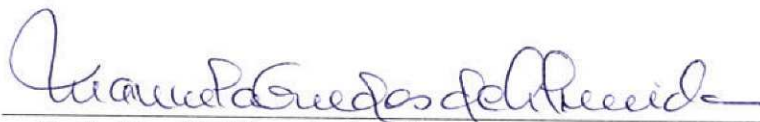


Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf Gonzalez  
Orientador - UNISINOS

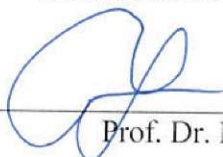


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Coordenador do PPGEC - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. M. Manuela de Oliveira Guedes de Almeida  
Universidade do Minho - Portugal



Prof. Dr. Roberto Lamberts  
UFSC

A minha família.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pelos ensinamentos, educação e apoio em todos meus projetos.

A minha irmã Lisiane e ao Mateus, pela companhia e motivações constantes.

Aos meus amigos pelos incentivos demonstrados.

Aos professores e funcionários do PPGEC, em especial ao meu orientador, Marco A. S. Gonzalez, pela confiança, dedicação e competência na orientação desta dissertação.

A todos os colegas do PPGEC e aos bolsistas de iniciação científica, Greice Capeletti, Bruna Brenner, Luciana Silva Roos, Grazielle de Camargo e Gustavo Benine pela disposição e ajuda durante esses dois anos.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES/PROSUP, pela concessão da bolsa de estudos e CNPq, pelo financiamento da pesquisa.





## **FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA**

Este trabalho foi realizado na Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, com apoio da CAPES – bolsa Prosup.



**PROSUP – Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior**



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	22
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	24
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	CONFORTO TÉRMICO	27
2.1.1	Caracterização do clima	28
2.1.2	Transmissão de calor	28
2.1.3	Índices de conforto térmico	30
2.1.4	Desempenho térmico	31
2.1.5	Eficiência energética	33
2.2	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA	34
2.2.1	Zoneamento bioclimático brasileiro	34
2.2.2	Princípios da arquitetura bioclimática	35
2.2.3	Estratégias bioclimáticas	35
2.3	SIMULAÇÃO E ANÁLISE	42
2.3.1	Ferramentas para simulação	42
2.3.2	Formas de avaliação	47
2.3.3	Estudos anteriores	65
2.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	69
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b>	<b>71</b>
3.1	FUNDAMENTO DO MÉTODO	72
3.2	APRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DA PESQUISA	72
3.2.1	Características dos municípios	72
3.2.2	Descrição dos projetos e das condições de ocupação	76
3.3	APRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTUDADOS	81
3.3.1	Cobertura	82
3.3.2	Paredes externas	83
3.3.3	Esquadrias	83
3.4	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	84
3.4.1	Programas computacionais	84
3.4.2	Parâmetros de modelagem e simulação	85
3.5	CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
3.5.1	Análise de desempenho térmico	86
3.5.2	Análise do ciclo de vida	88
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>91</b>
4.1	DESEMPENHO TÉRMICO	91
4.1.1	Edificação 1	92
4.1.2	Edificação 2	104
4.1.3	Edificação 3	115
4.1.4	Edificação 4	126
4.1.5	Discussão dos resultados	137
4.2	ANÁLISE DOS CUSTOS NO CICLO DE VIDA	145
4.2.1	Edificação 1	145
4.2.2	Edificação 2	150
4.2.3	Edificação 3	154
4.2.4	Edificação 4	158
4.2.5	Análise do ciclo de vida energético	161
4.2.6	Discussão dos resultados	163

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>165</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	170
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>171</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>181</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>225</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ferramentas de simulação de conforto ambiental e eficiência energética.....	45
Tabela 2 – Diretrizes construtivas e estratégias projetuais para a ZB 1 e ZB 3.....	47
Tabela 3 – Caracterização para as aberturas de ventilação. ....	47
Tabela 4 – Caracterização de paredes e coberturas. ....	47
Tabela 5 – Critério de avaliação de desempenho térmico.....	49
Tabela 6 – Equivalente numérico da envoltória do ambiente - ZB 1 e ZB 3.....	53
Tabela 7 – Equivalente numérico e classificação do nível de eficiência.....	53
Tabela 8 – Consumo de eletricidade das edificações residenciais brasileiras.....	77
Tabela 9 – Perfil de posse dos equipamentos.....	77
Tabela 10 – Potência total em iluminação instalada.....	79
Tabela 11 – Propriedades base dos envelopes.....	80
Tabela 12 – Temperatura de solo.....	81
Tabela 13 – Propriedades termofísicas dos materiais – Paredes, coberturas, forros e pisos....	82
Tabela 14 – Critério de avaliação de desempenho térmico para ZB 1 e ZB 3.....	87
Tabela 15 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 1.....	92
Tabela 16 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 1.....	93
Tabela 17 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 1.....	94
Tabela 18 – Nível Selo Procel –Edificação 1.....	97
Tabela 19 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 1.....	98
Tabela 20 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 1.....	99
Tabela 21 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 1.....	100
Tabela 22 – Nível Selo Procel – Edificação 1.....	103
Tabela 23 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 2.....	104
Tabela 24 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 2.....	106
Tabela 25 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 2.....	106
Tabela 26 – Nível Selo Procel –Edificação 2.....	110
Tabela 27 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 2.....	110
Tabela 28 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 2.....	111
Tabela 29 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 2.....	112
Tabela 30 – Nível Selo Procel – Edificação 2.....	115
Tabela 31 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 3.....	116
Tabela 32 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 3.....	117
Tabela 33 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 3.....	118
Tabela 34 – Nível Selo Procel – Edificação 3.....	120
Tabela 35 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 3.....	121
Tabela 36 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 3.....	122
Tabela 37 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 3.....	123
Tabela 38 – Nível Selo Procel – Edificação 3.....	126
Tabela 39 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 4.....	127
Tabela 40 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 4.....	128
Tabela 41 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 4.....	129
Tabela 42 – Nível Selo Procel – Edificação 4.....	131
Tabela 43 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 4.....	132
Tabela 44 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 4.....	133
Tabela 45 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 4.....	134
Tabela 46 – Nível Selo Procel – Edificação 4.....	137
Tabela 47 – Síntese ACCV– Edificação 1 – Bento Gonçalves.....	147

Tabela 48 – Síntese ACCV– Edificação 1 – Porto Alegre .....	149
Tabela 49 – Síntese ACCV– Edificação 2 – Bento Gonçalves.....	152
Tabela 50 – Síntese ACCV– Edificação 2 – Porto Alegre .....	153
Tabela 51 – Síntese ACCV– Edificação 3 – Bento Gonçalves.....	155
Tabela 52 – Síntese ACCV– Edificação 3 – Porto Alegre .....	158
Tabela 53 – Síntese ACCV– Edificação 4 – Bento Gonçalves.....	159
Tabela 54 – Síntese ACCV– Edificação 4 – Porto Alegre .....	161
Tabela 55 – Quadro geral dos resultados da análise térmica. ....	167
Tabela 56 – Quadro geral dos resultados da análise econômica.....	169

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transmissão de calor.....	29
Figura 2 – Zoneamento bioclimático brasileiro.....	34
Figura 3 – Predomínio de cores nas edificações.....	37
Figura 4 – Transmissão de energia solar através de três tipos de vidro .....	41
Figura 5 – Tipos de aberturas de janelas: .....	41
Figura 6 – ENCE unidade habitacional .....	51
Figura 7 – Síntese da pesquisa.....	71
Figura 8 – Densidade demográfica por cidade e identificação dos locais da pesquisa .....	73
Figura 9 – Carta bioclimática – Bento Gonçalves.....	75
Figura 10 – Carta bioclimática – Porto Alegre.....	76
Figura 11 – Exemplos de apartamentos com ar condicionado em HIS – São Leopoldo .....	78
Figura 12 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 1 .....	93
Figura 13 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 1 .....	94
Figura 14 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 1 .....	94
Figura 15 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 1 .....	95
Figura 16 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 1 .....	96
Figura 17 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 1 .....	97
Figura 18 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 1 .....	99
Figura 19 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 1 .....	100
Figura 20 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 1 .....	101
Figura 21 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 1 .....	102
Figura 22 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 1 .....	102
Figura 23 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 1 .....	103
Figura 24 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 2 .....	105
Figura 25 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 2 .....	106
Figura 26 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 2 .....	107
Figura 27 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 2 .....	108
Figura 28 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 2.....	108
Figura 29 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 2 .....	109
Figura 30 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 2 .....	111
Figura 31 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 2 .....	112
Figura 32 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 2 .....	112
Figura 33 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 2 .....	113
Figura 34 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 2 .....	114
Figura 35 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 2 .....	114
Figura 36 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 3 .....	116
Figura 37 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 3 .....	117
Figura 38 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 3 .....	118
Figura 39 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 3 .....	119
Figura 40 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 3 .....	119
Figura 41 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 3 .....	120
Figura 42 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 3 .....	122
Figura 43 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 3 .....	123
Figura 44 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 3 .....	123
Figura 45 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 3 .....	124
Figura 46 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 3 .....	125
Figura 47 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 3 .....	125

Figura 48 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 4.....	127
Figura 49 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 4.....	128
Figura 50 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 4.....	129
Figura 51 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 4.....	130
Figura 52 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 4.....	130
Figura 53 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 4.....	131
Figura 54 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 4.....	133
Figura 55 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 4.....	134
Figura 56 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 4.....	134
Figura 57 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 4.....	135
Figura 58 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 4.....	136
Figura 59 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 4.....	136
Figura 60 – Correlação entre graus-hora e transmitância térmica. ....	140
Figura 61 – Correlação entre graus-hora e transmitância térmica. ....	144
Figura 62 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	146
Figura 63 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 1 .....	146
Figura 64 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 1.....	147
Figura 65 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	148
Figura 66 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 1 .....	148
Figura 67 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 1.....	149
Figura 68 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	150
Figura 69 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 2 .....	151
Figura 70 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 2.....	151
Figura 71 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	152
Figura 72 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 2 .....	153
Figura 73 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 2.....	153
Figura 74 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	154
Figura 75 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 3 .....	154
Figura 76 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 3.....	155
Figura 77 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	156
Figura 78 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 3 .....	157
Figura 79 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 3.....	157
Figura 80 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	158
Figura 81 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 4.....	159
Figura 82 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 4.....	159
Figura 83 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas .....	160
Figura 84 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 4.....	160
Figura 85 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 4.....	161
Figura 86 – Síntese ACVE.....	162



## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Análise do Ciclo de Vida

ACCV – Análise dos custos no ciclo de vida

ACVE – Análise do ciclo de vida energético

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

BIM – *Building Information Modeling*

CAD – *Computer Aided-Design*

EI – Energia Incorporada

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EqNumEnv – Equivalente numérico da envoltória

EqNumEnv<sub>A</sub> – Equivalente numérico da envoltória do ambiente

EqNumEnv<sub>Resfr</sub> – Equivalente numérico da envoltória para resfriamento

EqNumEnv<sub>R</sub> – Equivalente numérico da envoltória para refrigeração

HIS – Habitação de Interesse Social

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO – *International Standardization Organization*

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC

MCMV – Minha Casa Minha Vida

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira Registrada

NIST – *National Institute of Standards and Technology*

PIB – Produto Interno Bruto

PMV – *Predicted Mean Vote* (Voto Médio Predito)

PPD – *Predicted Percentage Dissatisfied* (Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas Predita)

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PROCEL EDIFICA - Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificação

RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SINPHA – Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos

SIS – Síntese de Indicadores Sociais

UNEP – *United Nations Environment Programme*

ZB – Zona Bioclimática

## RESUMO

PIRES, J.R. **Investigação da viabilidade da redução do consumo de energia elétrica em edificações residenciais através da aplicação de soluções de conforto ambiental passivo.** São Leopoldo, 2013. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2013.

A preocupação com a sustentabilidade sugere a busca pela otimização dos recursos naturais. Um dos aspectos necessários é adequar as edificações para o clima em que estão localizadas, reduzindo o consumo energético da habitação e ampliando o conforto ambiental. O objetivo desta pesquisa é investigar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de critérios de desempenho térmico em edificações residenciais. A investigação foi centrada na identificação dos custos e da energia no ciclo de vida de projetos simulados com soluções baseadas em conforto ambiental passivo (natural) e ativo (artificial), verificando a influência no consumo de energia da edificação. Foi aplicada em projetos de edificações residenciais verticais e horizontais, de classe média e baixa, em dois climas distintos (Porto Alegre e Bento Gonçalves, RS), examinando o tipo de envelope, as absorções e o uso de elementos construtivos. Para análise do desempenho térmico foi adotada a norma de desempenho NBR 15575 e método graus-hora, com modelagem BIM, utilizando o Revit/Autodesk e para as simulações térmicas foi empregado o *EnergyPlus*, software especializado em análise energética para edificações. O ciclo de vida dos projetos propostos foi analisado considerando-se um período de 50 anos, comparando os custos e a energia incorporada das alternativas. Como um segundo parâmetro de sustentabilidade, também se analisou a eficiência energética conforme o selo de eficiência energética Procel Edifica. Os resultados indicam que com o aumento do isolamento da envoltória se verifica uma melhoria do conforto térmico, de até 54%, e economia de energia, em ambos os climas, com um período de retorno de 2 a 6 anos, em alguns casos.

Palavras-chave: Desempenho térmico; Análise do ciclo de vida; Energia incorporada; Selo Procel; *EnergyPlus*.



## ABSTRACT

**PIRES, J.R. Investigation of the viability of reducing energy consumption in residential buildings through the implementation of passive strategies for environmental comfort.**  
São Leopoldo, 2013. 228 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo, Brazil.

The concern with sustainability brought the need for optimization of the energy resources to reduce the consumption of electric energy and of natural resources. One of the aspects is the need to adapt the buildings to the climate in which they are located, reducing the energy consumption of housing. The aim of this research is to investigate the technical and economic viability of applying some criteria of thermal performance in residential buildings. The methodology is based on the identification of the costs and energy in the life cycle of projects based on environmental comfort on passive (natural) and active (artificial) ways, detailing the influence on energy consumption of the building. It was applied in residential projects, both vertical and horizontal, of lower and middle class, in two distinct microclimates (Porto Alegre and Bento Gonçalves, southern Brazilian cities), examining alternatives of envelope, insulation and the use of architectural façade elements. To analyze the thermal performance was adopted the Brazilian standard NBR 15575 and degree-hour method, with BIM modeling through Revit/Autodesk and for the thermal simulation Ecotect/Autodesk and *EnergyPlus*. The life cycle of the proposed case studies was analyzed by considering a period of 50 years, comparing the costs and embodied energy of alternatives. As a second measure of sustainability, energy efficiency was also analyzed with the Brazilian standard of energy efficiency Procel Edifica. The results showed that with the increment of envelope's insulation there are improvement of thermal comfort, of 54%, and energetic economy, in both climates, with a payback period of 2 to 6 years, in some cases.

**Key-words:** Thermal performance, Life cycle analysis, Embodied energy, Procel standard, *EnergyPlus*.



# 1 INTRODUÇÃO

A crise energética mundial e a constante preocupação com o setor energético nacional indicam a necessidade de otimização dos recursos com a redução do consumo de energia elétrica. O consumo de energia proveniente do uso das edificações representa importante parcela da demanda total de energia no Brasil. O país enfrenta dificuldades no setor, tendo sofrido períodos de “apagão” recentemente. Em algumas cidades há geração de energia em usinas termoelétricas e mesmo a construção de novas usinas hidroelétricas causa diversos impactos ambientais, como a poluição do ar através de emissões de CO<sub>2</sub>, inundação de grandes áreas, alteração do meio ambiente e geração de resíduos nas construções, uso e manutenção das usinas (BRASIL, 2005; MACIEL, 2006). A redução do consumo de energia é benéfica para a sociedade, sendo importante, portanto, investigar métodos e sistemas que permitam reduzir o consumo energético para o condicionamento térmico das edificações.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) os setores que mais consomem energia e tem maior potencial de aumento da eficiência energética no Brasil são os setores residencial e industrial, representando juntos 60% do consumo final. O setor residencial apresenta bom potencial de melhoria de eficiência energética, tendo em vista que, de toda energia elétrica consumida por este setor, estima-se que 32% tenha origem na busca por conforto térmico das edificações (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011).

O potencial de redução de energia chega a 30% em edificações já construídas. Entretanto, em novas edificações pode-se chegar a 50% caso haja um melhor aproveitamento dos recursos de ventilação e iluminação naturais, além da escolha de materiais e sistemas construtivos adequados à região bioclimática onde a edificação será construída, considerados desde a fase do projeto (BRASIL, 2005; PROCEL, 2010).

Uma das opções para reduzir o consumo de energia de uma edificação é o uso de soluções passivas de projeto. Cunha et al. (2006) e Roméro (2000) apontam que o projeto bioclimático busca satisfazer as exigências de conforto térmico através do conhecimento das condições ambientais – do meio natural e construído – e dos aspectos de lugar, história e cultura, para empregar soluções mais adequadas no desenho arquitetônico.

A crise energética colocou em pauta, além do consumo dos recursos energéticos, o consumo dos recursos naturais (matérias-primas). Para se conhecer e interpretar a origem e os impactos gerados pela produção de bens e serviços foi desenvolvido a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Conforme a norma ISO 14040, a ACV é uma técnica de avaliação de aspectos

ambientais e impactos potenciais associados a um produto. O seu inventário inclui os recursos naturais, materiais e energéticos utilizados (ABNT, 2001).

Através de um foco mais específico no estudo dos impactos relativos ao consumo de energia, pode-se utilizar o método de Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE) (FAY, 1999). Conforme Tavares (2006) a ACVE utiliza o conceito de Energia Incorporada dos materiais, bens e serviços, ou seja, o conjunto dos insumos energéticos para a fabricação, transporte e uso de materiais, entre outros insumos indiretos. Pode-se, assim, medir a energia incorporada total de uma edificação, incluindo a construção, reforma, manutenção e a demolição durante a vida útil. De acordo com a UNEP (2007), do total de energia consumida na edificação, menos de 20% ocorre durante a fase de construção e mais de 80% durante seu uso.

Buscando a melhoria do desempenho térmico e da eficiência energética das edificações no Brasil, também foram criadas normas e selos, baseados em normas internacionais (PEREIRA E ASSIS, 2010). No Brasil, os critérios mínimos estão normatizados pela NBR 15220/2005 e pela NBR 15575/2010 (ABNT, 2005b; ABNT, 2010). Para a verificação da eficiência energética das edificações foi lançado o Selo Procel, do Programa Procel Edifica (ELETROBRÁS, 2011).

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Com a recente edição da norma NBR 15575, diversas questões relacionadas ao projeto arquitetônico, tal como o conforto térmico (um dos aspectos mais importantes para os usuários) tiveram maior destaque. Segundo a NBR 15575, “a edificação habitacional deve reunir características que atendam às exigências de conforto térmico dos usuários” (ABNT, 2010). O conforto térmico nas residências tem sido frequentemente obtido através de soluções baseadas em condicionamento artificial. Bheling (apud LARSEN, FILIPPÍN E BEASCOCHEA, 2008) afirma que aproximadamente 50% do consumo energético global corresponde ao condicionamento térmico das edificações, embora existam diferenças regionais decorrentes do clima.

Através da adequada orientação solar, do uso de propriedades dos materiais (especialmente a massa) e de elementos de proteção de fachada (tais como fachadas duplas, esquadrias especiais, brise-soleil e vegetação) pode-se adequar as edificações para o clima em que estão localizadas, reduzindo assim o consumo energético da habitação, com impacto no



ciclo de vida. A aplicação destes conceitos de projeto permite na melhoria do conforto ambiental interno (iluminação, ventilação e temperatura) (CORBELLA E YANNAS, 2009).

Embora estes conceitos sejam bem conhecidos, o projeto bioclimático exige a comparação de soluções, com cálculo manual ou simulação através de *softwares* específicos, demandando considerável tempo e esforço do projetista. Por outro lado, o cliente/usuário geralmente entende que os estudos e elementos construtivos necessários são acessórios e representam apenas custos extras (MACIEL, 2006). Em função desta visão, não há valorização desta etapa do projeto, desestimulando o profissional. Nesta linha de pensamento, o conforto ambiental acaba recebendo uma solução de condicionamento artificial.

A maior parte das soluções deve ser pensada desde a concepção. É o caso da orientação solar ou do uso de paredes duplas, por exemplo (OLGYAY, 1998). Deste modo, é necessário existir a inclinação para esta linha de desenvolvimento desde o início do projeto. A sensibilização do cliente seria facilitada com o uso de elementos econômicos, tal como o custo no ciclo de vida. Contudo, há poucos estudos neste sentido. Não há investigação do custo de projeto (por exemplo, medido através do tempo que o projetista deve dedicar a esta etapa), nem comparações entre custos de construção e benefícios (tais como redução do consumo de energia elétrica) dos elementos “sustentáveis” ao longo do ciclo de vida.

Como o projeto bioclimático exige soluções individualizadas, o uso de programas computacionais de simulação térmica pode contribuir na busca de soluções bioclimáticas e de eficiência energética. Os *softwares* específicos para análise térmica ajudam a analisar a edificação de uma forma detalhada e rápida. O tempo de dedicação do profissional ao projeto pode ser reduzido através da utilização interligada de *softwares* tipo *Building Information Modeling* (BIM) e de ferramentas computacionais de simulação térmica. Estas conexões têm sido defendidas em publicações recentes (HARDIN, 2009; KRYGIEL E NIES, 2008).

Com o lançamento de novas ferramentas computacionais com interfaces mais amigáveis e simplificadas, criadas para auxiliar os profissionais nas questões de conforto ambiental desde a concepção, estes programas são utilizados por escritórios de engenharia civil e arquitetura no exterior, principalmente América do Norte e Europa (TARABIEH e MALKAWI, 2007; ZAZZINI, 2006). Contudo, conforme apresentam Mendes et al. (2005) e Trindade, Pedrini e Duarte (2010) estas ferramentas computacionais são pouco utilizadas por escritórios de arquitetura e engenharia no Brasil.

Igualmente, não há muitas pesquisas a respeito da energia incorporada de elementos e materiais construtivos utilizados na construção civil e, principalmente, nas edificações residenciais. Conforme Tavares (2006) a Indústria da Construção Civil carece de definições quanto a impactos ambientais e ao consumo de energia. Entretanto, é o setor que mais consome recursos naturais (matérias-primas e energia) no Brasil, utilizando em conjunto 75% de fontes não renováveis e emitindo quantidades consideráveis de gases do efeito estufa.

Desta forma, também é importante identificar os efeitos no ciclo de vida de projetos baseados em conforto ambiental passivo (natural) e ativo (artificial) detalhando a influência no consumo de energia da edificação e considerando a energia para extração dos insumos, industrialização, construção, uso, manutenção de edificações e tratamento ou disposição dos resíduos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo da pesquisa é investigar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de critérios de desempenho térmico em edificações residenciais.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos propostos são os seguintes:

- Identificar e testar técnicas e ferramentas de projeto para cálculo e simulação de desempenho térmico;
- Investigar as alterações de especificações de componentes e sistemas de vedação e o impacto sobre o processo de projeto, conforme aplicação dos critérios da NBR 15575;
- Examinar custos e energia incorporada no ciclo de vida de projetos com soluções de condicionamento ativo e passivo;

## **1.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Em razão da complexidade das relações do homem com o ambiente construído e da relação do desempenho ambiental com o consumo de energia elétrica na edificação, o presente trabalho delimita-se ao estudo da redução do consumo de energia através do desempenho térmico da edificação. Não foram considerados os demais quesitos de habitabilidade, tais como, lumínico, acústico, funcionalidade e acessibilidade.

Referente às limitações de estratégias bioclimáticas passivas aplicáveis aos objetos de estudo, estas foram restritas à proposição de parâmetros projetuais na escala arquitetônica, ou seja, as características construtivas. Neste trabalho não foram estudados critérios e técnicas urbanísticas para aprimorar o desempenho térmico das edificações, tais como vegetação, efeito de edificações adjacentes, ventos, corpos de água, entre outros. Deste modo, as edificações foram estudadas isoladamente, sem a inserção no contexto urbano.

Ressalta-se que o conforto térmico é a satisfação de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente e depende de diversas variáveis e métodos de avaliação, não estudados neste trabalho. Assim, o conforto térmico, neste trabalho, refere-se a uma condição média para atender a maior quantidade de pessoas expostas a esta condição, utilizado como forma de medir o desempenho térmico das edificações. Além disso, a nova revisão da norma NBR 15575 entrou em vigor em fevereiro de 2013. Devido a este estudo ter sido elaborado entre 2010 e 2013, este trabalho não apresenta as alterações dos conceitos revisados pela norma.

Das alternativas simuladas foram selecionadas algumas para análise nos quesitos certificações e custo no ciclo de vida (ACCV) e ciclo de vida energético (ACVE). Para simplificação do cálculo de ACV das edificações, apenas o estudo e comparação dos elementos de condicionamento ativo e passivos propostos foram realizados. A energia incorporada da edificação foi estimada através de bibliografia pertinente ao assunto. Também não foram considerados o consumo de água (apesar de esta ter relação com o consumo energético), e a energia consumida por equipamentos e aparelhos eletrodomésticos, salvo aqueles que têm ligação direta com o condicionamento ativo e passivo, devido à falta de referências nacionais e provável similaridade entre as alternativas estudadas.

#### **1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Este trabalho desenvolve-se em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é descrita a introdução aos temas relacionados ao presente trabalho, apresentando-se a justificativa, os objetivos gerais e específicos e a delimitação do tema, além da apresentação da organização geral do texto.

No segundo capítulo há a revisão dos assuntos pertinentes às ênfases propostas para a pesquisa, sendo apresentados: conforto e desempenho térmico, aspectos e estratégias bioclimáticas, normas, certificações, análise do ciclo de vida energético e do custo no ciclo de

vida e ferramentas computacionais de simulação térmica. Apresentam-se, ainda, referências de simulações térmicas, energéticas e de custo no ciclo de vida.

O método é apresentado no terceiro capítulo, no qual são descritas as etapas através das quais o trabalho foi desenvolvido. Resumidamente, a seleção e caracterização dos objetos (projetos e cidades) de estudo, a coleta dos dados pertinentes à pesquisa, descrição das ferramentas computacionais e caracterizações de análise do ciclo de vida energético, análise de custo no ciclo de vida.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações térmicas e os estudos de análise do ciclo de vida energético e do custo no ciclo de vida, além das análises comparativas realizadas e a avaliação dos modelos através do método do Selo Procel, graus-hora, NBR 15575 e análises do ciclo de vida. No último capítulo apresentam-se as conclusões encontradas no estudo desenvolvido e sugestões para trabalhos posteriores. Por fim, as referências bibliográficas, apêndices e anexos são apresentados.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONFORTO TÉRMICO**

Conforme a NBR 15220-1 e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o conforto térmico é a conformidade dos ambientes internos a um conjunto de requisitos, ou seja, é a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente (ABNT, 2005b; IPT, 2011). Segundo Frontczark e Wargocki (2011), esta satisfação ocorre quando o balanço térmico entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente é estável.

As variáveis do conforto térmico são diversas e são divididas em ambientais e humanas. As variáveis ambientais são: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa do ar. Já as variáveis humanas são o metabolismo gerado pela atividade física e a resistência térmica oferecida pela vestimenta. As variáveis humanas podem ainda ser influenciadas pelo gênero, idade, cor da pele, hábitos alimentares, peso, altura, sua localização, entre outros (SATTLER, 1991b; LAMBERTS, 2007).

Roméro (2000) afirma que, para manter a temperatura interna do corpo em torno de aproximadamente 37°C, a regulação térmica entre o corpo humano e o meio ambiente ocorre através de mecanismos de caráter fisiológico (suor, variação das batidas cardíacas, dilatação de vasos, contração de músculos, arrepio, entre outros) e comportamental (sono, desânimo, redução da capacidade de trabalho, etc.).

Sobre a percepção térmica, fisiológica e comportamental do homem atuam os elementos climáticos, especialmente a temperatura, a radiação solar e o movimento do ar. Os processos de trocas térmicas, para estabelecimento do equilíbrio térmico com o meio, ocorrem através de trocas por radiação, condução, convecção e evaporação (PAULA, 2004). Para Givoni (1998), em um ambiente interno, as trocas térmicas entre o homem e o meio ocorrem através da convecção e radiação. A troca por convecção depende da temperatura e da velocidade do ar interno, enquanto que a troca por radiação depende da temperatura média das superfícies ao redor do indivíduo.

A resistência térmica oferecida pela vestimenta é responsável pela troca de calor entre o corpo e o meio, assim, quanto maior for a sua resistência térmica, menor será a troca de calor (ANDREASI, 2001). O conforto térmico pode também ser influenciado pelo tipo de edificação, o clima externo e a estação do ano. Comparadas as edificações com ar condicionado e as edificações naturalmente ventiladas, percebe-se que as edificações

naturalmente ventiladas apresentam temperaturas consideradas neutras geralmente maiores, que aumentam conforme a temperatura externa (FRONTCZAR e WARGOCKI, 2011).

A taxa de produção de energia do corpo humano pode aumentar em até 20 vezes conforme a atividade, alterando completamente a sensação térmica do ambiente. Desta forma, deve-se prever o nível de atividade que será desenvolvido na edificação, desde a fase de projeto (ANDREASI, 2001).

### **2.1.1 Caracterização do clima**

Para Givoni (1976 apud ROMÉRO, 2000), o clima é determinado pelo padrão das variações e combinações entre diversos fatores. Givoni (1998) afirma que se deve analisar a relação entre o ambiente interno da edificação e os fatores climáticos. Segundo Roméro (2000) o clima compreende tanto a formação geomorfológica e espacial quanto os elementos climáticos. Para Olgyay (1963) o clima é um conjunto das variáveis meteorológicas. Gomes (1980) diferencia os elementos meteorológicos (que definem o clima) dos fatores climáticos (que determinam o clima).

Desta forma, o clima se altera conforme o local, em função da influência de diversos fatores, podendo estes serem divididos em fatores do clima e elementos do clima. Os fatores do clima condicionam, determinam e dão origem ao clima e se dividem em globais (radiação solar, altitude, latitude, ventos, massas de água e terra) e locais (topografia, vegetação, superfície do solo). Os elementos do clima definem e fornecem os componentes do clima, sendo estes a temperatura, umidade, precipitações e movimento do ar (COSTA, 1974; FROTA E SCHIFFER, 2001).

A dinâmica das massas de ar é um dos fatores que justifica a variedade climática no Brasil, tendo a região sul do país predomínio de clima subtropical úmido, cuja principal característica é apresentar as quatro estações bem definidas. Nimer (1979 apud POUHEY, 2011) afirma que a região sul possui a maior unidade climática. As massas de ar possuem pouca interferência da geografia, pois há a predominância de terrenos planos onde, ao longo de todo ano, ocorrem às frentes polares, com índice pluviométrico alto e constante.

### **2.1.2 Transmissão de calor**

O conjunto de fenômenos que caracteriza a passagem de calor entre duas regiões é chamado transmissão de calor e podem ocorrer de três maneiras distintas: condução, convecção e radiação. Cada uma dessas formas apresenta características próprias, mas

possuem em comum a necessidade de diferença de temperatura entre duas regiões, onde o fluxo térmico ocorre no sentido das temperaturas decrescentes (LAMBERTS, 2007).

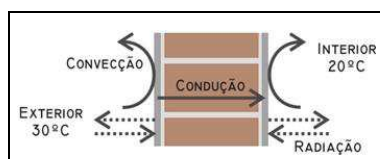
De acordo com Costa (1974) a condução térmica ocorre através do movimento vibratório molecular dentro de um mesmo corpo ou entre corpos diversos em contato íntimo, onde as moléculas de maior temperatura cedem energia às de menor temperatura. Obedece à Lei de Fourier, assim o fluxo térmico é diretamente proporcional à superfície, através da qual se verifica a passagem de calor, e ao gradiente de temperatura. A propagação de calor geralmente ocorre de forma unidirecional e permanente até o equilíbrio de temperaturas.

Conforme Frota e Schiffer (2001) a convecção é provocada pela diferença de pressão ocasionada pela diferença de temperatura. Ocorre através do movimento entre as partículas de uma zona para outra. Mesmo que o movimento do ar advinha de causas naturais, o mecanismo de troca entre a superfície e o ar é considerado como convecção forçada.

Nos dois processos descritos, o intercambio de energia é proporcional à diferença de temperatura, necessitando de um meio para seu transporte. O mesmo não ocorre com a radiação, que não necessita de um meio para transferir energia. A transmissão de calor por radiação é a troca de calor entre dois corpos, sem a necessidade de estarem em contato ou próximos, através da sua capacidade de absorver energia térmica (COSTA, 1974; FROTA E SCHIFFER, 2001).

Para Lamberts (2007), normalmente a convecção é verificada simultaneamente com a radiação e ocorre entre fluídos e paredes (onde também intervém a condução). A diferença física entre a transmissão de calor por convecção e condução, reside na grandeza das partículas que, em movimento, transportam o calor.

Quando dois fluídos com temperaturas distintas são separados por uma parede, o calor é transmitido do fluído com temperatura mais elevada por condutividade externa e radiação à parede para então, atravessar a parede por condutividade interna e passar novamente da parede ao segundo fluído por condutividade externa e radiação (Figura 1) (LAMBERTS, DUTRA E PEREIRA, 1997).



**Figura 1 – Transmissão de calor**

Fonte: Adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (1997, p. 57)

As transmissões de calor nas paredes de habitações ocorrem em regime transitório, quando as temperaturas das habitações se modificam com o tempo, devido às variações diárias de temperatura. Parte do calor que entra por uma face de uma parede aquece a mesma, de modo que a quantidade de calor que sai desta é menor. Deste modo, as variações periódicas de temperatura são amortecidas ao longo da parede (COSTA, 1974).

A inércia térmica está associada ao comportamento térmico da edificação. Ela depende das características da envoltória (conjunto de sistemas de vedações externas e coberturas de edificações) e dos componentes construtivos internos, em função das suas densidades, condutibilidade térmica e da capacidade calorífica. Compõem a inércia térmica o amortecimento e o atraso térmico. Quanto maior a inércia da construção, maiores serão o amortecimento e o atraso térmico (FROTA e SCHIFFER, 2001). Conforme NBR 15220-1 (ABNT, 2005b) o atraso térmico é a transferência de calor armazenado em uma superfície, para o ambiente em um determinado período de tempo. Já o amortecimento é a capacidade de um determinado componente de reduzir a amplitude térmica entre ambientes.

### **2.1.3 Índices de conforto térmico**

No intuito de quantificar a percepção térmica do homem, diversos autores definiram índices e escalas para identificar zonas de conforto. Estas zonas são delimitadas e estabelecidas através de cartas, nomogramas e diagramas. Em sua maioria foram montadas relacionando-se as graduações de conforto e desconforto térmico com os parâmetros físicos de estímulo, ou seja, buscam reproduzir as sensações subjetivas geradas pelas variações térmicas (BARBOSA, 2006). Mais recentemente, estes estudos são desenvolvidos com o apoio de ferramentas computacionais.

Sendo o conforto térmico resultante da avaliação individual, subjetiva, o objetivo destes índices é atender satisfatoriamente à maior quantidade das pessoas para uma dada situação (SATTLER, 1991b). Alguns destes modelos foram analisados por diversos autores, dentre os quais Barbosa (1997), Paula (2004), Almeida (2005) e Curcio (2011) e são sintetizados a seguir.

O diagrama de conforto térmico, desenvolvido por Olgyay a partir de 1952, propõe estratégias de adaptação da arquitetura ao clima. Assim, a zona de conforto é definida em função da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa. Através de linhas adicionais, apresenta o aumento da zona de conforto pela presença de movimento do ar e a sua



diminuição com a presença de radiação solar. Entretanto, este diagrama se aplica apenas às condições externas (ROMÉRO, 2000).

Os diagramas desenvolvidos por Fanger são derivados de equações de conforto. Calculam a combinação das variáveis ambientais (temperatura radiante média, velocidade do ar, umidade relativa do ar) e humanas (atividade física e vestimenta). Através da avaliação das percepções térmicas de pessoas de diferentes nacionalidades, idades e gêneros, para determinadas condições ambientais, Fanger desenvolveu o *Predicted Mean Vote* (PMV). O índice consiste de um valor numérico e indica o nível de esforço do organismo humano para manter o balanço térmico (ROMÉRO, 2000).

A carta bioclimática do edifício de Givoni (1976, atualizada em 1992) é apresentada através de uma carta psicrométrica com limites de conforto determinados por pesquisas conduzidas nos Estados Unidos, Europa e Israel. Nesta carta estão demarcados diferentes limites para climas temperados (países desenvolvidos) e climas quentes (países em desenvolvimento). Os critérios para definição da velocidade do ar para edifícios residenciais e de escritórios são diferentes, e o clima interno das edificações não condicionadas possui uma variação de temperatura e velocidade do ar maior que em edificações com condicionamento, devido à experiência de uso dos habitantes (GIVONI, 1992).

A carta psicrométrica da zona de conforto de Szokolay (1995) permite o cálculo de limites específicos para a zona de conforto de uma região, dependendo das temperaturas médias do mês mais quente e do mais frio desta região. Define ainda os indicadores numéricos do período do ano onde o clima apresenta subaquecimento, supraaquecimento e superumidificação em relação à zona de conforto de certa região (SZOKOLAY, 1995 apud BARBOSA, 1999).

Segundo Roméro (2000) e Almeida (2005) estes índices possuem uma série de limitações e são aplicáveis nas regiões e situações para as quais foram determinados. Pois se originam de análises estatísticas de dados experimentais e de extensivas observações de laboratório e de campo.

#### **2.1.4 Desempenho térmico**

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2010a) o desempenho térmico de uma edificação é o conjunto de características que atendem às exigências de conforto térmico dos usuários, considerando a região de implantação do projeto e as características bioclimáticas definidas pela norma NBR 15220-3. A normatização da avaliação do desempenho térmico no

Brasil iniciou em 2005, com a consolidação da NBR 15220, para avaliação do desempenho térmico de componentes construtivos (ABNT, 2005c; ABNT, 2005d) e avançou com a NBR 15575 – Desempenho de edificações de até cinco pavimentos, com seção específica de avaliação térmica de componentes e edificações (ABNT, 2010a).

As características da envoltória e dos sistemas construtivos empregados determinam o desempenho térmico da edificação. Diversas variáveis influem no desempenho térmico da edificação, sendo, entre outras, o tipo de material e cor empregados, o uso ou não de isolantes térmicos, orientação, área e tipo de esquadrias, cargas térmicas internas e o uso ou não de estratégias bioclimáticas (LAMBERTS E TRIANA, 2007).

Conforme Lamberts et al. (2010), comportamento térmico é a resposta física da edificação ao ser submetida às solicitações do clima externo e às condições de uso dos ambientes internos. A avaliação do desempenho térmico de uma edificação constitui-se da avaliação do comportamento térmico desta edificação, em relação aos requisitos de conforto térmico dos usuários, nas condições climáticas as quais a edificação está sujeita (PEREIRA E NETO, 1988, apud LAMBERTS et al., 2010).

As habitações residenciais apresentam o maior potencial para a incorporação de estratégias bioclimáticas, pois os ganhos de calor advindos das superfícies externas, das aberturas e as condições de exposição à insolação e ventilação, são os principais fatores do desempenho térmico desta. Em razão da menor ocupação dos ambientes a geração de calor interno advindo de pessoas, computadores e sistemas de iluminação artificial, entre outros, é menor (LAMBERTS et al., 2010).

Para Cunha et al. (2006), o desempenho térmico pode ser resolvido passiva ou artificialmente. Quanto ao sistema artificial, pode ser por sistema de refrigeração ou aquecimento. Entretanto, o seu uso indiscriminado para a adequação da edificação ao clima local gera alto consumo energético. O gasto energético pode ser reduzido caso o projeto considere o local, clima, orientação solar e insolação em que está inserido.

No Brasil, onde há condições climáticas variadas ao longo do território, os projetos devem responder ao clima de maneira diferente em cada local. Conforme Frota e Schiffer (2001) o conhecimento das necessidades do usuário e do microclima local, a escolha dos dados climáticos para o projeto, a adoção de um partido arquitetônico apropriado ao clima e às funções da edificação, possibilitam a produção de uma edificação mais adequada, sendo necessário para isto uma avaliação quantitativa do desempenho térmico deste edifício.

Entretanto, o que normalmente ocorre é o desenvolvimento de edificações que não consideram seu entorno imediato (MACIEL, 2006).

### **2.1.5 Eficiência energética**

Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (1997), a eficiência energética de uma edificação é a obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia. Ou seja, uma edificação proporciona as mesmas condições ambientais que outra, com menor consumo de energia. Para incentivar a eficiência energética das edificações foi lançado o Selo Procel, uma Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Programa Procel Edifica: Plano de ação para a eficiência energética em edificações (ELETROBRÁS, 2011a).

Em diversos países, o consumo energético das edificações representa de 25 a 40% do total de energia consumida, do qual mais da metade é utilizada para o condicionamento térmico da edificação (ZENG et al., 2011). Estima-se que 32% de toda energia consumida no Brasil, tenha origem no atendimento ao conforto térmico interno das edificações residenciais (BRASIL, 2005).

A eficiência térmica da envoltória da edificação é uma estratégia-chave na concepção e construção de edifícios que limitem o uso de sistemas de condicionamento ativo dos ambientes internos (MORRISSEY E HORNE, 2011). Conforme Okeil (2010) pode-se aumentar a eficiência energética da edificação através da aplicação de conceitos bioclimáticos, tais como aquecimento/resfriamento passivo, iluminação e ventilação natural. Entretanto, para Escrivá-Escrivá, Álvares-Bel e Peñalvo-López (2011), apesar do projeto, dos materiais e dos sistemas construtivos afetarem a edificação, o uso da edificação durante a fase operacional também possui grande influência. Segundo Lamberts e Triana (2007) em diversos países as normas de eficiência energética são obrigatórias e o desempenho térmico da edificação é um dos principais requisitos para aprovação dos projetos pelas autoridades competentes.

De acordo com Marques (2008) há diversas técnicas para avaliação do desempenho térmico e energético, todas com o objetivo de adequar as edificações ao meio e aos usuários. Para Mendes et al. (2005), a avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa, com grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. Com a crescente capacidade dos computadores pessoais, o desenvolvimento dos modelos físicos, que representam os comportamentos termo-energéticos, tornou-se mais fácil, permitindo a simulação de diferentes cenários. Desta forma,

a avaliação do desempenho térmico e energético permite que, utilizando-se referências climáticas sejam desenvolvidas diferentes alternativas de projeto de edificações, com diferentes níveis e condições de conforto.

## 2.2 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

### 2.2.1 Zoneamento bioclimático brasileiro

A norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005d), divide o território brasileiro em oito Zonas Bioclimáticas (Figura 2) e recomenda diretrizes de projeto para cada uma delas. Tem como objetivo ser um instrumento facilitador das estratégias de projeto de arquitetura para atender às necessidades de conforto dos usuários. As diretrizes construtivas propostas relacionam-se ao tamanho das aberturas para ventilação, proteção das aberturas, vedações externas (envoltória da edificação) e estratégias de conforto térmico passivo. As zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 relacionam-se ao contexto climático subtropical, localizando-se nestas zonas os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, parte do Paraná e de São Paulo.

A norma de desempenho, NBR 15575 (ABNT, 2010) fixa parâmetros para avaliar o comportamento da edificação no período pós-ocupação, analisando o desempenho de um sistema construtivo com relação às necessidades das edificações brasileiras. Apresenta os critérios de avaliação de desempenho térmico para as condições de conforto no verão e inverno em edificações habitacionais.

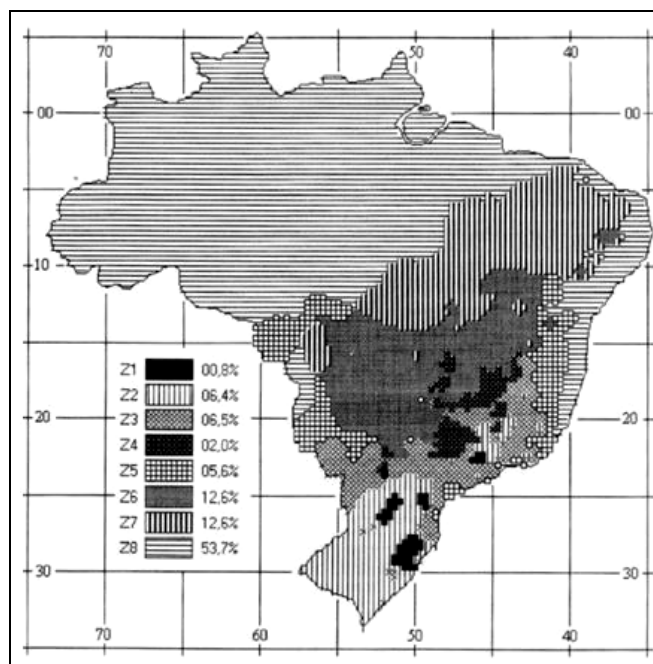


Figura 2 – Zoneamento bioclimático brasileiro

Fonte: ABNT (2005d)

O conforto térmico pode ser resolvido principalmente na escala urbana, onde a adequação dos materiais locais e a relação entre a paisagem e a forma construída auxiliam na adaptação das edificações ao meio. Assim, os ambientes urbanos, sobretudo na sua ordenação espacial, se transformam em “filtros” dos elementos do clima (ROMÉRO, 2000).

No projeto bioclimático, o desempenho térmico pode ser resolvido passiva ou artificialmente e são usados como limites para as estratégias bioclimáticas utilizadas nas edificações (PEDRINI, 2003). Entretanto, para climas extremos, não pode ser adquirido apenas passivamente, sendo necessária a utilização de estratégias artificiais para garantir conforto térmico dos usuários (HASTINGS E WALL, 2009; NGUYEN et al., 2011).

### **2.2.2 Princípios da arquitetura bioclimática**

Segundo Roaf, Fuentes e Thomas (2009), para possibilitar ao homem condições de conforto, a edificação deve estar adequada ao clima onde está inserida, amenizando as sensações de desconforto impostas pelo clima.

A bioclimatologia estuda as relações entre o clima, o ser humano e o ambiente físico, enquanto o projeto bioclimático visa à adequação da arquitetura ao clima local. Desta forma, a bioclimatologia busca satisfazer as exigências de conforto térmico através da definição das condições do meio natural e construído e dos aspectos de lugar, história e cultura (NGUYEN et al., 2011; ROMÉRO, 2000). Ou seja, através das considerações como lugar, clima, orientação solar, insolação e biomassa, pode-se melhorar o desempenho térmico e a eficiência energética da edificação (ROSENFELD et al., 2007).

As exigências de conforto térmico também variam em função dos diversos tipos de ambientes das edificações que, devido às rotinas de uso comuns, podem possuir requisitos distintos de conforto, entre eles, as rotinas de sono, preparação de comida, asseio e interações sociais. Portanto, em função do período de ocupação dos ambientes ao longo do dia e das estações, deve ser realizada a escolha das estratégias bioclimáticas a serem utilizadas, especialmente a organização dos ambientes conforme a orientação solar e as características das fachadas (OLGYAY, 1998; BRASIL, 2005).

### **2.2.3 Estratégias bioclimáticas**

Segundo Cunha et al. (2006) apenas a utilização isolada de um elemento de arquitetura passiva não garante um bom desempenho térmico da edificação. Deve-se ainda compatibilizar a estratégia utilizada com o contexto climático, ou seja, há necessidade de se

adequar os diferentes cenários climáticos com as diferentes soluções de projeto. Diversos materiais e técnicas construtivas influenciam o desempenho térmico de uma edificação, como orientação solar, vegetação, ventilação natural, insolação e as características da envoltória (cor, transmitância térmica, atraso térmico, materiais e técnicas construtivas).

#### 2.2.3.1 Orientação solar

Hastings e Wall (2009) afirmam que a orientação solar altera a efetividade de diversos materiais e técnicas construtivas. De acordo com Roaf, Fuentes e Thomas (2009), a orientação solar possui grande importância no desempenho térmico da edificação. O estudo realizado pelos autores, no projeto da Oxford Ecohouse, demonstrou que a diferença no desempenho térmico da varanda está intimamente ligada com a orientação solar desta.

Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (1997) a orientação da fachada determina a exposição da edificação ao sol, expondo as aberturas à quantidade de iluminação solar e, portanto, calor solar. De acordo com os autores, a partir da carta solar pode-se saber a incidência solar em uma determinada fachada e o ângulo de radiação solar, o qual interfere na quantidade de calor e de luz solar direta que entra pelas aberturas.

Olgyay (1998), em estudo no hemisfério sul, afirma que a fachada principal de uma edificação, para o melhor conforto térmico, deve ser a norte. As fachadas nordeste e noroeste possuem uma insolação mais equilibrada durante o ano, se comparadas com as fachadas leste e oeste, que tornam os ambientes mais quentes no verão e frios no inverno. Contudo, a fachada norte é a que apresenta a melhor insolação, com máxima exposição no inverno e mínima no verão.

#### 2.2.3.2 Cor

O ganho de calor solar através do envelope (paredes e cobertura) da edificação depende da intensidade da radiação solar e da absorvância da superfície externa, associada, geralmente, à utilização de diferentes cores superficiais (SATTLER, 1991b). Define-se absorvância como a razão entre a energia solar absorvida por uma superfície e a energia total incidente sobre a mesma. Apesar das propriedades termo-físicas dos materiais empregados serem um dos fatores fundamentais do ganho de calor, a absorvância ( $\alpha$ ) tem efeito bastante significativo (DORNELLES, 2008).

Givoni (1998) afirma que o impacto da radiação solar no envelope da edificação depende da absorvância deste. Indica qual fração da energia solar que realmente é absorvida e

qual fração é refletida, afetando o ganho de calor e as temperaturas internas da edificação. Entretanto, o autor afirma que sua importância é variável, pois depende dos ângulos de incidência solar sobre coberturas e paredes em diferentes orientações.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (1997) as cores escuras incrementam os ganhos de calor solar, pois absorvem maior quantidade de radiação, sendo adequadas a climas frios (Figura 3a), e as superfícies de cor clara aumentam a reflexão à radiação solar, reduzindo os ganhos de calor (Figura 3b). Contudo, em climas compostos, a utilização de superfícies com cores claras ou escuras não possui uma relação clara com a redução ou aumento dos ganhos de calor. De acordo com Dornelles (2008), estudos apontam que há materiais que absorvem ou refletem certos intervalos de frequência e há a necessidade de maiores estudos e divulgação a respeito de valores de absorvância mais exatos e atualizados.

A emissividade ( $\epsilon$ ) também influi no ganho de calor solar das edificações, expressando a capacidade da superfície em emitir calor. Entretanto, as cores não indicam o comportamento da emissividade de uma superfície (SATTLER, 1991b; DORNELLES, 2008).



**Figura 3 – Predomínio de cores nas edificações: (a) escuras, de alta absorvância, na Holanda, (b) claras, de baixa absorvância, na Grécia.**

Fonte: <http://www.deviantart.com/>

### 2.2.3.3 Tratamento de áreas externas

A vegetação pode ser utilizada como forma de diminuir os ganhos de calor, através da redução da insolação direta e como elemento de controle dos fluxos de ar nos espaços internos e externos, pois estabiliza os efeitos do clima sobre seus arredores imediatos, reduzindo os extremos ambientais (BRASIL, 2005; TORRES, 2011).

O seu uso tem pouca ou nenhuma influência no controle do movimento do ar em edificações verticais. Já em edificações horizontais, auxilia no sombreamento das aberturas, onde o uso de *brise soleil* não é suficiente (SATTLER, 1991b). Através do uso de árvores caducifólias pode-se sombrear a janela sem bloquear a luz natural, permitindo que no inverno ocorra a incidência do sol no interior da edificação (PIVETTA, 2010).

Como forma de controle dos fluxos de ar, o ar exterior é conduzido, através da vegetação, para o ambiente interno, sendo resfriado ao passar pela vegetação, e através de zonas de pressão e subpressão, gera fluxos de ar no interior da edificação (SATTLER, 1991b). Para o controle da ventilação pela vegetação, o projeto deve ser composto por espécies vegetais caducifólias de diferentes portes, esquadrias com ventilação higiênica e de conforto, de forma a permitir a permeabilidade interna (CUNHA et al., 2006).

#### 2.2.3.4 Massa térmica

O princípio da massa térmica se baseia em acúmulo de calor pela envoltória construtiva (paredes e cobertura) que retarda a entrada de calor, reduzindo a amplitude térmica no interior da edificação. Reduz os picos de variação da temperatura, acumulando e armazenando grandes quantidades de calor no interior da massa, e, posteriormente, direcionando-o para a superfície, suprimindo a demanda térmica da edificação (BRASIL, 2005). Conforme Akutsu, Brito e Chieppe (2012) através do aumento da capacidade térmica há a elevação da inércia térmica da edificação. Contudo, a sua redução pode ser compensada com o aumento da resistência térmica em proporções que dependem das propriedades do isolamento térmico.

Em climas com grande amplitude de variação diária de temperatura há necessidade de maior inércia térmica na edificação de forma a atenuar esta variação no interior da edificação. Assim, materiais com inércia térmica superior amortecem os picos de temperatura internamente (AKUTSU, BRITO E CHIEPPE, 2012). Sombreadas, as paredes com inércia proporcionam resfriamento no ambiente, enquanto que as paredes com grande inércia térmica, recebendo radiação solar, promovem o aquecimento do ambiente (LAMBERTS et al., 2007).

Segundo Cunha et al. (2006) há duas formas típicas de isolamento térmico como forma de adequar a edificação passivamente: o isolamento por inércia e o isolamento por resistência. O isolamento por inércia ocorre através de utilização de paredes de considerável massa para retardar a entrada e saída de calor ou atenuar as variações diárias de temperatura.



Já no isolamento por resistência, paredes leves isolantes oferecem resistência às perdas térmicas.

Para o isolamento ser mais eficiente, deve existir um estado de equilíbrio ou a direção do fluxo de calor ser constante. Materiais que possuem câmaras ar transmitem menos calor e são mais leves, já que o ar é um bom isolante térmico. Sistemas construtivos com duas ou mais camadas separadas por câmaras de ar, possuem uma resistência maior ao fluxo de calor. Esta resistência não depende somente da espessura da câmara de ar, mas também das características das superfícies que as encerram, já que, neste caso, a transferência de calor ocorre principalmente pela radiação (SATTLER, 1991b).

Conforme Roaf, Fuentes e Thomas (2009), os materiais com alta inércia e condutividade térmica, possuem melhor desempenho e sua eficácia depende da sua espessura, superfície, propriedades térmicas caloríficas e condutividade térmica. Pode ser utilizada tanto para o resfriamento quanto para o aquecimento passivo. Para Lamberts, Dutra e Pereira (1997) a massa térmica para aquecimento apresenta invólucros mais espessos, que armazenam calor durante o dia e os devolvem para o ambiente durante a noite.

Nas paredes, esta estratégia pode ser aplicada através de paredes de grande inércia (sombreadas para o resfriamento do ambiente ou com radiação solar para o aquecimento do ambiente), paredes com isolamento térmico externo ou interno, paredes duplas, entre outras (BAKER, 2009). No sistema de cobertura, as alternativas utilizadas são variações dos princípios do sistema de armazenagem em paredes: cobertura vegetal caducifólia, cobertura ventilada e materiais isolantes, entre outros (CUNHA et al., 2006; BAKER, 2009).

#### 2.2.3.5 Ventilação

A ventilação natural, necessária para manutenção da qualidade do ar, consiste na movimentação do ar dentro e entre a edificação e o exterior. Em regiões com muitos ventos geralmente se utiliza a pressão do ar para ventilar os ambientes (ROAF, FUENTES e THOMAS, 2009). Para locais onde há períodos frios, como é o caso do estado do Rio Grande do Sul, é mais vantajoso utilizar sistemas de ventilação controlada, visando promover a renovação de ar sem causar desconforto aos moradores, permitindo ao usuário dosar a ventilação conforme sua demanda de conforto (BRASIL, 2005).

Para Roaf, Fuentes e Thomas (2009) a ventilação de um ambiente pode ser direta e/ou indireta. A ventilação direta permite o esfriamento ou aquecimento do ambiente através de convecção. Já a ventilação indireta aquece ou resfria a estrutura da edificação,

armazenando o calor durante o dia e liberando-o a noite, ou armazenando o frescor da noite para refrescar o ambiente durante o dia seguinte. Conforme Matos (2007) além de proporcionar conforto térmico, a ventilação contribui para a higiene da edificação, realizado através do fornecimento de ar fresco e diluição de impurezas.

#### 2.2.3.6 Aquecimento/resfriamento solar passivo

O aquecimento/resfriamento solar passivo baseia-se na absorção da radiação solar que incide sobre as superfícies, gerando uma acumulação térmica, posteriormente irradiada para o ambiente (BRASIL, 2005). O condicionamento do ar interno pode ser realizado direta ou indiretamente. O ganho direto consiste no acesso da radiação solar diretamente no interior da edificação, através de aberturas laterais ou zenitais. Já o ganho indireto ocorre através da captação do calor pelos ambientes ou paredes de acumulação e a distribuição indireta do calor nos ambientes internos (LAMBERTS, DUTRA E PEREIRA, 1997). Como forma de aplicar esta estratégia na arquitetura, tem-se o uso de painéis de vidro (transparente a radiação solar, mas opaco a radiação térmica), a pérgola sazonal, a iluminação zenital e o termo-acumulador de calor, entre outros.

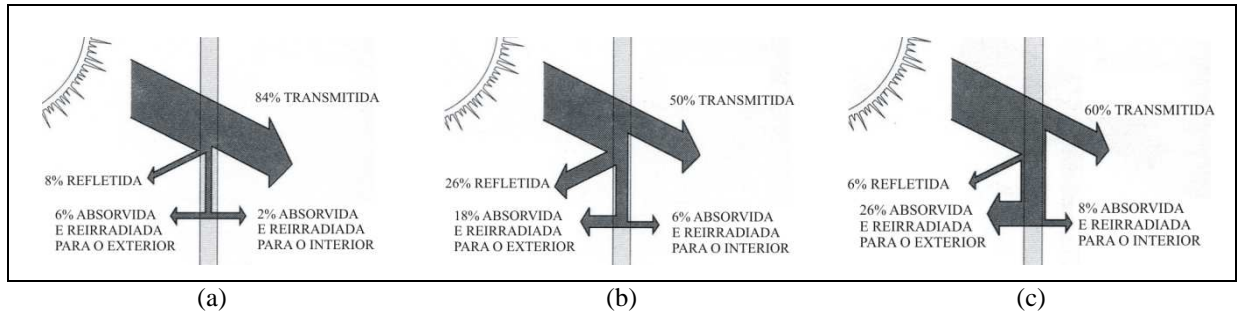
A iluminação zenital deve ser composta de um sistema de proteção móvel, para controlar a radiação solar direta nas estações quentes e permitir a incidência solar nos períodos frios (BRASIL, 2005). Complementarmente pode-se adotar dutos de ventilação, para promover a renovação e circulação do ar quente nos ambientes contíguos (CARMODY et al., 2004). O termo-acumulador de calor é caracterizado pelo ganho e acumulação de calor através de um fechamento transparente seguido de um opaco, sendo o calor transferido por convecção através de um sistema de ventilação (BAKER, 2009).

#### 2.2.3.7 Esquadrias

As esquadrias possuem um efeito crucial no desempenho térmico de uma edificação, por ser o elemento de maior transmitância térmica no envelope de uma edificação, visto que, aumentando a área de esquadrias melhora-se a luminosidade e ventilação. Contudo, a transmissão de calor aumenta (BAKER, 2009). De acordo com Mibratz (2007) as decisões de orientação solar, área, tipo de moldura da janela e tipo de protetor solar influenciam no desempenho térmico das esquadrias.

Conforme Carmody et al. (2000) os vidros podem ser, entre outros, de acabamento transparente ou cristal (permite a maior transferência de calor e a maior transmissão de luminosidade), temperado, laminado, antirreflexo (reduz os ganhos de calor

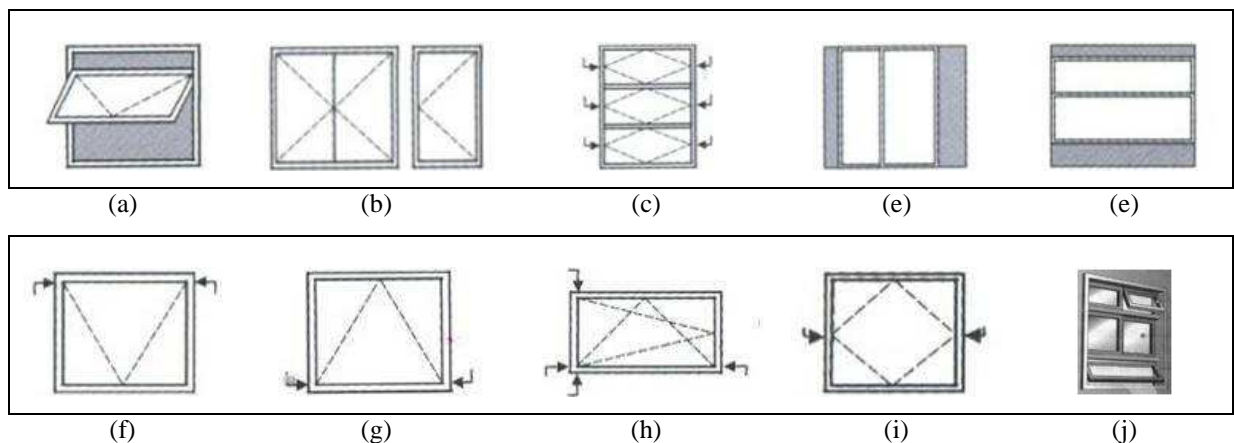
solar e transmitância visível, e diminui a entrada de luz natural) termo-absorvente e coloridos (reduzem os ganhos de calor solar e a transmitância visível, mas diminuem a entrada de luz natural) (Figura 4).



**Figura 4 – Transmissão de energia solar através de três tipos de vidro: (a) transparente, (b) reflexivo, e (c) termo-absorvente**

Fonte: Carmody et al. (2000)

Segundo Carmody et al. (2004) os vidros podem ser, ainda, simples, duplos e de múltiplos painéis. As esquadrias com vidros duplos possuem maior resistência térmica e a transmitância visível é parcamente reduzida, entretanto conforme a composição dos vidros utilizados estas características mudam. Já as esquadrias com múltiplos painéis possuem resistência térmica ainda maior, transmitância visível e os ganhos de calor são reduzidos com cada camada adicional. Os tipos e características das esquadrias mais utilizados nas edificações residenciais são sintetizados na Figura 5.



**Figura 5 – Tipos de aberturas de janelas: (a) projetante deslizante (maxim-ar), (b) de abrir, (c) basculante, (d) de correr, (e) de correr guilhotina, (f) projetante, (g) pivotante interna, (h) reversível, (i) pivotante, (j) de correr com caixilhos superior e inferior pivotante horizontal**

Fonte: adaptado de Brasil (2005); exceto (j): Cunha et al. (2006)

Conforme Cunha et al. (2006), para o estado do Rio Grande do Sul, as esquadrias devem controlar a radiação solar direta e possibilitar a ventilação higiênica e de conforto.

Outro aspecto salientado pelo autor é a utilização de caixilhos interiores que possibilitem o fluxo de ar em diferentes alturas.

Como forma de controlar a radiação solar direta nas esquadrias tem-se o uso de protetores solares. O sombreamento visa evitar o superaquecimento das superfícies expostas à insolação direta e não deve prejudicar a entrada de luz difusa (BRASIL, 2005). Há diversos tipos de protetores solar, tais como fixos e móveis, metálicos, de plástico e de concreto, além de venezianas, cortinas e cobogós. Tem como conceito básico a interceptação da radiação solar direta antes desta penetrar no ambiente, principalmente nos períodos quentes do ano (TORRES, 2011).

Os sistemas fixos de proteção solar são utilizados principalmente para sombreamento solar direto. Os móveis são utilizados para controle de ganhos térmicos, redução do ofuscamento e redirecionamento da luz solar visível, sendo o sistema mais flexível, já que se ajusta às mudanças climáticas diárias e às preferências dos usuários. Os protetores solares podem ainda ser internos ou externos. Em climas quentes, sistemas externos possuem maior eficiência térmica e energética, pois bloqueiam a entrada da radiação solar no ambiente (TORRES, 2011).

## **2.3 SIMULAÇÃO E ANÁLISE**

### **2.3.1 Ferramentas para simulação**

#### **2.3.1.1 Ferramentas BIM**

*Building Information Modeling* (BIM) é uma nova geração de ferramentas orientadas a representação digital de edificações. O termo refere-se à modelagem das características físicas e funcionais no projeto de edificações e inclui o conceito de edifício virtual. O modelo é um conjunto de objetos paramétricos que representam a edificação real (KRYGIEL E NIES, 2008).

Conforme Krygiel e Nies (2008) o BIM integra, em um único modelo, o processo de projeto, de construção e de operação do edifício. Devido à possibilidade de visualização e de processamento das informações, pode ser considerado como uma evolução do processo de projeto. A sua utilização aponta a necessidade de revisão do processo projetual e planejamento da sua implantação e gestão na construção civil (YAN, CULP E GRAF, 2011; SOUZA et al., 2012).

De acordo com Park (2011) e ainda Bosi e Massara (2011) a parametrização é um processo matemático e compreende a identificação de um conjunto de coordenadas de um sistema, processo ou modelo. Assim, a parametrização cria e gerencia as variáveis em um sistema de ideias. No sistema BIM, os bancos de dados substituem este processo matemático e são os responsáveis por armazenar e disponibilizar as variáveis que compõem cada um dos objetos e elementos arquitetônicos.

Conforme Hubers (2011) e Meadati, Irizarry e Aknoukh (2011) a base de dados é unificada, assim as alterações são dinâmicas, ou seja, se refletem em todos os desenhos associados, propagando as modificações de projeto automaticamente em todos os documentos envolvidos. Com a consolidação da parametrização, as mudanças no projeto se tornam mais rápidas e fáceis.

A agilidade das atualizações e modificações aumenta a confiabilidade no acesso às informações e no processo colaborativo de projeto. Conforme afirma Park (2011) e Soares e Amorim (2012) o BIM extrai as informações necessárias em qualquer plano de desenho, sendo um serviço útil na automatização do projeto, com geração simplificada de detalhes, compatibilizações, estimativas de custo e inspeções pré-construção.

O BIM permite, ainda, gerenciar as informações do ciclo de vida completo da edificação, coordenando o modelo a partir de informações gráficas e escritas. A incorporação de sistemas de comunicação ao banco de dados, junto com a operacionalidade dos *softwares* tornou possível o processo colaborativo de trabalho e a troca de dados nos projetos. A possibilidade de transferência de documentação em um único formato de arquivo simplifica a visualização, compatibilização, automação de processos construtivos, montagem, teste e pesquisa de materiais, por vários usuários, aumentando a produtividade dos envolvidos no processo (AZHAR et al, 2011; BOSI E MASSARA, 2011).

A sua utilização facilita a integração do modelo com simuladores, permitindo diversas análises sobre o projeto, tais como comportamento da estrutura, conforto térmico, consumo de energia e avaliação do ciclo de vida. Contudo, apesar de possibilitarem a incorporação e atualização de seus dados, estas ferramentas são majoritariamente estrangeiras e há, no Brasil, carência de banco de dados sobre impactos ambientais de materiais e sistemas construtivos (MARCOS, 2009; YAN, CULP E GRAF, 2011; GRAF et al., 2012).

A visualização tridimensional do modelo permite verificar as inadequações e incompatibilidades do projeto, auxiliando no processo de tomada de decisão em cada uma das

etapas do projeto (MARCOS, 2009). Bosi e Massara (2011) e Freire, Tahara e Amorim (2012) afirmam que ainda existem limitações e elementos conceituais e práticos a serem aperfeiçoados. O sistema BIM demanda definições e estratégias projetuais, mas a alteração constante é uma característica inerente ao processo de elaboração de projeto e quanto maior o projeto, mais complicadas as compatibilizações. Contudo, com a utilização do sistema BIM, criação de grupos de trabalho e utilização de compartilhamento de dados dinâmico, este processo se torna mais fácil para o gerente de projeto.

#### 2.3.1.2 Ferramentas de simulação térmica

O desempenho térmico de uma edificação pode ser avaliado de duas formas: por medição e por cálculo (simulação computacional). Deve-se considerar, para a avaliação por cálculo, o caráter dinâmico dos fenômenos de transferência de calor e de massa entre a edificação e o ambiente externo. O conceito do balanço de energia, massa e de movimento é o princípio de análise destes fluxos, requerendo o conhecimento dos processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação (TRIBESS, 2005 apud BESSA, 2010).

De acordo com Morrisey e Horne (2011), projetos de arquitetura comprometidos com as questões ambientais e energéticas devem encontrar um equilíbrio entre conforto, custo e impacto ambiental. Assim, pode-se determinar se esses projetos são ou não adequadas ou ainda auxiliar na escolha da melhor estratégia. A simulação computacional de um edifício é mais rápida e econômica do que a medição *in loco* e tem como objetivo testar as diferentes possibilidades de projeto e compará-las para encontrar a melhor solução.

As ferramentas de simulação podem ser classificadas em dois tipos, geradoras e de análise de desempenho. As ferramentas geradoras auxiliam na definição da geometria da edificação, solicitam poucos dados de entrada e fornecem diversas soluções (SHAVIV, 1999). As ferramentas de análise de desempenho analisam quantitativamente o comportamento do projeto. Conseqüentemente, solicitam uma descrição completa do edifício, avaliando somente o desempenho de uma solução detalhada (MARSH, 1997).

Há, também, as ferramentas que objetivam a integração de diretrizes práticas através de modelos de simulação. Desta forma, o arquiteto é orientado pelo sistema para a aplicação de diretrizes, no processo de tomada de decisão (MACIEL, 2006). Como o projeto bioclimático e a eficiência energética exigem soluções individualizadas, é necessária a adequação de soluções do projeto às características climáticas locais. Estas decisões podem ser facilitadas através do uso de *softwares* que auxiliem a interpretação destes dados.

De acordo com Pedrini e Szokolay (2005) as ferramentas computacionais para análise do desempenho térmico e energético, orientadas para arquitetos, são pouco utilizadas nos escritórios de arquitetura. Quando utilizadas, geralmente são operadas por consultores, tais como engenheiros e físicos. Conseqüentemente, não são utilizadas nas primeiras fases do projeto. Assim, o benefício do estudo torna-se limitado, pois a fase de detalhamento do projeto apresenta limitações quanto a alterações. Para os autores, um dos motivos mais evidentes da falta de compromisso de projetistas com o desempenho energético é a lacuna existente entre o processo de projeto e a utilização das ferramentas de simulação.

Dentre os diversos programas de simulação atualmente disponíveis, os *softwares* nacionais e internacionais de maior relevância, frequentemente empregados em institutos de pesquisa e universidades, são apresentados na Tabela 1. Desta tabela, destacam-se as ferramentas nacionais Arquitrop e Power Domus, visto que os demais *softwares* nacionais analisam aspectos isolados (DELBIN, 2006).

**Tabela 1 – Ferramentas de simulação de conforto ambiental e eficiência energética.**

Ferramentas	Status	Validação	Foco de análise
<b>Ferramentas Internacionais</b>			
BDA	Freeware	N/D	Análise bioclimática
BLAST	Freeware	Sim	Consumo energia, desempenho de sistemas e custo
DOE-2	Comercial	Sim	Conservação de energia e eficiência energética
Ecotect	Comercial	Não	Análise de desempenho
Energy-10	N/D	N/D	Consumo energético
EnergyPlus	Freeware	Sim	Simulação térmica e energética
ESP-r	Freeware	Sim	Análise bioclimática para projetistas
HEED	Freeware	Sim	Eficiência energética
IES<VE>	Comercial	Sim	Análise bioclimática
<b>Ferramentas Nacionais</b>			
ACTERM	Freeware	N/D	Conforto térmico
Analisis 1.5	Freeware	N/D	Análise bioclimática
Analisis Bio	Freeware	N/D	Adequação bioclimática
Analisis CST	Freeware	N/D	Stress térmico
Arquitrop	Freeware	N/D	Eficiência energética
AvalCon Rio	Freeware	N/D	Eficiência energética
AMBIENTE	Freeware	N/D	Simulação térmica
CTCA	Freeware	N/D	Análise térmica
Conforto 2.2	Freeware	N/D	Voto médio estimado
Declinação magnética	Freeware	N/D	Norte verdadeiro
EnerClac (E2)	Freeware	N/D	Avaliação energética
Luz do Sol	Freeware	N/D	Cartas solares
Mark IV plus	Freeware	N/D	Eficiência energética
Power Domus	Comercial	N/D	Desempenho térmico
PSYCHROS	Freeware	N/D	Arquivos TRY
SOL AR	Freeware	N/D	Carta solar
Sunpath	Freeware	N/D	Carta solar
THEDES	Freeware	N/D	Eficiência térmica
Transmitância	Freeware	N/D	Propriedades térmicas dos materiais
UMIDUS	Freeware	N/D	Umidade dos materiais
ZBBR	Freeware	N/D	Classificação bioclimática e diretrizes construtivas

Fonte: Adaptado de DELBIN (2006) e EERE (2012a).

Dentre os programas apresentados, o *software* utilizado neste estudo para realizar a análise termoenergética foi o *EnergyPlus* (versão 7.2). Baseado nos programas BLAST e DOE-2, foi desenvolvido pelo *U.S. Department of Energy* (DOE) em conjunto com *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories* (CERL), *University of Illinois*, *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), *Oklahoma State University* (OSU), *GARD Analytics* e *Florida Solar Energy Center*. O *EnergyPlus* é utilizado para definir a carga térmica para o dimensionamento dos sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação e determina o consumo energético e as condições de conforto de cada zona e permite avaliar a influência de diferentes parâmetros construtivos sobre o conforto e o consumo energético (EERE, 2012a; EERE, 2012b).

O *EnergyPlus* é gratuito e validado, ou seja, tem seus resultados comparados com os resultados de outros programas de simulação, verificando o grau de precisão obtido. O método adotado pela *ASHRAE Standard 140* como norma para testes e avaliações de programas computacionais é o *BESTest* (*Building Energy Simulation Test*). Além deste teste, outros três testes principais são conduzidos pelo *EnergyPlus*: (i) analíticos; (ii) comparativos, e (iii) de lançamento e execução (EERE, 2012b).

Para a validação do *EnergyPlus* foram simulados 18 casos. Destes, os resultados para carga anual e pico de aquecimento e refrigeração de 13 diferentes casos foram comparados com os resultados de oito programas de simulação energética. Os resultados máximos e mínimos de temperaturas *free-floating* foram comparadas com quatro casos diferentes. Por fim, condução térmica do solo foi comparada com apenas um programa de simulação, devido à limitação de outros programas. Das 62 comparações, o *EnergyPlus* manteve-se dentro do intervalo em 58 delas, para os demais, a variação foi menor que 5,6% (HENNINGER, WITTE E CRAWLEY, 2004).

É um programa de caráter científico e não possui uma interface amigável, tendo dados de entrada e saída em formato ASCII. O programa aceita qualquer dado de entrada (exceto em dados com limites) e não realiza análises críticas dos resultados obtidos. Desta forma, é necessário especial atenção nos dados de entrada e saída. Para os cálculos, o programa utiliza o conceito de zonas térmicas, ou seja, regiões da construção ou ambientes da edificação que possuem o mesmo controle térmico. As zonas interagem entre si, através de superfícies e fluxos de ar, utilizando as funções de transferência por condução (LBNL, 2012a; LBNL, 2012b).



## 2.3.2 Formas de avaliação

### 2.3.2.1 Critérios das normas de desempenho

Os critérios mínimos de desempenho térmico estão normatizados no Brasil pela NBR 15220 (ABNT, 2005d) e NBR 15575 (ABNT, 2013). A NBR 15220 divide o território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima. Cada uma dessas zonas possui um conjunto de recomendações técnico-construtivas, que permitem o entendimento das características dos elementos construtivos necessários à otimização do desempenho térmico das edificações, por meio de adequação climática de cada zona. Sua avaliação é prescritiva e realizada com base na verificação do atendimento de cada parâmetro identificado pela norma, sendo eles: estratégias de condicionamento térmico passivo (Tabela 2), tamanho das aberturas para ventilação (Tabela 3), proteção das aberturas, vedações externas, parede externa e cobertura (Tabela 4) (ABNT, 2005d).

**Tabela 2 – Diretrizes construtivas e estratégias projetuais para a ZB 1 e ZB 3.**

Estratégias	Zona Bioclimática 1	Zona Bioclimática 3
<b>Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas</b>		
Aberturas para ventilação	Médias	Médias
Sombreamento das aberturas	Permitir sol durante o período frio	Permitir sol durante o período frio
<b>Tipos de vedações externas</b>		
Paredes	Leve	Leve refletora
Coberturas	Leve isolada	Leve isolada
<b>Estratégias de condicionamento térmico passivo</b>		
Verão	-	Ventilação cruzada
Inverno	Aquecimento solar da edificação Vedações internas pesadas (inércia térmica)	Aquecimento solar da edificação Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Nota: O condicionamento passivo será insuficiente durante o período mais frio do ano

Fonte: Adaptado de ABNT (2005d).

**Tabela 3 – Caracterização para as aberturas de ventilação.**

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Fonte: Adaptado de ABNT (2005d).

**Tabela 4 – Caracterização de paredes e coberturas.**

Vedações externas		Transmitância térmica – U [W/m <sup>2</sup> °C]	Atraso térmico – $\phi$ [horas]	Fator solar – FS <sub>o</sub>
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \leq 6,5$	$FS_o \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30$ . FT	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 6,5$	$FS_o \leq 6,5$

Fonte: Adaptado de ABNT (2005d).

Esta norma apresenta um método simplificado para a avaliação do desempenho térmico dos sistemas construtivos o qual depende apenas do cálculo das propriedades térmicas de cada componente do sistema construtivo. As recomendações dos limites para as propriedades térmicas são variáveis a cada zona bioclimática em estudo (ABNT, 2005d).

Já a NBR 15575 (ABNT, 2010), considera a adequação ao uso de um sistema ou processo construtivo, independentemente da solução técnica adotada. No que tange ao desempenho térmico, este pode ser classificado qualitativamente e deve ser contemplado adequadamente, tendo como critérios de avaliação os valores de temperatura interna máximos no verão e mínimos no inverno. A norma apresenta três procedimentos para a avaliação da adequação das edificações: simplificado, simulação e medição (através de medições em edificações ou protótipos construídos). Estabelece ainda três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), sendo o nível mínimo obrigatório.

As exigências estabelecidas para o desempenho das edificações, através da avaliação por simulação computacional, pela NBR 15575 são de apresentar, para os dias típicos de verão e de inverno, condições térmicas iguais ou melhores que as do ambiente externo. O valor máximo da temperatura do ar interno da edificação no verão, em ambientes de permanência prolongada, sem presença de fontes internas de calor, deve ser menor ou igual ao valor máximo da temperatura externa, para o nível mínimo (Tabela 5). Para o desempenho no inverno, os valores mínimos da temperatura de ar interna em ambientes de permanência prolongada, devem ser maiores ou iguais à temperatura mínima externa acrescida de 3°C, para o nível mínimo de desempenho (Tabela 5) (ABNT, 2010a).

A NBR 15575 avalia os sistemas construtivos das edificações mais detalhadamente, pelo método de desempenho térmico, recomendando valores mínimos de capacidade térmica. Enquanto que a NBR 15220 recomenda sistemas construtivos para habitações de interesse social em cada zona bioclimática.

A partir de 2013 entra em vigor a norma NBR 15575/2013, com alterações quanto à NBR 15575/2010. A norma teve abrangência ampliada, passando a ser obrigatória para todas as edificações. No desempenho térmico das edificações paredes e coberturas são avaliadas através da transmitância térmica e capacidade térmica. Para o nível mínimo de desempenho térmico, os resultados devem ser confrontados com a exigência mínima para cada zona bioclimática. Para classificação acima de mínimo, há a necessidade de avaliação por simulação computacional ou medição in loco (ABNT, 2013).

Tabela 5 – Critério de avaliação de desempenho térmico

Nível de desempenho	Critérios – Verão		Critérios – Inverno	
	Zonas 1 a 7	Zona 8	Zonas 1 a 5	Zonas 6 a 8
M	$T_{i,Max} \leq T_{e,Max}$	$T_{i,Max} \leq T_{e,Max}$	$T_{i,Mín} \geq (T_{e,Mín} + 3^{\circ}C)$	Nestas zonas este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,Max} \leq (T_{e,Max} - 2^{\circ}C)$	$T_{i,Max} \leq (T_{e,Max} - 1^{\circ}C)$	$T_{i,Mín} \geq (T_{e,Mín} + 5^{\circ}C)$	
S	$T_{i,Max} \leq (T_{e,Max} - 4^{\circ}C)$	$T_{i,Max} \leq (T_{e,Max} - 2^{\circ}C)$ e $T_{i,Mín} \leq (T_{e,Mín} + 1^{\circ}C)$	$T_{i,Mín} \geq (T_{e,Mín} + 7^{\circ}C)$	

$T_{i,Max}$  é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus centígrados;  
 $T_{e,Max}$  é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus centígrados;  
 $T_{e,Mín}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus centígrados;  
 $T_{i,Mín}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus centígrados;  
 Zonas bioclimáticas de acordo com a norma 15220 – Parte 3.

Fonte: Adaptado de ABNT (2005d).

### 2.3.2.2 Certificações

Recentemente tem sido pesquisados conceitos de avaliação ambiental de edificações, já que estes são responsáveis por uma parcela significativa do impacto ambiental da construção civil. Devido à necessidade de avaliar a problemática ambiental de forma integrada foram criados diversos indicadores de sustentabilidade ambiental (ARAUJO, 2009).

De acordo com Patzlaff (2009) estes indicadores caracterizam-se por uma série de medidas de desempenho, introduzidos como facilitadores para comparações internacionais entre os resultados. A estrutura metodológica varia entre os métodos existentes, de acordo com as práticas construtivas e de projeto, clima, prioridades de regulamentações e do mercado, entre outros, mas possuem blocos de discussão relativamente comuns entre si.

Conforme Piccoli (2009) os principais sistemas de avaliação ambiental de edificações utilizam como base a Análise do Ciclo de Vida (ACV), uma ferramenta complexa, que envolve uma diversidade de produtos, processos e agentes, contudo não aborda impactos econômicos e sociais em sua análise.

Para Silva (2003) os sistemas de avaliação ambiental podem ser divididos em sistemas orientados para o mercado e orientados para pesquisa. Os sistemas que promovem a sustentabilidade através de mecanismos de mercado foram desenvolvidos para serem facilmente entendidos. Desta forma, possuem uma estrutura simplificada, geralmente em forma de lista de verificação, sendo todos vinculados com certificações de desempenho, como, por exemplo, o BREEAM, LEED e CASBEE. Nos sistemas orientados para a pesquisa a estrutura é centrada no desenvolvimento metodológico e na fundamentação científica, orientando o desenvolvimento de novos sistemas, neste caso podem ser citados GBC e BEPAC.

Conforme Silva (2003) praticamente todos os países da Europa, além dos Estados Unidos, Canadá, Austrália, Japão e Hong Kong, possuem um sistema próprio de avaliação e classificação do desempenho ambiental das edificações. As circunstâncias contextuais e aplicações pretendidas variam. Entretanto a maioria dos sistemas avalia edifícios novos ou ainda em fase de projeto e poucos distinguem o desempenho ambiental das propriedades inerentes ao edifício do desempenho real do edifício em operação.

No Brasil, em outubro de 2007 foi criado o primeiro método brasileiro de certificação ambiental de edifícios para o setor da construção civil, Alta Qualidade Ambiental (AQUA), da Fundação Vanzolini, tendo como base o sistema francês NF Bâtiments Tertiaires - Démarche HQE®. Está estruturado em duas partes que avaliam a edificação de forma complementar. A primeira engloba o Sistema de Gestão do Empreendimento, abordando a gestão a ser estabelecida para assegurar a qualidade ambiental final da edificação. A segunda parte corresponde à Qualidade Ambiental do Edifício, avaliando o desempenho da edificação de acordo com suas características técnicas e arquitetônicas (SILVA et al., 2010). Estruturado em 14 categorias, a edificação é avaliada em três momentos: na fase de pré-projeto, na fase de concepção e ao final da execução da obra, para certificação final (PICCOLI, 2009).

Criado em 2009, outro método brasileiro de certificação ambiental de edifícios é o Selo Casa Azul, da Caixa Econômica Federal. Tem como objetivo qualificar os projetos dentro de critérios socioambientais, priorizando a economia de recursos naturais e as práticas sociais. Possui 53 critérios de avaliação, distribuídos em seis categorias (inserção urbana, projeto e conforto, eficiência energética, conservação de recursos materiais, uso racional da água e práticas sociais) e dividem-se nas classes ouro, prata e bronze, definidos pelo número de critérios obrigatórios atendidos e de livre escolha. A edificação é avaliada em projeto e no curso da obra (JOHN, PRADO, 2010). O Selo Casa Azul difere das demais certificações devido à abordagem aos aspectos econômicos e sociais do empreendimento avaliado.

#### 2.3.2.3 Etiqueta Selo Procel: Edifica

O Selo Procel, uma Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Programa Procel Edifica amplia o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que até então compreendia apenas máquinas e equipamentos (BRASIL, 2010a; ELETROBRÁS, 2011). Visando à melhoria da eficiência energética das edificações, o selo avalia as edificações a partir dos sistemas de iluminação, condicionamento de ar e envoltória arquitetônica (FONSECA et al., 2010).

A regulamentação do Selo Procel preceitua que as edificações devam atender às normas e legislações vigentes e então propor medidas de melhorias dos sistemas analisados pelo selo, de forma a melhorar os níveis de eficiência energética. A edificação é avaliada em projeto e, no caso de edificações novas, após o “Habite-se”. Nas edificações existentes, a avaliação ocorre após reformas. Atestada a consonância entre a edificação e a regulamentação é fornecida uma placa com a certificação (Figura 6), podendo esta ser exposta na edificação (ARAUJO, 2009).

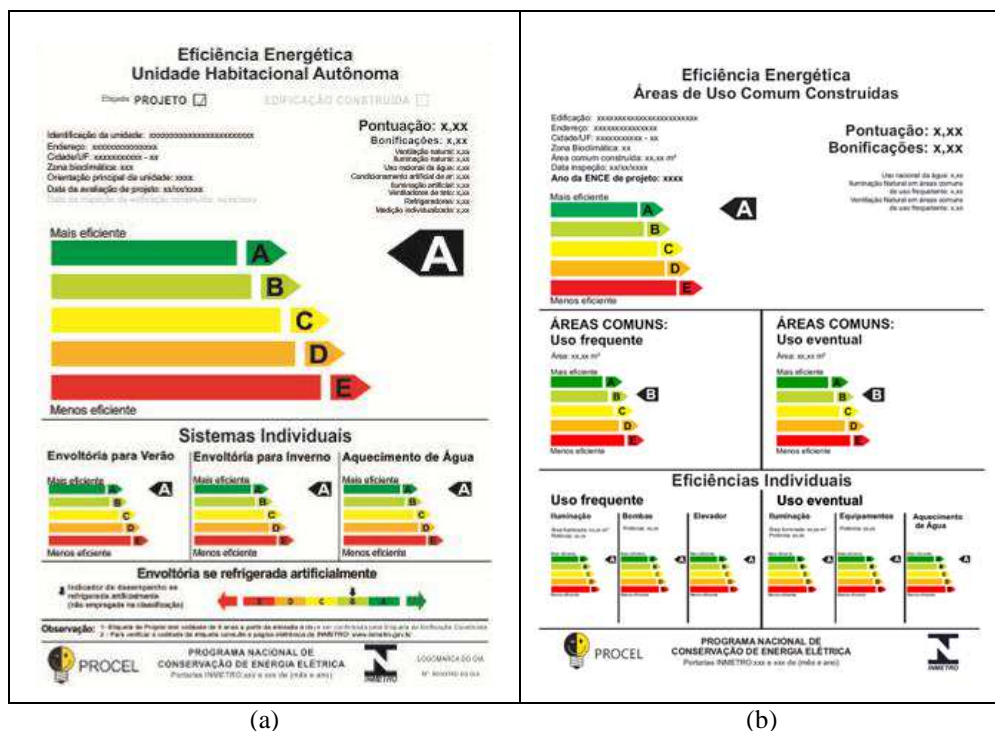


Figura 6 – ENCE unidade habitacional: (a) ZB 1 a 4 (b) áreas de uso comum: edificações multifamiliares

Fonte: <http://www.eletronbras.gov.br>

A avaliação pode ser realizada através dos métodos prescritivo ou de simulação. No método prescritivo, o desempenho de cada sistema avaliado possui um peso (BRASIL, 2010b). O método de simulação avalia a edificação de forma mais completa e/ou flexível, sendo possível, através deste método, avaliar a incorporação de inovações tecnológicas e o uso de estratégias passivas de condicionamento. Entretanto este método não descarta o método prescritivo e deve ser realizado utilizando ferramenta computacional validada pela ASHRAE Standard 140 (BRASIL, 2010a).

De acordo com Santos et al. (2010) a edificação pode ser avaliada de modo geral, ou seja, como um todo, ou de forma parcial, sendo obrigatória a avaliação da envoltória para qualquer etiqueta. Para a classificação geral calcula-se a eficiência de cada um dos sistemas

separadamente, ponderam-se as pontuações parciais, e, através dos pesos estabelecidos, obtém-se a pontuação final da edificação (FONSECA et al., 2010).

Os critérios de avaliação variam do nível A (mais eficiente) ao nível E (menos eficiente). As exigências devem ser avaliadas por laboratórios de inspeção, creditados pelo Inmetro (BRASIL, 2010c). Referente a bonificações, o selo define que as iniciativas que aumentem a eficiência da edificação podem receber até um ponto na classificação geral, são independentes entre si e podem ser parcialmente alcançadas.

O método de simulação proposto pelo Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) consiste em simular a edificação na condição de naturalmente ventilada e para quando a edificação é condicionada artificialmente, este de caráter informativo. Para este método devem ser atendidos os pré-requisitos de ventilação e iluminação natural e para a avaliação dos indicadores de graus-hora de resfriamento (GHR), dos ambientes de permanência prolongada, sendo calculada através da Equação 1 (BRASIL, 2010d).

$$GH_R = \sum(T_o - 26^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Onde:  $GH_R$  é indicador de graus-hora para resfriamento e  $T_o$  é a temperatura operativa horária ( $^\circ\text{C}$ ).

O coeficiente de rugosidade do entorno deve ser de 0,33, representando um terreno de centro urbano. Para a simulação da edificação condicionada artificialmente, compara-se o consumo relativo para a refrigeração e aquecimento dos ambientes de permanência prolongada, sendo calculados para o período das 21h às 8h; no restante do período deve-se considerar a edificação naturalmente ventilada. De acordo com os valores obtidos, determina-se o equivalente numérico da envoltória do ambiente para resfriamento ( $EqNumEnvAmb_{Resfr}$ ) e aquecimento ( $EqNumEnvAmb_A$ ) de cada ambiente, devendo estes ser iguais ou menores que os níveis de eficiência da Tabela 6 (BRASIL, 2010d).

A classificação do nível de eficiência das unidades é o resultado da distribuição dos pesos através da Equação (2, utilizando os coeficientes da Tabela 7, de acordo com região geográfica na qual a edificação está localizada.

$$PT_{UH} = (a \times EqNumEnv) + [(1 - a) \times EqNumAA] + \text{Bonificações} \quad (2)$$

Onde:  $PT_{UH}$ : pontuação total do nível de eficiência da unidade habitacional autônoma;  $a$ : coeficiente adotado de acordo com a região geográfica na qual a edificação está localizada;

EqNumEnv: equivalente numérico do desempenho térmico da envoltória da unidade habitacional autônoma quando ventilada naturalmente; EqNumAA: equivalente numérico do sistema de aquecimento de água; Bonificações: pontuação atribuída a iniciativas que aumentem a eficiência da edificação.

**Tabela 6 – Equivalente numérico da envoltória do ambiente - ZB 1 e ZB 3.**

ZB	Nível de eficiência	Resfriamento		Aquecimento	
		EqNumEnvAmb <sub>Resfr</sub>	Condição	EqNumEnvAmb <sub>A</sub>	Condição (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
1	A	5	$GH_R \leq 143$	5	$C_A \leq 16,700$
	B	4	$143 < GH_R \leq 287$	4	$16,700 < C_A \leq 33,400$
	C	3	$287 < GH_R \leq 430$	3	$33,400 < C_A \leq 50,099$
	D	2	$430 < GH_R \leq 574$	2	$50,099 < C_A \leq 66,799$
	E	1	$GH_R > 574$	1	$C_A > 66,799$
3	A	5	$GH_R \leq 822$	5	$C_A \leq 6,429$
	B	4	$822 < GH_R \leq 1643$	4	$6,429 < C_A \leq 12,858$
	C	3	$1643 < GH_R \leq 2465$	3	$12,858 < C_A \leq 19,287$
	D	2	$2465 < GH_R \leq 3286$	2	$19,287 < C_A \leq 25,716$
	E	1	$GH_R > 3.286$	1	$C_A > 66,799$

Fonte: Adaptado de Brasil (2010d)

O equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional é obtido através das Equações (3 (ZB1) e (4 (ZB3):

$$EqNumEnv = 0,8 \times EqNumEnv_{Resfr} + 0,92 \times EqNumEnv_A \quad (3)$$

$$EqNumEnv = 0,64 \times EqNumEnv_{Resfr} + 0,36 \times EqNumEnv_A \quad (4)$$

**Tabela 7 – Equivalente numérico e classificação do nível de eficiência**

Nível de eficiência	EqNum	Pontuação (PT)
A	5	$PT \leq 4,5$
B	4	$3,5 \leq PT < 4,5$
C	3	$2,5 \leq PT < 3,5$
D	2	$1,5 \leq PT < 2,5$
E	1	$PT < 1,5$

Fonte: Brasil (2010d).

#### 2.3.2.4 Estudos anteriores

Além dos métodos normativos, também podem ser abordados diferentes métodos alternativos para a avaliação térmica de materiais e sistemas construtivos, abordados em estudos científicos nacionais, resumidamente apresentados a seguir.

O estudo realizado por Akutsu e Vittorino (1991 apud BARBOSA, 1997) abordou os procedimentos de avaliação de desempenho térmico e escolha do sistema de ar condicionado energeticamente mais eficiente. As exigências básicas eram que pelo menos 80% dos ocupantes deveriam expressar satisfação com o ambiente térmico e a umidade

relativa do ar deveria ser de no mínimo 30%. Os autores adotaram as recomendações das normas ASHRAE 55 e ISO 7730 para o conforto térmico. Entretanto para a velocidade do ar, enquanto a norma ASHRAE 55 indica a velocidade de 0,80m/s, a máxima permitida no estudo para o inverno não deveria exceder os 0,15m/s e, para o verão, 0,25m/s. Os autores afirmam que a determinação da resposta térmica da edificação poderia ser realizada através de programas de simulação térmica computacional.

Akutsu e Vittorino (1993 apud MARQUES, 2008) propõem critérios para a definição de níveis de desempenho para o processo de avaliação do desempenho térmico de edificações. O estudo indica três níveis de desempenho térmico: (a) onde a temperatura interna encontra-se dentro da faixa de conforto térmico estabelecida pela ISO 7730; (b) a temperatura interna não ultrapassa a temperatura mínima ou máxima externa; e, (c) a temperatura interna ultrapassa as externas. A distinção entre edificações de mesmo nível pode ser feita através de somatório da quantidade de horas do dia onde se verifica condições insatisfatórias de conforto térmico, ou seja, entre o valor da temperatura interna e do valor da temperatura limite de conforto para a estação. A edificação com melhor desempenho será a que obtiver o menor valor absoluto desta somatória.

Em continuidade a esta pesquisa e em uma tentativa de dar início a normatização brasileira sobre o desempenho térmico de habitações de interesse social, Akutsu et al. (1995 apud BARBOSA, 1997) desenvolveram um método simplificado de avaliação de desempenho térmico, específico para habitações de interesse social térreas. Os autores criaram quadros-síntese onde especificaram 30 tipos de paredes, 8 tipos de coberturas e 4 orientações distintas de janelas para cada um dos 8 climas examinados pelo estudo, diferenciando-os pelas suas composições, resistências e capacidades térmicas internas e externas. A aplicação do método consiste em consulta aos quadros, por região climática e por estação (verão ou inverno), permitindo identificar o sistema construtivo mais adequado àquela região e a compatibilidade do sistema construtivo para o desempenho de verão e de inverno.

Becker (1993) avaliou o desempenho térmico de uma edificação unifamiliar térrea (protótipo habitacional), na cidade de Cachoeirinha, RS, durante o outono de 1990. O estudo foi realizado com dados climáticos externos de temperatura, umidade relativa e velocidade de vento, obtidos na estação meteorológica do Aeroporto Salgado Filho (Porto Alegre). As temperaturas externas, internas, superficiais e de globo foram monitoradas, de 10 em 10 minutos, não sendo considerados ganhos internos e ventilação interna. Para avaliação do conforto térmico foram utilizados os critérios de Fanger, e para a análise de desempenho



térmico o autor adotou a norma ANSI/ASHRAE 55-81 e os critérios do IPT (1981). Os resultados obtidos no estudo demonstram que apesar de atender os critérios da metodologia de Fanger, a edificação não atende a todas as exigências da norma ANSI/ASHRAE 55-81 e o período de medição deveria ser estendido para as condições de inverno e verão. O estudo conclui ainda que, para ter condições de realizar uma avaliação térmica completa, deveriam ser coletados os dados de umidade e consideradas as condições de uso e ocupação (carga térmica de pessoas, equipamentos, iluminação e a influência da operação das aberturas).

Barbosa (1997) desenvolveu o método de horas de desconforto. O método utilizado foi confirmar as condições de conforto térmico dos usuários e a partir de simulações térmicas de diferentes sistemas construtivos, estabelecer o limite de horas anuais de desconforto, tanto por frio quanto por calor, que a edificação apresenta por um ano inteiro. Aplicado em habitações de interesse social, utiliza a zona de conforto de Givoni para países em desenvolvimento, com temperatura de conforto no intervalo entre 18°C e 29°C. O limite estabelecido para que a habitação de interesse social apresente desempenho térmico mínimo foi de mil horas de desconforto, devido às condições econômicas e o referencial cultural.

Sakamoto et al. (2001) procuraram aperfeiçoar o método desenvolvido por Barbosa (1997) através da comparação dos resultados obtidos no estudo anterior. Neste trabalho foram adotados critérios de caracterização da edificação: transmitância térmica, absorvância, sombreamento mínimo e área efetiva útil das aberturas para ventilação em relação à área de piso. Considerou-se o zoneamento bioclimático e os cálculos de transmitância térmica, atraso térmico, o fator de ganho de calor solar de elementos opacos e a razão de proporção de ventilação entre aberturas e a área de piso. O resultado demonstrou que as edificações que obtiveram o melhor desempenho térmico por simulação ou monitoramento, nem sempre se classificaram com o melhor desempenho pelos critérios estabelecidos pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005d) e somente as propriedades da edificação não são determinantes para um bom desempenho térmico.

O estudo desenvolvido por Morello e Sattler (2004) em um protótipo na cidade de Porto Alegre, RS, no período de inverno de 2003, utilizou os dados climáticos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Das horas monitoradas, os relatórios obtidos através de carta bioclimática apontam que em 26,22% das horas havia a necessidade de aquecimento artificial; em 71,8% das horas a temperatura esteve abaixo dos 18°C; e em 16,9% a temperatura esteve acima dos 17°C, ou seja, próxima da zona de conforto. Foram calculados, como forma complementar à análise

térmica, os graus-hora no interior e exterior do protótipo. Por este método, as condições de desconforto no interior da edificação diminuíram pela metade e, conseqüentemente, as horas de conforto foram ampliadas. Os autores concluem que, mesmo com uma elevada quantidade de horas internas em desconforto, a edificação exerceu uma redução considerável em relação ao frio externo.

Ghisi e Massignani (2007) utilizaram o método de coeficiente de determinação e o aplicaram a fatores de influência térmica, para comparar o desempenho de oito ambientes de uma edificação residencial multifamiliar. Foram utilizados parâmetros de absorção das cores das superfícies externas e das propriedades térmicas (atraso térmico, transmitância térmica e capacidade térmica) de paredes e janelas e o mascaramento das aberturas para correlacionar a diferença das temperaturas externas com as internas, frente às propriedades térmicas. O estudo conclui que a transmitância térmica na área de fachada teve maior influência na temperatura máxima interna; e a capacidade térmica e o atraso térmico apresentaram melhor correlação com a temperatura mínima interna. Desta forma, a redução da transmitância térmica, o aumento da capacidade e atraso térmico resultaria em melhores desempenhos.

Como forma de aperfeiçoamento de projeto, Sattler (2007) realizou um estudo de desempenho térmico do protótipo habitacional Casa Alvorada. O programa de simulação computacional utilizado para a análise do desempenho térmico foi o THEDES, para edificações não condicionadas artificialmente. Para o estudo, dois arquivos climáticos foram criados, para o inverno e para o verão, com os dados climáticos de dias típicos da cidade de Porto Alegre, RS, localizada na ZB 3. Observou-se que o interior da edificação é em média 1°C superior a temperatura externa. No verão, as temperaturas internas ultrapassam as externas e em 16 horas do dia estas foram superiores a 29°C. No inverno, novamente as temperaturas médias internas foram superiores as externas e a temperatura manteve-se abaixo do limite térmico (em 16°C) durante o dia todo. As trocas mais significativas foram referentes ao isolamento de paredes externas e coberturas, tanto no inverno quanto no verão. Os piores resultados apresentados são para o período de verão, devido à presença de temperatura e umidade altas, características da região. Contudo, o autor afirma que estes resultados não revelam o real desempenho do protótipo habitacional, pois algumas estratégias utilizadas não foram expressas nos dados de caracterização da edificação no programa de simulação, tais quais sombreamento dos planos transparentes e ventilação por efeito chaminé. Outra razão para este fato é a utilização de dias típicos, considerados situações extremas, correspondentes a curtos períodos do ano.

Filippín e Beascochea (2009) estudaram o desempenho termoenergético, através de monitoramento de uma habitação localizada em Santa Rosa, província de La Pampa, Argentina, de abril 2008 a fevereiro de 2009. As diretrizes de projeto foram aquecimento, resfriamento e iluminação natural. Os resultados obtidos demonstram que, na etapa de projeto, a simulação térmica foi razoável e o calor auxiliar apresentou uma economia superior a 50% de energia em comparação a uma edificação convencional. As autoras afirmam que o custo extra pelas estratégias bioclimáticas utilizadas (esquadrias de vidro duplo e isolamento térmico da cobertura) e pela conservação de energia foi de 6,4%. Os resultados para o inverno foram satisfatórios, mantendo-se as condições de conforto com um consumo de gás natural 67% menor em comparação com uma construção tradicional. Durante a primavera e verão as temperaturas internas se mantiveram dentro da zona de conforto térmico.

A pesquisa realizada por Pouey (2011) teve como objetivo avaliar projetos desenvolvidos através de estratégias bioclimáticas de conforto passivo. Avaliou-se o desempenho térmico e energético de edificações residenciais horizontais de interesse social na cidade de Pelotas, RS, situada na ZB 2. A metodologia foi desenvolvida a partir de simulações térmicas e energéticas utilizando-se os programas *Design Builder* e *EnergyPlus*, avaliando o conforto térmico através de fluxo de energia e graus-hora de desconforto e energeticamente conforme o RTQ-R. Devido à cidade de Pelotas não possuir dados climáticos foram utilizados dados anuais da cidade de Santa Maria, RS e comparando com os dados de verão da cidade de Florianópolis e de inverno de Curitiba. Com o aumento do isolamento da edificação o conforto térmico no inverno aumentou, devido à diminuição das perdas térmicas pelas paredes e forros, reduzindo o ganho de calor pelas paredes externas. Pouey (2011) concluiu que a principal estratégia para aumentar o conforto térmico da edificação nos períodos frios é o isolamento, e nos períodos de calor, a promoção de ventilação cruzada. Os resultados apresentaram significativo aumento do nível de eficiência energética pelo método RTQ-R de C para A.

Grigoletti e Sattler (2012) propuseram um método de avaliação global de desempenho higtotérmico de habitações térreas unifamiliares de interesse social, em Porto Alegre, RS. Os requisitos e critérios apresentados pelos autores complementam as normas de desempenho NBR 15575. Foi realizada pesquisa bibliográfica referente ao clima da região e dos parâmetros do comportamento térmico global de edificações e analisadas 4 edificações, para definição dos parâmetros térmicos relevantes. Como forma de validar o método proposto, os autores submeteram-no à opinião de agentes locais ligados ao financiamento,

projeto, execução e avaliação de habitações e de especialistas em conforto térmico de instituições de ensino e pesquisa. Foram indicados 17 parâmetros de avaliação e três classificações. Os resultados obtidos pelos autores demonstram a pouca variação de desempenho térmico entre as habitações analisadas, com pouca influência da orientação solar na temperatura interna da edificação, importância do ganho de calor solar no inverno com o uso de estratégias de aquecimento passivo (inércia térmica e esquadrias voltadas a norte) e a importância da cobertura no desempenho térmico de edificações horizontais. Por fim, os requisitos foram divididos em quatro grupos (edificação, cobertura, paredes e fechamentos transparentes) e foi adotado um valor mínimo para cada um dos parâmetros térmicos recomendados, incluindo os da norma brasileira.

#### 2.3.2.5 Análise do ciclo de vida

A análise do ciclo de vida (ACV) caracteriza-se por ser um método de avaliação do impacto ambiental de um produto ou processo, considerando os impactos desde a extração de matéria-prima até a disposição final, incluindo extração, processamento, manufatura, transporte, distribuição, uso, reuso, manutenção, reciclagem e disposição final (HASTINGS E WALL, 2009). Com a utilização desta metodologia tem-se uma constatação dos diversos impactos ambientais causados pelo produto ou processo, o que possibilita o planejamento de medidas adequadas para a minimização dos danos causados ao meio ambiente (TAVARES, 2006). Entretanto, conforme Roaf, Fuentes e Thomas (2009) os cálculos para determinar o impacto preciso de cada edificação não são viáveis devido à falta de dados confiáveis.

A estrutura metodológica da ACV foi padronizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), dentro da série ISO 14000. No Brasil, esta série foi reconhecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Até o ano de 2005 foram lançadas quatro normas técnicas desta coleção: NBR ISO 14040, que estabelece os princípios gerais (ABNT, 2001), NBR ISO 14041, que aborda a definição de objetivos e escopo e análise do inventário (ABNT, 2004a), NBR ISO 14042 que aborda a avaliação de impactos ambientais (ABNT, 2004b); e NBR ISO 14043 que é voltada para a interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2005).

Conforme a NBR ISO 14040 (2001), a ACV é uma técnica de avaliação de aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, mediante: (i) a compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto; (ii) a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas; (iii) a

interpretação dos resultados das fases anteriores em relação aos objetivos dos estudos. Devem ser considerados o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas, não existindo um único método para a condução dos estudos.

De acordo com Hastings e Wall (2009) para a ACV de uma edificação a unidade funcional podem ser: moradores, unidades habitacionais, m<sup>2</sup> de área útil ou m<sup>2</sup> de piso aquecido. Conforme a unidade funcional, a forma de comparação é diferente. Por exemplo, se a unidade funcional for m<sup>2</sup> de área útil, a comparação prioriza as diferenças dos materiais utilizados; caso seja m<sup>2</sup> de piso aquecido, é priorizada a diferença de uso energético na operação da edificação.

No setor da construção civil, a ACV é um importante método de avaliação das edificações durante todo o processo, desde a extração de matérias-primas, fabricação dos componentes construtivos, até a construção, uso, manutenção e demolição da edificação (ORTIZ et al., 2009). Fay, Treloar e Iyer-Raniga (2000) afirmam que a energia requerida para a demolição da edificação geralmente não é incluída, por ser considerada muito pequena em comparação aos outros processos. Conforme Marcos (2009), a avaliação do consumo de energia de uma edificação deve considerar todo seu ciclo de vida, podendo ser dividido em fase pré-operacional (energia incorporada inicial), operacional (energia de ocupação, uso e manutenção) e pós-operacional (demolição, reciclagem e reutilização).

O consumo de energia da edificação na fase de operação tornou-se o foco principal de pesquisas. Pesquisas indicam que 80% do total de energia consumida na edificação ocorre durante a fase de uso (UNEP, 2007; MARCOS, 2009). De acordo com Hastings e Wall (2009) as edificações de alto desempenho, comparadas com uma edificação convencional, podem reduzir em até 50% seu impacto ambiental total no ciclo de vida.

#### **a. Energia no ciclo de vida**

A análise do ciclo de vida energético (ACVE) é uma forma simplificada de análise de impacto ambiental. Baseada na ACV, demanda menos esforço e custo na sua aplicação e pode facilitar a tomada de decisão acerca da eficiência energética de materiais e produtos (FAY, 1999). A ACVE fornece condições de avaliar impactos ambientais, tais como as emissões de gases de efeito estufa, e prioriza o inventário de dados de consumo energéticos diretos e indiretos (MARCOS, 2009).

Para Fay (1999), a ACVE utiliza a energia como medida para avaliar o impacto ambiental, possibilitando a comparação entre a energia incorporada de uma edificação e a sua

energia operacional. Pode indicar, por exemplo, o potencial da eficiência energética e as estratégias de conservação de energia no ciclo de vida. Conforme a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001) o conjunto de requisitos energéticos é chamado de Energia Total no ciclo de vida energético.

De acordo estudos realizados por Pullen (2000 apud ROAF, FUENTES E THOMAS, 2009) na Nova Zelândia, a energia utilizada diariamente em uma edificação convencional, ao longo de 50 anos, é igual a aproximadamente quatro vezes a energia incorporada da estrutura da edificação. Entretanto, de acordo com Tavares (2006), localizados em sua maioria em regiões de inverno rigoroso, os países desenvolvidos têm sua geração de energia elétrica baseada em fontes fósseis. Assim, o principal foco de pesquisas científicas nestes países é a redução do consumo operacional, mais especificamente, energia para o condicionamento de ambientes. Contudo, segundo Verbeeck e Hens (2010) ao aprimorar o desempenho termo-energético das edificações, materiais e componentes extras são aplicados, resultando em uma maior energia incorporada na edificação.

Thormark (2001) afirma que a energia necessária para a operação de uma edificação pode ser reduzida aumentando a eficiência do envelope da edificação e utilizando outras estratégias passivas. Entretanto essas estratégias aumentam o consumo energético na fase de produção. Conforme a autora, estudos demonstram que a energia de produção pode ser responsável por 40 a 60% do total de energia consumida no ciclo de vida. Conforme Ramesh, Prakash e Shukla (2010) o excessivo uso de estratégias passivas de conforto pode ser contra-produtivo. Observou-se que em edificações de baixo consumo energético, a energia incorporada total na edificação (inicial, operacional e de manutenção) em um período de 50 anos, é maior que em uma edificação que tenha um gasto de energia operacional maior.

De acordo com Roaf, Fuentes e Thomas (2009) umas das medidas mais importantes do impacto ambiental de um objeto é o conceito de energia incorporada (EI), pois descreve a quantidade de energia utilizada para produzir um produto. O total de EI em uma edificação inclui a energia utilizada na produção, transporte dos materiais e componentes e para os processos durante a produção e demolição (CHEN, BURNETT E CHAU, 2001).

Os valores da análise de energia incorporada são, geralmente, apontados em MJ/kg ou MJ/m<sup>3</sup> de material produzido, ou em MJ/m<sup>2</sup> quando a comparação é feita entre elementos construtivos ou edificações (TAVARES, 2006). As parcelas de energia incorporada foram descritas por diversos autores, dentre os quais Ramesh, Prakash e Shukla (2010), Marcos (2009), e Tavares (2006), e são sintetizados a seguir:

- Energia incorporada inicial: é o conjunto dos insumos energéticos, diretos e indiretos. É a energia de construção na edificação. Depende do tipo de materiais do projeto e da fonte primária de energia utilizada na produção;
- Energia incorporada operacional: é a energia requerida para manter as necessidades de conforto e manutenção diária da edificação, ou seja, uso de equipamentos para suprir as necessidades de cocção, iluminação, entretenimento, climatização, entre outros;
- Energia incorporada de manutenção: energia despendida em manutenções da edificação e troca de materiais;
- Energia incorporada de demolição: energia requerida para, demolição da edificação, descarte ou reciclagem dos materiais, no fim do ciclo de vida.

Desta forma, a análise do ciclo de vida energético é a soma de todas as energias gastas no ciclo de vida da edificação. Para Fay, Treolar e Iyer-Raniga (2000) o principal benefício da ACVE é a possibilidade de avaliar a energia incorporada dos materiais e das modificações projetuais das estratégias utilizadas para melhorar o desempenho da edificação.

A energia incorporada inicial e a energia incorporada de manutenção são, geralmente, estudadas em conjunto, visto que suas naturezas são associadas à fabricação de materiais e da construção (TAVARES, 2006). De acordo com Fay, Treolar e Iyer-Raniga (2000) a energia requerida para a demolição da edificação é, normalmente, muito pequena comparada com o resto da energia do ciclo de vida.

Vários métodos foram desenvolvidos para calcular a energia incorporada e foram descritos por alguns autores (TAVARES, 2006; FAY, TREOLAR E IYER-RANIGA, 2000; MARCOS, 2009) sendo os principais métodos: análise de processo, análise estatística, análise por matrizes insumo x produto e análise híbrida, os quais são resumidos a seguir:

- Análise de processo: baseia-se no estudo detalhado de todas as etapas do processo de fabricação, discriminando os consumos energéticos diretos e indiretos em cada etapa. Tem como inconveniente o tempo necessário para realizar uma análise devidamente detalhada, entretanto é utilizado devido à precisão dos dados (utilizada neste estudo, tendo como base os quantitativos de materiais de construção utilizados nos modelos analisados);

- Análise estatística: realizada a partir de estatísticas sobre o consumo energético de produtos ou categorias de setores industriais, fábricas e órgãos do governo. Apesar de ser um método rápido e prático, exige dados consistentes e confiáveis;
- Análise por matrizes insumo x produto: relaciona os resultados financeiros de setores da economia definindo o fluxo de recursos entre eles. Destacando-se os fluxos, estabelece-se a relação de cada unidade de energia com a unidade de moeda correspondente. Desta forma, são determinadas as tabelas com índices de consumo de energia de cada setor da economia para cada unidade de moeda produzida. Sua aplicação é geralmente associada a outro método de análise, para a redução de altas incertezas verificadas;
- Análise híbrida: como forma de reduzir as incertezas, combina duas das formas anteriores: análise de processo e análise de estatística ou análise por matrizes insumo x produto.

Lobo, Santos e Tavares (2010) desenvolveram um método para a avaliação de impactos ambientais utilizando ferramentas comuns da construção civil. Para isto, vincularam os dados para a análise do ciclo de vida energético nas planilhas de serviços de uma obra, calculando a energia incorporada inicial. Método semelhante foi empregado por Marcos (2009) que utilizou os quantitativos gerados por programas BIM e, com os dados de energia incorporada e de emissão de CO<sub>2</sub> de cada material, calculou a quantidade emitida destes.

No Brasil, conforme Tavares (2006) existe poucas pesquisas que objetivam a obtenção de índices de energia incorporada em materiais de construção. As principais pesquisas sobre o tema, em relação à relevância e citações em trabalhos de análises energéticas são internacionais, incluindo Boustead e Hancock (1979), Treolar (1997), Adalbert (1997), entre outros.

#### **b. Custos no ciclo de vida**

Conforme Matteis e Almeida (2009) e Abaza (2011), para ser sustentável, a edificação de alto desempenho térmico deve ser econômica, tendo em vista os custos inicial e operacional e o retorno do investimento, tanto no nível de componentes quanto no de sistemas construtivos. Assim, edificações de alto desempenho devem utilizar materiais mais eficazes, com maior durabilidade e em menor quantidade.



O método de Análise dos Custos no Ciclo de Vida (ACCV) pode ser definido como uma análise sistêmica dos custos de um processo que avalia várias alternativas e ações visando melhor empregar os recursos disponíveis (FABRYCKY e BLANCHARD, 1991). De acordo com o National Institute of Standards and Technology (NIST), define-se como o custo total de possuir, operar, manter e dispor um edifício ou um sistema de construção (FULLER E PETERSEN, 1995).

Desta forma, a ACCV consiste na avaliação de todos os custos de um projeto, ou seja, custos de construção, operação, manutenção e demolição. De acordo com Queiros et al. (2007) a ACCV avalia, ainda, a contribuição da gestão de resíduos de todas as etapas e do aproveitamento no fim da vida produto, como, por exemplo, os processos de revalorização pós-consumo.

O ciclo de vida pode ser dividido em três fases conectadas pelas micro-fases do ciclo de vida total da edificação. A fase de desenvolvimento compreende a concepção e planejamento do projeto, aquisição do terreno e conclusão da construção. Falhas nesta fase geram efeitos na fase de ocupação (REAL, 2010). Na segunda fase a manutenção influencia o final da vida útil do imóvel e a última fase caracteriza-se pela alternativa de modernização (remodelação) ou demolição da edificação (ROTTKE; WERNECKE, 2007 apud WEISE et al., 2009).

Conforme Silva Jr. (2005) a ACCV compõe-se de três técnicas econômicas distintas: (i) custos no ciclo de vida (CCV): caracterizados como a soma do custo inicial de compra e custo operacional anual, ao longo da vida útil do produto; (ii) análise de engenharia/economia: possibilita estimar os custos de produção, instalação e manutenção e a relação entre o produto e suas partes para, desta forma, estudar o custo de produção de um produto mais eficiente; (iii) período de retorno do investimento: permite calcular o tempo necessário para recuperar um investimento adicional de um produto mais eficiente com menores custos operacionais.

A análise dos custos no ciclo de vida é estruturada em quatro etapas, sendo elas: (i) definição do objetivo e escopo do estudo, ou seja, como será realizada e que tipo de decisão de investimento será tomado, tais quais: aceitar ou rejeitar um tipo de sistema ou projeto, seleção do melhor nível de eficiência de um sistema construtivo ou seleção do melhor nível de eficiência de sistemas construtivos combinados; (ii) fronteiras do sistema, quais etapas do ciclo de vida será realizada a análise e os valores de taxa de desconto e de juros; (iii)

análise do inventariado do ciclo de vida, coleta de dados e procedimentos de cálculos; e, (iv) interpretação dos resultados.

Para o cálculo não é necessário incluir todos os custos dos projetos, apenas os que são relevantes e significativos para a tomada de decisão (REAL, 2010). Segundo Woodward (1997), para atender aos objetivos da ACCV os seguintes elementos devem ser identificados: custos iniciais de capital; ciclo de vida da edificação; custo de capital; custos operacionais e de manutenção; custo de destinação final/desconstrução; informações e feedback; e, análise de incerteza e sensibilidade. Além destes, as tarifas de energia também são consideradas importantes.

De acordo com Weise et al. (2009) os custos iniciais podem ser divididos em três categorias: de compra, de aquisição/financiamento e de instalação, consignação e treinamento. Já o ciclo de vida utilizado para a ACCV reflete o período de tempo durante o qual a análise é executada. Em edificações residenciais, o período de estudo utilizado em pesquisas nacionais e internacionais geralmente é de 50 anos (TAVARES, 2006).

O custo de capital é uma medida que desconta o valor que será gasto ou recebido no futuro, tornando os valores dos fluxos de caixa equivalentes aos valores presentes. Em edificações, por possuírem um ciclo de vida longo, os custos não podem ser comparados diretamente em razão da existência de juros sobre o capital.

Os custos operacionais e de manutenção incluem trabalho, materiais e despesas, diretas e indiretas. Os custos de manutenção podem ser divididos em manutenção planejada, não planejada e intermitente (SHERIF E KOLARIK, 1981). O custo de destinação final/desconstrução inclui todos os custos ocorridos no final do ciclo de vida da edificação, tais como, demolição, desmonte e reciclagem (WEISE et al., 2008).

Segundo Fuller e Petersen (1996), o consumo energético anual para cada alternativa de projeto é utilizado no cálculo do custo de energia correspondente. Desta forma, a economia de energia é refletida na diferença do CCV entre as alternativas. Assim, a economia de energia não é computada diretamente no cálculo da edificação. Deve-se medir a quantidade de energia utilizada (ou economizada) no canteiro de obra e na edificação, por fonte de energia (eletricidade, gás, petróleo, etc.) e utilizar de preço local atual para o tipo de combustível ou energia utilizada.

A ACCV é adequada principalmente para a avaliação de estratégias alternativas de projeto que atendam o desempenho ambiental, sobretudo o desempenho térmico da

edificação, mas que provavelmente tenham um custo inicial de investimento, de manutenção, de operação e de reparo diferente (FULLER E PETERSEN, 1996). Para Morrissey e Horne (2011), a análise do custo do ciclo de vida, em estratégias de desempenho térmico, pode determinar se esses projetos são ou não justificáveis para o investidor, baseado na redução do custo de energia e de outros custos envolvidos no ciclo de vida da edificação, ou ainda para auxiliar na escolha da estratégia que possui o melhor custo-benefício, maximizando o retorno do investimento.

### 2.3.3 Estudos anteriores

Pesquisas e experimentos nacionais e internacionais foram desenvolvidos por diversos autores como forma de avaliar o conforto térmico e desenvolver metodologias de ACCV e de ACVE de edificações. Alguns destes estudos são sintetizados a seguir.

#### 2.3.3.1 Estudo na Austrália

Fay (1999) analisou o ciclo de vida energético de oito edificações residenciais existentes, em Melbourne, Austrália. As características de tipologia, área construída, materiais do envelope, número de quartos, banheiros e de habitantes, foram obtidos em levantamento do *Australian Bureau of Statistics*. O estudo não considerou os consumos energéticos de construção e demolição, apenas a energia incorporada inicial e operacional, em um ciclo de vida de 100 anos. A EI da edificação foi definida pelas Equações (5) e (6):

$$ECV = EIO + EIE \quad (5)$$

$$ECV = [OE_t + OE_n] \times t + \sum_{p=1}^p \left[ PQ_p \times TEI_p + PQ_p \times TEI_p \times \left( \frac{t}{RP_p} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

Onde: ECV = Energia total consumida no ciclo de vida; EIO = Energia Incorporada Operacional; EIE = Energia Incorporada na Edificação; OE<sub>t</sub> = Energia consumida para climatização; OE<sub>n</sub> = Energia consumida por equipamentos; t = tempo de vida útil da edificação; p = produto analisado; PQ<sub>p</sub> = Quantidade do produto analisado; TEI<sub>p</sub> = Intensidade Energética total do produto analisado; RP<sub>p</sub> = Taxa de Reposição do produto, em anos.

O cálculo da energia operacional considerou dois fatores: OE<sub>t</sub> e OE<sub>n</sub>. As cargas de climatização foram obtidas através de programas de simulação, nas condições climáticas da cidade em questão. Quando ao consumo de equipamentos, atribuiu-se um fator médio, definido por valores obtidos nas concessionárias de energia e por literatura técnica. Para o cálculo da energia incorporada na edificação, organizaram-se em planilha eletrônica os

valores de energia inicial e de reposição de cada material. Os valores de EI foram contabilizados a partir dos quantitativos de materiais que as compõem, definidos por volume ou peso, multiplicado pelos valores de intensidade energética total. Para tanto, utilizou-se a análise energética híbrida: análise de processos e matrizes insumo x produto. A energia de reposição dos materiais foi calculada pela intensidade energética, multiplicado pelo seu valor de reposição, ao longo do ciclo de vida.

Os resultados obtidos para a EIE nas oito habitações analisadas foram semelhantes, de 10,1 a 14,3 GJ/m<sup>2</sup> e a EIO variou entre 95,8 e 121,4 GJ/m<sup>2</sup>. Considerou-se para o ciclo de vida o resultado de uma das edificações, a qual obteve energia incorporada inicial de 13,7 GJ/m<sup>2</sup>, a energia operacional, ao final de 100 anos, de 85 GJ/m<sup>2</sup>. A taxa de crescimento anual foi de 0,4 GJ/m<sup>2</sup> para a energia incorporada inicial e de 0,85 para a energia operacional, a qual iguala a EIE no 18º ano do ciclo de vida. Em 50 anos a EI inicial compõem 46% do ciclo de vida, aos 100 anos, 32%. Observou-se que 12 materiais compõem 80% do conteúdo energético da edificação.

Pela análise estatística dos resultados, o autor observou que o ciclo de vida energético é igual à energia incorporada da edificação. A massa térmica como um todo é o fator de maior impacto na edificação, mesmo que sua influência tenha variado entre os objetos de estudo. No ano 50, o fator de maior influência é a insolação, mesmo que esta tenha variado no período. O tipo de energia utilizada para aquecimento da edificação também teve um grande impacto nas edificações. Por fim, Fay (1999) conclui que tanto o comportamento do usuário quanto o *design* da edificação influenciam no ciclo de vida energético. Outro fator importante indicado pelo autor é o trecho do ciclo de vida da edificação considerado, pois fatores que em um estágio são críticos, em outro não são.

#### 2.3.3.2 Estudo em Portugal

Santos (2010) avaliou o comportamento térmico de uma edificação comercial, no inverno e no verão, e propôs medidas de reabilitação térmica adequadas ao clima onde a edificação se insere. O método utilizado foi de revisão bibliográfica relacionada ao desempenho de diferentes soluções construtivas e equipamentos, dispondo teorias previamente estabelecidas para o esclarecimento sobre o assunto. Assim, as técnicas de reabilitação de edificações, tanto passivas quanto ativas, foram descritas considerando-se as vantagens e desvantagens de cada uma no contexto da edificação em estudo. A análise da edificação e de soluções passivas de conforto (em diferentes níveis de intervenção) foi

baseada no método simplificado do RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios).

Através da apresentação de alternativas de reabilitação energética de edificações comerciais o desempenho das soluções construtivas foi desenvolvido. Baseada no desempenho térmico de cada uma foram propostas modificações da edificação original para a reabilitação térmica. Após, o autor estabeleceu a melhor estratégia de intervenção, ou seja, aquelas que permitiriam atingir o objetivo com o menor custo no menor período de retorno do investimento. O custo de energia foi estimado através do gasto energético da edificação, estipulado a partir do nível de desempenho térmico encontrado pelo RCCTE (Equação (7) e a equação do período de retorno utilizada foi a simplificada.

$$\text{Custo de exploração} = \frac{N_{ic}}{\eta_i} \times A_p \times \text{custo}_i + \frac{N_{vc}}{\eta_v} \times A_p \times \text{custo}_v + N_{ac} \times \text{custo}_{aqs} \quad (7)$$

Onde:  $N_{ic}$ : necessidades de energia para aquecimento (kWh/m<sup>2</sup>.ano);  $\eta_i$ : eficiência nominal do equipamento de aquecimento;  $A_p$ : área útil de pavimento (m<sup>2</sup>);  $\text{custo}_i$ : custo da energia para aquecimento (€/kWh);  $N_{vc}$ : necessidades de energia para resfriamento (kWh/m<sup>2</sup>.ano);  $\eta_v$ : eficiência nominal do equipamento de resfriamento;  $\text{custo}_v$ : custo da energia para resfriamento (€/kWh);  $N_{ac}$ : necessidades energia para produção de AQS (kWh/m<sup>2</sup>.ano);  $\text{custo}_{aqs}$ : custo da energia para produção de AQS (€/kWh).

Os resultados obtidos pelo autor mostram que houve uma redução maior dos gastos energéticos para aquecimento da edificação do que para resfriamento. A redução do consumo energético chegou a 80%, com utilização de isolamento térmico adequado a região, e o retorno do investimento ocorre em 2,9 anos, com diminuição da emissão de CO<sup>2</sup> na ordem de 2,47 toneladas ao ano. Outras propostas se mostraram mais vantajosas ambientalmente, entretanto o custo do investimento foi maior nestes casos.

### 2.3.3.3 Estudo na Jordânia

Jaber e Ajib (2011) estudaram o desempenho técnico, econômico e energético de diferentes estratégias bioclimáticas em edificações típicas da região do Mediterrâneo. Os pontos avaliados foram: orientação solar, tamanho das janelas e espessura de isolamento térmico; através de análise do custo no ciclo de vida, nas fases inicial e operacional. Para o conforto térmico interno, a prática de resfriamento foi de 24°C e 50-65% de umidade relativa e para o aquecimento, 20°C e umidade relativa de 30%. Para simulação térmica utilizou-se o *software* TRNSYS, o qual realiza simulações de transferência de energia. Os dados de

condutividade térmica e espessura dos materiais utilizados no estudo foram optados de acordo com o Código de Isolamento Térmico da Jordânia. Como critério de escolha de espessura de paredes de isolamento térmico, tamanho de janelas e protetores solares utilizou-se ACCV.

O ciclo de vida da edificação e das estratégias passivas foi de 30 anos e para o sistema de condicionamento ativo do ambiente, de 10 anos. Para a taxa de inflação no preço do combustível e de juros, os autores utilizaram os dados de mercado e do Banco Central da Jordânia. O fator de valor real (FVA) foi estimado em 44,96 aos 30 anos e 11,48 aos 10 anos. O fator de resgate ( $f_{salv}$ ) foi fixado em 10% e 6% de custo do capital dos sistemas de aquecimento e resfriamento, respectivamente. Para o fator de operação e manutenção ( $f_{o\&m}$ ) destes sistemas, considerou-se 15% e 10% de custo do capital, respectivamente. Para os cálculos da ACCV, foram utilizadas as Equações (8) e (9):

$$CCV = C_{aux} \left( 1 + f_{o\&m} \times FVA \times f_{salv} \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^N \right)_{aux} \times \left[ (Q_{aux} - Q_{saved}) \times \frac{P}{n_{aux}} \times FVA \right] \quad (8)$$

$$FVA = \sum_{j=1}^N \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^j = \frac{1+i}{r-i} \left( 1 - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^N \right) \quad (9)$$

Onde:  $C_{aux}$ : custo do sistema auxiliar;  $n_{aux}$ : sistema de aquecimento auxiliar;  $Q_{saved}$ : energia economizada devido ao sistema passivo (GJ);  $f_{o\&m}$ : fração de operação e manutenção; FVA: fator de valor atual; N: período de investimento (ano); p: preço da energia (\$/GJ);  $f_{salv}$ : fator de resgate;  $i$ : taxa de inflação;  $r$ : taxa de juros.

Os resultados mostram que o CCV é mínimo quando o tamanho das janelas é de 30% da área de fachada Sul, 20% da fachada Leste e 10% para ambas as fachadas Norte e Oeste, com dispositivo de sombreamento na fachada sul, evitando a radiação solar no verão. O consumo de energia no inverno foi reduzido em 5,06% e no verão em 8,61%. Ao combinar espessura de isolamento térmico de 0,13m nas paredes e de 0,20m na cobertura, o consumo de energia reduz 25,31%, e o CCV reduz em 11,67%. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que se pode economizar em torno de 27,59% do consumo anual de energia e reduzir o custo no ciclo de vida em 11,94% com a melhor escolha de orientação solar, tamanho de janelas, utilização de dispositivos de sombreamento e espessura ideal para as paredes.

#### 2.3.3.4 Estudo em Curitiba

O estudo desenvolvido por Graf (2011) determinou as condições de equilíbrio entre transmitância térmica e energia incorporada da envoltória de uma edificação localizada

em Curitiba, PR. A pesquisa utiliza um projeto padrão e cria variações desse projeto através da manipulação das espessuras das superfícies que compõem a envoltória da edificação, de forma a aumentar o desempenho térmico da edificação. O *software* utilizado nesta pesquisa foi o MESTRE. A partir da composição dos materiais empregados no projeto base e nas suas variações calculou-se a EI e a transmitância térmica por área de superfície da envoltória da edificação, além da porcentagem de horas dentro e fora da faixa de conforto térmico para cada alternativa.

Para o cálculo da EI a autora utilizou o dados de Tavares (2006), devido à preferência por valores nacionais. O transporte dos materiais também foi calculado, obtendo-se a distância percorrida pela Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias e com listagem das indústrias brasileiras de construção civil. A transmitância térmica foi calculada conforme o disposto na NBR 15220. Para a faixa de conforto térmico utilizou-se a equação de Nicol e Humphreys, devido à abrangência mundial desta. Após, foram feitas relações entre cada uma das características estudadas: espessura, energia incorporada, transmitância, horas de conforto térmico e energia consumida para climatização. Através destes estudos a autora obteve um ponto de equilíbrio entre a transmitância térmica e a EI ou a inviabilidade do uso da tecnologia construtiva para o local estudado.

Os resultados obtidos indicaram que a edificação sem climatização se mostra desfavorável em todas as variáveis estudadas, mesmo no ponto de equilíbrio. Os sistemas apresentaram consumo até 2,5 vezes maior que o valor de consumo médio de uma edificação similar à utilizada na pesquisa. Assim, por necessitar de climatização a edificação, no clima de Curitiba, se mostrou inviável ambiental e financeiramente. Por fim, a autora conclui que a utilização de sistemas construtivos iguais em climas diversos não é recomendável, devido ao desconforto térmico e uso excessivo de climatização.

## **2.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO**

A revisão da literatura apontou alguns trabalhos que demonstram a importância das análises de desempenho térmico e alguns dos métodos mais reconhecidos para sua avaliação. Visando investigar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de critérios de desempenho térmico em edificações residenciais verticais e horizontais e com base na revisão bibliográfica realizada, este trabalho pode ser realizado da seguinte forma.

Dentre os métodos para análise do conforto térmico apresentados na revisão bibliográfica, destaca-se o graus-hora, por ser um dos mais utilizado em estudos científicos

nacionais. Em relação aos índices e escalas de conforto térmico, a zona de conforto de Givoni para países em desenvolvimento, com temperatura entre 18°C e 29°C, foi utilizada devido aos demais limites serem mais restritivos e, por vezes, definidos para ambientes condicionados artificialmente. Givoni apresenta um intervalo de conforto térmico maior e admite temperaturas mais altas quando há aclimação térmica dos usuários, quando há, por exemplo, o uso de ventilação natural, além de ser a faixa de temperatura mais utilizada em estudos nacionais.

Quanto aos programas de simulação térmica, optou-se por utilizar o *EnergyPlus*, por ser uma ferramenta de análise térmica e energética, validada, permite a análise do ano inteiro e gratuita. Além disso, possibilita a modelagem das variações de ocupação, uso e potência de iluminação e equipamentos, ventilação natural e sistemas de condicionamento artificial. Outras ferramentas, com maior integração com os *softwares* BIM não possuem validação e são comerciais, como o Ecotect (integração direta com o Revit), por exemplo, que apesar de utilizado em alguns artigos científicos, possui cálculos simplificados e sem validação. Os demais programas de simulação não foram utilizados, já que não estavam disponíveis ou havia dificuldades de operação para o desenvolvimento deste trabalho.

Como visto da revisão bibliográfica, existe uma diversidade de sistemas e métodos para mensurar os impactos ambientais em edificações. Neste trabalho utiliza-se a ACV e, em face da complexidade das atividades construtivas e da carência de pesquisas completas a respeito de ACV em edificações, fez-se um recorte do processo para as análises energéticas, adotando-se a ACVE, e para as análises econômicas, utilizando-se a ACCV. O processo da ACV foi realizado através dos trabalhos científicos apresentados na revisão bibliográfica. Optou-se por um ciclo de vida de 50 anos, pois em ciclos de vida maiores a EI e, principalmente, o custo operacional possuem menor impacto ou impacto inexistente na edificação. Para reduzir o tempo no estudo do ciclo de vida, houve a delimitação do processo aos materiais, sistemas construtivos e de ar condicionado utilizados nas estratégias bioclimáticas, como realizado em outros estudos.



### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo é descrito o método empregado para a realização do estudo de desempenho térmico de edificações residenciais. A metodologia do presente trabalho fundamentou-se em revisão bibliográfica referente ao tema. A Figura 7 apresenta um resumo da pesquisa.

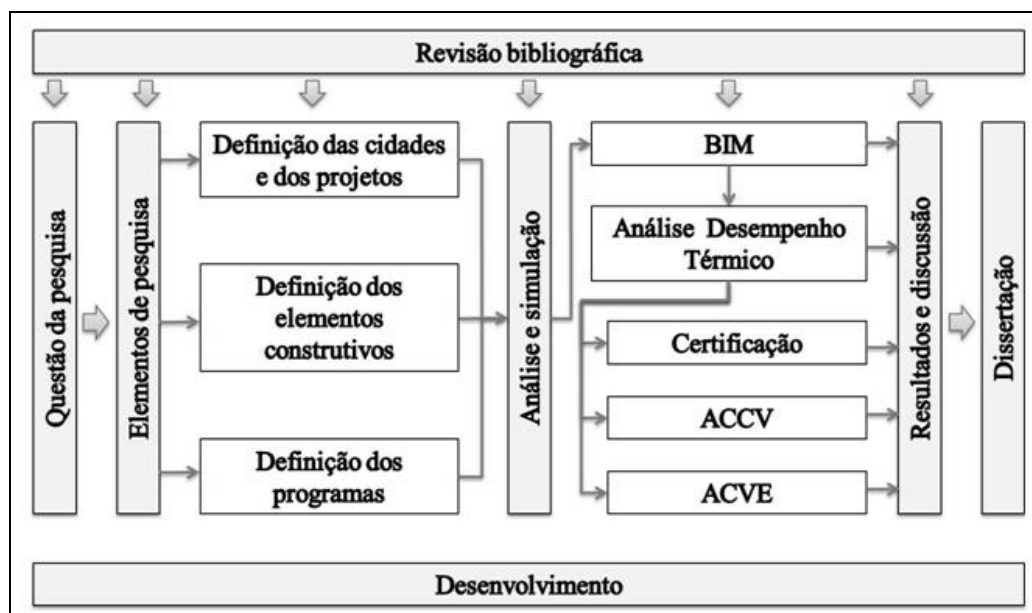


Figura 7 – Síntese da pesquisa

Em síntese, a pesquisa foi desenvolvida a partir de simulação em projetos residenciais unifamiliares e multifamiliares de classe média e baixa, em dois climas distintos:

(i) foram examinadas as técnicas e ferramentas de projeto disponíveis, com a utilização integrada de pacotes BIM e *softwares* de simulação; para modelagem BIM, foi utilizado o Revit/Autodesk em conjunção com o *EnergyPlus*;

(ii) foram examinadas as soluções mais adequadas para dois climas distintos, adotando-se parâmetros climáticos de Porto Alegre e Bento Gonçalves – representando as regiões da Região Metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha – verificando os critérios de projeto adotados e a sua aderência aos critérios da NBR15575;

(iii) para a identificação do consumo energético e como parâmetro de sustentabilidade foram aplicadas as metodologias de avaliação de eficiência energética do RTQ-R – Selo Procel: Edifica Residencial e ACV, identificando os custos e energia

incorporada no ciclo de vida de projetos baseados em conforto ambiental passivo (natural) e ativo (artificial);

(iv) foram identificadas as dificuldades a serem enfrentadas pelos profissionais de projeto, através de observação e percepção dos participantes (autora e bolsistas).

### **3.1 FUNDAMENTO DO MÉTODO**

Para alcançar o objetivo proposto este estudo fundamenta-se no método científico de simulação computacional. De acordo com Banks et al. (2005) a simulação computacional é o processo de criação e experimentação de um sistema físico, possibilitando visualizar o comportamento, identificar problemas e melhorar o desempenho de um sistema. Ou seja, permite compreender o funcionamento de um sistema, o desenvolvimento de recursos e testar novos conceitos e/ou sistemas antes da implementação (PEGDEN et al., 1995; GAVIRA, 2003).

Desta forma, este método consiste no processo de experimentação, através de um modelo que replica o funcionamento de um sistema real (ou hipotético) e a condução de experimentos com a finalidade de determinar como ele responderá a mudança em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno, testando diferentes alternativas e propondo melhores decisões (HARREL et al., 2002).

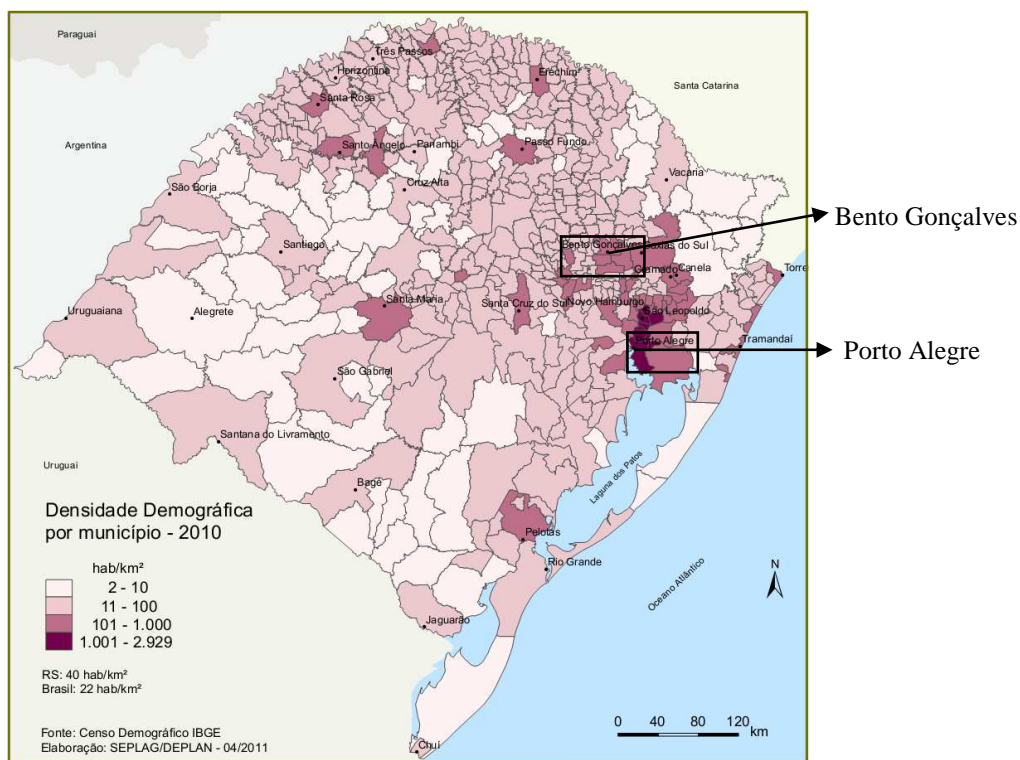
Conforme Bastos, Baum e Correia (2008) as ferramentas de simulação são utilizadas em sistemas complexos para auxiliar e aperfeiçoar as tomadas de decisões, utilizando os resultados como um apoio a decisão. Para Pidd (1998 apud CHWIF, 1999) algumas das vantagens da simulação computacional, comparada com a experimentação direta de um sistema, é a redução de custos e tempo envolvidos e de riscos, tanto materiais quanto humanos, não perturbando o sistema real.

### **3.2 APRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DA PESQUISA**

#### **3.2.1 Características dos municípios**

De forma a examinar as soluções mais adequadas para os dois climas distintos, foram adotados parâmetros dimensionais de Porto Alegre e Bento Gonçalves, cidades que representam climas típicos de duas regiões do estado do Rio Grande do Sul, com classificação do zoneamento bioclimático brasileiro diferentes. Bento Gonçalves está localizada na zona bioclimática ZB1, enquanto que Porto Alegre está localizada na ZB3.

Levou-se em consideração para a escolha das cidades de estudo, além dos climas distintos, a alta densidade demográfica da cidade e região onde se localizam (Figura 8), com um maior número de pessoas afetadas e maior presença de edificações residenciais horizontais e verticais.



**Figura 8 – Densidade demográfica por cidade e identificação dos locais da pesquisa**

Fonte: <http://www.scp.rs.gov.br/atlas/default.asp>

Embora no estado do Rio Grande do Sul exista uma unidade climática, pode-se dividir seu território em oito regiões climáticas, sendo elas: (i) campanha; (ii) serra do sudoeste; (iii) litoral norte e sul; (iv) depressão central; (v) vale do Uruguai baixo e alto; (vi) missões; (vii) planalto oeste e leste; e, (viii) serra do nordeste (SATTLE, 1991a).

A variação térmica acompanha a elevação solar, sendo os meses mais frios junho e julho onde, com a entrada de massas de ar frio, ocorrem súbitas quedas de temperatura. As ondas de calor ocorrem nos meses de verão e início de outono, onde meses mais quentes são janeiro e fevereiro (POUEY, 2011).

Entre maio e agosto ocorrem elevações de temperatura. Os meses mais secos são novembro, dezembro e fevereiro e os mais chuvosos maio e setembro. Já os ventos têm origem no quadrante leste, sendo benéficos principalmente para o clima no verão. A umidade relativa do ar média anual é alta, variando entre 75 e 87%, sendo mais altas nos meses de inverno e mais baixas nos meses de verão (SATTLE, 1991a).

### 3.2.1.1 Bento Gonçalves

Bento Gonçalves está localizada na região da Serra Gaúcha, no Nordeste Rio Grandense, a 109 km da capital do estado, Porto Alegre. Esta região compreende 31 municípios, com uma população de 862.305 habitantes (8,06% da população do estado) e densidade demográfica de 124,1 hab./km<sup>2</sup> (FEE, 2011).

O município de Bento Gonçalves possui área de 382.51 km<sup>2</sup>, com população de aproximadamente 107.341 habitantes, sendo que 92,4% destes ocupam a área urbana da cidade. Com densidade de 280.62 hab./km<sup>2</sup>, é o 18º maior município do estado (IBGE, 2010). Sua principal atividade econômica está centrada na indústria, sendo os principais setores o moveleiro e o vinícola.

Bento Gonçalves possui relevo bastante acidentado, caracterizado por escarpas e vales profundos, com altitude média de 691 m. Sua classificação climática é subtropical úmido, tipo Cfa pela classificação climática de Köppen-Geiger (clima temperado úmido com verão quente), com precipitação pluviométrica média anual de 1.500mm, com temperaturas médias entre 26°C e 7°C, ao longo do ano (RIO GRANDE DO SUL, 2011).

Na Figura 9 apresenta-se a carta bioclimática da cidade de Bento Gonçalves, gerada a partir do programa *Analysis Bio*<sup>1</sup> e com arquivo climático horário da cidade (TRY), elaborados pelo Prof. Maurício Roriz, a partir de dados horários, registrados em estação climatológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010 (Roriz, 2011).

Extraíndo da carta os percentuais de cada zona, constata-se que em 34% das horas haverá conforto e em 66% das horas haverá desconforto térmico, sendo causados pelo frio em 59,5% do tempo e pelo calor, em 6,5%. Percebe-se a variação climática que ocorre ao longo do ano, indicando maior necessidade de aquecimento da edificação.

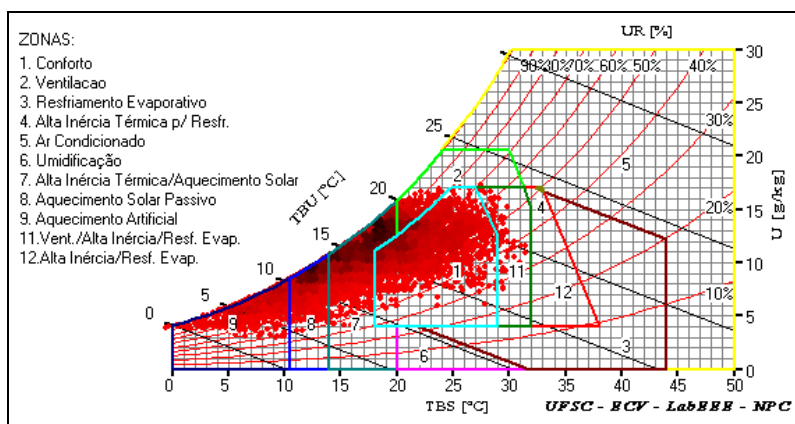
As principais estratégias a serem adotadas para proporcionar o conforto térmico indicadas pela carta bioclimática são: (i) alta inércia térmica com 34,6% das horas; (ii) sombreamento, 33,8%; (iii) aquecimento solar passivo, 15,2%; (iv) ventilação cruzada, 4,85%, e; (v) aquecimento artificial, em 9,7% das horas.

Portanto, no verão a utilização de ventilação e de sombreamento das fachadas oferece resposta satisfatória de melhora do desempenho térmico da edificação. No inverno, o conforto deve ser resolvido com o emprego de ferramentas bioclimáticas e utilização de sistemas construtivos adequados, com alta inércia térmica, para soluções passivas de conforto.

---

<sup>1</sup> Desenvolvido pelo LabEEE/UFSC.

No entanto, ainda há necessidade de uso de recursos artificiais ou mecânicos para a manutenção do conforto térmico, devido às temperaturas extremas desta época do ano.



**Figura 9 – Carta bioclimática – Bento Gonçalves**

### 3.2.1.2 Porto Alegre

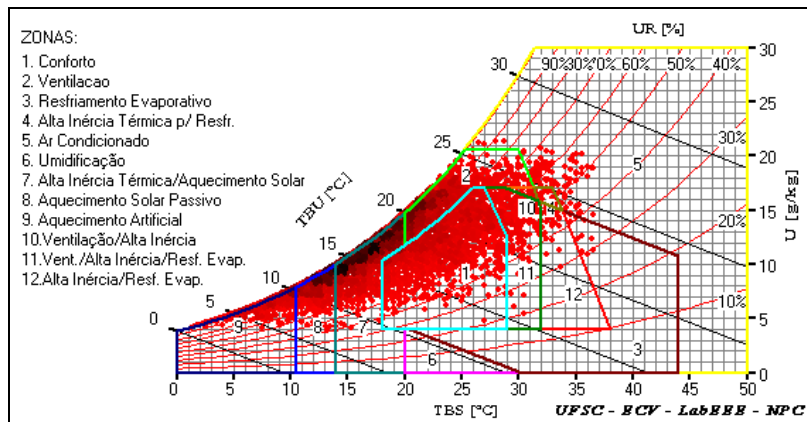
A região metropolitana de Porto Alegre compreende 98 municípios agrupados em seis microrregiões, com densidade demográfica de 480,62 hab./km<sup>2</sup> (FEE, 2011), totalizando 37% da população do Rio Grande do Sul. O município de Porto Alegre possui área de 496,827 km<sup>2</sup>, com população de 1.413.094 habitantes, com uma densidade de 2.844,237 hab./km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). Sua atividade econômica está centrada em comércio e serviços.

O relevo de Porto Alegre se destaca pelos morros com até 311 m de altitude, embora a altitude média da cidade seja de 14 m acima do nível do mar. Sua classificação climática é subtropical úmido, tipo Cfa (clima temperado úmido com verão quente), de grande variabilidade térmica. A precipitação pluviométrica média anual está em torno de 1.300mm, umidade relativa do ar de 76% e temperaturas médias anuais entre 31°C e 9°C (RIO GRANDE DO SUL, 2011).

Apresenta-se na Figura 10 a carta bioclimática da cidade. Percebe-se que em 22,4% das horas haverá conforto e em 77,6% das horas haverá desconforto térmico, estes causados pelo frio em 51,6% do tempo e pelo calor, em 26%. Verifica-se, desta forma, que o clima é mais confortável no verão, mas que há necessidade de melhora do desempenho térmico da edificação tanto para os períodos frios quanto para os períodos quentes do ano.

Ainda de acordo com a carta bioclimática da cidade de Porto Alegre, as principais estratégias a serem adotadas para proporcionar o conforto térmico são: (i) sombreamento com 45,3% das horas; (ii) alta inércia térmica, 33,8%; (iii) ventilação cruzada, 23,33%; (iv)

aquecimento solar passivo, 11,8%, e; (v) aquecimento e resfriamento artificial, em 6,07% e 1,35% das horas, respectivamente.



**Figura 10 – Carta bioclimática – Porto Alegre**

Desta forma, em boa parte do verão as brisas naturais da região e a utilização de sombreamento das fachadas oferecem resposta satisfatória de melhora do desempenho térmico da edificação. Já para o inverno, o conforto térmico é, da mesma forma, relativamente fácil de resolver com a utilização de ferramentas bioclimáticas e sistemas construtivos adequados. Entretanto em ambos os casos, há necessidade uso de recursos artificiais ou mecânicos para a manutenção do conforto térmico.

### 3.2.2 Descrição dos projetos e das condições de ocupação

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram identificados exemplos de tipologias construtivas típicas, em termos arquitetônicos e construtivos, para edificações residenciais de classe média e baixa. Baseados na realidade construtiva das regiões estudadas, os modelos utilizados são de natureza empírica e são apresentados nos próximos itens.

#### 3.2.2.1 Consumo de energia elétrica

A partir dos dados fornecidos pelo IBGE (2010) e Eletrobrás/Procel (2011) obtiveram-se informações sobre as habitações residenciais do Sul do Brasil, como, por exemplo, número de domicílios, de habitantes, de cômodos, posse de aparelhos eletrodomésticos e informações sobre o consumo de energia elétrica. A Tabela 8 apresenta alguns dos dados sobre o consumo médio de eletricidade por faixas de renda.

**Tabela 8 – Consumo de eletricidade das edificações residenciais brasileiras.**

<b>Renda familiar</b>	<b>Consumo eletricidade (kWh/mês)</b>
Até 3 S.M.	150
De 3 a 5 S.M.	150 a 200
De 5 a 10 S.M.	200 a 300
De 10 a 20 S.M.	300 a 500
Acima de 20 S.M.	Mais de 500
Consumo médio no Brasil	153,9

Fonte: SINPHA (2005)

De acordo com a Síntese de Indicadores Sociais - SIS (IBGE, 2010), a tipologia de edificação residencial predominante no estado do Rio Grande do Sul é a residência horizontal, com 84,3% do total de domicílios particulares. Neste estudo foram também considerados modelos de edificações multifamiliares verticais, pois, embora representem apenas 15,7% das edificações residenciais, observa-se um crescimento gradual desta tipologia, principalmente nas cidades mais urbanizadas.

Através de saturações de equipamentos e serviços em domicílios particulares permanentes e índices de posses apresentados pelo IBGE e pelo Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos (SINPHA), Tavares (2006) definiu, a partir das faixas de consumo de energia elétrica, um perfil de equipamentos eletrodomésticos instalados nas moradias, para três grupos complementares de cada faixa de renda, apresentados na Tabela 9. O calor gerado por esses equipamentos foi considerado na análise térmica da edificação. Entretanto, apenas o consumo de energia elétrica do ar condicionado foi contabilizado na análise do ciclo de vida energético e na análise do custo no ciclo de vida.

**Tabela 9 – Perfil de posse dos equipamentos.**

<b>Equipamentos Consumo</b>				
<b>até 150 kWh/mês</b>				
Televisor	Ferro elétrico	Refrigerador	Liquidificador	Rádio elétrico
Aparelho de som	Ventilador	Chuveiro elétrico		
<b>até 250 kWh/mês</b>				
Televisor	Ferro elétrico	Refrigerador	Liquidificador	Ventilador
Chuveiro elétrico	Rádio elétrico	Aparelho de som	Lava roupas	Videocassete
Aspirador de pó	Batedeira	Forno micro-ondas	Cafeteira elétrica	Secador de roupa
<b>mais de 250 kWh/mês</b>				
Televisor	Ferro elétrico	Refrigerador	Liquidificador	Ventilador
Chuveiro elétrico	Rádio elétrico	Aparelho de som	Lava roupas	Videocassete
Aspirador de pó	Batedeira	Forno micro-ondas	Cafeteira elétrica	Secador de roupa
Forno elétrico	Torneira elétrica	Impressora	Videogame	Condicionador de ar
Lava louças	Microcomputador			

Fonte: adaptado de Tavares (2006)

Apesar do ar condicionado não estar na lista dos equipamentos utilizados pela faixa de renda familiar de até 5 salários mínimos, torna-se cada vez mais comuns solicitações feitas a Caixa Federal para a instalação de aparelhos de ar condicionado em HIS (habitações

de interesse social) (Figura 11), indicando que estas edificações estão sendo concebidas sem considerar as características climáticas locais e procedimentos de avaliação de conforto ambiental. Resta ao usuário a solução dos problemas decorrentes, aumentando o consumo de energia elétrica, com impacto econômico significativo, tendo em vista o nível de renda dos moradores (MATTEIS E ALMEIDA, 2009).



**Figura 11 – Exemplos de apartamentos com ar condicionado em HIS – São Leopoldo**

### 3.2.2.2 Apresentação dos projetos

#### a. Projetos

A Edificação 1 é um empreendimento vertical de HIS. Possui blocos de cinco pavimentos, com quatro unidades de três dormitórios por pavimento, cada um com área de 55,00m<sup>2</sup> e pé-direito de 2,50m. A Edificação 2 é um empreendimento horizontal de HIS, composto por casas geminadas, com dois dormitórios, área de 34,07m<sup>2</sup> e pé-direito de 2,50m.

Já a Edificação 3 é um empreendimento vertical de classe média. Possui 10 pavimentos, com quatro unidades de três dormitórios por pavimento, com área de 64,31m<sup>2</sup> e pé-direito de 2,70m. Por fim, a Edificação 4 é um empreendimento horizontal de classe média, composto por sobrados geminados de três dormitórios, área de 79,89m<sup>2</sup> e pé-direito de 2,80m. Na Figura A.1 (localizada no Apêndice A) as fachadas e plantas baixas de cada um dos projetos estudados são apresentadas.

#### b. Ocupação

Na Figura B.1 (localizada no Apêndice B) apresentam-se os padrões de ocupação para as edificações. Nas Edificações 1, 3 e 4 o padrão de ocupação é de cinco habitantes por unidade e na Edificação 2, de quatro habitantes por unidade. Os quartos são ocupados por, no máximo, duas pessoas, cozinha e sala são utilizadas por toda família e a ocupação máxima do banheiro é uma pessoa.



As atividades desenvolvidas pelos habitantes foram baseadas na ISO 7730 (2005), definindo-se: 45 W/m<sup>2</sup> de pele para os dormitórios; 60 W/m<sup>2</sup> para a sala; e 95 W/m<sup>2</sup> para a cozinha. O consumo de energia elétrica para as edificações de classe média foi estimado em 300kWh/mês e para as HIS em 200 kWh/mês. A orientação solar dos modelos foi definida a partir da preferência pela fachada principal ser a norte.

### c. Equipamentos

O perfil de equipamentos utilizados nas HIS são da faixa de consumo de até 150kWh e para as habitações de classe média, de 250kWh, ambos apresentados na Tabela 9. Foram consideradas lâmpadas compactas fluorescentes, por possuírem vida útil maior e menor consumo de energia elétrica. A potência total em iluminação de cada cômodo é apresentada na Tabela 10. No Apêndice B, Tabela 1 apresenta-se o padrão de iluminação utilizado de cada ambiente nos dias de semana e nos fins de semana, baseado na RTQ-R.

**Tabela 10 – Potência total em iluminação instalada**

Modelo	Sala	Circ.	Cozinha	Banho	Lavand	Dorm 1	Dorm 2	Dorm 3	Total
Edif. 1	20	--	8	8	--	11	11	11	69
Edif. 2	20	--	8	8	--	11	11	--	58
Edif. 3	40	20	20	8	8	11	11	11	145
Edif. 4	20	20	20	8	8	11	11	--	117

Obs.: valores em W

### d. Condicionamento de ar

As simulações são realizadas com ventilação natural para análise de conforto térmico e com sistema de condicionamento de ar para as análises de eficiência energética. O sistema de condicionamento de ar foi baseado na RTQ-R. Para a modelagem do sistema de condicionamento de ar considerou-se a temperatura do termostato em 22°C para aquecimento e, para refrigeração, em 24°C, o ventilador em sistema contínuo com 0,7 de eficiência e a eficiência do motor de 0,9. A taxa de fluxo de ar por pessoa foi de 0,00944 m<sup>3</sup>/s, e a relação entre energia consumida pelo aparelho e o calor retirado do ambiente de 3,0 W/W, para o calor fornecido ao ambiente 2,75 W/W. O número máximo de horas do ano não atendidas pelo sistema foi de 10%. Por fim, a capacidade destes sistemas foi dimensionada automaticamente pelo programa e as esquadrias foram mantidas fechadas enquanto o sistema de ar condicionado estava ligado.

### e. Sistema construtivo base

O sistema construtivo base das edificações é apresentado na Tabela 11. O revestimento externo é de chapisco, emboço e pintura com tinta acrílica cor clara, com espessura de 2,0 cm. O revestimento interno varia conforme o tipo de edificação, nas HIS o

revestimento é de gesso de 0,2cm de espessura, enquanto que nas edificações de classe média o revestimento é de argamassa de 2,5cm de espessura.

A estrutura da cobertura é de madeira e cobertura de telha de fibrocimento de 7 mm. O forro também varia conforme o tipo de edificação, para as edificações horizontais é de PVC, já para as edificações verticais, de concreto de 3cm. Os pisos e lajes internas mantêm-se constante, independente do tipo de edificação ou de forro da cobertura.

**Tabela 11 – Propriedades base dos envelopes**

Sistema construtivo			Propriedades		
Identificação	Descrição		U [W/m <sup>2</sup> K]	$\alpha$	$\phi$ [h]
Edif. 1 e 3	C01 F01	1º camada: Telha de fibrocimento pintada (e: 7mm); 2º camada: Câmara de ar ( $\geq 5,0$ cm); 3º camada: Forro de concreto (e: 3,0cm)	2,25	0,2	2,6
Edif. 2 e 4	C01 F04	1º camada: Telha de fibrocimento pintada (e: 7mm); 2º camada: Câmara de ar ( $\geq 5,0$ cm); 3º camada: Laje PVC	1,76	0,2	1,3
Edif. 1 e 2	P1 <sub>h</sub>	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos, 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	2,37	0,2	4,2
Edif. 3 e 4	P1 <sub>c</sub>	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos, 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	2,20	0,2	4,5
Edif. 1 e 2	P0 <sub>h</sub>	1º camada: pintura, 2º camada: gesso (e: 0,2cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos, 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	2,48	0,2	3,3
Edif. 3 e 4	P0 <sub>c</sub>	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos, 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	2,32	0,2	3,5
	Laje int.	1º camada: piso cerâmico (e: 1,0cm), 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: laje mista (e: 12cm), 4º camada: argamassa, 5º camada: pintura	2,58	0,7	-

Fonte: ABNT (2005d); Morishita et al. (2011).

#### f. Esquadrias

As Edificações 1 e 2 possuem portas externas de alumínio, portas internas de madeira e janelas de correr de duas folhas ou basculante de alumínio, de tamanhos variados, com vidro translúcido 3 mm. As Edificações 3 e 4 possuem esquadrias externas de PVC e internas de madeira, com tamanhos variados e vidro translúcido de 3 mm. Para as simulações com ventilação natural definiu-se três fatores de abertura para a modelagem das janelas: zero para janela fechada; 0,5 para a abertura de 50% da janela; e, 1 para a abertura completa da janela. As portas terão dois fatores de abertura, zero e 1.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005d) recomenda que, para as zonas de permanência prolongada, ocorra a incidência de sol dentro do ambiente nos períodos frios. Assim, para a proteção dos vãos foi utilizado um sistema de sombreamento tipo veneziana externa móvel, de alumínio, cor branca, com fechamento automático quando a temperatura externa atinge

29°C. Permitindo, assim, que permaneça aberto durante os períodos frios, quando há a necessidade de radiação solar interna.

#### g. Temperatura de solo

Para a definição da temperatura de solo de cada uma das cidades estudadas (Bento Gonçalves e Porto Alegre) utilizou-se o programa Slab, *software* auxiliar do *EnergyPlus*. Este programa calcula as temperaturas médias do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios de temperaturas externas e internas da edificação. Na Tabela 12 apresentam-se os valores de temperatura do solo calculados pelo programa para a Edificação 2, nos dois climas estudados.

**Tabela 12 – Temperatura de solo**

Clima	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
BG	21,53	21,50	21,51	21,16	20,65	20,11	20,34	20,25	20,19	20,54	20,93	21,27
PA	22,02	22,00	21,97	21,57	20,90	20,62	20,63	20,38	20,45	20,99	21,27	21,75

Obs.: valores em °C

### 3.3 APRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTUDADOS

Com o emprego do *EnergyPlus* para as simulações, houve a necessidade de especificação dos elementos e materiais que compõem os sistemas construtivos utilizados nos modelos. Dados como dimensões, espessuras e propriedades termofísicas são necessários já que representam a base da simulação. Devido ao caráter regional dos programas de simulação, estes reproduzem as características de seu país de origem dificultando sua utilização, já que adotam variáveis automaticamente. Portanto, optou-se por adotar o relatório interno desenvolvido pelo LabEEE para a definição destas propriedades, já que este relatório adapta os dados à realidade brasileira (ORDENES, 2003). Apresenta-se na Tabela 13 as propriedades termofísicas dos materiais adotados para paredes, coberturas, pisos e forros.

Neste estudo são focados materiais e técnicas construtivas que permitam sua utilização em climas compostos, ou seja, com períodos quentes e frios, associando as soluções para vários climas. Pois, como o estado do Rio Grande do Sul possui as quatro estações bem definidas, conforme Cunha et al. (2006), há a necessidade de adoção de, pelo menos, dois tipos de estratégia de projeto.

Dentre as estratégias bioclimáticas estudadas (Seção 2.2.3) e através das recomendações das normas NBR 15220-3 (ABNT, 2005d), NBR 15575-4 (ABNT, 2010b) e NBR 15575-5 (ABNT, 2010c), foram identificados alguns materiais e sistemas construtivos utilizados nas simulações térmicas. As alternativas adotadas consistem em alteração da

transmitância e absorvância térmica da edificação (paredes, cobertura e cor), área de vãos envidraçados e do tipo de vidro. Os valores definidos para cada parâmetro são especificados a seguir.

**Tabela 13 – Propriedades termofísicas dos materiais – Paredes, coberturas, forros e pisos**

Material construtivo	Propriedades térmicas				
	e (cm)	$\lambda$ [W/m.K]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	c [kJ/kg.K]	R [(m <sup>2</sup> .K) / W]
Câmara de ar (2-5cm)	-	-	-	-	0,160
Argamassa de Emboço (2,5 cm)	2,50	1,15	2000	1,000	0,022
Gesso (2mm)*	0,20	0,35	750	0,840	-
Concreto maciço (10 cm)	10,0	1,75	2400	1,000	0,029
Tijolo cerâm. 6f circ. (10 cm)	3,00	0,90	840	0,920	0,033
Tijolo cerâm. 6f circ. (15 cm)	6,60	0,90	840	0,920	0,073
Tijolo cerâmico 6f circular duplo (10cm)	12,8	0,90	628	0,920	0,142
Tijolo cerâm. 8f circ. (20 cm)	11,1	0,90	646	0,920	0,123
Bloco cerâm. 2f quadr. (14 cm)	1,50	0,90	3732	0,920	0,017
Bloco cerâm. 6f quadr. (9 cm)	1,40	0,90	2290	0,920	0,016
Bloco cerâm. 6f quadr. (14 cm)	5,50	0,90	909	0,920	0,061
Bloco cerâm. 8f quadr. (19 cm)	8,20	0,90	868	0,920	0,091
Tijolo cerâmico maciço (10 cm)	9,60	0,90	1764	0,920	0,106
Tijolo cerâmico maciço duplo (10 cm)	19,8	0,90	1812	0,920	0,220
Tijolo cerâmico maciço (22 cm)	20,7	0,90	1812	0,920	0,230
Câmara de ar - alta emissividade (> 5 cm)	-	-	-	-	0,210
Câmara de ar - baixa emissividade (> 5 cm)	-	-	-	-	0,610
EPS (3,0 cm)**	3,00	0,035	40	1,420	0,86
Lã de vidro (2,5 cm)	2,50	0,05	50	0,700	0,556
Telha fibrocimento	0,70	0,95	1900	0,840	0,007
Forro de PVC*	1,00	0,2	1300	0,960	-
Forro concreto (3 cm)	3,00	1,75	2200	1,000	0,017
Laje de concreto (10 cm)	10,0	1,75	2200	1,000	0,114
Laje mista (12 cm)	9,50	1,05	1087	0,920	0,090
Piso cerâmico	1,00	0,90	1600	0,920	0,011
Solo (45,7 cm)	45,7	0,87	1361	0,8373	0,528
Argamassa de reboco (2,5 cm)	2,50	1,15	2000	1,000	0,022
Radier concreto (10 cm)	10,0	1,75	2400	1,000	0,057
Laje mista (12 cm)	9,50	1,05	1087	0,920	0,090

Fonte: Adaptado de Ordenes (2003); exceto: (\*) MORISHITA et al. (2011); (\*\*) AIPEX (2012).

### 3.3.1 Cobertura

Apesar de estarem localizadas em zoneamentos bioclimáticos diferentes (ZB-1 e ZB-3), a estratégia bioclimática recomendada pela norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005d) para a cobertura é a mesma: cobertura leve e isolada, ou seja, com transmitância térmica igual ou menor que 2,00 W/m<sup>2</sup>. K, atraso térmico igual ou menor que 3,3 horas e fator solar menor ou igual a 6,5%.

Já a NBR 15575-5 (ABNT, 2010c) especifica para a ZB-1 uma transmitância térmica igual ou menor que 2,30 W/m<sup>2</sup>.K. Para a ZB-3, nas coberturas com absorvância menor ou igual que 0,6 a transmitância térmica deve ser menor ou igual a 2,30 W/m<sup>2</sup>.K e para as

coberturas com absorvância maior que 0,6, recomenda transmitância térmica menor ou igual a  $1,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Foram, ainda, consideradas alternativas que não atendem as recomendações das normas, a fim de gerar dados para comparações dos resultados das simulações. Desta forma, definiram-se doze composições para a variação da cobertura (Apêndice C, Tabela 1) e para a absorvância da cobertura os valores de 0,2 (cor clara), 0,4 (cor média clara), 0,6 (cor média escura) 0,8 (cor escura) foram utilizados.

### **3.3.2 Paredes externas**

Segundo NBR 15220, para a ZB-1 as paredes devem ser leves, assim, devem ter transmitância térmica igual ou menor que  $3,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , atraso térmico igual ou menor que 4,3 horas e fator solar menor ou igual que 5,0%. Já para a ZB-3 as paredes devem ser leves e refletoras, com transmitância térmica igual ou menor que  $3,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , atraso térmico igual ou menor que 4,3 horas e fator solar menor ou igual que 4,0% (ABNT, 2005d).

A NBR 15575-4 (ABNT, 2010b) especifica que as paredes das edificações na ZB-1 devem ter transmitância térmica menor ou igual a  $2,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Enquanto que, para a ZB-3, as paredes devem apresentar, para absorvância solar igual ou menor que 0,6, transmitância térmica menor ou igual a  $3,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e capacidade térmica maior ou igual a  $130 \text{ KJ/m}^2\cdot\text{K}$ . Para absorvância maior que 0,6, a transmitância térmica deve ser menor ou igual a  $2,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e capacidade térmica maior ou igual a  $130 \text{ KJ/m}^2\cdot\text{K}$ .

Da mesma forma que nas Coberturas, também se considerou alternativas que não atendam as recomendações da norma. Assim, para as paredes foram definidas 15 composições, apresentadas no Apêndice C, Tabela 2. Para a absorvância da cobertura os valores de 0,2 (cor clara), 0,4 (cor média clara), 0,6 (cor média escura), 0,8 (cor escura), foram utilizados. As paredes internas com absorvância solar de 0,2 foram mantidas constantes. Para as edificações de HIS (Edificações 1 e 2), o revestimento interno das paredes é em gesso com 0,2 cm de espessura; já nas edificações de classe média (Edificações 3 e 4), o revestimento é de argamassa com 2,5 cm de espessura.

### **3.3.3 Esquadrias**

Para os vãos de esquadrias utilizou-se, além das recomendações das normas NBR 15220-3 (ABNT, 2005d) e NBR15575-1 (ABNT, 2010a), as exigências mínimas do Código de Obras de Bento Gonçalves e Porto Alegre para áreas de iluminação e ventilação. A NBR

15220 recomenda que, para as zonas bioclimáticas ZB-1 e ZB-3, a área de janelas nas edificações devem ter entre 15 e 25%, para efeito de ventilação. A NBR 15575-4 (ABNT, 2010b) recomenda que para as ZB-1 a ZB6 o percentual de abertura para ventilação em relação à área de piso seja maior que 8%.

O Código de Obras de Porto Alegre exige que em áreas de dormitórios a relação entre Aenv/Apav seja de 1/5; em áreas de permanência prolongada diurna, 1/7; enquanto que, tratando-se de compartimentos de ocupação transitória, 1/12. Já o Código de Obras de Bento Gonçalves não faz exigências quanto ao tamanho de vãos de esquadrias.

Deste modo, foram simuladas duas diferentes áreas de janela, 20% e 25% da área de piso do ambiente simulado, além da área de projeto. Em todas as simulações as variações ocorreram apenas nos ambientes de permanência prolongada diurna e noturna, e foram iguais para os dois municípios. Para o tipo de vidro, optou-se por simular cinco diferentes tipos de vidro (Apêndice C, Tabela 3), os quais de acordo com estudos já apresentam melhora no conforto térmico do ambiente e permitem a passagem de luz visível (MACIEL, 2006; MIBRATZ, 2007).

### **3.4 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO**

#### **3.4.1 Programas computacionais**

Para a análise das técnicas e ferramentas de projeto integradas utilizou-se o pacote BIM. Sendo um repositório compartilhado de informações, em um único modelo há toda a representação virtual das características físicas e funcionais da edificação, permitindo o estudo de desempenho e de qualidade nas fases iniciais do projeto. Neste estudo foi utilizado o Revit/Autodesk, visto que possui migração de seus arquivos para diversos programas de simulação térmica. O estudo da viabilidade de utilização deste programa e o tempo de dedicação no estudo de desempenho térmico de soluções bioclimáticas e eficiência energética foi realizado através de observações e percepções dos participantes, sendo, neste estudo, as alunas bolsistas e pesquisadora.

Para a simulação térmica selecionou-se o *EnergyPlus* (versão 7.2), devido sua capacidade de estimar trocas térmicas e consumo energéticos de edificações, através da modelagem e de padrões de uso da mesma (ventilação, atividade, ocupação, iluminação, aquecimento e resfriamento etc.). Também por ser o programa de simulação térmica mais utilizado para estudos científicos, sendo amplamente utilizado no Brasil, podendo-se citar os

estudos do LabEEE/UFSC e de Pereira e Assis (2010), Pedrini (2003) e Ortiz et al. (2009), Pozza (2011), Pouey (2011), entre outros.

Para a modelagem das edificações foi utilizado o *plug-in OpenStudio* para o *Google SketchUp* 8, pois permite a visualização do projeto modelado e possui um conjunto de ferramentas que facilitam a modelagem. Para a modelagem das zonas térmicas (espaço ou grupo de espaço suficientemente similares) optou-se por unificar em uma única zona os espaços não estudados nesta pesquisa (cozinhas e banheiros), quando em espaços contíguos. Desta forma, os espaços de permanência prolongada foram modelado como uma zona cada.

O algoritmo de solução do *EnergyPlus* utilizado neste trabalho foi o CTF (*Conduction Transfer Function*), o qual considera apenas a troca de calor sensível, desconsiderando o armazenamento e difusão de umidade nos sistemas construtivos. Os dados avaliados foram a temperatura interna e consumo de energia elétrica. Ou seja, a variação da temperatura interior face as diferentes combinações de parâmetros construtivos para manter o conforto térmico e o consumo anual (somatório do consumo mensal) relacionado ao sistema HVAC (Apêndice D).

### **3.4.2 Parâmetros de modelagem e simulação**

A análise térmica foi orientada pelo método de simulação da norma de desempenho NBR 15575-1. Esta norma preconiza que, para a simulação computacional, a avaliação deve ser feita para um dia típico de projeto de inverno e de verão, nas unidades habitacionais representativas: para os conjuntos habitacionais de edificações térreas, a unidade com maior número de paredes expostas e, nas edificações verticais, a unidade do último pavimento. Todos os ambientes devem ser simulados, considerando as trocas térmicas entre os ambientes. Analisam-se apenas os ambientes de permanência prolongada, com taxa de renovação de ar de 1 ren/h e desconsiderando-se a ocupação.

A norma recomenda também que para a entrada de dados deve-se considerar que os recintos adjacentes apresentem a mesma condição térmica do ambiente a ser simulado. A orientação das unidades deve ser distinta para o verão e inverno, indicando as unidades com janelas dos ambientes de permanência prolongada voltadas para oeste e parede exposta para norte no verão e para o inverno, estes ambientes devem ser voltados para sul e leste (ABNT, 2010a).

Para este estudo, além do disposto pela NBR 15575-1 (ABNT 2010a), as unidades foram analisadas para o ano inteiro e simuladas com orientações das janelas oeste e norte, e

orientações sul e leste. Todos os ambientes foram simulados e se considerou as trocas térmicas entre eles e as ocupações, tanto de usuário quanto de equipamentos. Para análise de desempenho térmico as simulações foram realizadas com ventilação natural e, para a análise de eficiência energética, com sistema de condicionamento de ar nos ambientes de permanência prolongada.

Ferramenta para determinação das exigências higrotérmicas de verão e inverno, o dia típico de projeto é utilizado pela NBR 15575 para avaliar a edificação. Baseados no estudo de Goulart, Lamberts e Firmino (1998) o dia de projeto de verão e inverno para Porto Alegre foram quatro de fevereiro (04/02) e quatorze de julho (14/07), respectivamente. Bento Gonçalves não possui dados relativos aos dias de projeto, assim, utilizou-se os referentes à Curitiba por ser uma cidade localizada na mesma zona bioclimática, com clima semelhante ao de Bento Gonçalves e utilizada por outros estudos na região da Serra Gaúcha, quando na falta de dados sobre o clima local (Pouey, 2011 e Pozza, 2011). Deste modo, para a cidade de Bento Gonçalves foi estipulado os dias vinte e oito de janeiro (28/01) para o verão e vinte e três de julho (23/07) para o inverno.

### **3.5 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Para a análise dos resultados obtidos pelas simulações foram utilizadas algumas metodologias amplamente utilizadas em estudos científicos. Para a análise do desempenho térmico foram utilizadas a norma NBR 15575 e o método graus-hora. Para as análises econômicas e ambientais foram utilizadas a análise de custo no ciclo de vida e análise do ciclo de vida energético. Nos itens seguintes são discutidas cada uma das análises.

#### **3.5.1 Análise de desempenho térmico**

##### **3.5.1.1 Norma NBR 15575**

Para a classificação do desempenho térmico das edificações estudadas utilizou-se a norma de desempenho - NBR 15575-1 (ABNT, 2010a). Esta norma especifica que sua aplicação destina-se à ambientes de permanência prolongada (não ocupada) e valores máximos e mínimos de temperatura interna para o verão e inverno. No verão o valor máximo diário da temperatura do ar interno, nos ambientes de permanência prolongada sem presença de fontes internas de calor, deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário de temperatura do ar externo. Para o inverno os valores mínimos diários da temperatura do ar interno, nos ambientes de permanência prolongada, devem ser sempre maiores que o estabelecido (Tabela 14) (ABNT, 2010 a).



**Tabela 14 – Critério de avaliação de desempenho térmico para ZB 1 e ZB 3**

Nível de desempenho	Verão	Inverno
M	$T_{i,Max} \leq T_{e,Max}$	$T_{i,Mín} \geq T_{e,Mín} + 3^{\circ}C$
I	$T_{i,Max} \leq (T_{e,Max} - 2^{\circ}C)$	$T_{i,Mín} \leq (T_{e,Mín} + 5^{\circ}C)$
S	$T_{i,Max} \leq (T_{e,Max} - 4^{\circ}C)$	$T_{i,Mín} \leq (T_{e,Mín} + 7^{\circ}C)$

$T_{i,Max}$  é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus centígrados;  
 $T_{e,Max}$  é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus centígrados;  
 $T_{e,Mín}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus centígrados;  
 $T_{i,Mín}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus centígrados;  
Zonas bioclimáticas de acordo com a norma NBR 15220 – Parte 3.

Fonte: adaptado de ABNT (2010 a)

Os valores da temperatura interna resultante das simulações são comparados com a temperatura externa. A diferença entre eles é comparada com os valores máximos para o verão e mínimos para o inverno.

Cabe ressaltar que embora a nova revisão da norma NBR 15575 tenha sido elaborada e entrado em vigor em fevereiro de 2013, este estudo foi elaborado entre jan./2010 a jan./2013. Assim sendo, este trabalho não apresenta as alterações dos conceitos revisados.

### 3.5.1.2 Graus-hora

De forma complementar à classificação da NBR 15575-1 (ABNT, 2010a), realizou-se uma avaliação dos dados através do método graus-hora, em unidades de permanência prolongada com a presença dos habitantes. Desta forma, o método graus-hora é utilizado para avaliar o desempenho da edificação e o conforto térmico, neste trabalho, refere-se a uma condição média para atender a maior quantidade de pessoas expostas a esta condição.

Esta metodologia é definida como a somatória da diferença de temperatura do ar que ultrapassa uma temperatura base estipulada (Equação (10)) (MACHADO, 2010). Através do total de graus-hora pode-se definir a quantidade de horas que o ambiente esteve fora da faixa de conforto. Para este estudo, a temperatura base foi definida através da zona de conforto de Givoni (1992) para países em desenvolvimento, com temperaturas variando entre 18°C e 29°C.

$$GH = \sum (T_b - T_h) \quad (10)$$

Onde: GH: índice de graus-hora;  $T_b$ : temperatura base, e;  $T_h$ : temperatura horária.

### 3.5.1.3 Etiqueta Selo Procel

Como um parâmetro de eficiência energética foi aplicado, neste estudo, o método de avaliação de eficiência energética do RTQ-R (apresentado no item 2.3.2.3) (BRASIL,

2010b). Visto que a etiqueta pode ser uma ferramenta adequada para consolidar, em longo prazo, o uso eficiente de energia no Brasil e, de forma gradativa, passará a ser obrigatória. A metodologia utilizada foi de simulação, comparando-se o desempenho da edificação com os valores de referência das tabelas de classificação dos níveis de eficiência energética dos componentes da edificação.

Conforme Brasil (2010d), para o cálculo do nível de eficiência da envoltória determina-se os equivalentes numéricos, obtidos na simulação, para aquecimento (consumo energético) e resfriamento (graus-hora de conforto) dos ambientes de permanência prolongada com ocupação. As demais variáveis da certificação não foram calculadas, em vista de este trabalho avaliar somente a envoltória da edificação. Desta forma, não se chega a uma pontuação total do nível de eficiência energética das edificações.

### **3.5.2 Análise do ciclo de vida**

#### **3.5.2.1 Análise do ciclo de vida energético**

Foi realizada a análise do ciclo de vida energético (ACVE) para mensurar o impacto das alternativas na energia incorporada da edificação. A ACVE delimita-se ao estudo dos materiais e sistemas construtivos utilizados nas estratégias bioclimáticas e de condicionamento de ar ativo. Como a finalidade foi comparar os impactos ambientais de cada uma das alternativas e sendo os projetos empíricos (sem a totalidade de dados de um projeto real) não se obtém, neste trabalho, o total geral de EI de cada projeto. Entretanto, em vista a obter um valor de EI o mais próximo da realidade, estimou-se, através do CUB, um valor de EI por metro quadrado (Apêndice E). Dessa maneira, pôde-se obter um valor total estimado de EI para cada um dos tipos arquitetônicos estudados.

A metodologia utilizada foi baseada na tese de Tavares (2006) e no estudo de Lobo, Santos e Tavares (2010). O levantamento do inventário dos parâmetros da ACVE utilizados foi realizado por meio de uma planilha de serviços de edificações da construção civil, a qual contém as informações de quantitativos dos materiais utilizados, por ser esta um instrumento convencional da construção civil (TAVARES, 2006; LOBO, SANTOS e TAVARES, 2010).

Considerou-se a energia incorporada inicial nos materiais de construção e equipamentos de condicionamento ativo, a reposição dos materiais ao longo do ciclo de vida e respectivos custos energéticos de transportes. Os quantitativos de materiais utilizados em cada edificação foram extraídos diretamente dos modelos do Revit.

Para a energia operacional considerou-se a energia consumida nos equipamentos de condicionamento ativo e na energia incorporada de manutenção. Os valores de EI de cada material foram baseados nas pesquisas de Tavares (2006) e Lobo, Santos e Tavares (2010), apresentados no Anexo A. Já o tempo de vida útil das partes da edificação, relacionadas com as coberturas e fachadas foram baseados pela norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2010a), dispostas no Anexo B.

Através da relação entre a distância entre a produção do cada material e o canteiro de obras (mensurado através do *GoogleMaps*), carga completa de um caminhão e seu consumo médio de combustível (1 L de óleo diesel/3 km; 35GJ/m<sup>3</sup>) foi estimado a energia de transporte dos materiais (Apêndice F).

Utilizou-se um ciclo de vida de 50 anos, com unidade funcional de MJ/m<sup>2</sup>. Consideraram-se as fases inicial (pré-operacional) e operacional das edificações. A fase de desconstrução não foi calculada, pois, geralmente, é muito pequena quando comparada com o resto da energia do ciclo de vida, além da dificuldade em obter dados (FAY, TREOLAR E IYER-RANIGA, 2000). Para a conversão de materiais em massa para quilograma (kg) utilizou-se a tabela de densidades, disposta no Anexo A.

### 3.5.2.2 Análise dos custos no ciclo de vida

Esta análise foi realizada para identificar o impacto das alternativas no custo das edificações ao longo do ciclo de vida. As intervenções bioclimáticas reduzem o custo operacional da edificação, entretanto, geralmente aumentam o custo inicial de construção. Esta análise indica o tempo decorrido entre a realização do investimento inicial e o retorno deste investimento, calculado através da relação entre o acréscimo de custo para adoção de cada solução passiva e o fluxo de caixa anual da economia em energia com esta alternativa.

Para a ACCV utilizou-se um ciclo de vida de 50 anos, considerando as fases pré-operacional, operacional e pós-operacional. Limita-se ao custo dos sistemas e materiais construtivos dos projetos baseados em conforto ambiental passivo e ativo. Apenas um modelo de ar condicionado foi considerado nesta análise visando à simplificação das comparações. A fase de desconstrução da edificação foi estimada, através de estudos realizados dentro do PPGEC, em 10% do custo inicial.

O quantitativo necessário de material para as estratégias bioclimáticas foi extraído diretamente dos modelos do BIM. Os custos de serviços e materiais foram estimados através

do sistema de preços Sinapi (calculado pela Caixa Econômica Federal), para o estado do Rio Grande do Sul, com valores referentes ao mês de outubro de 2012.

O consumo de energia elétrica anual é a quantidade de energia necessária para a manutenção da temperatura estipulada para o ar condicionado nos ambientes de permanência prolongada (dormitórios e salas), calculado pelo *EnergyPlus*. O custo anual em energia elétrica foi calculado com base no gasto em energia considerando a tarifa de R\$ 0,49 para as edificações residenciais. O CCV foi calculado pela Equação (11).

$$CCV = CP + CC + \sum [COP_t / (1 + k)^t] + \sum [CM_t / (1 + k)^t] \quad (11)$$

Onde: CP: o custo de projeto; CC: o custo de construção; COP: custo de operação, CM: custo de manutenção, k: taxa de desconto (taxa de juros); t: é o momento no tempo em que cada custo ocorre; n: é a vida útil do imóvel.

A economia calculada representa a diferença entre o gasto de energia elétrico do sistema base e o gasto do sistema alternativo. Com esta economia anual é calculado o período de retorno do investimento inicial.

## **4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo os resultados obtidos para as edificações estudadas são apresentados. Primeiramente, discutem-se os resultados das análises de desempenho térmico das edificações bases e alternativas propostas, após, as análises dos custos no ciclo de vida e ciclo de vida energético. Devido à extensa quantidade de dados apurados, delimitou-se a apresentação das análises no corpo de texto. Apenas as médias de uma unidade de cada edificação será analisada, os demais resultados estão expostos nos Apêndices G a I. Para a escolha das unidades, utilizou-se a norma de desempenho térmico NBR 15575, descrita no item 3.5.1.1.

### **4.1 DESEMPENHO TÉRMICO**

Os itens que seguem apresentam e discutem os resultados obtidos pelas análises de desempenho térmico realizadas para as edificações base e alternativas construtivas propostas. Inicialmente foram analisadas as edificações localizadas em Bento Gonçalves e, em seguida, as edificações no clima de Porto Alegre.

Para avaliar a sensibilidade do componente cobertura face ao clima de Bento Gonçalves e Porto Alegre em uma edificação residencial vertical (Edificação 1 e 3), as simulações da cobertura foram realizadas com 9 sistemas construtivos diferentes (apresentadas no Apêndice B, Tabela 1), ou seja, três tipos de forro e três tipos de isolamento térmico. Já a avaliação do componente cobertura em uma edificação residencial horizontal (Edificação 2 e 4), nos climas propostos, as simulações da cobertura foram realizadas com 12 sistemas construtivos diferentes: quatro tipos de forro e três tipos de isolamento térmico. Variou-se também o parâmetro de absorvância das coberturas. Foram mantidas constantes nesta fase de simulações as paredes internas e externas (P1), com absorvância de 0,2, esquadrias com vidro claro de 3 mm e pisos e lajes dos pavimentos intermediários.

A avaliação das paredes externas utilizou como alternativa ao sistema construtivo base das Edificações seis sistemas construtivos de paredes simples e dois sistemas de paredes duplas com três tipos de isolamento térmico (Apêndice B, Tabela 2). As absorvâncias simuladas foram as mesmas que na fase da cobertura. A cobertura que obteve o melhor resultado nas simulações foi mantida constante, além das paredes internas, vidros claros de 3 mm nas janelas, pisos e lajes dos pavimentos intermediários. Por fim, as simulações das esquadrias foram simuladas com três diferentes áreas de janelas e cinco tipos de vidros (Apêndice B, Tabela 3).

### 4.1.1 Edificação 1

#### 4.1.1.1 Bento Gonçalves

##### a. NBR 15575

Com a análise dos dados horários obtidos pelas simulações e com a adoção dos limites correspondentes à zona bioclimática ZB1 (Tabela 14), apresenta-se na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 o nível de desempenho da edificação com as diferentes coberturas, paredes externas, absorvâncias e esquadrias simuladas.

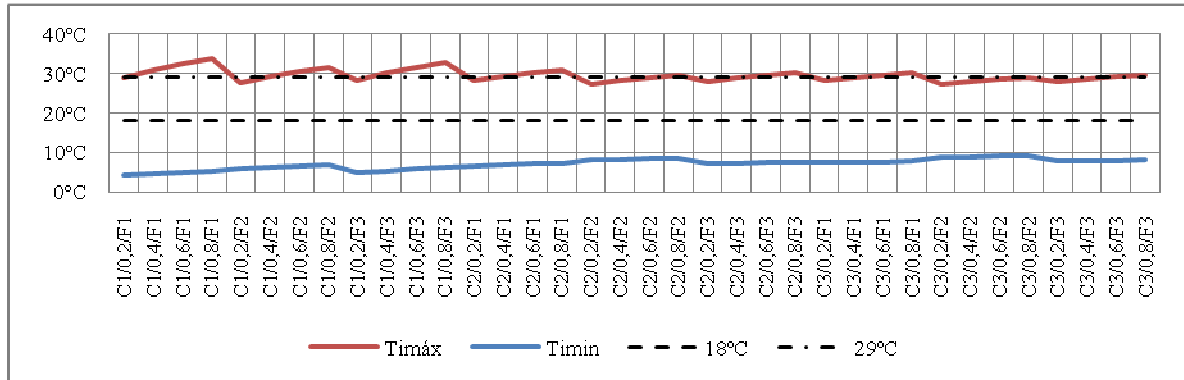
No verão o sistema construtivo base (C01/0,2/F01) apresenta nível intermediário (I) de desempenho térmico, já no inverno o nível é o mínimo (M) (Tabela 15). Com a mudança da cobertura e utilização de isolantes térmicos, o desempenho térmico aumenta, apresentando o nível superior (S). A variação da absorvância apresenta uma relação linear, entre seu aumento e o desempenho da edificação. Com o aumento da absorvância o desempenho no verão é menor e, no inverno, a edificação apresenta um desempenho superior.

**Tabela 15 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 1**

Sistema Construtivo		Resultados					
Ident.	$\alpha$	F01		F02		F03	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01	0,2	I	M	S	I	I	M
	0,4	M	M	I	I	I	I
	0,6	N/A	M	M	I	M	I
	0,8	N/A	M	M	I	N/A	I
C02	0,2	I	I	S	I	I	I
	0,4	I	I	I	I	I	I
	0,6	M	I	I	I	I	I
	0,8	M	I	I	S	M	I
C03	0,2	I	I	S	I	I	I
	0,4	I	I	I	S	I	I
	0,6	I	I	I	S	I	I
	0,8	M	I	I	S	I	I

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Entretanto, observando-se as temperaturas internas mínimas ( $T_{i_{\min}}$ ) na Figura 12, nota-se que estas são extremas em relação à faixa de temperatura utilizada (18°C), mesmo nos sistemas com o nível superior de desempenho térmico. Já as temperaturas internas máximas ( $T_{i_{\max}}$ ) encontram-se dentro do limite de 29°C nas alternativas que apresentaram nível de desempenho intermediário ou superior. A realização das demais simulações (paredes e esquadrias) foi realizada com a cobertura C4/0,8/F02.



**Figura 12 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 1**

Nas simulações com as alternativas de paredes externas (Tabela 16), o sistema construtivo base (P01/0,2) apresentou o nível intermediário no verão e superior no inverno. Este nível de desempenho térmico se mantém constante em quase todas as alternativas simuladas com paredes duplas, independente da absorvância utilizada. Nos demais sistemas construtivos, o aumento da absorvância apresenta uma diminuição do desempenho térmico no verão (M) e, em absorvâncias mais baixas o desempenho decresce no inverno (I).

**Tabela 16 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 1**

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	I	S	I	I	I	I	I	S	I	I	I	S
0,4	I	S	M	I	I	S	I	S	I	I	I	S
0,6	M	S	M	S	M	S	I	S	M	I	I	S
0,8	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	I	S
$\alpha$	P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,4	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,6	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,8	M	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

De acordo com a Figura 13, as  $T_{i\max}$  se mantêm próximas do limite de temperatura utilizada (entre 28,1°C e 30,9°C). Já a temperatura interna mínima aumenta com a absorvância e do tipo de sistema das paredes externas, entretanto ainda se encontram fora do limite estipulado.

Para as simulações das esquadrias as alternativas estudadas foram: tamanho de esquadrias e tipo de vidro (Tabela 17). O sistema construtivo base é de paredes externas P01/0,2, cobertura C03/0,8/F02 e esquadrias E01. O nível de desempenho térmico apresentado foi constante na maior parte das alternativas, intermediário no verão e superior no inverno. Nas alternativas com vidros reflexivos (E05) e esquadrias com 20% e 25% da área do piso este resultado se inverte, com nível superior no verão e intermediário no inverno. Para

a Edificação 1 apenas as alternativas de esquadrias E03 e E04, ambas 20% da área de piso, apresentaram o nível superior em ambos os períodos do ano.

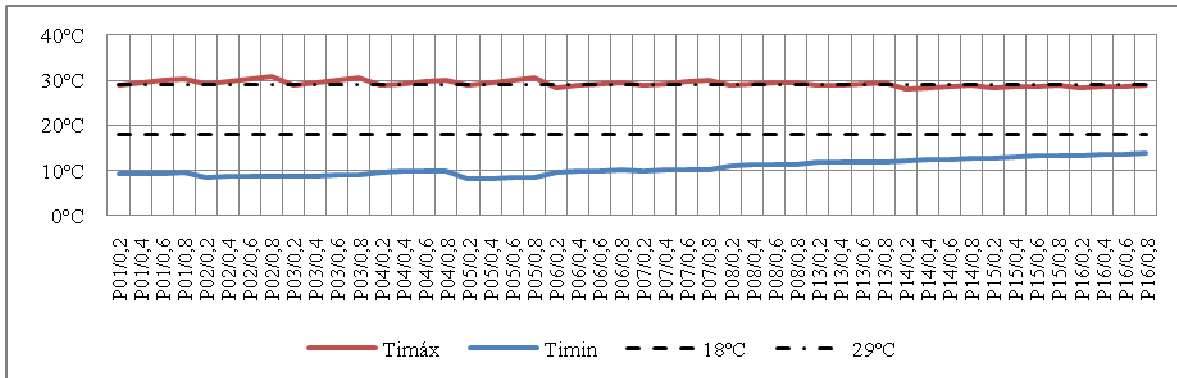


Figura 13 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 1

Em relação à temperatura interna mínima (Figura 14), todas as simulações ainda apresentam-se fora da faixa de temperatura estabelecida. As alternativas E05/20 e E05/25 apresentaram a melhor temperatura no verão dentre as alternativas simuladas, 26,3°C. Entretanto, também foram as que apresentaram a menor temperatura interna, 8,3°C.

Tabela 17 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 1

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	I	S	I	I	I	I
E02	I	S	I	I	I	I
E03	I	S	S	S	I	S
E04	I	S	S	S	I	S
E05	I	S	S	I	S	I

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

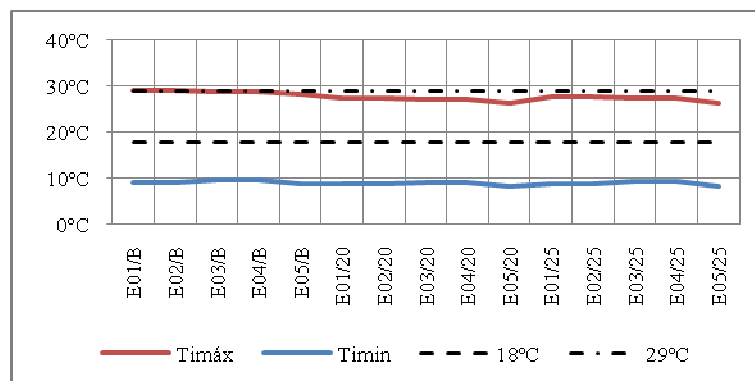


Figura 14 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 1

Em todas as simulações realizadas nesta etapa do estudo houve um amortecimento das temperaturas internas mínimas de até 9,5°C (C01/0,2/F01 em comparação com P16/0,8).

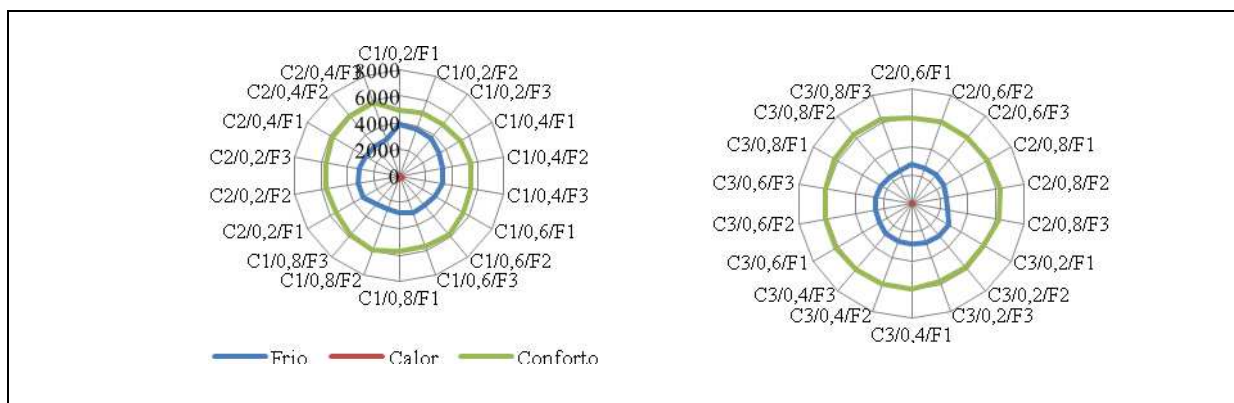


Nas temperaturas máximas o amortecimento foi de até 2,5°C, comparando-se o sistema base (C01/0,2/F01) com o sistema E05/20. Esta melhora ocasionou em um maior nível de desempenho térmico da edificação, entretanto as temperaturas internas ainda apresentam, principalmente no inverno, temperaturas extremas em relação à faixa de temperatura utilizada.

### b. Graus-hora

De forma complementar a classificação da NBR 15575, realizou-se uma avaliação dos dados através do método de graus-hora, apresentado na Figura 15, Figura 16 e Figura 17. Através desse método, nota-se que as alternativas de cobertura apresentaram resultados semelhantes de desempenho térmico, com aumento progressivo em relação ao aumento da absorvância e de massa térmica. Conforme o aumento da absorvância há também um aumento no desconforto térmico causado pelo calor, de até 3%.

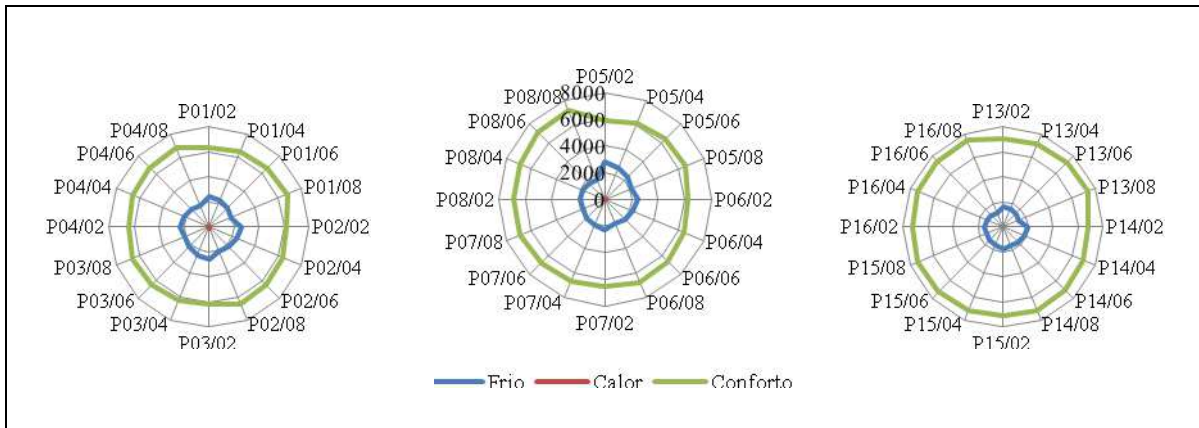
Conforme Figura 15, o sistema base (C01/0,2/F01) apresentou 44% das horas em desconforto causado pelo frio (3872 horas) e 56% das horas em conforto térmico (4887 horas), o desconforto causado pelo calor durante o ano é de 1 hora. Entre todos os sistemas simulados, este foi o que apresentou as maiores quantidades de horas de desconforto causado pelo frio. A maior quantidade de horas de desconforto no calor foi com a absorvância 0,8 (C01/0,8/F01) com 3 pontos % (256 horas) a mais que o sistema base.



**Figura 15 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 1**

O desempenho térmico aumenta proporcionalmente com aumento da absorvância e com a utilização de isolamento térmico (Figura 15). Com a utilização do sistema F02 o conforto térmico apresenta um sutil aumento, de 1 ponto % (124 horas) apenas com a mudança da laje (C01/0,2/F02). Com o sistema construtivo F03 (C01/0,2/F03) este aumento foi de 2 pontos % (161 horas a mais que o sistema base). O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho foi C03/0,8/F02, com 72% das horas em conforto (6316 horas), com um acréscimo de 1 hora em desconforto térmico por calor.

Apresenta-se na Figura 16 o desempenho térmico das paredes externas simuladas. O sistema base apresentou 72% das horas em conforto térmico (6311 horas), as demais horas em desconforto térmico causado pelo frio e apenas 2 horas em desconforto causado pelo calor. O sistemas de paredes simples apresentaram um acréscimo em horas de conforto de até 6 pontos % (489 horas) (P06/0,8). Por outro lado, os sistemas de paredes duplas apresentaram até 14 pontos % a mais, ou seja, 1215 horas.



**Figura 16 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 1**

Ainda de acordo com a Figura 16, observa-se que os sistemas de paredes simples e sem isolamento (P01 a P06) foram os que apresentaram as maiores horas em desconforto térmico. O sistema P02/0,8 apresentou a maior quantidade de horas de desconforto causado pelo calor, 1% das horas (76 horas). Já a maior quantidade de horas de desconforto devido ao frio foi no sistema P05/0,2, com 32% das horas em desconforto térmico (2811 horas). Dos sistemas construtivos de paredes que apresentaram os melhores resultados, o sistema P16/0,8 foi o que apresentou o melhor desempenho térmico, 86% de horas em conforto térmico (7526 horas).

As esquadrias apresentaram maiores quantidades de desconforto por frio e maiores reduções do desconforto térmico pelo calor. O sistema base (E01/Base) apresentou 72% de horas em conforto térmico (6311 horas), 28% em desconforto térmico causado pelo frio (2448 horas) e apenas 2 horas em desconforto pelo calor (Figura 17). As alternativas analisadas apresentam resultados semelhantes de desempenho térmico, porém o sistema E05 apresenta resultados distintos. Este sistema apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no inverno, 3444 e 3400 horas (39%), respectivamente E05/20 e E05/25. Já o sistema que apresentou o melhor desempenho térmico foi o sistema E03/Base, com 73% de horas em conforto (6381 horas).

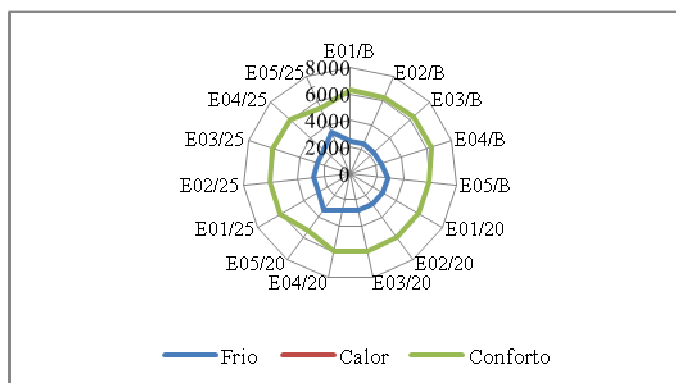


Figura 17 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 1

### c. Selo Procel

Realizou-se, ainda, a avaliação da eficiência energética da envoltória a partir do RTQ-R. Os equivalentes numéricos da edificação são calculados a partir dos indicadores de graus-hora de resfriamento ( $GH_R$ ) e o consumo energético relativo ao aquecimento ( $C_A$ ) de cada ambiente de permanência prolongada da unidade estudada, obtidos através de simulação. O método e as equações utilizadas para o clima de Bento Gonçalves estão dispostas nos itens 2.3.2.3 e 3.5.1.3. Das alternativas simuladas nos métodos anteriores foram selecionadas algumas para esta análise, devido à semelhança entre os resultados. Na Tabela 18 apresentam-se os resultados obtidos através deste método.

Tabela 18 – Nível Selo Procel –Edificação 1

Sistema Construtivo	Resultados [ $^{\circ}C$ ]											
	C01/F01				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	$GH_R$	$C_A$	Pt	Nível	$GH_R$	$C_A$	Pt	Nível	$GH_R$	$C_A$	Pt	Nível
0,2	5,91	1,27	1,64	D	6,35	1,72	2,09	D	6,35	2,46	2,77	C
0,8	1,27	1,72	1,68	D	3,63	2,46	2,55	C	4,64	2,46	2,63	C
$\alpha$	P01				P08				P16			
0,2	4,64	2,46	2,63	C	4,64	3,20	3,31	C	5,19	3,75	3,87	B
0,8	2,25	3,20	3,12	C	3,07	3,75	3,70	B	4,64	3,75	3,82	B
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01/0,2	4,64	2,46	2,63	C	6,35	2,46	2,77	C	6,35	2,46	2,77	C

Nas alternativas de cobertura, o sistema base (C01/0,2/F01) apresentou o nível D de desempenho energético. Apenas com a modificação da cobertura a edificação alterou-se para o nível C (Tabela 18). Segundo os equivalentes numéricos para aquecimento e resfriamento da edificação, observa-se que, nos sistemas de cobertura, os valores do consumo de energia para resfriamento foram baixos, demonstrando um alto consumo de energia para o aquecimento dos ambientes da Edificação 1, no clima de Bento Gonçalves.

Ainda conforme Tabela 18, com a modificação do sistema de paredes para sistemas de paredes duplas foi possível alterar o nível da edificação de C para o B. No sistema

P08 o sistema só atinge o nível B com alta absorptância, já o sistema P16, mesmo com baixa absorptância, obteve o nível B de eficiência energética. Os sistemas de esquadrias apresentaram o mesmo nível, C. Assim, com as alterações realizadas foi possível obter até o nível B de eficiência energética no clima de Bento Gonçalves.

#### 4.1.1.2 Porto Alegre

##### a. NBR 15575

A análise dos dados à luz dos limites correspondentes à zona bioclimática ZB3 (Tabela 14) permitiu o exame do nível de desempenho da edificação com as diferentes alternativas simuladas, apresentadas na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21.

De acordo com a Tabela 19, o sistema base (C01/0,2/F01) apresentou desempenho térmico superior no verão e não atendeu o nível mínimo no inverno (N/A). Há melhora do desempenho térmico da cobertura no verão e no inverno com a utilização de lajes de maior massa (F02 e F03) e de isolamento térmico (C02 e C03). Com o aumento da absorptância houve a diminuição do desempenho térmico no verão, em todos os sistemas construtivos simulados, e não houve modificação do nível de desempenho térmico no inverno. Assim não foi possível obter um aumento do desempenho térmico apenas com modificações de absorptâncias.

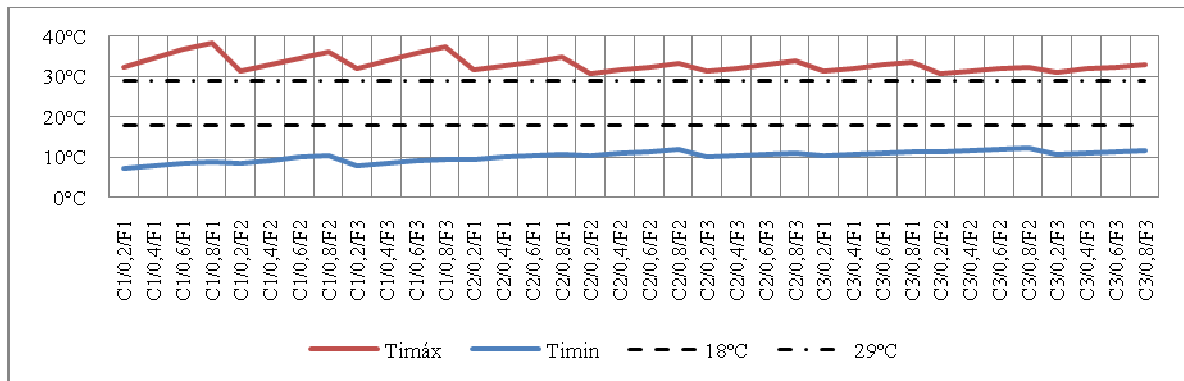
**Tabela 19 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 1**

Sistema Construtivo		Resultados					
		F01		F02		F03	
Ident.	$\alpha$	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01	0,2	S	N/A	S	M	S	N/A
	0,4	I	N/A	S	M	I	N/A
	0,6	M	N/A	I	M	I	N/A
	0,8	N/A	N/A	I	M	M	N/A
C02	0,2	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M
	0,6	I	M	S	M	I	M
	0,8	I	M	I	M	I	M
C03	0,2	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M
	0,6	I	M	S	M	S	M
	0,8	I	M	S	M	I	M

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

O sistema que apresentou as temperaturas internas mais extremas foi o C01/F01, com temperatura mínima de 7,2°C com absorptância de 0,2, decorrente do menor ganho de calor da edificação, e temperatura máxima de 38,4°C quando com absorptância de 0,8 (6,1°C a mais que o sistema base) (Figura 18). Contudo, ainda que alguns sistemas tenham atingido o

nível superior de desempenho térmico, as temperaturas internas apresentadas por todos os sistemas são extremas, tanto no verão quanto no inverno, e não se encontram dentro do limite estipulado. Devido à melhora apresentada pelo sistema construtivo C03/0,2/F02 no desempenho térmico, este foi utilizado para a realização das simulações das paredes externas e esquadrias.



**Figura 18 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 1**

A Tabela 20 apresenta o nível de desempenho térmico das paredes externas simuladas. O sistema base (P01/0,2) apresentou o nível superior no verão e mínimo no inverno. Este resultado se mantém, em geral, constante. Em alguns sistemas construtivos de paredes simples (P01, P02, P03, P05) com altas absorvâncias (0,6 e 0,8) houve uma redução do desempenho térmico desta edificação, para o nível intermediário. No inverno, apenas o aumento da absorvância não causa efeito no desempenho térmico. Neste período do ano, o aumento do nível de desempenho ocorre, principalmente, nas paredes duplas (P08 a P16).

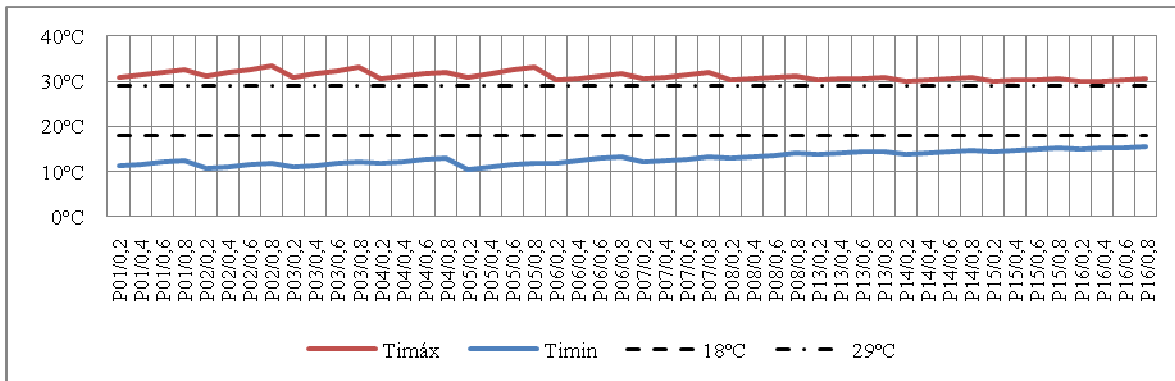
**Tabela 20 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 1**

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,4	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,6	S	M	I	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,8	I	M	I	M	I	M	S	M	I	M	S	M
$\alpha$	P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I
0,4	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I
0,6	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I
0,8	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

As temperaturas internas máximas e mínimas são mais extremas nas paredes externas simples (Figura 19). A alternativa P05 apresentou a temperatura interna mais baixa, 10,5°C, enquanto que a P02 apresentou a temperatura mais alta, 33,5°C. Com o aumento da absorvância houve o aumento da temperatura mínima e máxima e o inverso ocorre com a

absortância baixa. As temperaturas são mais extremas no verão, onde passa dos 30°C no interior da edificação. No inverno, a temperatura elevou-se até os 15,6°C (P16/0,8), mas ainda não se encontra dentro da faixa de temperatura estipulada.



**Figura 19 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 1**

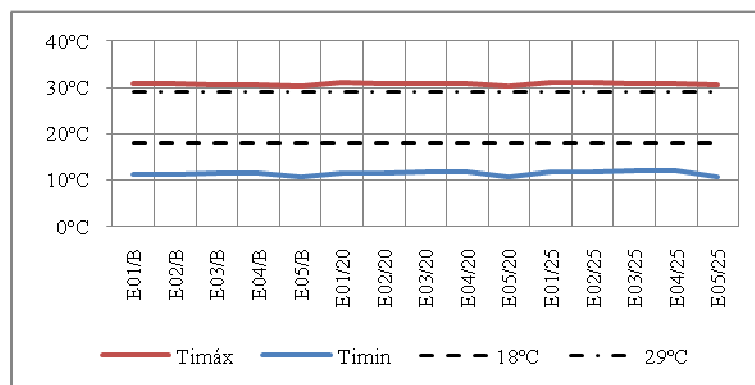
As simulações de tamanho e tipo de vidro das esquadrias são apresentadas na Tabela 21, sendo o sistema construtivo base: paredes externas P01/0,2, cobertura C03/0,2/F02 e esquadrias E01. Conforme tabela, o nível de desempenho térmico alcançado pelo sistema base das esquadrias foi superior no verão e mínimo no inverno. Em todas as alternativas estudadas estes níveis se mantiveram constantes.

**Tabela 21 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 1**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
Ident.	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	S	M	S	M	S	M
E02	S	M	S	M	S	M
E03	S	M	S	M	S	M
E04	S	M	S	M	S	M
E05	S	M	S	M	S	M

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Observando-se as temperaturas internas máximas e mínimas percebe-se que o sistema que apresentou a maior temperatura foi o sistema construtivo E01/25 (31,1°C) e o sistema E05/Base, a menor temperatura interna, 10,6°C (Figura 20). Nenhum dos sistemas construtivos estudados obteve temperaturas internas entre 18°C a 29°C, ou seja, em ambas as estações. O amortecimento térmico no verão foi no máximo de 2,3°C, enquanto que no inverno foi de 8,4°C. Da mesma forma que no estudo com o clima de Bento Gonçalves, houve um maior amortecimento das temperaturas no inverno do que de verão.



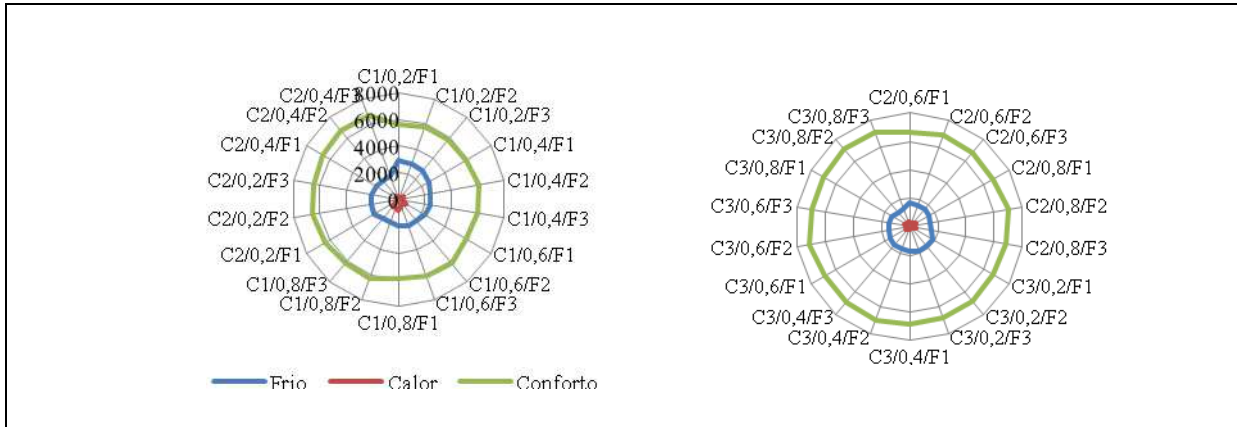
**Figura 20 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 1**

O nível de desempenho térmico pela NBR 15575 se manteve estável em quase todas as simulações no estudo de verão. Não foi possível melhorar o desempenho térmico da edificação apenas com as modificações realizadas. Percebe-se, portanto, que há a necessidade de se utilizar os três sistemas em conjunto no clima de Porto Alegre e de modificação do sistema de proteção das esquadrias, promovendo o fechamento destas em temperaturas mais baixas que 29°C.

#### **b. Graus-hora**

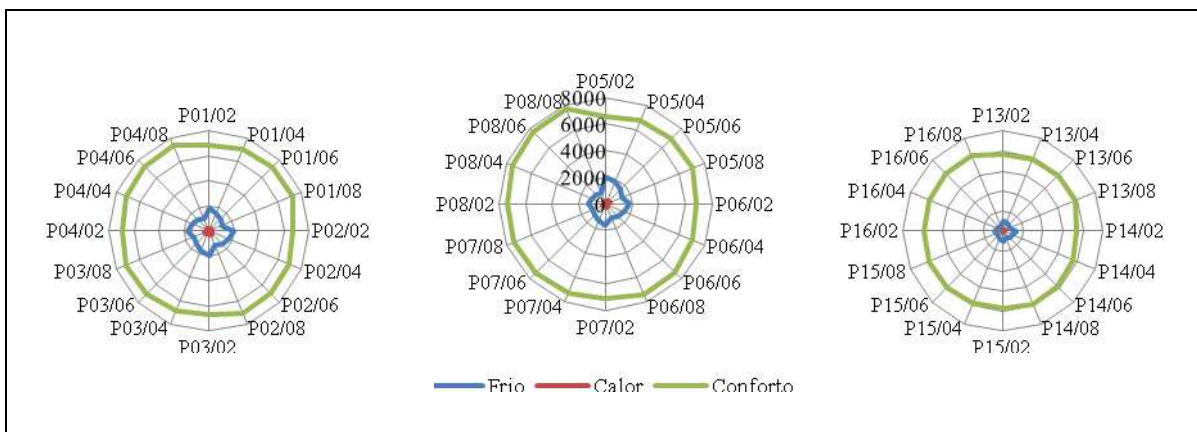
Apresenta-se na Figura 21, Figura 22 e Figura 23 a avaliação dos dados horários através do método de graus-hora, complementando a classificação da NBR 15575. Pode-se perceber o aumento progressivo do desempenho térmico em relação ao aumento da absorvância e de massa térmica dos sistemas construtivos e o aumento no desconforto térmico causado pelo calor, de até 8 pontos %.

De acordo com a Figura 21, o sistema construtivo base (C01/0,2/F01) apresentou 34% das horas em desconforto causado pelo frio (2956 horas), 2% das horas em desconforto pelo calor (195 horas) e 66% das horas em conforto térmico (5610 horas). Dentre os sistemas simulados, o sistema base foi o que apresentou a maior quantidade de horas de desconforto por frio. Este mesmo sistema construtivo (C01/0,8/F01), com absorvância de 0,8, apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no calor, de 10% (865 horas). Com a utilização de sistemas construtivos com maior massa térmica (F02 e F03) o conforto térmico apresenta um sutil aumento, de 1 ponto % (197 horas a mais), comparando-se os sistemas C01/0,2/F02 e C01/0,2/F03 com o sistema base. O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho térmico foi C03/0,8/F02, com 82% das horas em conforto térmico (7183 horas).



**Figura 21 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 1**

O sistema construtivo base de parede externa (P1/0,2) apresentou 78% das horas em conforto térmico (6845 horas), o desconforto térmico causado pelo frio corresponde a 21% das horas (1807 horas) e o causado pelo calor 1% (108 horas) (Figura 22). O aumento da absorvância acrescentou até 5 pontos % (444 horas) no conforto térmico, apesar do aumento do desconforto pelo calor. O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho foi o sistema de paredes duplas, até 15 pontos %, ou seja, 1298 horas em conforto. Por outro lado, os sistemas de paredes simples (P1 a P06) foram os que apresentaram as maiores horas em desconforto térmico pelo frio e pelo calor, P05/0,2 com 24% das horas (2093 horas) e P02/0,8 com 4% das horas (391 horas), respectivamente. De todos os sistemas construtivos simulados, o sistema P16/0,8 foi o que apresentou o melhor desempenho térmico, 93% das horas em conforto térmico (8143 horas).



**Figura 22 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 1**

As esquadrias apresentaram resultados semelhantes às alternativas de paredes (Figura 23). O sistema base (E01/Base) apresentou 78% de horas em conforto térmico (6845 horas), 21% em desconforto térmico causado pelo frio (1807 horas) e 1% devido ao calor (108 horas). O sistema E05/Base apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no



inverno, 26% das horas (2286 horas) e o sistema E01/25 no verão, com 2% (150 horas) das horas em desconforto, devido às suas propriedades térmicas e de área de vão. A variação da área de esquadrias apresentou uma relação linear, entre o aumento de área e o desempenho térmico da edificação, assim, esquadrias com maior relação entre área de piso e área de esquadrias obtiveram 221 horas de conforto térmico (E01/25) a mais que o sistema base. Desta forma, a esquadria E03/25 foi o sistema que apresentou o maior desempenho térmico, 82% das horas em conforto.

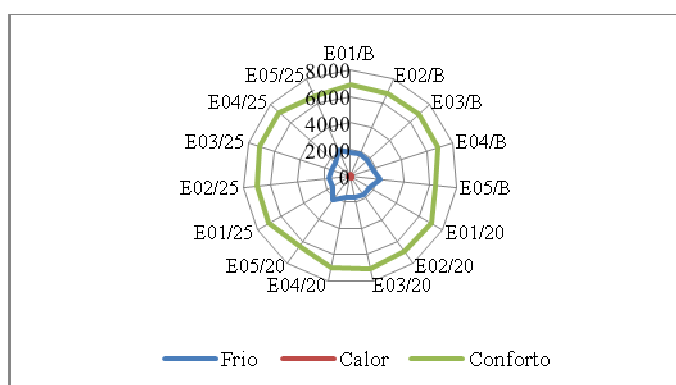


Figura 23 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 1

### c. Selo Procel

A avaliação da eficiência energética da envoltória a partir do RTQ-R é apresentada na Tabela 22. O método e as equações utilizadas para o clima de Porto Alegre localizam-se nos itens 2.3.2.3 e 3.5.1.3. Assim como anteriormente, apenas algumas alternativas simuladas nos métodos anteriores foram selecionadas para esta análise, devido à semelhança entre os resultados.

Tabela 22 – Nível Selo Procel – Edificação 1

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F01				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível
0,2	5,08	1,27	3,71	B	5,34	2,73	4,40	B	5,34	2,28	4,24	B
0,8	3,81	1,72	3,06	C	5,08	3,74	4,60	A	5,08	3,74	4,60	A
$\alpha$	P01				P08				P16			
0,2	5,34	2,73	4,40	B	5,34	3,74	4,77	A	5,08	4,74	4,96	A
0,8	5,08	3,74	4,60	A	5,08	4,74	4,96	A	5,64	4,29	5,15	A
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01	5,34	2,73	4,40	B	5,08	3,47	4,50	A	5,34	3,02	4,51	A

O sistema base de cobertura (C01/0,2/F01) obteve o nível B. Com a modificação da cobertura para os sistemas C02/0,8/F02 e C03/0,8/F02 a edificação atingiu o nível A de eficiência energética (Tabela 22). Conforme os equivalentes numéricos para aquecimento e resfriamento da edificação, observa-se que, que o consumo de energia para o aquecimento dos

ambientes da Edificação 1 no clima de Porto Alegre é maior que para o resfriamento da edificação, assim como apresentado nos métodos da NBR 15575 e Graus-hora.

Com a alteração da absorvância da parede base (P1/0,2) para absorvâncias mais altas (P1/0,8), o nível da edificação passou de B para o A. Com a modificação do sistema construtivo das paredes, de paredes simples para paredes duplas, houve o aumento do nível para o nível A de eficiência energética. O mesmo ocorre com as esquadrias: com a utilização de vidros duplos a edificação obtém o nível A de eficiência energética. Logo, com as alterações realizadas na Edificação 1 foi possível obter até o nível A de eficiência energética no clima de Porto Alegre.

#### 4.1.2 Edificação 2

##### 4.1.2.1 Bento Gonçalves

###### a. NBR 15575

Na Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 apresenta-se o nível de desempenho da edificação, nos limites da ZB1, com as alternativas de cobertura, paredes externas, absorvâncias e esquadrias simuladas.

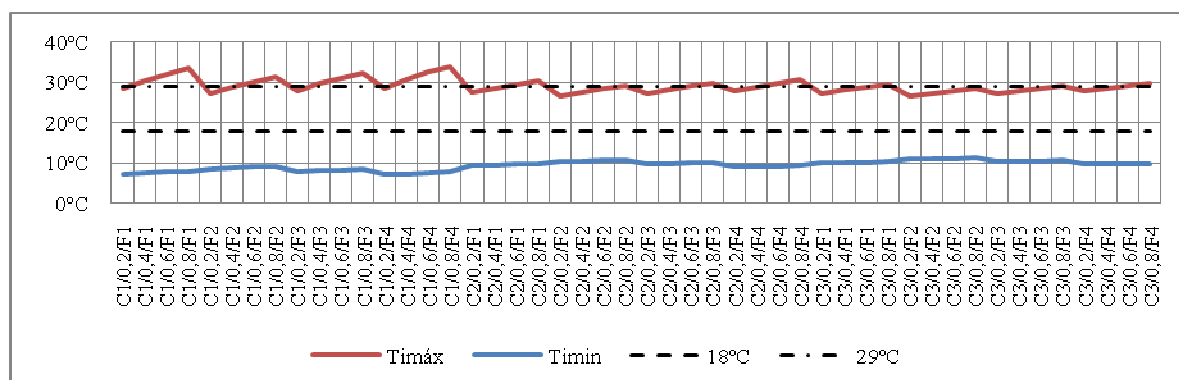
**Tabela 23 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 2**

Sistema Construtivo		Resultados							
Ident.	$\alpha$	F01		F02		F03		F04	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01	0,2	I	M	I	M	I	M	M	M
	0,4	M	M	I	M	M	M	M	M
	0,6	N/A	M	M	M	M	M	N/A	M
	0,8	N/A	M	M	M	N/A	M	N/A	M
C02	0,2	I	M	I	I	I	M	I	M
	0,4	M	M	I	I	I	M	M	M
	0,6	M	M	I	I	M	I	M	M
	0,8	M	M	M	I	M	I	M	M
C03	0,2	I	M	I	I	I	I	I	M
	0,4	I	I	I	I	I	I	M	M
	0,6	M	I	I	I	I	I	M	M
	0,8	M	I	I	I	M	I	M	M

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

O sistema construtivo de cobertura base (C01/0,2/F04) apresentou no verão e no inverno desempenho térmico mínimo (Tabela 23). Este nível de desempenho se modifica conforme a mudança de absorvância da cobertura, forro e uso de isolantes térmicos. Conforme a variação de absorvância da cobertura o nível de desempenho térmico no verão se modifica, sendo menor no verão quanto maior for a absorvância; no inverno esta mudança devido à absorvância não é significativa. O aumento do nível de desempenho térmico ocorre em ambas

às estações, sobretudo com o uso de lajes de maior massa e, com menor importância, com o uso de isolantes térmicos.



**Figura 24 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 2**

Em relação às temperaturas mínimas e máximas o sistema base C01/0,2/F04 apresentou a temperatura interna mais baixa, de 7,3°C, com absorvância de 0,8. Este mesmo sistema apresentou a maior temperatura interna, de 34,1°C (Figura 24). Os sistemas construtivos com maior massa e com baixa absorvância apresentaram temperaturas internas máximas dentro do limite de 29°C, ou seja, temperaturas mais amenas no interior da edificação. Todavia, nenhuma alternativa simulada apresentou temperatura interna mínima próxima ao limite de 18°C. O sistema construtivo C03/0,8/F02 foi utilizado para a realização das simulações das paredes externas e esquadrias em face à melhora apresentada.

As alternativas de paredes externas simuladas (Tabela 24) não apresentaram significativa mudança no desempenho térmico, através do método da NBR 15575. O sistema base (P1/0,2) apresenta para as duas estações o nível intermediário. No inverno, todos os sistemas apresentaram o nível intermediário, e no verão os níveis intermediário ou mínimo. O nível mínimo ocorre, no verão, principalmente nos sistemas de paredes simples. Nos sistemas de paredes duplas este nível ocorre especialmente em sistemas com alta absorvância.

Conforme Figura 25, as temperaturas internas máximas encontradas estão, em geral, dentro da faixa estipulada. Poucos sistemas construtivos apresentaram temperaturas acima dos 30°C e estes ocorrem principalmente em sistemas de paredes simples com absorvância de 0,6 e 0,8, caso do sistema P02/0,8 que apresentou a temperatura mais alta desta simulação 30,8°C. As  $T_{\text{mín}}$  se mantêm no mínimo 2,6°C abaixo do limite estabelecido, de 18°C, sendo a temperatura interna mínima mais alta de 15,4°C (apresentada pelo sistema P12/0,8) e a mais baixa de 10,2°C (P05/0,2).

Tabela 24 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 2

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
$\alpha$												
0,2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
0,4	M	I	M	I	M	I	I	I	M	I	I	I
0,6	M	I	M	I	M	I	M	I	M	I	I	I
0,8	M	I	M	I	M	I	M	I	M	I	M	I
$\alpha$	P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
0,4	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
0,6	M	I	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I
0,8	M	I	M	I	M	I	M	I	M	I	M	I

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Na Tabela 25 apresentam-se as simulações de tamanho e tipo de vidro das esquadrias. O sistema construtivo base (paredes externas P01/0,2, cobertura C03/0,8/F02 e esquadrias E01) apresenta, assim como as demais alternativas simuladas, o nível intermediário no verão e inverno. Por este método, apenas o sistema E05/25 apresentou uma redução do desempenho da edificação para mínimo no inverno.

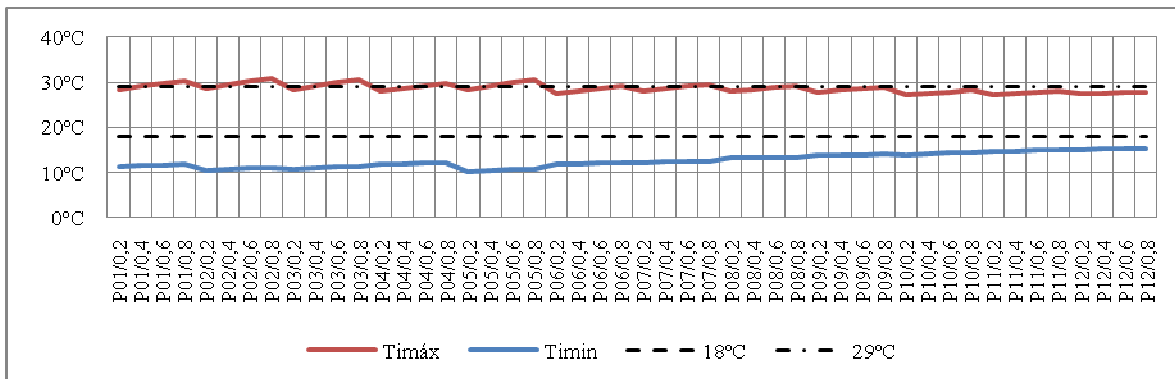


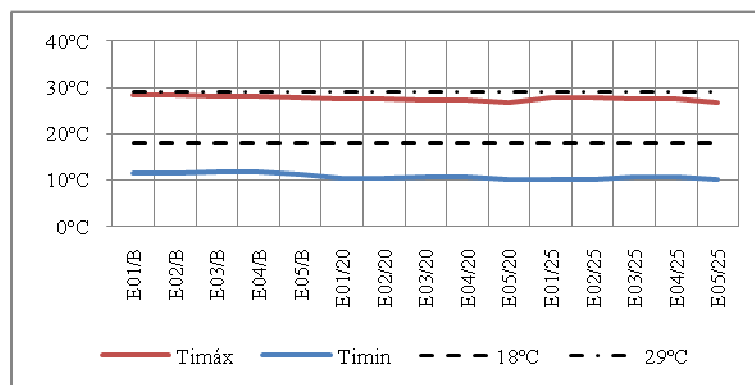
Figura 25 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 2

De acordo com a Figura 26, nas temperaturas internas máximas e mínimas percebe-se a redução do ganho de calor por radiação solar pelo tipo de vidro utilizado e pela maior área de ventilação. Assim, a temperatura interna reduz para até 26,6°C (E05/20) no verão e o mesmo ocorre no inverno, apresentando até 10°C (E05/25).

Tabela 25 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 2

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	I	I	I	I	I	I
E02	I	I	I	I	I	I
E03	I	I	I	I	I	I
E04	I	I	I	I	I	I
E05	I	I	I	I	I	M

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.



**Figura 26 – Temperaturas internas – Esquadrrias – Edificação 2**

Assim, todos os sistemas construtivos apresentaram mudanças no nível de desempenho térmico e na temperatura interna da edificação. Contudo, nenhum sistema construtivo simulado apresentou o nível superior, mantendo até o nível intermediário. Novamente as temperaturas internas no verão foram as que apresentaram o menor amortecimento, 2,1°C (C01/0,2/F02 em comparação com E05/20). Já no inverno este amortecimento da temperatura interna foi de até 8°C, comparando-se o sistema base (C01/0,2/F02 com P12/0,8).

#### **b. Graus-hora**

A avaliação dos dados através do método de graus-hora é apresentada na Figura 27, Figura 28 e Figura 29. As alternativas possuem resultados semelhantes, com aumento do desempenho térmico através do aumento absorvância e da massa térmica dos sistemas construtivos, havendo, também, o aumento no desconforto térmico de até 3% causado pelo calor.

A Figura 27 apresenta os resultados encontrados na simulação das alternativas de cobertura. O sistema construtivo base (C01/0,2/F04) apresentou 62% das horas em conforto térmico (5436 horas) e as demais horas (38%) em desconforto causado pelo frio (3324 horas). Este sistema foi o que apresentou a maior quantidade de horas em desconforto pelo calor, quando com absorvância de 0,8 (C01/0,8/F04), com 3% das horas em desconforto térmico (270 horas). A maior quantidade de horas de desconforto no frio foi obtido pelo sistema C01/0,2/F01 com 1 pontos % a mais que o sistema base, 50 horas a mais de desconforto térmico. O sistema F01 apresentou um sutil aumento no desempenho térmico, em comparação ao sistema F04, em quase todas as simulações, exceto as alternativas C01/0,2/F01, C01/0,4/F01 e C03/0,2/F01. O conforto térmico apresentou um aumento de 2 pontos %, em comparação com C01/0,2/F04, com os sistemas C01/0,2/F02 e C01/0,2/F03. O sistema

construtivo que apresentou o melhor desempenho foi C03/0,8/F02, com 6680 horas em conforto térmico.

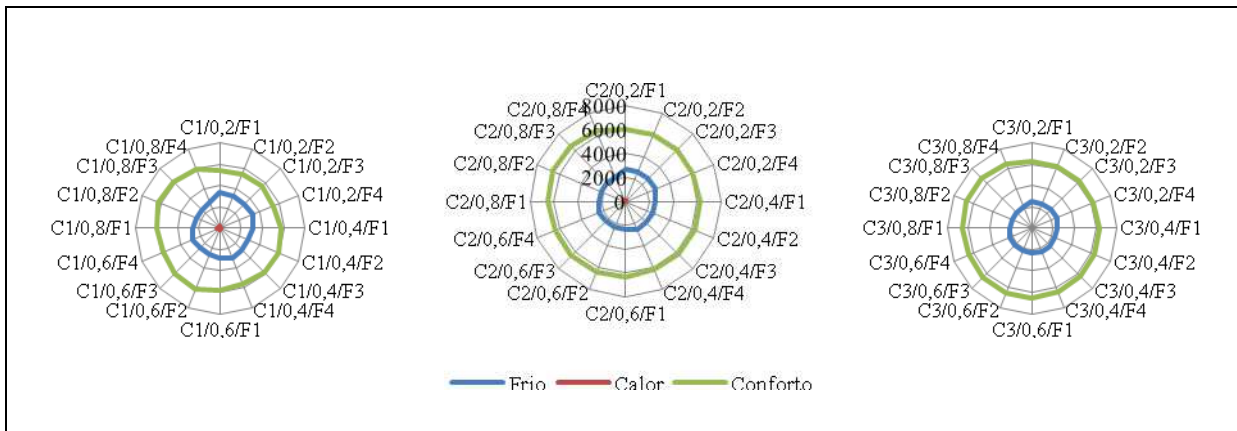


Figura 27 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 2

Na Figura 28 apresenta-se os resultados das paredes externas simuladas. O sistema base, P01/0,2, apresentou 76% das horas em conforto (6680 horas) e as demais horas em desconforto térmico pelo frio. Os sistemas construtivo de paredes simples apresentaram um sutil aumento das em horas de conforto, até 8 pontos % (689 horas) (P04/0,8). Estes sistemas também apresentaram a maior quantidade de horas em desconforto térmico devido ao frio e ao calor, 29% (2497 horas, sistema P05/0,2) e 1% (66 horas, sistema P02/0,8), respectivamente.

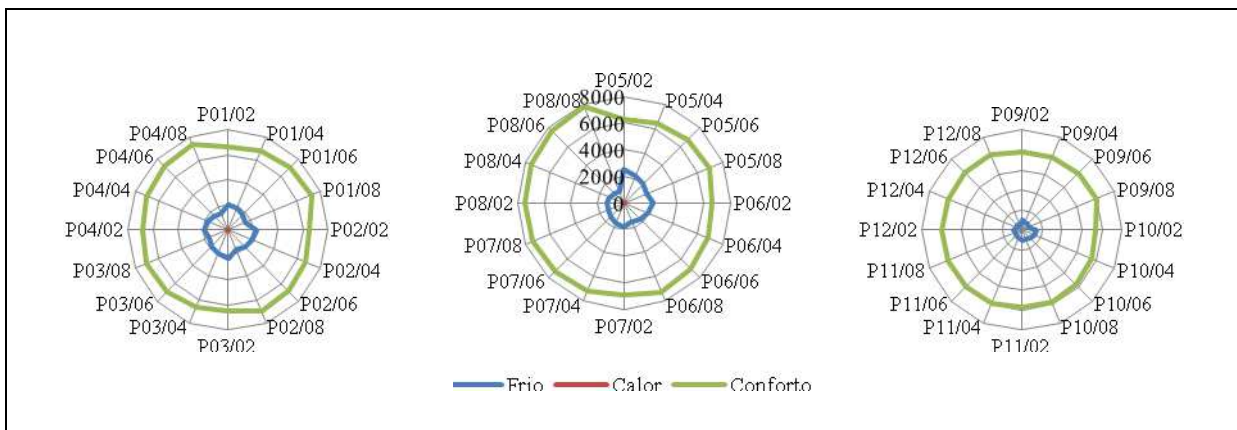


Figura 28 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 2

Os sistemas de paredes duplas apresentaram até 17 pontos % a mais de conforto, em números absolutos 1509 horas (Figura 28). Este tipo de sistema construtivo também apresentou a maior quantidade de horas em conforto térmico, 93% das horas (8189 horas), no sistema P12/0,8. Desta forma, os sistemas de paredes duplas com isolamento térmico apresentaram o melhor desempenho térmico, caso dos sistemas P08/0,8, P10/0,8 e dos sistemas P09, P11 e P12 em todas as absorções estudadas.

As alternativas de esquadrias são apresentadas na Figura 29. O sistema base de esquadria (E01/Base) apresentou 24% de horas (2080 horas) em desconforto pelo frio e 76% em conforto térmico (6680 horas). Os sistemas de esquadrias apresentaram menores reduções do desconforto pelo frio que os demais sistemas simulados, contudo, nenhum destes sistemas apresenta horas em desconforto térmico causado pelo calor. O aumento da área de esquadrias proporcionou uma relação linear, entre o aumento de área e a diminuição do desempenho térmico da edificação, apresentando uma redução de 5 pontos % de horas de conforto. O sistema E05/20 apresentou 31% das horas em desconforto térmico (2712 horas), a maior quantidade dentre os sistemas simulados. Já a maior quantidade de horas em conforto térmico foi obtida pelo sistema E03/Base, 77% (6755 horas).

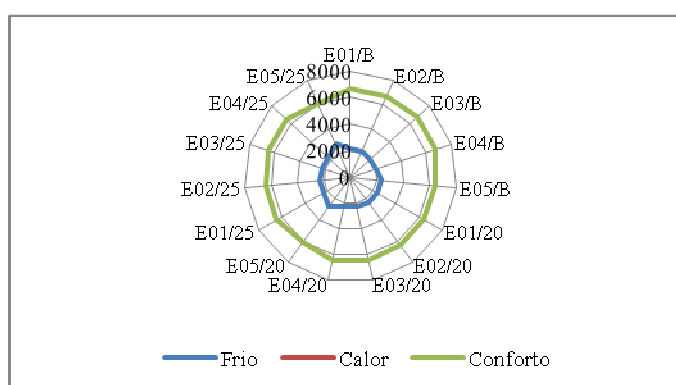


Figura 29 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 2

### c. Selo Procel

Apresenta-se na Tabela 26 os níveis de eficiência energética da envoltória da Edificação 2, no clima de Bento Gonçalves, a partir do RTQ-R. Pode-se perceber que os valores do consumo de energia para aquecimento foram altos, confirmando os resultados dos demais métodos (NBR 15575 e Graus-hora). A cobertura base (C01/0,2/F04) obteve o nível E de eficiência energética e, mesmo com alteração da cobertura, o melhor nível alcançado foi nível D.

O sistema P1 atinge o nível C somente com alta absorvância. Com a modificação do sistema de paredes simples para sistemas de paredes duplas foi possível alterar o nível da edificação de D para o B. Os sistemas de esquadrias apresentaram o mesmo nível de eficiência energética D. Desta forma, a Edificação 2 mudou de nível E para o nível B de eficiência energética.

Tabela 26 – Nível Selo Procel –Edificação 2

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F04				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GHR	CA	Pt	Nível	GHR	CA	Pt	Nível	GHR	CA	Pt	Nível
0,2	4,00	1,00	1,24	E	5,00	1,73	1,99	D	5,00	2,13	2,36	D
0,8	1,00	1,40	1,37	E	4,00	2,13	2,28	D	4,33	2,13	2,31	D
$\alpha$	P01				P08				P12			
0,2	4,33	2,13	2,31	D	4,60	3,73	3,80	B	5,00	3,73	3,83	B
0,8	2,40	3,13	3,07	C	3,73	3,73	3,73	B	4,33	3,73	3,78	B
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01/0,2	4,33	2,13	2,31	D	5,00	2,13	2,36	D	5,00	2,13	2,36	D

## 4.1.2.2 Porto Alegre

## a. NBR 15575

Com a análise dos dados horários obtidos pelas simulações, e com a adoção dos limites correspondentes à zona bioclimática ZB3 (Tabela 14) são apresentados neste item os valores do nível de desempenho térmico dos sistemas construtivos de cobertura (Tabela 27), paredes externas (Tabela 28), tamanho de esquadrias e tipo de vidros (Tabela 29).

Apresentam-se na Tabela 27 os níveis de desempenho térmico obtidos pelo sistema de cobertura base (C01/0,2/F04) e demais sistemas simulados. O sistema de cobertura base apresentou para o verão o nível intermediário e para o inverno o limite para o nível mínimo de desempenho térmico não foi atendido. Em relação ao desempenho no verão, este aumenta com o uso de materiais de maior massa na laje de forro e/ou de isolantes térmicos, entretanto diminui com o aumento da absorvância. Deste modo, em alguns casos, os sistemas F02, F03, C02 e C03 apresentam o nível superior no verão. No inverno, a absorvância possui menor significância nos resultados e os sistemas que atingiram o nível mínimo de desempenho térmico foram os sistemas de maior massa e com o uso de isolamento térmico.

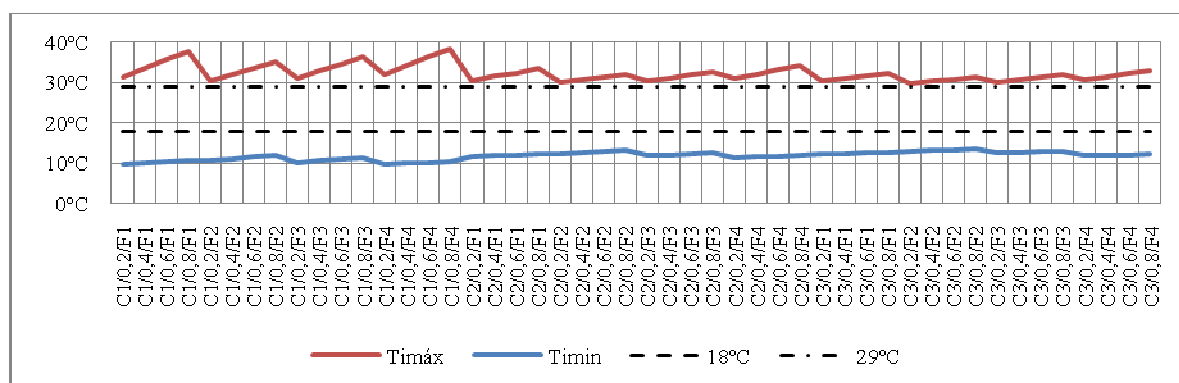
Tabela 27 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 2

Sistema Construtivo	Ident.	$\alpha$	Resultados							
			F01		F02		F03		F04	
			Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01		0,2	I	N/A	S	N/A	S	N/A	I	N/A
		0,4	I	N/A	I	N/A	I	N/A	M	N/A
		0,6	M	N/A	I	N/A	I	N/A	M	N/A
		0,8	M	N/A	I	N/A	M	N/A	N/A	N/A
C02		0,2	S	N/A	S	M	S	N/A	I	N/A
		0,4	I	N/A	S	M	S	N/A	I	N/A
		0,6	I	N/A	S	M	I	M	I	N/A
		0,8	I	N/A	I	M	I	M	M	N/A
C03		0,2	S	M	S	M	S	M	S	N/A
		0,4	S	M	S	M	S	M	I	N/A
		0,6	I	M	S	M	S	M	I	N/A
		0,8	I	M	S	M	I	M	I	N/A

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.



Conforme Figura 30, percebe-se que ambas as temperaturas máximas e mínimas de cada alternativa estudada são extremas e se encontram fora do limite estabelecido. Nenhum dos sistemas estudados apresentou  $T_{i\text{máx}}$  abaixo dos  $30^{\circ}\text{C}$  ou  $T_{i\text{mín}}$  acima dos  $14^{\circ}\text{C}$ , sendo a  $T_{i\text{máx}}$  mais alta obtida pelo sistema C01/0,8/F04, de  $38,3^{\circ}\text{C}$ , e a  $T_{i\text{mín}}$  mais baixa de  $9,7^{\circ}\text{C}$ , do sistema construtivo C01/0,2/F04. Assim, o sistema construtivo de cobertura C03/0,2/F03 foi utilizado para as demais simulações.



**Figura 30 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 2**

Na Tabela 28 apresentam-se os níveis de desempenho térmico obtidos nas simulações dos sistemas construtivos de paredes externas. Nesta fase das simulações o sistema construtivo base (P1/0,2) apresentou nível superior no verão e mínimo no inverno. Somente com a alteração de sistema construtivo estes níveis se mantêm constantes, entretanto com a mudança da absorvância para valores mais altos, o nível no verão passa de superior para intermediário e de N/A para mínimo no inverno, em alguns dos sistemas de paredes simples estudados (P01, P02, P03 e P05).

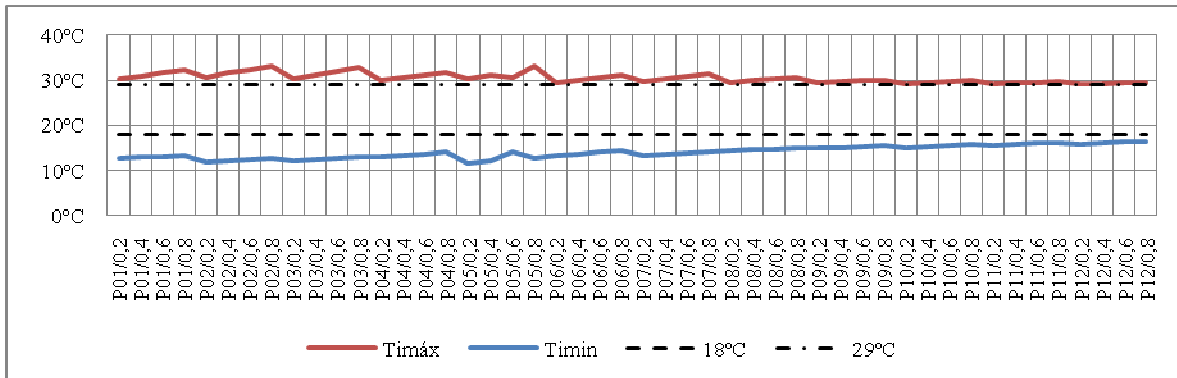
**Tabela 28 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 2**

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	S	M	S	N/A	S	N/A	S	M	S	N/A	S	M
0,4	S	M	I	N/A	S	M	S	M	S	N/A	S	M
0,6	I	M	I	N/A	I	M	S	M	S	M	S	M
0,8	I	M	I	M	I	M	S	M	I	M	S	M
$\alpha$	P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,4	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,6	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,8	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Na Figura 31 observa-se que apesar do aumento do nível de desempenho térmico, as temperaturas internas são extremas, principalmente no inverno, onde a menor  $T_{i\text{mín}}$  foi de  $11,7^{\circ}\text{C}$  (P05/0,2) e a maior de  $16,5^{\circ}\text{C}$  (P12/0,8). No verão, os sistemas construtivos

apresentaram temperaturas mais próximas do limite de 29°C, apesar de ainda estarem altas, de até 33,3°C (P02/0,8).



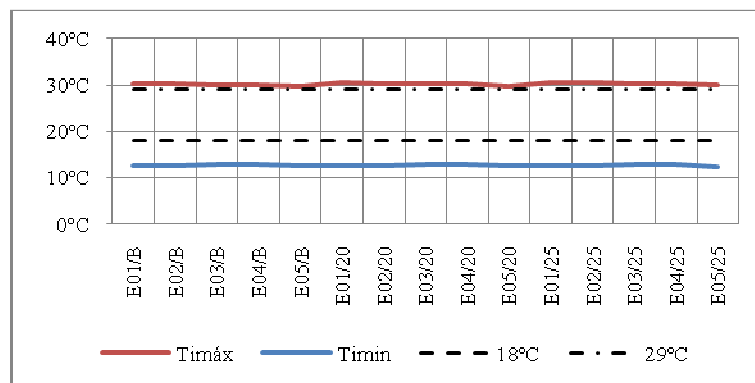
**Figura 31 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 2**

Os níveis de desempenho térmico alcançados pelos sistemas de esquadrias são apresentados na Tabela 29. Todos os sistemas apresentam o nível superior no verão e mínimo no inverno, exceto o sistema E05/25 que não atendeu o limite estabelecido pela norma para o nível mínimo. As temperaturas internas (Figura 32) também se encontram fora do limite de conforto térmico, tanto no inverno como no verão, mesmo tendo alcançado o nível superior da NBR 15575. As temperaturas mais altas e baixas foram apresentadas pelo sistema de 25% de área do piso,  $T_{i\text{máx}}$ : 30,6°C; e,  $T_{i\text{mín}}$ : 12,3°C.

**Tabela 29 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 2**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	S	M	S	M	S	M
E02	S	M	S	M	S	M
E03	S	M	S	M	S	M
E04	S	M	S	M	S	M
E05	S	M	S	M	S	N/A

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

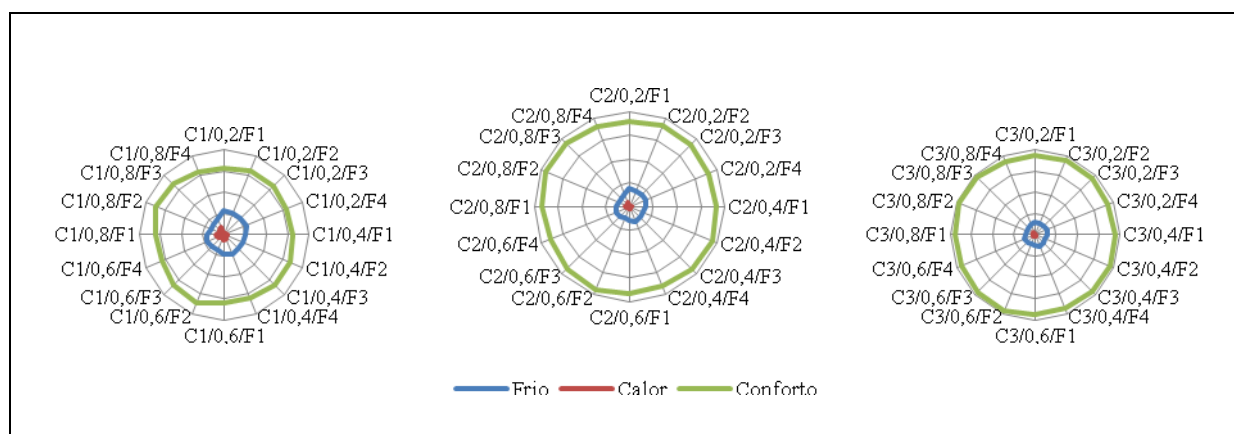


**Figura 32 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 2**

Observando-se todas as simulações realizadas para a Edificação 2 no clima de Porto Alegre, percebe-se que quase todos os sistemas estudados apresentaram o nível superior de desempenho térmico, no verão, entretanto, o desempenho no inverno foi, no máximo, o mínimo. O mesmo ocorre com as temperaturas internas, que se apresentaram, na sua maioria, dentro do limite de 29°C, mas o limite de 18°C não foi alcançado. Apesar disso, o amortecimento térmico no inverno foi maior que no verão, de 6,8°C e 2,4°C, respectivamente.

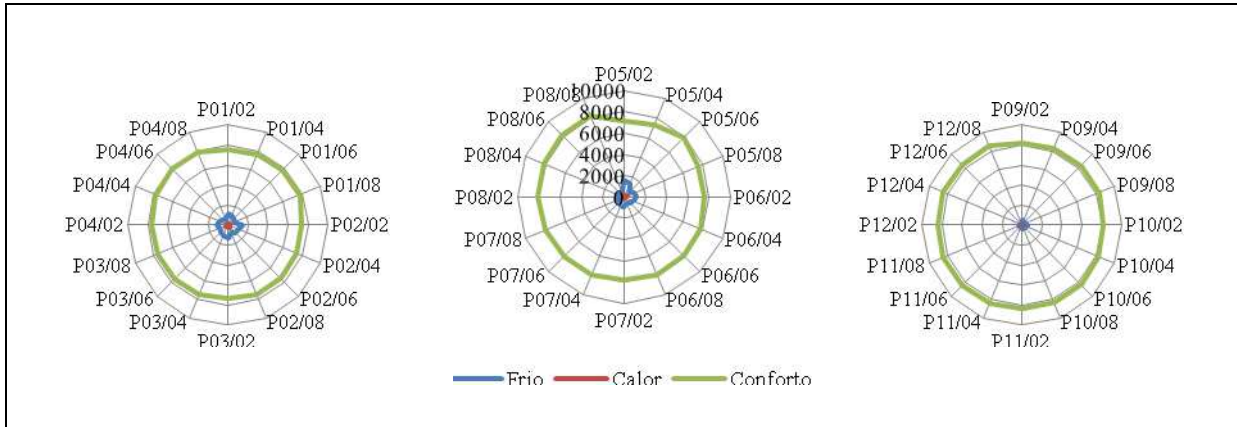
### b. Graus-hora

A avaliação dos dados horários através do método de graus-hora é apresentada nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35. Observa-se que o desempenho térmico aumenta progressivamente com a utilização de absorvâncias e de massa térmica dos sistemas construtivos, apesar do aumento no desconforto térmico causado pelo calor de 8%.



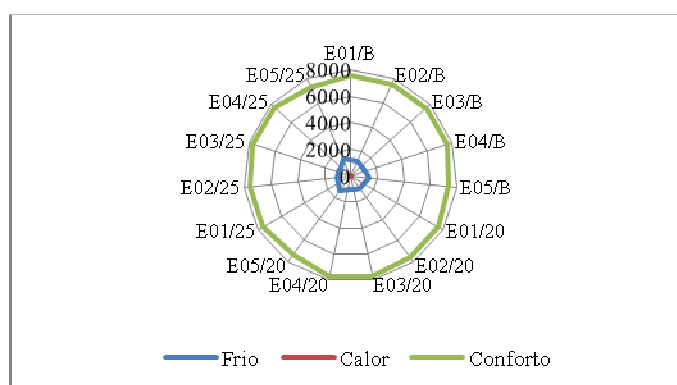
**Figura 33 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 2**

O sistema construtivo de cobertura base (C01/0,2/F04) apresentou 27% das horas em desconforto causado pelo frio (2337 horas), 1% das horas em desconforto pelo calor (126 horas) e 72% das horas em conforto térmico (6296 horas), sendo o sistema que apresentou a maior quantidade de horas de desconforto por frio (Figura 33). Com absorvância de 0,8 (C01/0,8/F01), apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no calor, de 9% (814 horas). A utilização dos sistemas construtivos F02 e F03 apresentou um sutil aumento no conforto térmico, de 2 pontos %, comparando-se os sistemas C01/0,2/F02 e C01/0,2/F03 com o sistema base. O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho térmico, dentre as alternativas de coberturas simuladas, foi o C03/0,8/F02, com 89% das horas em conforto térmico (7780 horas).



**Figura 34 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 2**

Na Figura 34 apresentam-se os resultados de graus-hora do sistema base de paredes e demais alternativas. O sistema de parede externa base (P1/0,2) apresentou 86% das horas em conforto térmico (7536 horas), o desconforto térmico causado pelo frio corresponde a 13% das horas (1178 horas) e o causado pelo calor 1% (46 horas). O aumento da absorvância aumentou em até 5 pontos % (399 horas) o conforto térmico, apesar do aumento do desconforto pelo calor de 2 pontos %, e sua influência é maior nos sistemas de paredes simples. Estes sistemas (P1 a P06) foram os que apresentaram as maiores horas em desconforto térmico pelo frio e pelo calor, com 1575 horas (P05/0,2) e P03/0,8 com 330 horas (P02/0,8), respectivamente. Por outro lado, o sistema de paredes duplas apresentou até 12 pontos % (1014 horas) a mais de conforto térmico, a maior quantidade de horas de conforto, sendo o P12/0,8 sistema que apresentou o melhor desempenho térmico.



**Figura 35 – Nível de graus-hora – Esquadrias– Edificação 2**

O sistema E01/Base apresentou 86% de horas em conforto térmico (7536 horas), 13% em desconforto térmico causado pelo frio (1178 horas) e 1% devido ao calor (46 horas) (Figura 35). Devido às propriedades térmicas e de área de vão, o sistema que apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no inverno foi o E05/Base, 16% das horas (1391 horas) e o sistema E01/25 no verão, com 89 horas em desconforto. A variação da área de

esquadrias não apresentou aumento significativo do desempenho térmico. A esquadria E03/25 foi o sistema que apresentou a maior quantidade de horas em conforto térmico, 7724 horas.

### c. Selo Procel

Na Tabela 30 os níveis de eficiência energética do método RTQ-R são apresentados. Através deste método, o sistema base (C01/0,2/F04) apresentou o nível de eficiência energética C, com maior consumo de energia elétrica para o aquecimento da edificação. Com a utilização de isolamento térmico o nível de eficiência muda de C para B. Não houve mudança de nível com a variação da absorvância.

**Tabela 30 – Nível Selo Procel – Edificação 2**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F01				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível
0,2	4,00	1,00	2,92	C	5,00	2,13	3,97	B	5,00	2,73	4,18	B
0,8	3,33	1,40	2,64	C	4,00	3,13	3,69	B	4,00	3,13	3,69	B
$\alpha$	P01				P08				P12			
0,2	5,00	2,73	4,18	B	5,00	3,40	4,42	B	5,00	3,73	4,54	A
0,8	4,00	3,40	3,78	B	4,00	3,73	3,90	B	4,73	4,00	4,47	B
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01	5,00	2,73	4,18	B	5,00	2,86	4,23	B	5,00	2,86	4,23	B

Já o nível de eficiência energética do sistema construtivo de paredes e esquadrias manteve-se constante, B, com exceção do sistema P16/0,2 que apresentou o nível A. Com a modificação desta absorvância para 0,8 o nível passa a ser novamente o B, devido ao aumento do ganho de calor solar nos períodos quentes que aumentam a necessidade de resfriamento do ambiente. Observa-se, assim, que foi possível atingir até o nível A de eficiência energética na Edificação 2 no clima de Porto Alegre.

## 4.1.3 Edificação 3

### 4.1.3.1 Bento Gonçalves

#### a. NBR 15575

A análise dos dados obtidos pelas simulações, e com a adoção dos limites da ZB1 (Tabela 14), apresenta-se nas Tabela 31, Tabela 32 e Tabela 33 o nível de desempenho da edificação com as diferentes coberturas, paredes externas, absorvâncias e tamanho e tipo de vidros das esquadrias simuladas.

O sistema construtivo base (C01/0,2/F01) apresenta, no verão, nível intermediário (I) de desempenho térmico e, no inverno, o nível mínimo (M) (Tabela 31). O desempenho aumenta principalmente com a mudança da cobertura e utilização de isolantes térmicos, apresentando o nível intermediário ou superior. A variação da absorvância apresenta uma

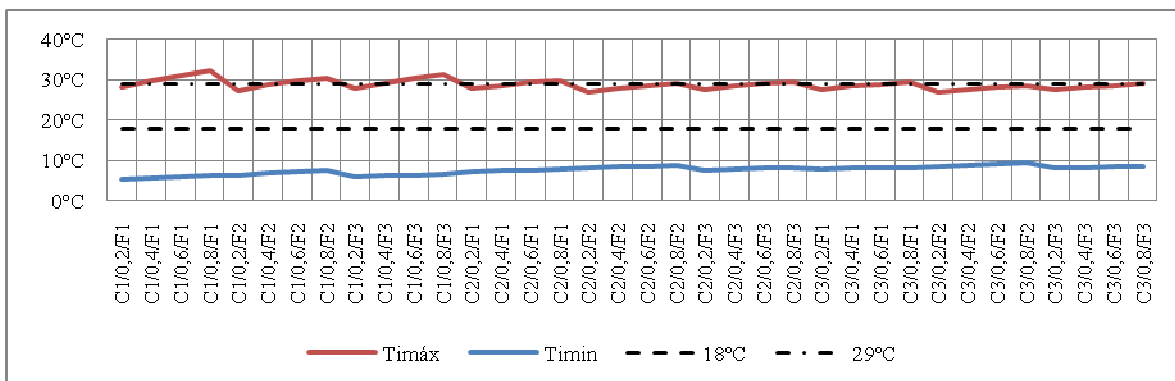
relação linear entre o aumento da absorvância e o desempenho da edificação, sendo, assim como nas demais simulações, menor no verão e, no inverno, superior.

**Tabela 31 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 3**

Sistema Construtivo		Resultados					
Ident.	$\alpha$	F01		F02		F03	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01	0,2	I	M	S	I	S	I
	0,4	I	M	I	I	I	I
	0,6	M	I	I	I	M	I
	0,8	N/A	I	M	I	M	I
C02	0,2	I	I	S	I	I	I
	0,4	I	I	I	I	I	I
	0,6	I	I	I	I	I	I
	0,8	M	I	I	S	I	I
C03	0,2	I	I	S	I	I	I
	0,4	I	I	I	S	I	I
	0,6	I	I	I	S	I	I
	0,8	I	I	I	S	I	S

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

As  $T_{\text{mín}}$  são extremas em relação ao limite de temperatura utilizado ( $18^{\circ}\text{C}$ ), mesmo nos sistemas com o nível superior de desempenho térmico (Figura 36), sendo de, no máximo,  $9,4^{\circ}\text{C}$  (C03/0,8/F02). Já as  $T_{\text{máx}}$  encontram-se, em sua maioria, dentro do limite de  $29^{\circ}\text{C}$ , especialmente nas alternativas que apresentaram nível de desempenho intermediário ou superior, até  $32,3^{\circ}\text{C}$ . Conforme o exposto a realização das demais simulações (paredes e esquadrias) foi realizada com C4/0,8/F02.



**Figura 36 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 3**

Nas simulações com as alternativas de paredes externas (Tabela 32), o sistema construtivo base (P01/0,2) apresentou o nível intermediário no verão e superior no inverno. Este nível se mantém constante em todas as alternativas simuladas, independente da absorvância utilizada. Apenas no sistema construtivo P02 o aumento da absorvância apresenta um aumento do desempenho térmico no inverno (S) e no sistema construtivo P05 que apresentou para ambas as estações nível intermediário de desempenho térmico.

Tabela 32 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 3

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	I	S	I	I	I	S	I	S	I	I	I	S
0,4	I	S	I	I	I	S	I	S	I	I	I	S
0,6	I	S	I	S	I	S	I	S	I	I	I	S
0,8	I	S	I	S	I	S	I	S	I	I	I	S
$\alpha$	P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,4	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,6	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,8	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Segundo Figura 37, as  $T_{i\max}$  se mantêm próximas (entre 27,8°C e 29,9°C) do limite de temperatura utilizado (29°C). Já a  $T_{i\min}$ , apesar de aumentar com a absortância e com alteração do sistema construtivo, ainda se encontra entre 8,7°C e 13,1°C, ou seja, fora do limite estipulado de 18°C.

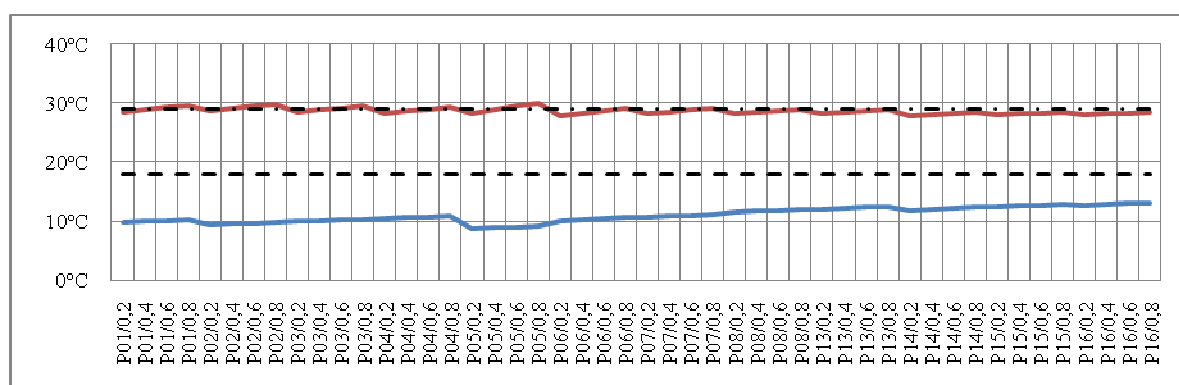


Figura 37 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 3

Para as simulações das esquadrias as alternativas estudadas foram: tamanho de esquadrias e tipo de vidro (Tabela 33). O sistema construtivo base é P01/0,2, C03/0,8/F02 e E01/base. O sistema base alcançou o nível intermediário no verão e superior no inverno. Apenas as alternativas E01 e E02 ambas de 25% da área de piso apresentaram nível abaixo do alcançado pelo sistema base. As alternativas de esquadrias E03 e E04, ambas 20% da área de piso apresentaram o nível superior em ambos os períodos do ano. Nas demais alternativas, o resultado do sistema base se inverte, com nível superior no verão e intermediário no inverno.

Em relação à  $T_{i\min}$  (Figura 38), todas as simulações ainda apresentam-se fora da faixa de temperatura estabelecida. A alternativa E05/20 apresentou a melhor temperatura no verão dentre todas as simuladas, 26,1°C. Entretanto, também apresentou a menor temperatura interna, 8,8°C.

Tabela 33 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 3

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
Ident.	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	I	S	S	I	I	I
E02	I	S	S	I	I	I
E03	I	S	S	S	S	I
E04	I	S	S	S	S	I
E05	S	I	S	I	S	I

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Nesta etapa do estudo houve um maior amortecimento das  $T_{i\min}$ : 7,8°C (C01/0,2/F01 em comparação com P16/0,8). Nas  $T_{i\max}$  o amortecimento foi de até 2,2°C, comparando-se a o sistema base com o sistema E05/20. Este aumento do desempenho térmico ocasionou em um maior nível de desempenho térmico da edificação, pelo método da NBR 15575. Entretanto as temperaturas internas ainda apresentaram, sobretudo no inverno, temperaturas extremas em relação ao limite.

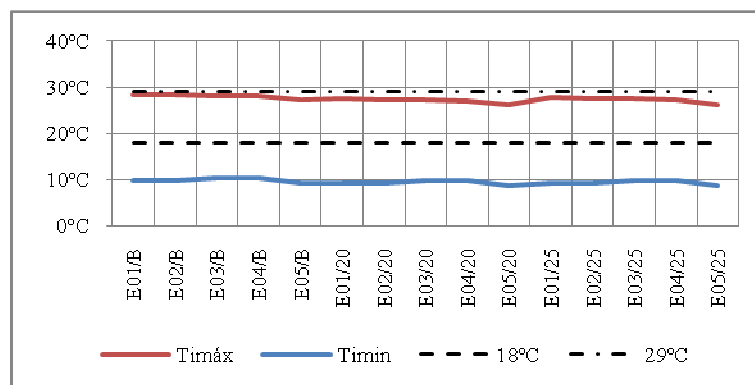


Figura 38 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 3

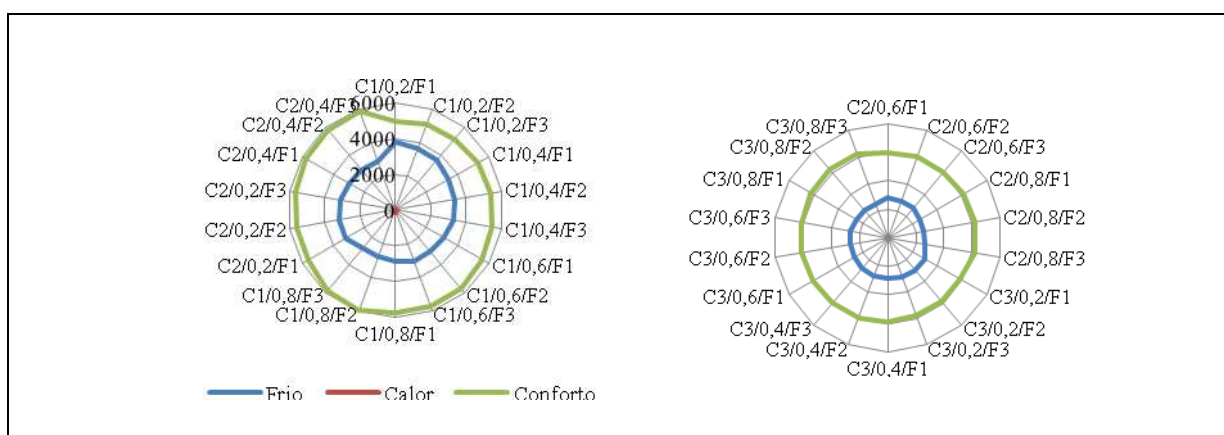
### b. Graus-hora

A avaliação dos dados através do método de graus-hora é apresentada na Figura 39, Figura 40 e Figura 41. As alternativas de cobertura apresentaram resultados semelhantes, com aumento do desempenho térmico, e sutil aumento do desconforto térmico causado pelo calor (2%), contíguo ao aumento da absorvância e de massa térmica dos sistemas construtivos.

Segundo a Figura 39, o sistema base (C01/0,2/F01) apresentou 57% das horas em conforto térmico (4971 horas) e 43% das horas em desconforto causado pelo frio (3790 horas), a maior quantidade de hora de desconforto causado pelo frio. Já as horas em desconforto pelo calor foi maior no sistema C01/0,8/F01 com 2 pontos % a mais de desconforto térmico (145 horas). Com a mudança da laje, o sistema C01/0,2/F02 e C01/0,2/F03 apresentaram um sutil aumento do conforto térmico, de 1 ponto % (153 horas a mais que o sistema base). Este desempenho aumenta com o uso de absorvâncias mais altas e

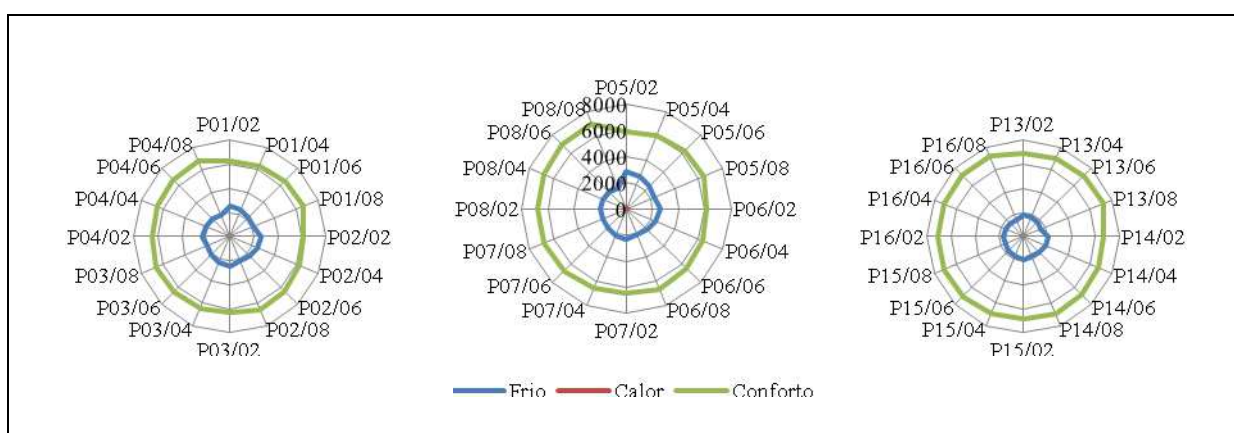


isolamento, chegando a apresentar 71% das horas em conforto térmico (6254 horas), no sistema construtivo C03/0,8/F02.



**Figura 39 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 3**

O desempenho térmico das paredes externas simuladas é apresentado na Figura 40. O sistema base (P01/0,2) apresentou 71% horas em conforto térmico (6242 horas) e as demais em desconforto térmico causado pelo frio. Observa-se que os sistemas de paredes simples e sem isolamento térmico (P1 a P06) apresentaram um acréscimo no conforto de até 6 pontos % (489 horas) (P06/0,8). Estes sistemas apresentaram as maiores quantidades de horas em desconforto térmico: o sistema P05/0,2 obteve 33% de horas (2879 horas) em desconforto causado pelo frio, enquanto que este mesmo sistema, com absorvância de 0,8 (P05/0,8), apresentou 28 horas em desconforto pelo calor. Os sistemas de paredes duplas apresentaram os melhores resultados de desempenho térmico, com acréscimo entre 3 e 12 pontos % no conforto térmico. O sistema P16/0,8 obteve o melhor desempenho, 83% das horas em conforto térmico (7265 horas).



**Figura 40 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 3**

O sistema de esquadrias base (E01/Base) apresentou 71% de horas em conforto térmico (6242 horas) e 29% em desconforto térmico causado pelo frio (2518 horas) (Figura

41). Este sistema apresentou em todas as alternativas simuladas maior quantidade de desconforto devido ao frio e não obteve horas de desconforto pelo calor. Os resultados obtidos foram similares, porém o sistema E05/20 apresentou resultados de conforto térmico abaixo das demais alternativas e a maior quantidade de horas de desconforto no inverno, 39% das horas (3436 horas). Já o sistema E03/Base apresentou maior quantidade de horas de conforto térmico, 72% (6332 horas).

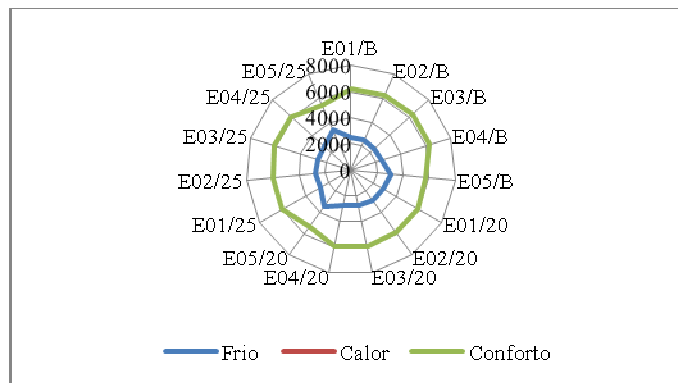


Figura 41 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 3

### c. Selo Procel

Na Edificação 3, o sistema base de cobertura apresentou o nível D de desempenho energético. Com alta absorvância este sistema atingiu o nível E de eficiência energética, já que houve aumento do desconforto térmico causado pelo calor. Com a mudança do sistema de cobertura e aumento da absorvância, o nível alterou-se para o C (Tabela 34).

Tabela 34 – Nível Selo Procel – Edificação 3

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F01				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GHR	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GHR	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GHR	C <sub>A</sub>	Pt	Nível
0,2	6,18	1,24	1,63	D	6,18	1,75	2,10	D	6,18	1,75	2,10	D
0,8	1,24	1,24	1,24	E	4,94	2,55	2,74	C	4,94	2,55	2,74	C
$\alpha$	P01				P08				P16			
0,2	5,23	2,55	2,76	C	5,23	2,55	2,76	C	5,47	3,07	3,26	C
0,8	3,73	2,84	2,91	C	4,45	2,84	2,97	C	4,94	3,87	3,96	B
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01/0,2	5,23	2,55	2,76	C	6,18	2,55	2,84	C	6,18	2,55	2,84	C

De acordo com a Tabela 34, somente com a utilização de paredes duplas com alta absorvância (P16/0,8) é que foi possível alterar o nível da edificação de C para o B. Os sistemas de esquadrias também apresentaram o nível C de eficiência energética. Assim sendo, mesmo com as alterações realizadas foi possível obter somente até o nível B de eficiência energética no clima de Bento Gonçalves.

## 4.1.3.2 Porto Alegre

## a. NBR 15575

A análise dos dados permitiu o exame do nível de desempenho da edificação com as diferentes alternativas simuladas, apresentado nas Tabela 35, Tabela 36 e Tabela 37.

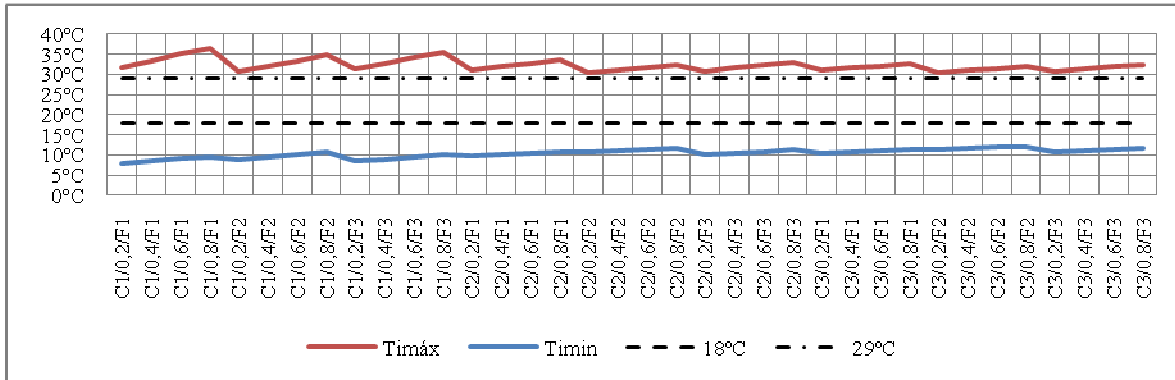
De acordo com a Tabela 35 o sistema base (C1/0,2/F01) apresentou desempenho térmico superior no verão e não atendeu o nível mínimo no inverno (N/A). Com o aumento da absorvância houve a diminuição do desempenho térmico no verão, em todos os sistemas construtivos simulados, e não apresentou modificação do nível de desempenho térmico no inverno. Assim não foi possível obter um aumento do desempenho térmico apenas com modificações de absorvâncias. Observa-se um aumento do desempenho térmico da cobertura no verão com a utilização de lajes de maior massa (F02 e F03) e de isolamento térmico (C02 e C03). No inverno, o uso de absorvâncias altas, o uso de isolantes térmicos ou de diferentes lajes modificou o nível de desempenho para no máximo mínimo, não apresentando modificações maiores no desempenho no inverno.

Tabela 35 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 3

Sistema Construtivo		Resultados					
Ident.	$\alpha$	F01		F02		F03	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01	0,2	S	N/A	S	M	S	M
	0,4	I	M	S	M	S	M
	0,6	I	M	I	M	I	M
	0,8	M	M	I	M	I	M
C02	0,2	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M
	0,6	I	M	S	M	S	M
	0,8	I	M	S	M	I	M
C03	0,2	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M
	0,6	S	M	S	M	S	M
	0,8	I	M	S	M	S	M

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Conforme Figura 42, o sistema que apresentou as temperaturas internas mais extremas foi o C01/F01, com temperatura mínima de 7,9°C quando com absorvância de 0,2 e temperatura máxima de 36,6°C quando com absorvância de 0,8. Contudo, ainda que alguns sistemas tenham atingido o nível superior de desempenho térmico, as temperaturas internas apresentadas por todos os sistemas não se encontram dentro do limite de temperatura estabelecido (18°C a 29°C). Devido à melhora apresentada pelo sistema construtivo C03/0,4/F02 no desempenho térmico, este foi utilizado para a realização das simulações das paredes externas e esquadrias.



**Figura 42 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 3**

Na Tabela 36 apresenta-se o nível de desempenho térmico das paredes externas. O sistema base (P01/0,2) apresentou o nível superior no verão e mínimo no inverno. Este resultado se mantém, em geral, constante, apresentando uma redução do desempenho térmico da edificação, para o nível intermediário nos sistemas P03/0,8 e P05/0,8. No inverno, apenas o aumento da absorvância não causa efeito e o aumento do nível de desempenho para intermediário ocorre apenas nas paredes duplas P14, P15 e P16.

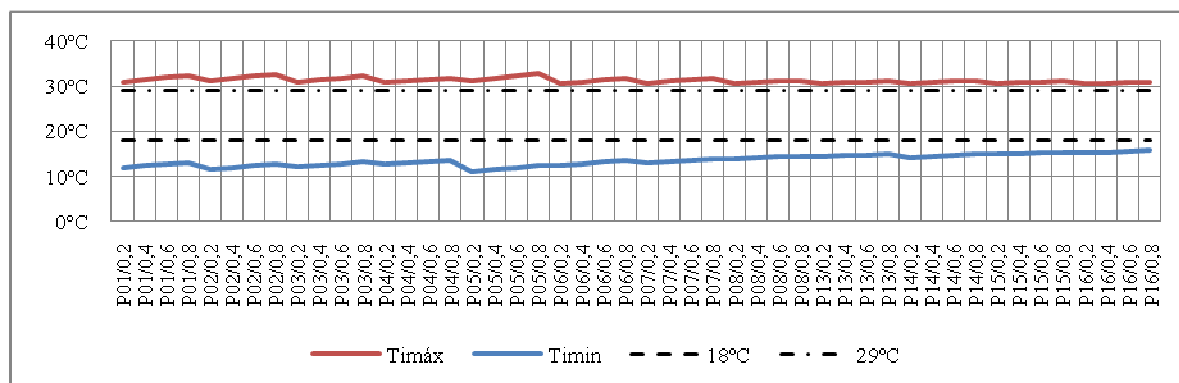
**Tabela 36 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 3**

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,4	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,6	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,8	S	M	I	M	S	M	S	M	I	M	S	M
$\alpha$	P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I
0,4	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I
0,6	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I
0,8	S	M	S	M	S	M	S	I	S	I	S	I

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

O sistema P05 apresentou a temperaturas internas mais extremas, de 11,1°C e 32,9°C, nas absorvâncias de 0,2 e 0,8, respectivamente (Figura 43). Com o aumento da absorvância houve o aumento da  $T_{i_{máx}}$  e  $T_{i_{mín}}$  e o inverso ocorre com a absorvância baixa. As temperaturas no verão passam dos 30°C no interior da edificação e no inverno, a temperatura elevou-se até os 15,6°C, mas ambas não se encontram dentro da faixa de temperatura.

As simulações de tamanho e tipo de vidro das esquadrias são apresentadas na Tabela 37, sendo o sistema construtivo base: P01/0,2, C03/0,4/F02 e E01. Conforme tabela, o nível de desempenho térmico alcançado pelo sistema base das esquadrias foi superior no verão e mínimo no inverno e estes níveis se mantiveram constantes em todas as alternativas estudadas.



**Figura 43 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 3**

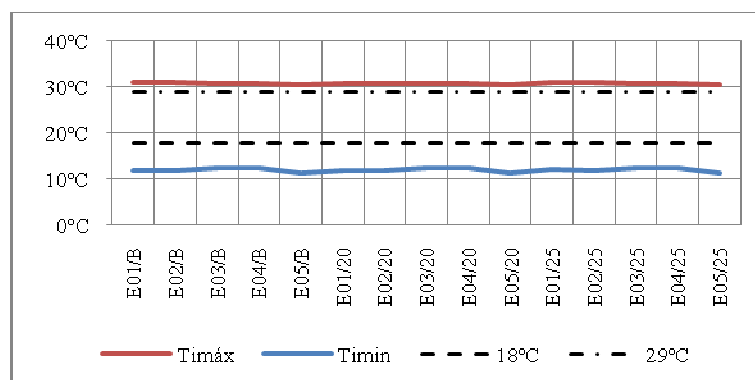
Percebe-se que o sistema que apresentou a maior temperatura interna máxima foi o sistema construtivo de E01 e E02, ambos com área de esquadria base de 25%, de 31°C (Figura 44). O sistema E05, em todas as áreas de esquadria estudadas, apresentou a menor temperatura interna: 11,4°C. Além disso, nenhum dos casos estudados apresentou temperaturas entre 18°C a 29°C.

**Tabela 37 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 3**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	S	M	S	M	S	M
E02	S	M	S	M	S	M
E03	S	M	S	M	S	M
E04	S	M	S	M	S	M
E05	S	M	S	M	S	M

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Nenhum dos sistemas construtivos estudados apresentou temperaturas internas dentro ou próximo da faixa de temperatura, no verão e no inverno. Da mesma forma que nos demais estudos houve um maior amortecimento das temperaturas no inverno do que no verão, de 7,8°C e de 1,2°C, respectivamente. Todavia, o nível de desempenho térmico, pela NBR 15575 se manteve estável em quase todas as simulações.

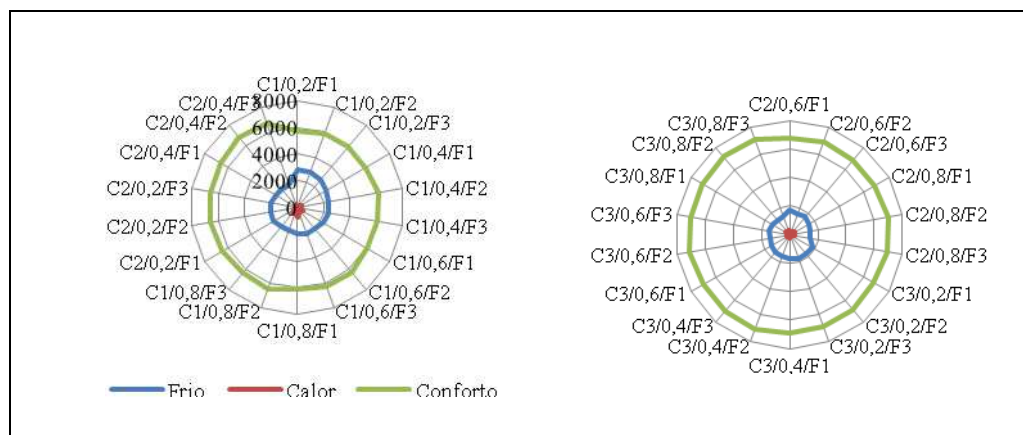


**Figura 44 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 3**

### b. Graus-hora

A avaliação dos dados pelo método de graus-hora é apresentada na Figura 45, Figura 46 e Figura 47. Observa-se que o aumento do desempenho térmico em altas absorptâncias e com maior massa térmica, apesar do aumento de até 8 pontos % do desconforto térmico causado pelo calor.

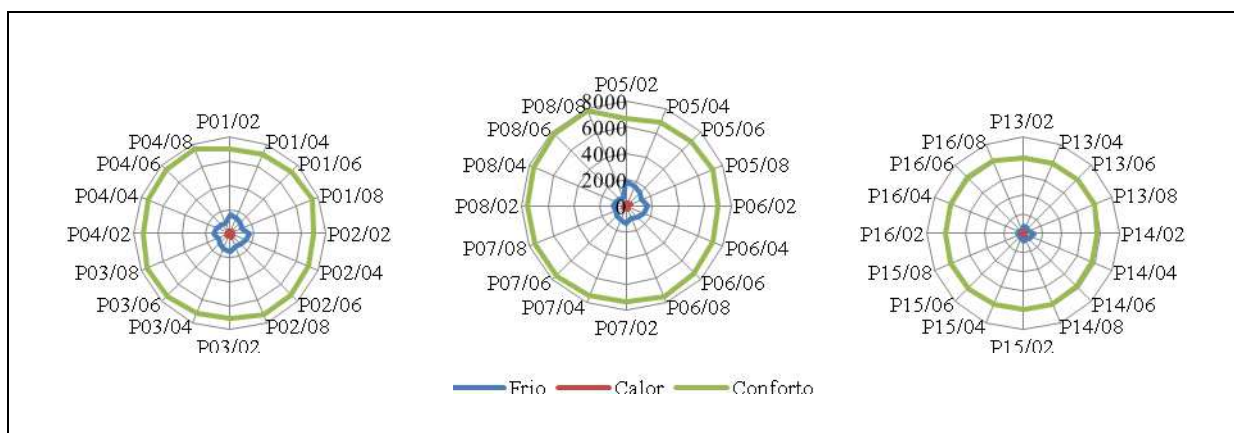
A Figura 45 apresenta os resultados encontrados na simulação das coberturas. O sistema construtivo base (C01/0,2/F01) apresentou 65% das horas em conforto térmico (5729 horas), 33% das horas em desconforto devido ao frio (2859 horas) e as demais horas (2%) em desconforto causado pelo calor (172 horas). Entre os sistemas de cobertura, o sistema base foi o que apresentou a maior quantidade de horas em desconforto pelo frio. Já o maior desconforto térmico devido ao calor, 8% das horas, foi obtido pelo sistema C01/0,8/F01 (720 horas). Os sistemas F02 e F03 apresentaram um sutil acréscimo de conforto térmico, em quase todas as simulações, de, no mínimo, 2 pontos %, em comparação com o sistema base. O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho foi C03/0,8/F02, com 82% das horas (7207 horas) em conforto térmico.



**Figura 45 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 3**

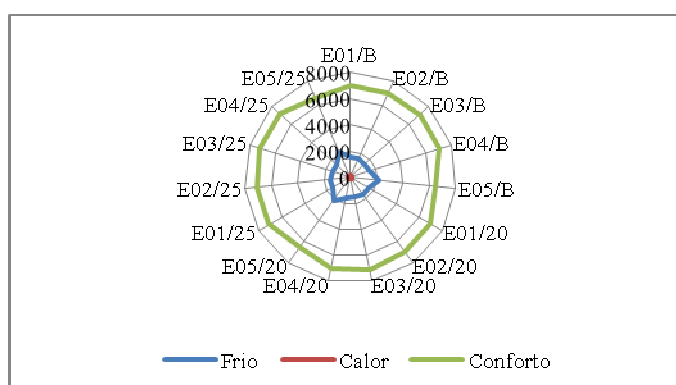
Apresenta-se na Figura 46 o desempenho térmico das paredes externas simuladas. O sistema construtivo base (P01/0,2) apresentou 80% das horas em conforto térmico (7028 horas), 18% em desconforto térmico causado pelo frio (1589 horas) e 2% pelo calor (149 horas). O aumento apresentado pelo sistema de paredes simples foi de até 6 pontos % (543 horas) (P04/0,8). Além disso, a maior quantidade de horas em desconforto térmico devido ao frio e ao calor foi de 22% das horas no sistema P05/0,2 (1906 horas) e 4% das horas no sistema P05/0,8 (370 horas), respectivamente. Já os sistemas de paredes duplas apresentaram

até 14 pontos % a mais de horas em conforto térmico, apresentando, no sistema P16/0,8, 94% das horas em conforto térmico (8211 horas).



**Figura 46 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 3**

Os resultados das simulações das alternativas de esquadrias são apresentados na Figura 47. O sistema base de esquadria (E01/Base) apresentou 80% das horas em conforto térmico (7028 horas), 18% das horas em desconforto pelo frio (1584 horas) e as demais em desconforto pelo calor. O sistema E05/20 apresentou aumento de 25% das horas em desconforto térmico causado pelo frio (2188 horas) e o sistema E01/25, 2% de horas em desconforto térmico pelo calor (162 horas). Já a maior quantidade de horas em conforto térmico foi obtida pelo sistema E03/25, 83% das horas (7236 horas), ou seja, apenas 3 pontos % a mais que o sistema base. O aumento da área de esquadrias proporcionou uma relação linear, entre o aumento de área e o aumento do desempenho térmico da edificação, devido a maior área de ventilação cruzada e ganho de calor por radiação solar.



**Figura 47 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 3**

### c. Selo Procel

O sistema construtivo base de cobertura (C01/0,2/F01) apresentou o nível B e este se manteve constante, mesmo com a modificação do sistema construtivo. Apenas o sistema

C01/0,8/F01 apresentou redução da eficiência térmica, devido à diminuição do desempenho térmico no calor com o aumento da absorvância (Tabela 38). Segundo os equivalentes numéricos para aquecimento e resfriamento da edificação, observa-se que, assim como apresentado nos métodos da NBR 15575 e graus-hora, o consumo de energia para o aquecimento dos ambientes é maior que para o resfriamento da edificação.

**Tabela 38 – Nível Selo Procel – Edificação 3**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F01				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível
0,2	4,94	1,24	3,61	B	4,94	2,55	4,08	B	4,94	2,55	4,08	B
0,8	3,71	1,75	3,00	C	4,94	3,07	4,27	B	4,94	3,59	4,45	B
$\alpha$	P01				P08				P16			
0,2	4,94	2,78	4,16	B	4,94	3,82	4,54	A	4,94	4,31	4,71	A
0,8	4,94	3,07	4,27	B	4,94	4,31	4,71	A	4,94	4,31	4,71	A
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01	4,94	2,78	4,16	B	4,94	3,31	4,35	B	4,94	3,31	4,35	B

O nível da edificação passou do nível B para o nível A com a modificação das paredes externas simples (P01) para sistemas de paredes duplas (P08 e P16) (Tabela 38). Com a alteração na absorvância das paredes e de esquadrias não houve mudança de nível. Logo, com as alterações realizadas na Edificação 3 foi possível obter até o nível A de eficiência energética, no clima de Porto Alegre.

#### 4.1.4 Edificação 4

##### 4.1.4.1 Bento Gonçalves

###### a. NBR 15575

Nas Tabela 39, Tabela 40 e Tabela 41 apresentam-se os níveis de desempenho da Edificação 4, nos limites da ZB1, com as alternativas de cobertura, paredes externas, absorvâncias e esquadrias simuladas.

Segundo Tabela 39 percebe-se que o sistema construtivo de cobertura base (C01/0,2/F04) apresentou, no verão, nível de desempenho térmico superior e no inverno o nível intermediário. O aumento do nível de desempenho térmico ocorre em ambas às estações, sobretudo com o uso de lajes de maior massa e, especialmente no verão, com o uso de isolantes térmicos. Alguns dos sistemas de cobertura com isolamento térmico apresentaram o nível superior de desempenho em ambos os dias típicos de projeto, principalmente os sistemas que utilizam o EPS como isolante térmico.



Tabela 39 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 4

Sistema Construtivo	Ident.	$\alpha$	Resultados							
			F01		F02		F03		F04	
			Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01		0,2	S	I	S	I	S	I	S	I
		0,4	I	I	S	I	I	I	I	I
		0,6	I	I	I	I	I	I	I	I
		0,8	M	I	I	I	I	I	M	I
C02		0,2	S	I	S	I	S	I	S	I
		0,4	S	I	S	S	S	I	I	I
		0,6	I	I	S	S	I	S	I	I
		0,8	I	I	I	S	I	S	I	I
C03		0,2	S	I	S	S	S	S	S	I
		0,4	S	S	S	S	S	S	S	I
		0,6	I	S	S	S	S	S	I	I
		0,8	I	S	S	S	I	S	I	I

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Em relação às  $T_{i\min}$  e  $T_{i\max}$  o sistema base (C01/0,2/F04) apresentou a temperatura interna mais baixa, de 8,3°C (Figura 48). Este mesmo sistema, com alta absorvância (C01/0,8/F04) apresentou a maior temperatura interna, de 30,5°C. Os sistemas construtivos com maior massa e com baixa absorvância apresentaram temperaturas internas máximas dentro do limite de 29°C, ou seja, temperaturas mais amenas no interior da edificação. No inverno nenhuma alternativa simulada apresentou  $T_{i\min}$  próxima do limite de 18°C.

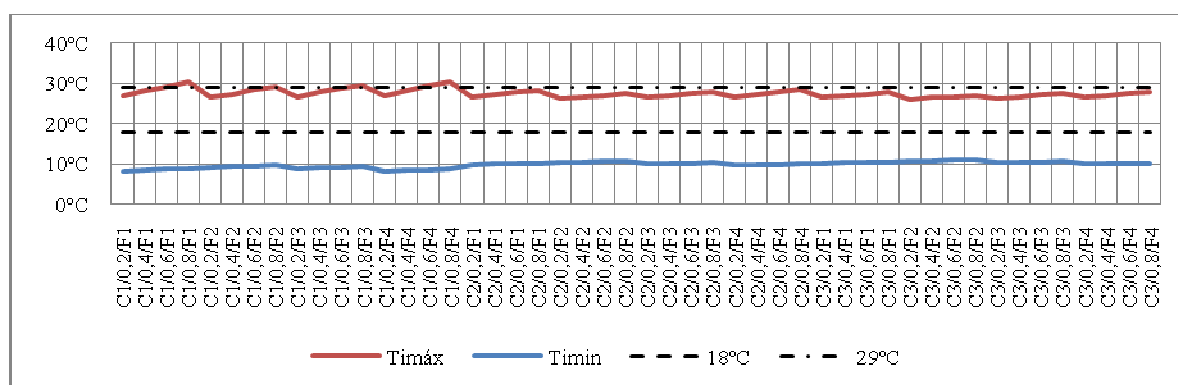


Figura 48 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 4

As alternativas de paredes externas simuladas são apresentadas na Tabela 40. O sistema base (P01/0,2) apresenta para as duas estações o nível superior. No inverno, todos os sistemas apresentaram este nível, exceto o sistema P05/0,2 e P05/0,4 que apresentaram o nível intermediário. No verão os níveis se modificam principalmente conforme o aumento da absorvância, passando, assim, do nível superior para o intermediário. Apesar desta diminuição de nível devido à absorvância, diversos sistemas mantiveram o nível de desempenho térmico obtido pelo sistema base.

Tabela 40 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 4

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	I	S	S
0,4	I	S	I	S	I	S	S	S	I	I	S	S
0,6	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,8	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
$\alpha$	P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	I	S
0,4	S	S	S	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,6	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
0,8	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Conforme Figura 49, as  $T_{i_{\max}}$  encontradas estão dentro do limite de temperatura estipulado ou próximas deste (estando esta apenas  $0,7^{\circ}\text{C}$  acima do limite de  $29^{\circ}\text{C}$ ). As  $T_{i_{\min}}$  se mantêm abaixo do limite de temperatura estabelecido, de  $18^{\circ}\text{C}$ , sendo a temperatura interna mínima mais alta de  $15,3^{\circ}\text{C}$  (apresentada pelo sistema P12/0,8) e a mais baixa de  $10,0^{\circ}\text{C}$  (P05/0,2).

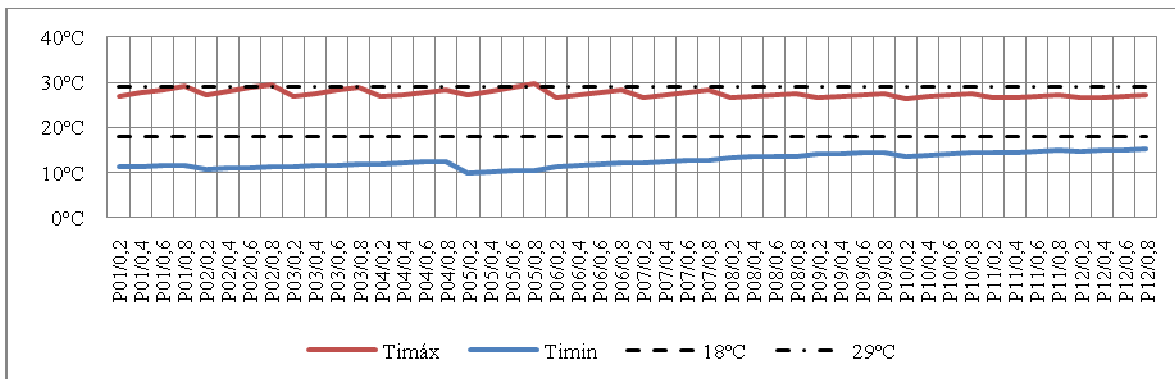


Figura 49 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 4

Na Tabela 41 apresenta-se a simulação de tamanho e tipo de vidro das esquadrias. O sistema construtivo base apresenta, no verão e inverno, assim como as demais alternativas simuladas, o nível de desempenho térmico superior. Por este método, apenas o sistema E05/25 apresentou uma redução do desempenho da edificação para intermediário, no inverno. A diminuição do ganho de calor solar se faz perceber também nas temperaturas internas máximas e mínimas (Figura 50), onde a temperatura interna no verão reduziu para até  $25,7^{\circ}\text{C}$  (E05/20 e E05/25). O mesmo ocorre no inverno, ou seja, a temperatura interna também decresce, apresentando até  $10,5^{\circ}\text{C}$  (E05/25).

Tabela 41 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 4

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
Ident.	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	S	S	S	S	S	S
E02	S	S	S	S	S	S
E03	S	S	S	S	S	S
E04	S	S	S	S	S	S
E05	S	S	S	I	S	I

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Portanto, todos os sistemas construtivos apresentaram mudanças no nível de desempenho térmico e na temperatura interna da edificação, apresentando o nível superior nos dois dias típicos estudados. Igualmente, as temperaturas internas no verão foram as que apresentaram o menor amortecimento, 1,4°C (sistema C01/0,2/F04 em comparação com E05/20). Já no inverno este amortecimento da temperatura interna foi maior, até 7°C, comparando-se o sistema base (C01/0,2/F04 com P12/0,8).

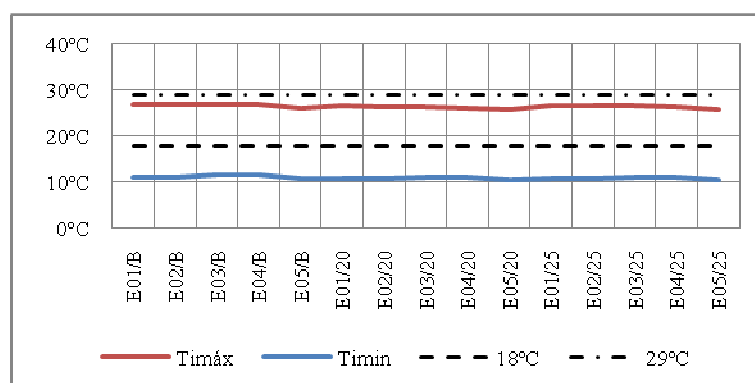
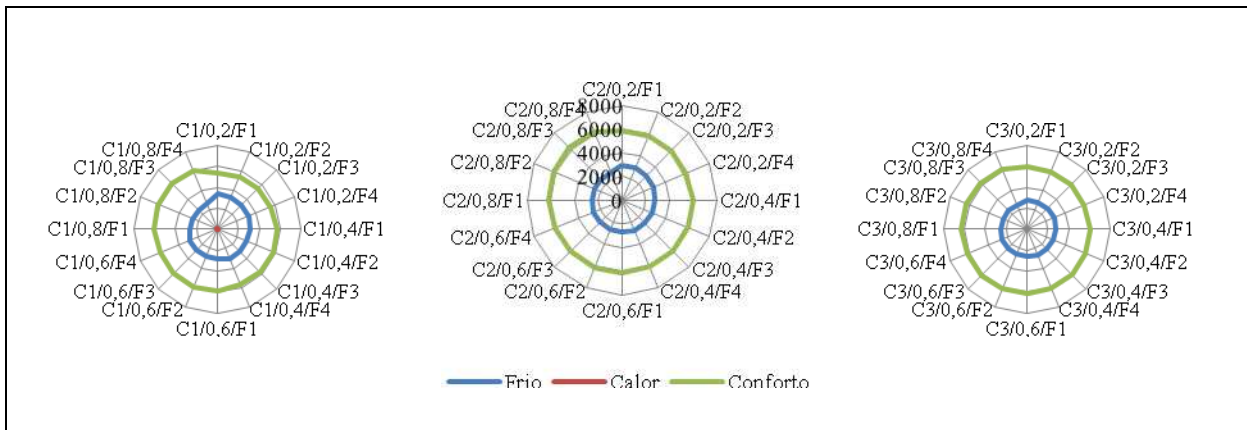


Figura 50 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 4

### b. Graus-hora

Apresenta-se nas Figura 51, Figura 52 e Figura 53 a avaliação dos dados horários através do método de graus-hora. Percebe-se o aumento do desempenho em face do aumento da massa térmica dos sistemas construtivos e da absorvância e, conseqüentemente, um sutil aumento no desconforto térmico causado pelo calor (1%), causado pelo aumento do ganho de calor solar.

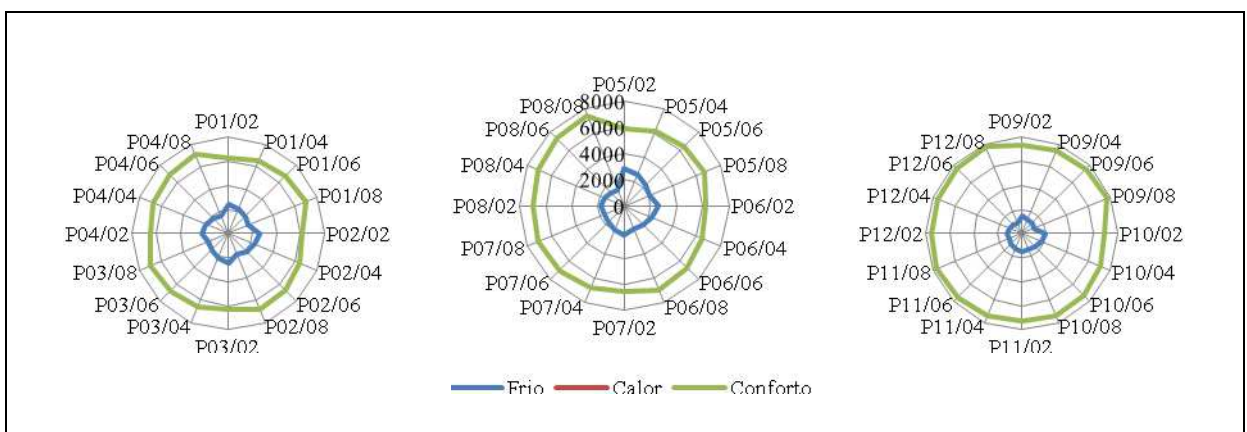
Conforme Figura 51, o sistema construtivo base (C01/0,2/F04) apresentou 62% das horas em conforto térmico (3290 horas), e as demais horas em desconforto térmico causado pelo frio. Este mesmo sistema construtivo, com absorvância de 0,8 (C01/0,8/F04), apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no calor, 1% (64 horas). Ambos os sistemas (F01 e F04) apresentaram resultados similares entre si.



**Figura 51 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edificação 4**

Contudo, o sistema C01/0,2/F01 apresentou a maior quantidade de desconforto causado pelo frio, 38% das horas (3352 horas) (Figura 51). Com a utilização de sistemas construtivos com maior massa térmica (F02 e F03) o desempenho térmico apresenta sutil aumento, com a mudança de absorvância e utilização de isolamento térmico este aumento é maior. O sistema construtivo C03/0,8/F02 apresentou o melhor desempenho térmico, de 72% das horas em conforto térmico (6278 horas).

De acordo com a Figura 52, o sistema construtivo de parede externa base (P1/0,2) apresentou 72% das horas em conforto térmico (6280 horas) e o desconforto térmico causado pelo frio corresponde a 28% das horas (2480 horas). O aumento da absorvância acrescentou até 7 pontos % (663 horas) no conforto térmico e um aumento de 2 horas no desconforto térmico pelo calor. O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho foi o sistema de paredes duplas, tendo alcançado até 89% de horas (7823) em conforto térmico (P12/0,8). Por outro lado, os sistemas de paredes simples (P1 a P06) foram os que apresentaram as maiores horas em desconforto térmico pelo frio e pelo calor, respectivamente, P05/0,2 obteve 33% das horas (2900 horas) e P05/0,8, 10 horas.



**Figura 52 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 4**

Na Figura 53 apresentam-se os resultados referentes às alternativas de esquadrias. O sistema base (E01/Base) apresentou 72% de horas em conforto térmico (6283 horas) e 28% em desconforto térmico causado pelo frio (2477 horas), sem apresentar horas em desconforto térmico devido ao calor. O sistema E05/20 apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no inverno, 36% das horas (3112 horas). Os resultados apresentados são semelhantes entre si, a variação da área de esquadrias não apresentou uma relação entre o aumento de área e o desempenho térmico da edificação. Contudo, com a utilização de vidros duplos o desempenho térmico aumenta sutilmente. Desta forma, a esquadria E03/Base foi o sistema que apresentou a maior quantidade de horas em conforto térmico, 72% das horas (6347 horas).

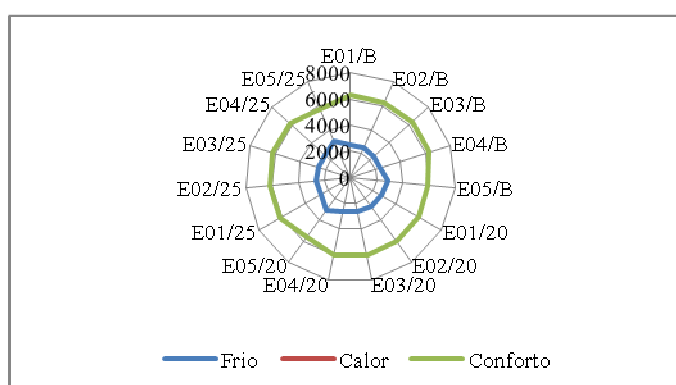


Figura 53 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 4

### c. Selo Procel

Apresenta-se na Tabela 42 os níveis de eficiência energética da envoltória, a partir do RTQ-R. Percebe-se que os valores do consumo de energia para aquecimento encontrados foram altos, confirmando os resultados dos demais métodos (NBR 15575 e Graus-hora). Estes valores diminuem conforme a modificação do sistema construtivo base para sistemas com maior massa térmica.

Tabela 42 – Nível Selo Procel – Edificação 4

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F01				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível
0,2	6,50	2,31	2,65	C	6,50	2,31	2,65	C	6,50	2,31	2,65	C
0,8	3,93	2,31	2,44	D	6,50	2,31	2,65	C	6,50	3,08	3,36	C
$\alpha$	P01				P08				P12			
0,2	6,50	3,08	3,36	C	6,50	3,34	3,59	B	6,50	3,34	3,59	B
0,8	5,71	3,08	3,29	C	6,27	4,15	4,32	B	6,50	4,15	4,34	B
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01	6,50	3,08	3,36	C	6,50	2,82	3,12	C	6,50	2,31	2,65	C

A cobertura base (C01/0,2/F04) obteve o nível C de eficiência energética e este nível se mantém constante com a modificação do sistema construtivo. Com a alteração do sistema de paredes base para sistemas de paredes duplas foi possível alterar o nível da edificação de C para o B e não houve mudança de nível com a modificação da absorvância. Os sistemas de esquadrias também apresentaram nível de eficiência energética C.

#### 4.1.4.2 Porto Alegre

##### a. NBR 15575

Com a análise dos dados obtidos pelas simulações, e com a adoção dos limites da ZB3 (Tabela 14) são apresentados os valores do nível de desempenho térmico dos sistemas construtivos de cobertura (Tabela 43), paredes externas (Tabela 44), tamanho de esquadrias e tipo de vidros (Tabela 45).

Na Tabela 43 apresentam-se os níveis de desempenho térmico obtidos pelo sistema construtivo de cobertura base (C01/0,2/F04) e demais sistemas simulados. O sistema base apresentou para o verão o nível superior e para o inverno o nível mínimo de desempenho térmico. Em relação ao desempenho no verão, este se mantém constante, exceto nos sistemas C01/0,8/F01, C01/0,6/F04 e C01/0,8/F04, onde este nível reduz para intermediário. No inverno, este nível também se mantém constante, mesmo com a mudança de absorvância, massa térmica e uso de isolamento térmico.

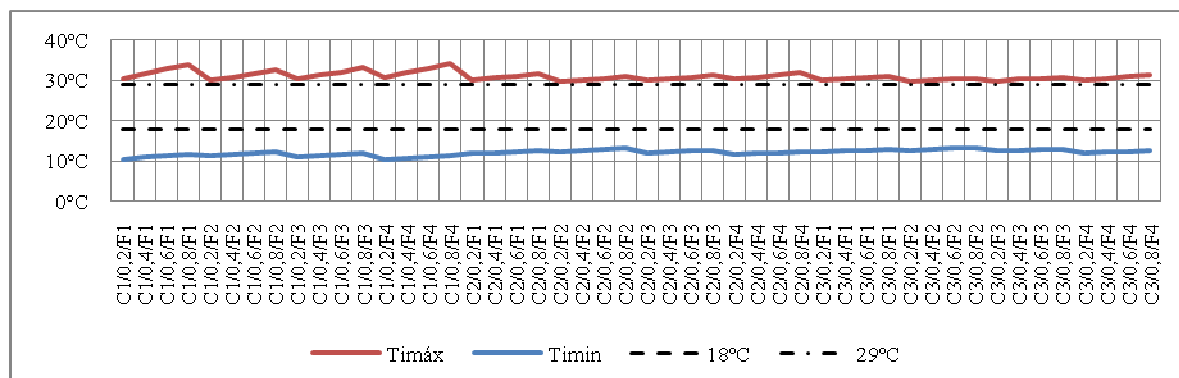
**Tabela 43 – Nível de desempenho térmico – Coberturas – Edificação 4**

Sistema Construtivo		Resultados							
		F01		F02		F03		F04	
Ident.	$\alpha$	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
C01	0,2	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,6	S	M	S	M	S	M	I	M
	0,8	I	M	S	M	S	M	I	M
C02	0,2	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,6	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,8	S	M	S	M	S	M	S	M
C03	0,2	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,4	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,6	S	M	S	M	S	M	S	M
	0,8	S	M	S	M	S	M	S	M

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Percebe-se que ambas as temperaturas máximas e mínimas de cada alternativa estudada permanecem extremas e fora do limite de temperatura estabelecido (Figura 54). Entretanto alguns sistemas (C02/0,2/F02 e C03/0,2/F02) apresentam temperaturas perto do

limite de 29,8°C. Nenhum dos sistemas estudados apresentou  $T_{i\text{mín}}$  acima dos 18°C. A  $T_{i\text{máx}}$  mais alta obtida pelo sistema C01/0,8/F04, de 34,2°C, e a  $T_{i\text{mín}}$  mais baixa de 10,6°C, do sistema construtivo C01/0,2/F04.



**Figura 54 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 4**

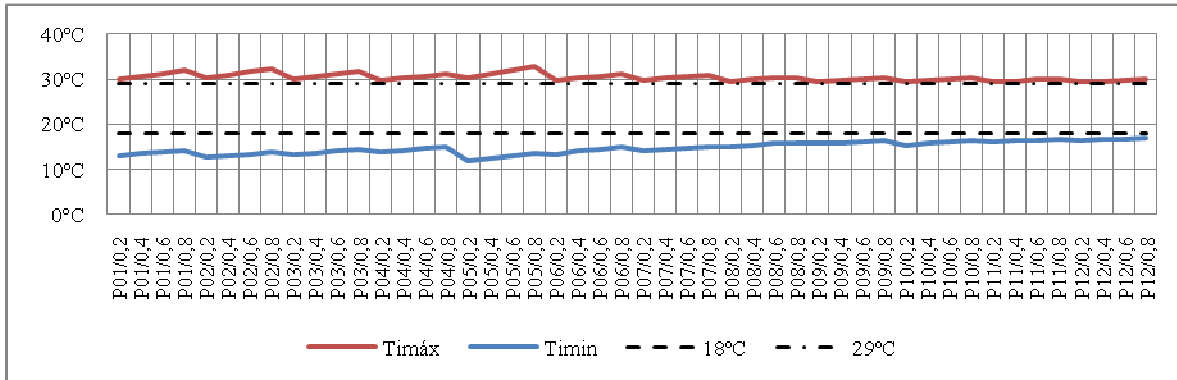
Na Tabela 44 os níveis de desempenho térmico obtidos nas simulações dos sistemas construtivos de paredes externas são apresentados. Nesta fase, o sistema construtivo base (P1/0,2) apresentou nível superior no verão e mínimo no inverno. Com a alteração de sistema construtivo de parede simples para paredes duplas, ou com maior massa, este nível no inverno se modifica para intermediário.

**Tabela 44 – Nível de desempenho térmico – Paredes externas – Edificação 4**

Sistema Constr.	Resultados											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	Inv.
0,2	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
0,4	S	M	S	M	S	M	S	I	S	M	S	I
0,6	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	I
0,8	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	I
$\alpha$	P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I
0,4	S	M	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I
0,6	S	M	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I
0,8	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Apesar do aumento do nível de desempenho térmico, as temperaturas internas são extremas (Figura 55). No inverno, onde a menor  $T_{i\text{mín}}$  foi de 12°C (P05/0,2), alguns sistemas construtivos apresentam temperaturas mais próximas do limite de 18°C, como, por exemplo, o sistema P12/0,8, com 17°C. No verão, os sistemas construtivos também apresentaram temperaturas próximas do limite de 29°C, apesar de ainda estarem altas, de até 32,8°C (P03/0,8).



**Figura 55 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 4**

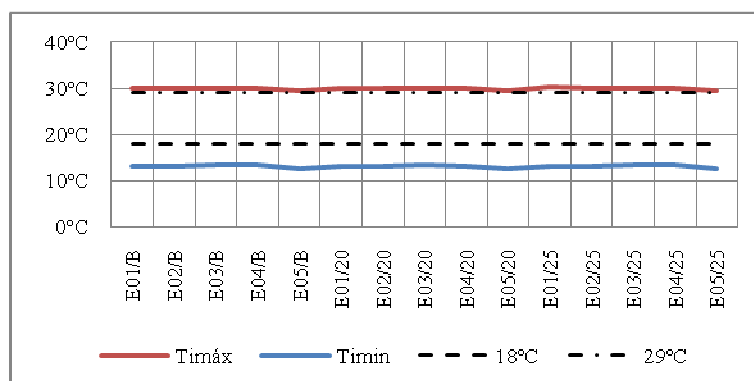
Conforme Tabela 45 e Figura 56, todos os sistemas apresentam o nível superior no verão e mínimo no inverno. As temperaturas internas também se encontram fora do limite, principalmente no inverno. As temperaturas mais altas e baixas foram apresentadas pelo sistema de 25% de área do piso,  $T_{i\text{máx}}$ : 30,2°C; e,  $T_{i\text{mín}}$ : 12,5°C.

**Tabela 45 – Nível de desempenho térmico – Esquadrias – Edificação 4**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
E01	S	M	S	M	S	M
E02	S	M	S	M	S	M
E03	S	M	S	M	S	M
E04	S	M	S	M	S	M
E05	S	M	S	M	S	M

Obs.: sistema construtivo base: E01. N/A: não atende. M: mínimo; I: intermediário; S: Superior.

Observando-se todas as simulações realizadas, percebe-se que quase todos os sistemas estudados apresentaram, no verão, o nível superior de desempenho térmico. Entretanto, o desempenho no inverno foi, no máximo, o mínimo. O mesmo ocorre com as temperaturas internas, que se apresentaram perto dos limites de 18°C e 29°C. Além disso, o amortecimento térmico no inverno foi, novamente, maior que no verão, de 6,4°C e 1,2°C, respectivamente.



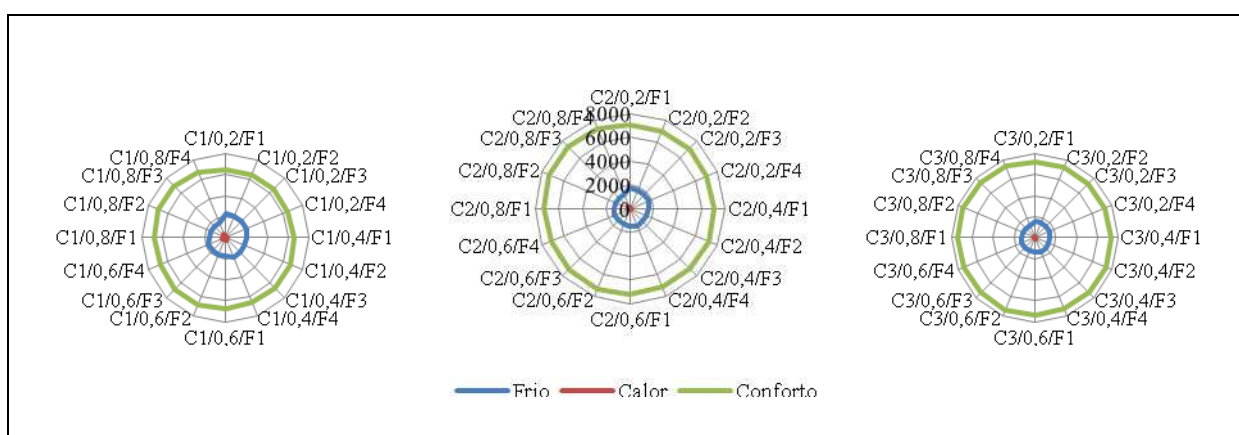
**Figura 56 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 4**



### b. Graus-hora

A avaliação dos dados através do método de graus-hora é apresentada na Figura 57, Figura 58 e Figura 59. Através desse método, nota-se que as alternativas apresentaram resultados parecidos, com aumento do desempenho através do aumento da absortância e da massa térmica dos sistemas construtivos. Com um aumento de até 3 pontos % no desconforto térmico causado pelo calor.

Conforme Figura 57, o sistema de cobertura base (C01/0,2/F04) apresentou 74% das horas em conforto térmico (6469 horas), 25% das horas em desconforto causado pelo frio (2222 horas) e o desconforto causado pelo calor durante o ano é de 1% (69 horas). O sistema C01/0,2/F01 foi o que apresentou as maiores quantidades de horas de desconforto causado pelo frio entre os sistemas simulados, de 26% das horas (2283 horas). A maior quantidade de horas de desconforto no calor foi no sistema C01/0,8/F04, com 3 pontos % a mais de desconforto térmico (392 horas).

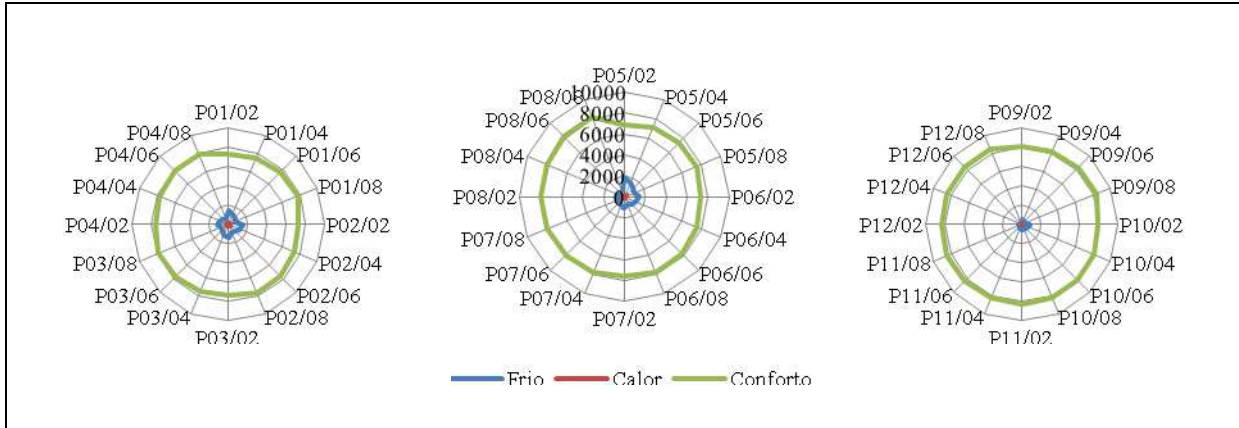


**Figura 57 – Nível de graus-hora – Coberturas – Edifício 4**

O nível de desempenho térmico aumenta, principalmente, com aumento da absortância e com a utilização de isolamento térmico (Figura 57). Com a utilização do sistema F01 o conforto térmico apresenta uma redução de 1 ponto %, comparando-se os sistemas C01/0,2/F01 e C01/0,2/F04. Com os sistemas construtivos de maior massa térmica, F02 e F03 houve um sutil aumento no conforto, de até 1 ponto % (86 horas a mais que o sistema base). O sistema construtivo que apresentou o melhor desempenho foi com o isolante térmico EPS (C03/0,8/F02) com 85% das horas em conforto (7469 horas), com um acréscimo de 27 horas no desconforto térmico por calor.

Apresenta-se na Figura 58 o nível de desempenho térmico das paredes externas simuladas. O sistema base apresentou 84% das horas em conforto térmico (7326 horas), 15% de horas em desconforto térmico causado pelo frio (1387 horas) e 1% devido ao calor (47

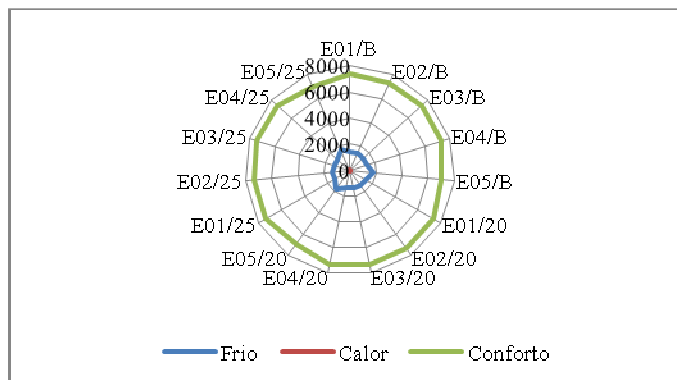
horas). O sistemas de paredes simples apresentaram um acréscimo em horas de conforto de até 7 pontos % (632 horas), enquanto que o sistema de paredes duplas apresentaram até 14 pontos %, ou seja, 1188 horas.



**Figura 58 – Nível de graus-hora – Paredes externas – Edificação 4**

Observa-se também que os sistemas de paredes simples e sem isolamento térmico (P1 a P06) foram os que apresentaram as maiores horas em desconforto térmico (Figura 58). O sistema P05/0,8 apresentou a maior quantidade de horas de desconforto causado pelo calor, 3% das horas (268 horas). Já a maior quantidade de horas de desconforto causado pelo frio foi o sistema P05/0,2, com 21% das horas em desconforto térmico (1809 horas). Dos sistemas construtivos de paredes que apresentaram os melhores resultados, o sistema P12/0,8 apresentou o 97% das horas em conforto térmico (8514 horas).

Na Figura 59 os resultados das simulações de esquadrias. As esquadrias apresentaram maiores quantidades de desconforto por frio e maiores reduções do desconforto térmico pelo calor. O sistema base (E01/Base) apresentou 84% de horas em conforto térmico (7329 horas), 16% em desconforto térmico causado pelo frio (1384 horas) e apenas 1% de horas em desconforto pelo calor (47 horas).



**Figura 59 – Nível de graus-hora – Esquadrias – Edificação 4**

As alternativas analisadas apresentam resultados semelhantes de desempenho térmico, porém o sistema E05 apresentou resultados de desempenho menor que os demais (Figura 59). Este sistema (E05) apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no inverno, 20% (1762 horas), quando com 20% de área de esquadria. Já o desconforto térmico causado pelo calor foi obtido pelo sistema E01/25 que apresentou 1% das horas em desconforto (54 horas). Os sistemas que apresentam as menores horas de desconforto térmico pelo frio são os de vidros duplos claros. O sistema que apresentou maior quantidade de horas de conforto térmico foi o sistema E03/25 com 85% das horas (7459 horas).

### c. Selo Procel

Os níveis de eficiência energética do método RTQ-R da Edificação 4 no clima de Porto Alegre são apresentados na Tabela 46. Através deste método, o sistema base (C01/0,2/F04) apresentou o nível de eficiência energética C. Com a utilização de alta absorvância (C01/0,2/F04) o nível de eficiência muda de C para B.

**Tabela 46 – Nível Selo Procel – Edificação 4**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]											
	C01/F04				C02/F02				C03/F02			
$\alpha$	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível	GH <sub>R</sub>	C <sub>A</sub>	Pt	Nível
0,2	6,50	3,12	3,39	C	5,71	3,38	4,87	A	6,50	2,82	5,18	A
0,8	5,20	3,38	3,53	B	6,50	2,82	5,18	A	6,01	3,38	5,06	A
$\alpha$	P01				P08				P12			
0,2	6,50	3,38	5,38	A	6,50	4,68	5,84	A	6,50	4,68	5,84	A
0,8	5,20	4,68	5,01	A	5,20	4,68	5,01	A	6,01	4,91	5,61	A
Esquadrias	E01/Base				E03/20%				E04/20%			
P01	6,50	3,08	5,27	A	6,50	3,38	5,38	A	6,50	3,38	5,38	A

O nível A de eficiência energética é alcançado com a utilização de sistemas construtivos de maior massa e isolantes térmicos. Já o nível de eficiência energética do sistema construtivo de paredes e esquadrias manteve-se constante, nível A. Percebe-se que a necessidade de aquecimento é menor que no clima de Bento Gonçalves. Observa-se, assim, que foi possível atingir até o nível A de eficiência energética na Edificação 2 no clima de Porto Alegre.

## 4.1.5 Discussão dos resultados

### 4.1.5.1 Bento Gonçalves

Conforme os dados apresentados para as simulações com a Edificação 1 (item 4.1.1.1), nos resultados encontrados através do método de desempenho apenas as alternativas de esquadrias com vidro duplo de 3-3mm e 6-3mm com 20% de área de piso (E03/20 e E04/20) apresentaram nível superior de desempenho, em ambas as estações. Contudo, o

sistema de paredes externas de concreto pré-moldado e *drywall* com isolamento de EPS (P16/0,8) foi o que apresentou o melhor desempenho térmico. Os demais apresentaram, no método da NBR 15575, resultados distintos no inverno e no verão e, pelo método de graus-hora, poucas horas em desconforto, caso dos sistemas de concreto pré-moldado e *drywall* com isolamentos de lã de vidro e EPS (P15/0,8 e P16/0,8). Desta forma, a Edificação 1 apresentou até 54% de melhora do desempenho térmico. Pelo método do Selo Procel houve aumento do nível de eficiência energética de D para B.

Na Edificação 2 (item 4.1.2.1) os resultados pelo método de desempenho da NBR 15575 não alcançaram o nível superior em nenhum dos sistemas construtivos simulados, tanto no inverno quanto no verão. Enquanto que, pelo método de graus-hora, alguns sistemas de paredes duplas com câmara de ar ou isolante térmico de lã de vidro ou EPS apresentaram resultados acima de 7826 horas em conforto térmico (sistemas P08/0,6, P08/0,8, P10/0,8 e P09 a P12, em todas as absorções estudadas) e um aumento linear do desempenho térmico, com um acréscimo de até 50% no desempenho da edificação. Conforme os resultados do Selo Procel, com as modificações feitas no sistema construtivo da Edificação 2, o nível de eficiência energética passou de E para o nível B.

Os resultados encontrados para a Edificação 3 (item 4.1.3.1) demonstram que apesar das horas de desconforto estarem principalmente nos períodos frios do ano, diversos sistemas apresentaram nível superior de desempenho térmico neste período. Enquanto que o inverso ocorre no verão, onde a maioria dos sistemas apresentou nível intermediário pela NBR 15575. O sistema de esquadrias com vidro duplo de 3-3mm e 6-3mm com 20% da área de piso (E03/20 e E04/20) apresentaram em ambos os períodos do ano o nível superior de desempenho, entretanto, o sistema com vidro duplo de 3-3mm (E03/Base) apresentou o melhor desempenho térmico. Observa-se que houve um aumento de até 47% no desempenho térmico e que a Edificação 3 mudou, pelo método do Selo Procel, do nível D de eficiência energética para o nível B.

Já a Edificação 4 (item 4.1.4.1) obteve os melhores resultados de desempenho térmico, entre as quatro edificações analisadas, com aumento de 42% do desempenho térmico. Das alternativas estudadas, 37 apresentaram nível superior de desempenho térmico em ambas as estações. Destas, 10 são alternativas de cobertura, 14 de paredes externas e as demais de esquadrias. Já pelo método de graus-hora, o sistema obteve conforto térmico de 7823 horas (paredes de tijolos maciços duplos com EPS, P12/0,8), os demais apresentaram aumento do

desempenho térmico, mas não ultrapassaram este limite. O nível de eficiência térmica da edificação pelo método do Selo Procel passou de C para o nível B.

A maior quantidade de horas de desconforto foi encontrada nos meses frios do ano, onde os meses de temperaturas baixas ainda mostram elevadas horas em desconforto térmico, principalmente nas Edificações 1 e 3. Contudo, alguns sistemas da Edificação 2 e 4 apresentam resultados acima de 85% das horas em conforto térmico, tais quais a parede de blocos cerâmicos de 6 furos duplo, com lã de vidro ou EPS (P08/0,8 e P09 em todas as absorptâncias), paredes de tijolos maciços duplos com câmara de ar (P10/0,8) e dos sistemas de tijolos maciços duplos com lã de vidro ou EPS (P11 e P12), em todas as absorptâncias.

Os dados apresentados pelo método de Graus-hora, Selo Procel e NBR 15575 corroboram entre si e indicam que nos períodos de frio há maior quantidade de desconforto térmico. Os resultados do Selo Procel demonstram que embora tenha tido aumento no desempenho térmico, este aumento não foi suficiente para obter o nível A de eficiência térmica. As diferenças encontradas entre os métodos de desempenho e graus-hora ocorrem provavelmente por causa do sistema metodológico deles, já que o método de desempenho utiliza dias típicos de projeto e o método de graus-hora, os dados horários de um ano inteiro. Em todas as edificações analisadas muitos sistemas apresentam temperaturas internas máximas dentro do limite de temperatura estipulado (29°C), contudo as temperaturas mínimas foram extremas em relação ao limite de 18°C. Por fim, os melhores resultados encontrados foram dos sistemas construtivos com maior absorptância (0.8) e com o isolante térmico EPS, devido à maior necessidade de aquecimento e isolamento dos ambientes.

Estes resultados também confirmam os dados obtidos pelo programa *Analysis Bio* referente ao clima de Bento Gonçalves, que afirma que em 59,5% das horas há desconforto térmico causado pelo frio, e em apenas 5,5% das horas o desconforto térmico é causado pelo calor. As estratégias a serem adotadas indicadas pela carta também foram confirmadas (alta inércia térmica, aquecimento solar passivo, sombreamento, ventilação cruzada) e comprovou-se, com o método do Selo Procel, que apesar do aumento do desempenho térmico e redução do consumo de energia elétrica para o condicionamento de ar, ainda há necessidade de aquecimento artificial na edificação.

A semelhança apresentada nas edificações verticais (Edificação 1 e 3) pelas alternativas de cobertura simuladas em relação ao sistema base é devido à cobertura ter menor troca de calor com o ambiente em razão da área por ela ocupada (menor que a de paredes), com isso, o efeito do isolamento da cobertura é reduzido. Nas edificações horizontais

(Edificação 2 e 4) está diferença é maior. Outra diferença entre o tipo de edificação é em relação ao desempenho térmico destas, onde as edificações horizontais apresentam 9% de horas de conforto a mais que as edificações verticais. Possivelmente, devido à proximidade da edificação horizontal com o solo e a relação de área de paredes e cobertura. O solo possui menor variação térmica, e a área de paredes e cobertura são similares em edificações horizontais, o que ao ocorre em edificações verticais, e a área de troca de calor através da envoltória da edificação com o ambiente externo é menor.

Os sistemas de cobertura que apresentaram os melhores resultados possuem  $U \leq 1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$  e os sistemas de paredes externas  $U \leq 1,52 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $\phi \geq 6,0$  horas. O nível de desempenho térmico aumenta proporcionalmente com a utilização de isolamento térmico. Além disso, as altas absorptâncias apresentaram o melhor desempenho térmico nos métodos da NBR 15575 e graus-hora, pois amplia o ganho de calor solar. Desta forma, com o aumento da massa térmica e atraso térmico, ou seja, com maior inércia térmica, há o incremento do desempenho térmico da edificação no clima de Bento Gonçalves (Figura 62).

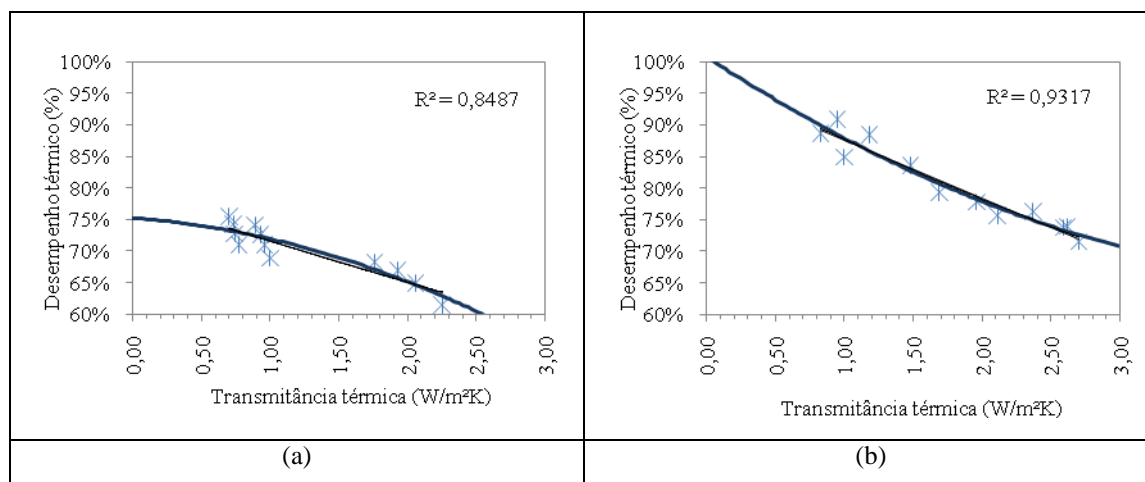


Figura 60 – Correlação entre graus-hora e transmitância térmica de (a) cobertura e (b) paredes externas.

Desta forma, as baixas transmitâncias permitiram que as temperaturas internas fossem maiores no inverno e menores no verão, tendo se mantido mais próximas do limite de temperatura ( $18^{\circ}\text{C}$  e  $29^{\circ}\text{C}$ ). Principalmente quando associadas à absorptância de 0.8, que se mostrou favorável tanto na cobertura quanto nas paredes externas, no inverno e no verão.

A maior resistência térmica pode ocasionar na elevação do consumo de energia para a refrigeração, pela dificuldade de perda de calor. Contudo, este aumento foi pequeno, pois Bento Gonçalves possui um clima ameno com temperaturas abaixo dos  $29^{\circ}\text{C}$  mesmo nos períodos quentes do ano. Ainda, o *setpoint* de fechamento das venezianas estipulado em  $29^{\circ}\text{C}$

impede a entrada de radiação solar no ambiente, quando em temperaturas externas mais altas, tendo o ganho de calor neste período reduzido.

As esquadrias apresentaram maiores quantidades de desconforto por frio e maiores reduções do desconforto térmico pelo calor, quando comparadas com as alternativas de paredes. O aumento do vão das esquadrias promoveu em uma sutil redução das temperaturas máximas e mínimas das edificações. Desta forma, as esquadrias que apresentaram o melhor desempenho foram as de menor área (até 20% de área de piso), pois permitem menor transmissão de calor entre o ambiente interno e o ambiente externo.

Com a utilização de sistemas de vidros duplos reduziu-se a perda por condução através das esquadrias, logo apresentaram a maior quantidade de horas em conforto térmico, ou seja, o isolamento térmico da edificação demonstrou maior importância neste clima. Já o sistema com vidro reflexivo de 6 mm (E05) obteve a maior quantidade de horas de desconforto no inverno, devido às propriedades reflexivas deste vidro, que ao contrário dos demais, permite menores ganhos de calor pela radiação solar.

Apesar de não favorecer o ganho de calor no inverno, a utilização combinada de esquadrias com até 20% de área de piso, baixa transmitância térmica na envolvente e orientação solar adequada, permite a preservação do calor interno e solar. No verão, este vão possuem menor ganho de calor, contribuindo para o menor aumento das temperaturas máximas no interior da edificação.

Por fim, estes resultados corroboram os resultados dos demais estudos em regiões análogas às de Bento Gonçalves, como, por exemplo, os trabalhos de Filippín e Beascochea (2009), Santos (2010), Pouey (2011) e Graf (2011), apresentados nos itens 2.3.2.4 e 2.3.3 da revisão bibliográfica.

#### 4.1.5.2 Porto Alegre

Os resultados encontrados nas simulações da Edificação 1 (item 4.1.1.2) através do método de graus-hora complementam os resultados do método da NBR 15575 e Selo Procel, com pequenas diferenças no desempenho nos períodos frios do ano. Pelo método de desempenho da NBR 15575 todos os sistemas simulados apresentaram até o nível intermediário. Entretanto estes mesmos sistemas apresentaram aumento das horas de conforto térmico em até 93% das horas (parede de concreto pré-moldado e *drywall* com isolamento de EPS, P16/0,8). A maior quantidade de horas de desconforto foi encontrada nos meses frios do

ano. A Edificação 1 apresentou uma melhora de até 41% no desempenho térmico e aumento do nível de eficiência energética de B para A.

Os sistemas construtivos simulados na Edificação 2 (item 4.1.2.2) apresentaram um aumento do desempenho térmico, apresentando 35 alternativas com resultados acima de 85% das horas em conforto térmico, destas uma alternativa de cobertura, duas de esquadrias e as demais de paredes externas. Assim, houve um aumento de até 36% no desempenho térmico. Pelo método de desempenho da NBR 15575 todos os sistemas simulados apresentaram no inverno o nível mínimo e até o nível superior no verão. Os resultados do Selo Procel demonstram que com as modificações realizadas, o nível de eficiência energética passou de C para A.

Os resultados da simulação da Edificação 3 (item 4.1.3.2) pelo método de graus-hora apresentaram até 94% horas em conforto térmico. Estes sistemas obtiveram nível intermediário de desempenho térmico no inverno e superior no verão. Alguns sistemas apresentaram resultados abaixo de 10% das horas em desconforto, tais quais as paredes de concreto pré-moldado dupla com isolamento de lã de vidro ou câmara de ar (P08/0,8 e P14/0,8) e os sistemas de concreto pré-moldado e *drywall* com lã de vidro, EPS ou câmara de ar (P13, P15 e P16) em todas as absortâncias. Deste modo, houve aumento do desempenho térmico na edificação de até 45%. Pelo método do Selo Procel, a Edificação 3 mudou do nível B de eficiência para o nível A, demonstrando o aumento da eficiência energética da edificação com as mudanças realizadas.

A Edificação 4 (item 4.1.4.2) obteve, pelo método da NBR 15575, nível de desempenho no verão superior e intermediário no inverno. Dos sistemas analisados, 29 sistemas de parede externa apresentaram resultados acima de 85% das horas em conforto: paredes de blocos cerâmicos de 6 furos, de 2 furos e de 8 furos, de tijolos maciços de 22cm (P01/0,8, P03/0,8, P04/0,6, P04/0,8, P06/0,8), além das paredes duplas de tijolos maciços e de blocos cerâmicos de 6 furos, com isolamento térmico de lã de vidro, EPS ou câmara de ar (P07 ao P12). Das edificações analisadas, no clima de Porto Alegre, a Edificação 4 apresentou o menor aumento de desempenho térmico, 31%. O nível de eficiência térmica da edificação, pelo método do Selo Procel, passou de C para o nível A.

Pode-se inferir que as edificações em Porto Alegre apresentaram resultados 8% maiores de desempenho no sistema base e 8% menores de melhora da eficiência térmica das edificações, devido às características climáticas locais. Os resultados apresentados no método de Graus-hora, NBR 15575 e Selo Procel são análogos, indicando que o desconforto nos



períodos de frio é mais frequente que o desconforto pelo calor, apesar deste ser elevado (até 865 horas), principalmente se comparadas com o clima de Bento Gonçalves. Os resultados do Selo Procel evidenciam que o aumento no desempenho térmico foi suficiente para obter o nível A de eficiência térmica.

Como dito anteriormente, as diferenças entre os métodos da NBR 15575 e graus-hora ocorrem possivelmente devido ao sistema metodológico, já que um utiliza dias típicos de projeto e o outro, dados horários de um ano inteiro. Em todas as edificações analisadas muitos sistemas apresentam temperaturas internas máximas acima do limite de 29°C, contudo as temperaturas mínimas foram mais extremas em relação ao limite de 18°C. Apesar da maior quantidade de horas em desconforto térmico pelo calor, os melhores resultados encontrados foram dos sistemas construtivos com alta absorvância (0.8) e com o isolante térmico EPS.

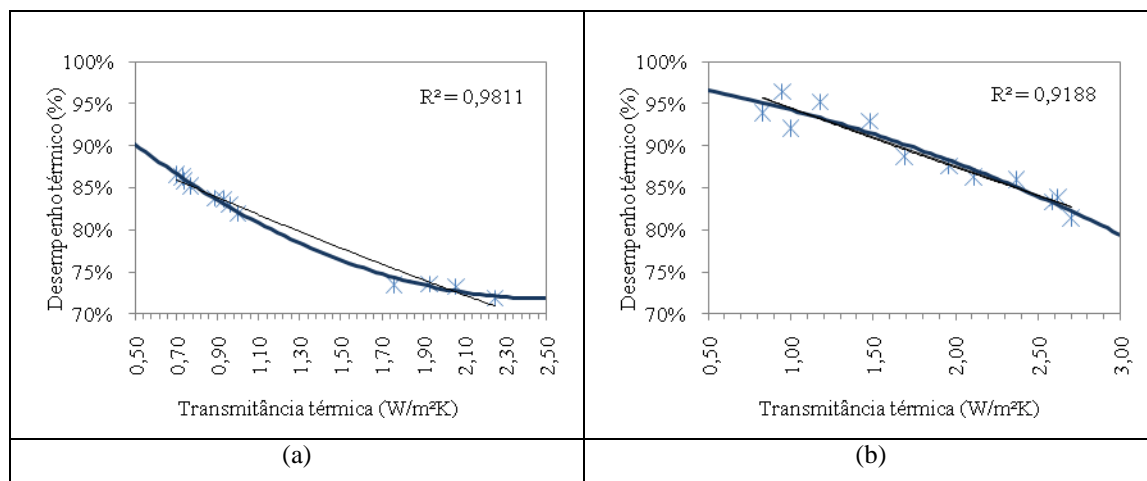
Os resultados obtidos confirmam, ainda, os obtidos pelo programa *Analysis Bio*, referente ao clima de Porto Alegre. Segundo a carta bioclimática Porto Alegre apresenta 51,6% das horas há desconforto térmico causado pelo frio, e em 25,9% das horas o desconforto térmico é causado pelo calor. Confirma, também, as estratégias a serem adotadas indicadas pela carta (alta inércia térmica, aquecimento solar passivo, sombreamento, ventilação cruzada) e comprovou-se também que, apesar do aumento do desempenho térmico e redução do consumo de energia elétrica para o condicionamento de ar (indicado pelo nível A em eficiência térmica), ainda há necessidade de aquecimento e resfriamento artificial nos ambientes das edificações.

Em relação às diferenças encontradas entre as tipologias verticais e horizontais, as Edificações 1 e 3 apresentaram um aumento do desempenho térmico menor que as Edificações 2 e 4. Assim como em Bento Gonçalves, provavelmente, em face à proximidade com o solo e a relação de área de paredes e cobertura da edificação horizontal, esta possui maior estabilidade da variação da temperatura de ar interno, já que o solo possui menor variação térmica. A área de paredes e cobertura também pode influir, já que a área de troca de calor através da envoltória da edificação com o ambiente externo é menor nas edificações horizontais do que em edificações verticais.

Assim como no clima de Bento Gonçalves, os sistemas de cobertura que apresentaram os melhores resultados possuem  $U \leq 1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Já os sistemas de paredes externas divergem dos de Bento Gonçalves, sendo  $U \leq 2,11 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $\phi \geq 6,0$  horas. De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que, com o aumento da massa térmica (e atraso térmico) e, portanto, com maior resistência térmica, há a melhora do desempenho

térmico da edificação, já que aumentam o amortecimento e o atraso térmico. Este sistema acumula e armazena quantidades de calor no seu interior (massa) e, posteriormente, direciona-os para superfície, suprimindo a demanda térmica da edificação.

Entretanto, isto ocasionou em um aumento do consumo de energia para a refrigeração, pois dificulta a perda de calor do ambiente. Assim, baixas transmitâncias térmicas propiciaram a redução das temperaturas internas máximas e o aumento das mínimas, durante o verão e o inverno. No entanto, ressalta-se que sua utilização nos períodos de verão deve ser associada à estratégias de dissipação de calor, como a ventilação cruzada.



**Figura 61 – Correlação entre graus-hora e transmitância térmica de (a) cobertura e (b) paredes externas.**

Verifica-se, ainda, que a absorvância 0.8 obteve o melhor desempenho térmico em ambos os métodos, já que incrementa o ganho de calor solar. Entretanto, em altas absorvâncias há o aumento do desconforto térmico pelo calor, verificado pelo aumento das temperaturas máximas e graus-hora de desconforto no verão, mesmo com o fechamento das venezianas quando a temperatura externa atinge os 29°C. Tal fato pode ser melhorado com uma promoção de sombreamento das esquadrias (*brise soleil*), ou com sombreamento em temperaturas mais baixas que a estipulada. Além da promoção de ventilação cruzada controlada na cobertura, permitindo o sombreamento e ventilação nos períodos quentes. Já que as vantagens para o inverno, com o aumento do desempenho térmico e das temperaturas mínimas, demonstrou ser benéfico.

A variação da área de esquadrias apresentou uma relação linear, entre o aumento de área e o desempenho térmico da edificação, ou seja, as esquadrias com maior relação entre área de piso e área de esquadrias obtiveram horas de conforto térmico a mais que o sistema base. As esquadrias que apresentaram o melhor desempenho foram as de maior área (25% de área de piso) e os sistemas de vidros duplos obtiveram maior quantidade de horas em conforto

térmico, já que aumenta a área de ganho de calor solar e ventilação. Pois propiciam uma redução das temperaturas máximas e um aumento das temperaturas mínimas no interior das edificações, quando com a utilização de recursos para diminuir as perdas por condução térmica através dos vãos envidraçados e com o uso de baixas transmitâncias térmicas na envolvente. Assim, o tipo de vidro também impactou no desempenho térmico das edificações, vidros reflexivos reduzem o ganho de calor solar e a transmitância, desta forma, o sistema de vidro reflexivo de 6 mm (E05) apresentou a maior quantidade de horas de desconforto no inverno e no verão.

Assim, a utilização de esquadrias com 25% da área de piso com vidros duplos, contribuiu para o aumento das temperaturas mínimas, com o maior ganho de calor solar no inverno. Sendo necessário associar a orientação solar adequada e baixa transmitância da envoltória da edificação, reduzindo as perdas. Além de contribuir para a melhor ventilação dos ambientes no verão, sendo, para isto, imprescindível o estudo da orientação solar e de bloqueadores solares quando em altas temperaturas.

Estes resultados se alinham aos resultados de estudos em Porto Alegre e região metropolitana, como os trabalhos de Becker (1993), Morello e Sattler (2004), Sattler (2007) e Grigoletti e Sattler (2012), entre outros, apresentados nos itens 2.3.2.4 e 2.3.3 da revisão bibliográfica.

## **4.2 ANÁLISE DOS CUSTOS NO CICLO DE VIDA**

### **4.2.1 Edificação 1**

#### **4.2.1.1 Bento Gonçalves**

Na Figura 62, Figura 63 e Figura 64 apresentam-se os resultados da análise do ciclo de vida dos sistemas construtivos simulados. Na Tabela 47 apresenta-se uma síntese desta análise, com os melhores resultados entre todos os sistemas construtivos simulados.

O custo de projeto aumenta devido à necessidade de maior tempo de trabalho para projetar uma edificação com menor gasto operacional (estudo das técnicas, simulações e análise dos resultados), tendo-se acrescentado 160h a mais de trabalho para 5 alternativas de projeto, ou seja, houve um acréscimo de 6% no custo de projeto.

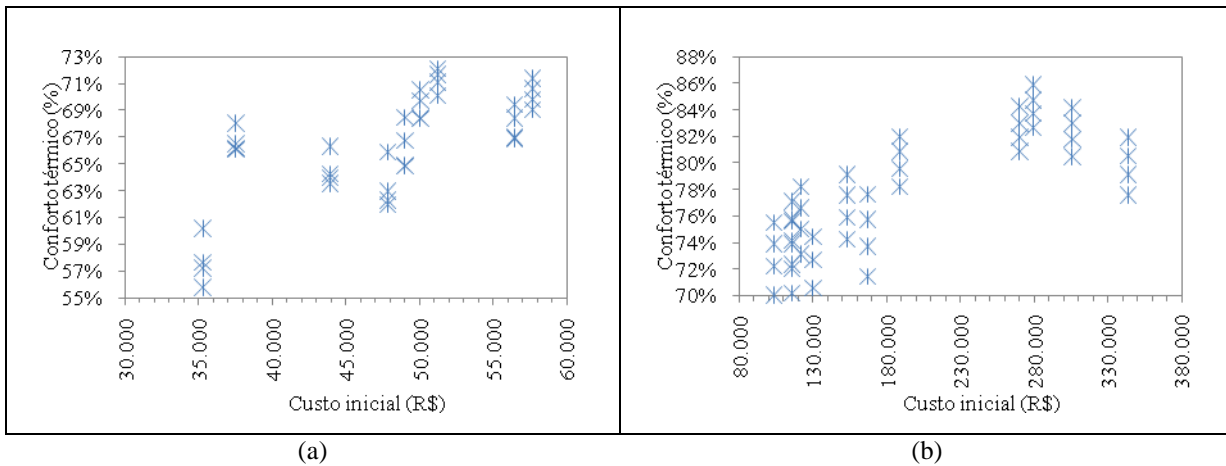


Figura 62 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas

Conforme Figura 62, com o aumento do custo do material construtivo há o aumento do desempenho térmico, devido ao maior custo de material que sistemas com maior massa térmica, como os utilizados neste trabalho possuem. Percebe-se que as paredes externas apresentaram um maior aumento do desempenho e do custo quando comparadas com os sistemas de cobertura.

Os sistemas de cobertura apresentaram menor custo de investimento que as paredes externas, contudo possuem custos de ocupação e manutenção semelhantes, mesmo com a utilização de sistemas construtivos diversos (Figura 63 e Figura 62a). O sistema base (F01) possui o menor custo construtivo, pois há somente a necessidade de utilização do isolamento térmico. Desta forma é o sistema que possui o menor custo de investimento e, portanto, menor período de retorno. Igualmente ocorre com o sistema C03, que com a utilização do isolante térmico EPS possibilitou as maiores economias de energia elétrica e o menor custo de investimento. Assim, este sistema apresentou períodos de retorno dentro dos 50 anos estipulados e as maiores relações custo benefício (Tabela 47).

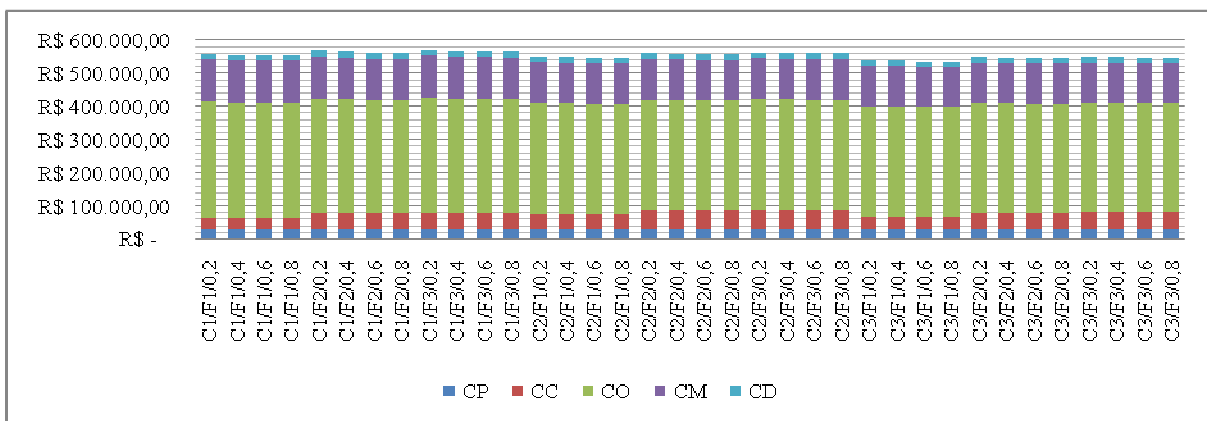
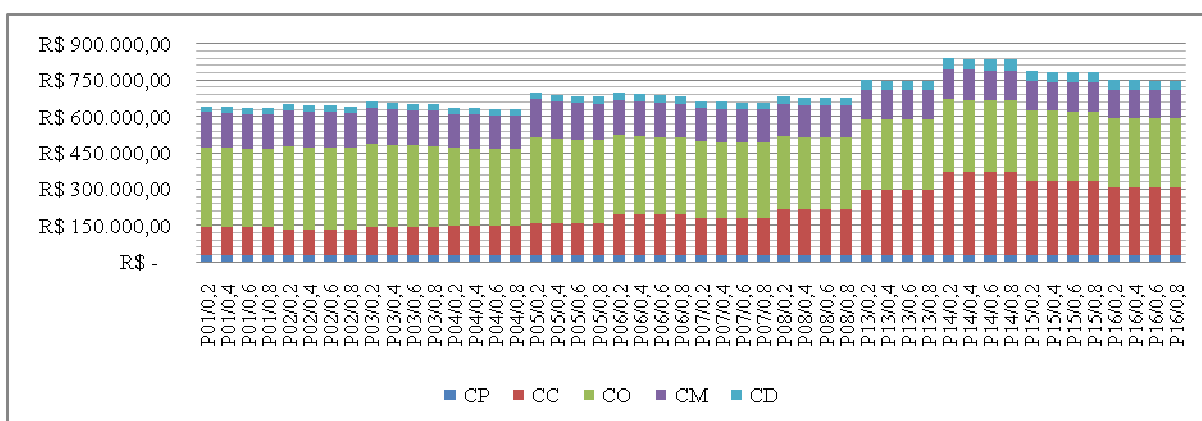


Figura 63 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 1

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Já nas alternativas de paredes externas (Figura 64 e Figura 62b) o CC é mais significativo e apesar da redução do CO, este é pequeno quando comparado com o custo de investimento. Quase todos os sistemas de paredes duplas não apresentaram relação de custo benefício e o período de retorno é maior que 50 anos. Já o custo de manutenção possui significativa mudança principalmente nos sistemas construtivos pré-moldados (P13 a P16). O sistema de parede simples P04 apresentou o menor custo de investimento, sendo o único sistema a apresentar período de retorno dentro do tempo estipulado. Este sistema também apresentou a maior B/C dos sistemas de paredes externas (Tabela 47).



**Figura 64 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 1**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

**Tabela 47 – Síntese ACCV– Edificação 1 – Bento Gonçalves**

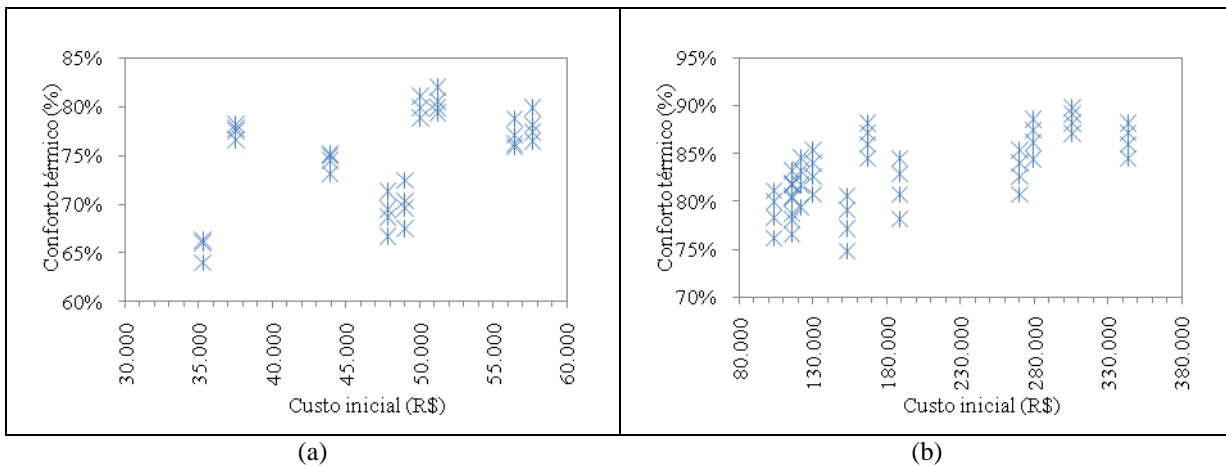
Sistema Construtivo	Resultados					
	C01/F02		C02/F01		C02/F02	
$\alpha$	B/C [-]	PbD [anos]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]
0,2	0,44	-	2,23	9	1,09	-
0,4	0,80	-	2,35	8	1,16	-
0,6	1,02	-	2,55	8	1,20	-
0,8	1,04	-	2,57	6	1,28	-
$\alpha$	C02/F03		C03/F01		C03/F02	
0,2	1,00	-	11,04	3	1,89	13
0,4	1,05	-	11,32	2	1,96	12
0,6	1,08	-	12,09	2	2,01	11
0,8	1,09	-	12,17	2	2,04	11
$\alpha$	C03/F03		P04		P09	
0,2	1,75	17	2,02	13	1,13	-
0,4	1,81	16	2,45	9	1,15	-
0,6	1,86	15	2,98	7	1,16	-
0,8	1,89	14	3,17	6	1,17	-

Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F01, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

#### 4.2.1.2 Porto Alegre

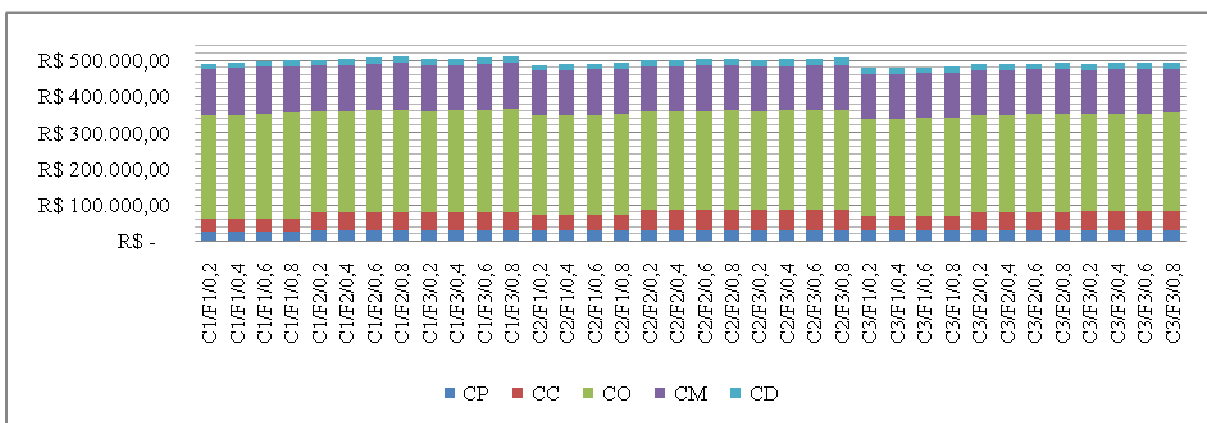
Os resultados da ACCV dos sistemas construtivos simulados na Edificação 1, no clima de Porto Alegre, são apresentados na Figura 65, Figura 66 e Figura 67. A síntese desta

análise, com os alguns dos resultados dos sistemas construtivos simulados, é disposta na Tabela 48. Observa-se a redução do custo operacional devido ao aumento do desempenho térmico através do aumento da absorvância e da massa térmica, mas esta redução é pequena se comparada com os resultados de Bento Gonçalves. O custo de projeto utilizado foi o mesmo que na Edificação 1, em BG, e o custo de manutenção não possui significativa mudança, devido aos sistemas construtivos semelhantes utilizados nesta pesquisa.



**Figura 65 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas**

Na Figura 65 apresenta-se a relação entre o custo e o desempenho térmico da edificação dos sistemas construtivos de cobertura e paredes externas. Assim como ocorre na em Bento Gonçalves, com a utilização de materiais de maior massa, e maior custo, há o aumento do desempenho térmico. Contudo, a relação é mais proporcional em Porto Alegre.

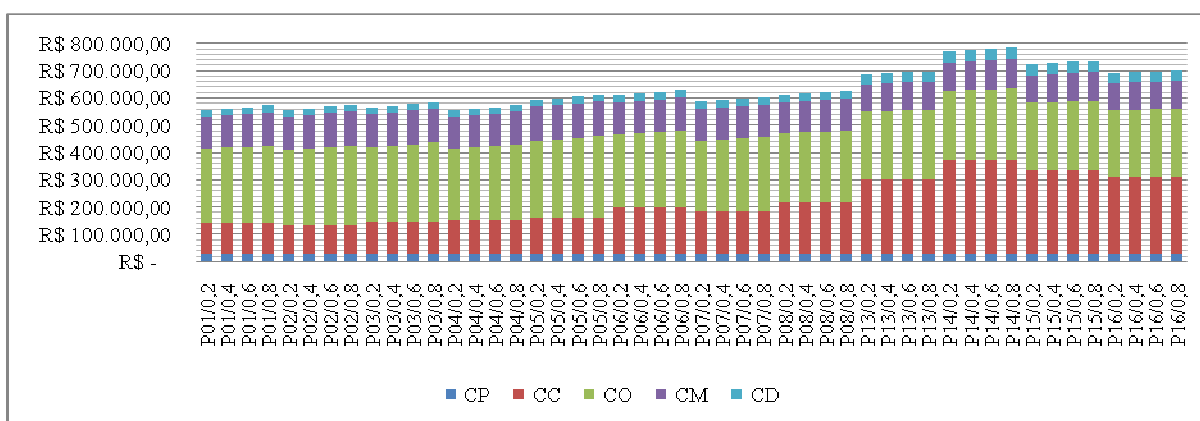


**Figura 66 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 1**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Conforme Figura 66 e Figura 65a os sistemas construtivos de cobertura simulados apresentaram custos semelhantes e menor custo de investimento que as paredes externas. Devido ao menor investimento necessário para a melhoria do desempenho térmico da

edificação, o sistema base (F01) apresentou o menor custo construtivo e o único a apresentar período de retorno menor que 50 anos, com a utilização de isolante térmico de lã de vidro (C02) e EPS (C03). Apesar do custo de operação ter sido menor nos sistemas F02 e F03, estes necessitam de mudança de laje e a utilização de isolamento térmico, o que aumenta o custo de construção, não apresentando período de retorno menor que 50 anos. Parte dos sistemas de cobertura obtiveram relação custo benefício (B/C) acima de 1, o que demonstra que estes sistemas são viáveis economicamente (Tabela 48).



**Figura 67 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 1**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Segundo a Figura 67 e Figura 65b as alternativas de paredes externas possuem o custo de construção maior e o custo operacional menor que as coberturas, contudo esta diferença é pequena se comparada com a de investimento. Nenhum dos sistemas simulados apresentou período de retorno menor que o ciclo de vida da edificação em estudo. Entretanto, apresentam, em sua maioria, B/C acima de 0, ou seja, estes sistemas possuem pequena viabilidade econômica. A parede simples P04 apresentou a maior economia e o menor custo de investimento e, desta forma, a maior B/C dos sistemas de paredes externas (Tabela 48).

**Tabela 48 – Síntese ACCV– Edificação 1 – Porto Alegre**

Sistema Constr.	Resultados									
	C02/F01		C03/F01		C03/F02		C03/F03		P04	
$\alpha$	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]
0,2	1,76	20	7,98	2	1,40	-	1,25	-	1,05	-
0,4	1,46	35	7,54	3	1,35	-	1,11	-	0,09	-
0,6	1,34	-	7,05	3	1,19	-	1,05	-	-0,74	-
0,8	1,05	-	6,13	3	1,12	-	0,98	-	-1,78	-

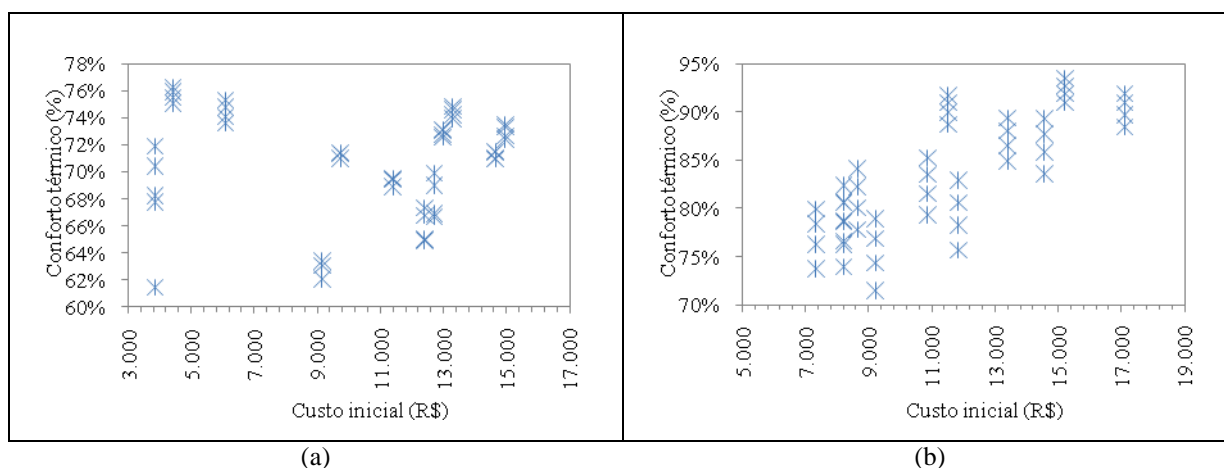
Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F01, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

## 4.2.2 Edificação 2

### 4.2.2.1 Bento Gonçalves

Apresentam-se na Figura 68, Figura 69 e Figura 70 os resultados da análise do custo no ciclo de vida dos sistemas construtivos simulados, e na Tabela 49, uma síntese da ACCV da Edificação 2. Com o aumento do desempenho houve significativa redução do gasto elétrico da edificação e aumento do custo construtivo. O sistema F4 que, por ser de PVC, possui custo menor que as demais alternativas, mas um desempenho térmico também mais baixo (Figura 68).

O custo de projeto aumenta devido à necessidade de maior tempo de trabalho para projetar uma edificação com menor gasto operacional, tendo-se acrescentado 120h a mais de trabalho, em vista da maior quantidade de tempo requerida para o estudo das técnicas, simulações e análise dos resultados para 5 alternativas de projeto. Assim, o acréscimo no custo de projeto foi de 20%.



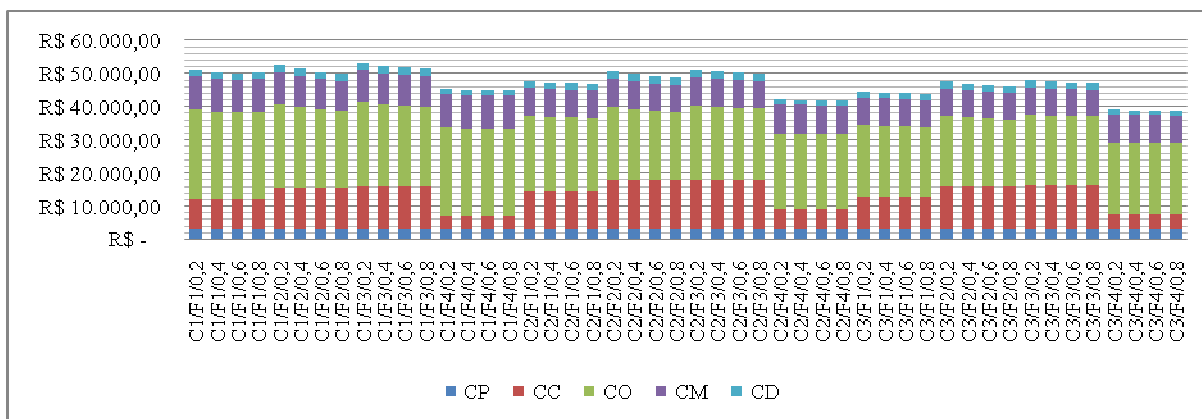
**Figura 68 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas**

Na Figura 69 e Figura 68a apresentam-se os sistemas de cobertura. A economia de energia elétrica foi maior nos sistemas com o isolante térmico EPS (C03), seguido pelo isolante térmico de lã de vidro (C02). O EPS tem um custo de construção baixo, apresentando um período de retorno de 2 anos do investimento (Tabela 49). Contudo a lã de vidro possui um custo de construção maior e, portanto, o retorno do investimento ocorre em até 9 anos. Os custos de ocupação e manutenção são semelhantes já que os sistemas construtivos são parecidos.

O sistema base (F04) possui o menor custo construtivo, pois há somente a necessidade de adição do isolamento térmico, sendo o sistema que possui o menor custo de investimento e, portanto, menor período de retorno (Figura 69 e Figura 68a). Os demais

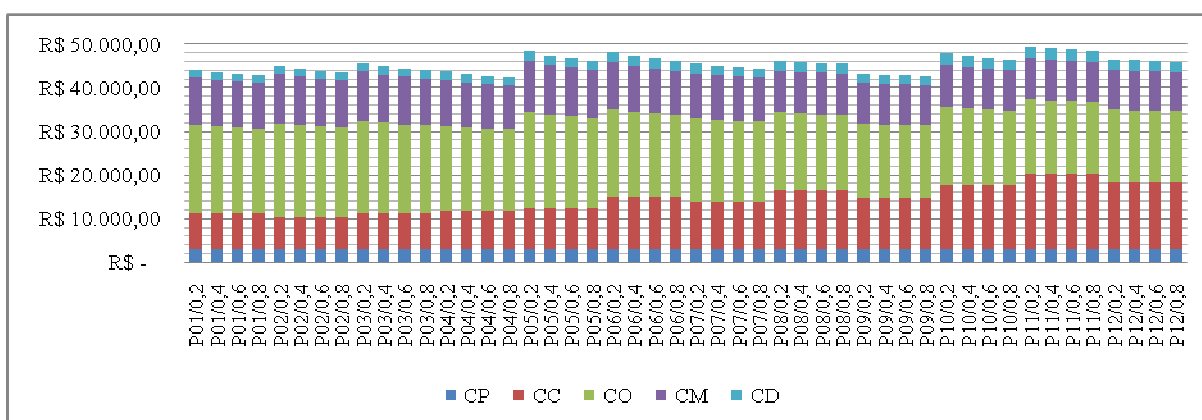


sistemas construtivos simulados não apresentam período de retorno menor que os 50 anos do ciclo de vida, entretanto possuem B/C maior que 1, sendo economicamente viáveis, apesar do longo período para o retorno do investimento (Tabela 49).



**Figura 69 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 2**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.



**Figura 70 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 2**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Nos sistemas construtivos de paredes externas (Figura 70 e Figura 68b) o custo de construção e de manutenção é mais significativo e o custo operacional pequeno quando comparado com o custo de investimento e a sua relação com o desempenho térmico é crescente. Apenas o sistema P04 e P09/0,8 apresentaram período de retorno dentro do limite estabelecido, tendo apresentado a maior economia e o menor custo de investimento. Assim, somente um sistema construtivo de paredes duplas obteve bom desempenho econômico. Entretanto, quase todos os sistemas apresentaram B/C acima de 0, apesar do período de retorno maior que o ciclo de vida.

Tabela 49 – Síntese ACCV– Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema Constr.	Resultados									
	C02/F04		C03/F01		C03/F04		P04		P09	
$\alpha$	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]	B/C	PbD [anos]
0,2	2,35	9	1,20	-	11,60	2	2,09	12	1,35	-
0,4	2,46	9	1,23	-	11,96	2	3,41	5	1,43	-
0,6	2,49	9	1,27	-	12,08	2	4,20	4	1,46	-
0,8	2,50	8	1,31	-	12,11	2	4,84	3	1,52	35

Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F04, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

#### 4.2.2.2 Porto Alegre

Os resultados da ACCV dos sistemas construtivos simulados são apresentados na Figura 71, Figura 72 e Figura 73. A síntese desta análise, com os melhores resultados entre os sistemas construtivos simulados na Edificação 2, no clima de Porto Alegre, é disposta na Tabela 50. Houve a redução do custo operacional e aumento do inicial com a melhora do desempenho térmico, contudo a economia operacional foi menor que em Bento Gonçalves. O custo de projeto utilizado foi o mesmo que na Edificação 2, em BG, e o custo de manutenção não possui significativa alteração, devido aos sistemas construtivos semelhantes.

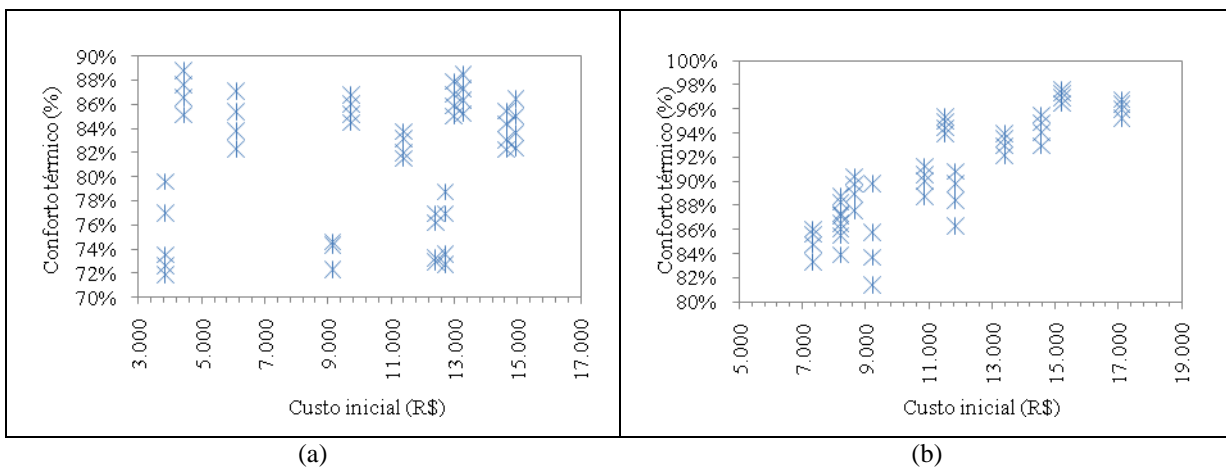
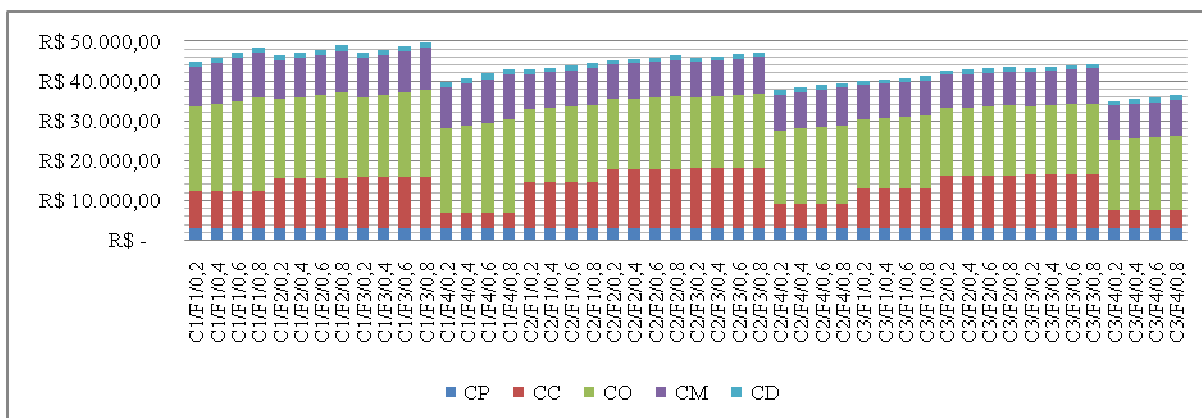


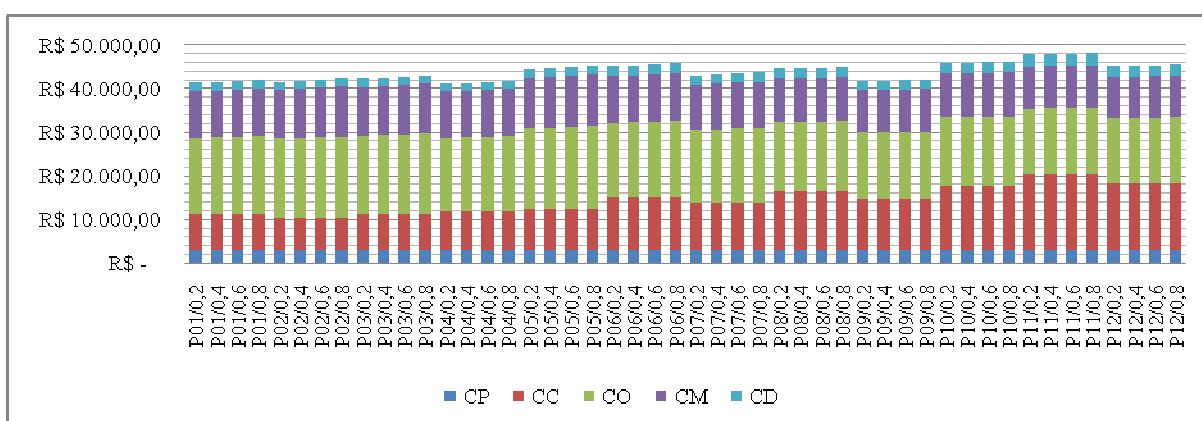
Figura 71 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas

Na Figura 72 e Figura 71a apresentam-se os resultados dos sistemas construtivos de cobertura simulados. As coberturas apresentaram custos semelhantes, com aumento gradual do custo conforme o tipo de laje utilizada. O sistema base (F04) apresentou o menor custo construtivo e foi o único a apresentar um período de retorno menor que 50 anos, com a utilização de isolante térmico de lã de vidro (C02) e EPS (C03). Isto ocorre devido ao menor investimento necessário para a melhoria do desempenho térmico da edificação. Apesar do custo de operação ter sido menor nos demais sistemas, o custo de construção foi maior e não apresentam retorno em menos que 50 anos, pois os custos foram altos.



**Figura 72 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 2**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.



**Figura 73 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 2**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Na Figura 67 e Figura 71b apresentam-se as alternativas de paredes externas. Estes sistemas possuem o custo de construção maior e o custo operacional menor que os sistemas de cobertura. Apenas um sistema (P04) apresentou período de retorno menor que o ciclo de vida em estudo da edificação, devido ao menor custo de investimento e redução do gasto elétrico compatível com o custo de construção, desta forma, a maior B/C dos sistemas de paredes externas. Os demais sistemas apresentam, em sua maioria, B/C abaixo de 1, demonstrando que não há viabilidade econômica.

**Tabela 50 – Síntese ACCV– Edificação 2 – Porto Alegre**

Sistema Construtivo	Resultados					
	C02/F04		C03/F04		P04	
$\alpha$	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]
0,2	1,78	-	8,82	2	1,36	13
0,4	1,53	-	8,00	3	1,19	9
0,6	1,31	18	7,32	3	0,66	7
0,8	1,04	29	6,47	3	0,02	6

Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F04, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

### 4.2.3 Edificação 3

#### 4.2.3.1 Bento Gonçalves

Apresentam-se na Figura 74, Figura 75 e Figura 76 os resultados da análise do ciclo de vida dos sistemas construtivos simulados. Na Tabela 51 apresenta-se uma síntese da ACCV, com os melhores resultados entre os sistemas construtivos simulados. O custo de projeto aumenta devido à necessidade de maior tempo de trabalho para projetar uma edificação com menor gasto operacional, tendo-se acrescentado a mesma quantidade de horas que a Edificação 1 (160h), pois ambas possuem o mesmo modo e tempo projetual.

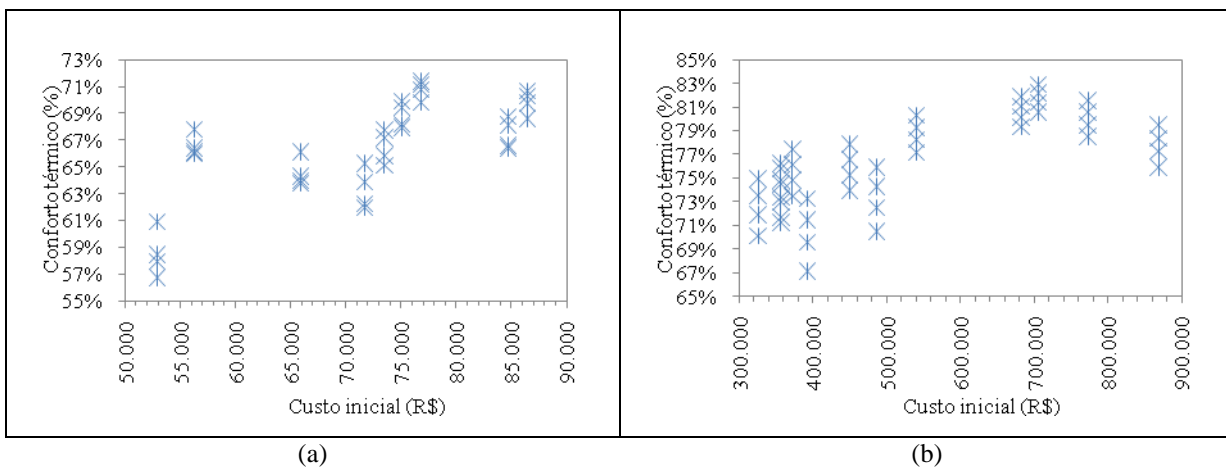


Figura 74 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas

Na Figura 74 é apresentado a relação custo x desempenho térmico da edificação 3. Pode-se observar um aumento significativo o custo de construção para a promoção do desempenho térmico da edificação, principalmente nas paredes externas, devido à maior área por esta utilizada. Desta forma, com o aumento do desempenho térmico da edificação há o aumento do custo do material construtivo.

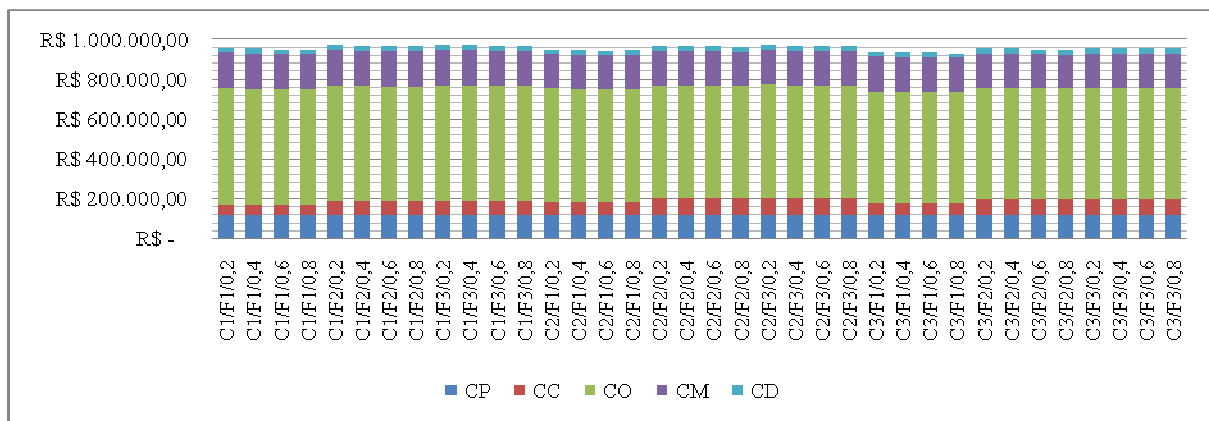
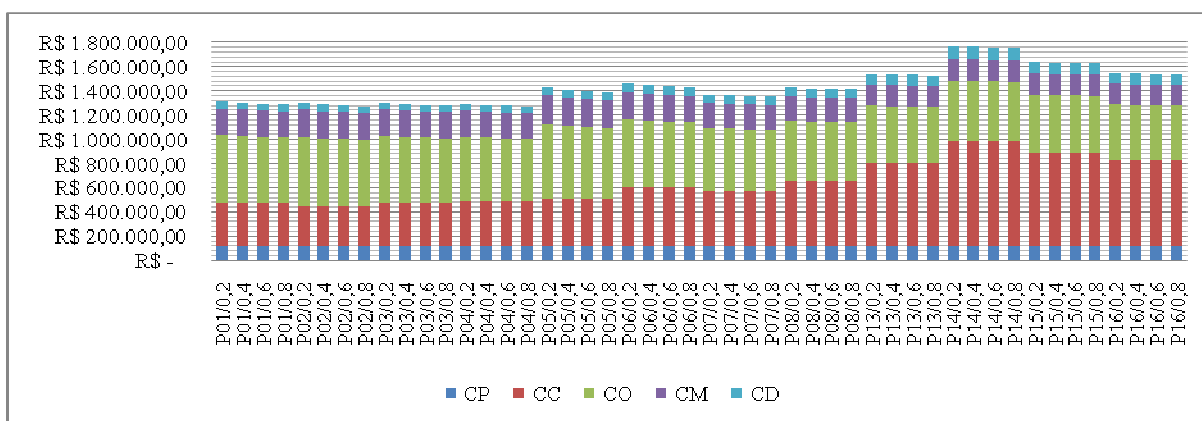


Figura 75 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 3

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Os resultados dos sistemas construtivos de cobertura são apresentados na Figura 75 e Figura 74a. Estes sistemas apresentaram um menor custo de investimento que as paredes externas, contudo possuem custos de ocupação altos e custos de manutenção semelhantes. O sistema base (F01) possui o menor custo construtivo, pois há somente necessidade de acréscimo do isolamento térmico. Desta forma é o sistema que possui o menor custo de investimento e, portanto, menor período de retorno (F01).



**Figura 76 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 3**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

O mesmo ocorre com a utilização do isolante térmico EPS (C03), que possibilitou as maiores economias de energia elétrica e menor custo de investimento, apresentando períodos de retorno dentro dos 50 anos estipulados e as maiores relações custo benefício (Tabela 51). Além destes, na Edificação 3 o sistema C03/F02 também apresenta período de retorno dentro do ciclo de vida utilizado e B/C acima dos demais sistemas, ocasionado principalmente pelo alto impacto deste sistema no custo operacional.

**Tabela 51 – Síntese ACCV– Edificação 3 – Bento Gonçalves**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	C02/F01		C03/F01		C03/F02	
$\alpha$	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]
0,2	1,65	16	7,61	2	1,30	30
0,4	1,76	13	8,50	2	1,37	24
0,6	2,18	9	8,77	2	1,41	21
0,8	1,88	11	8,91	1	1,45	-
$\alpha$	C03/F03		P04		P09	
0,2	1,18	-	2,30	9	0,94	-
0,4	1,23	-	2,84	7	0,96	-
0,6	1,27	-	3,26	6	0,99	-
0,8	1,30	-	3,48	5	1,00	-

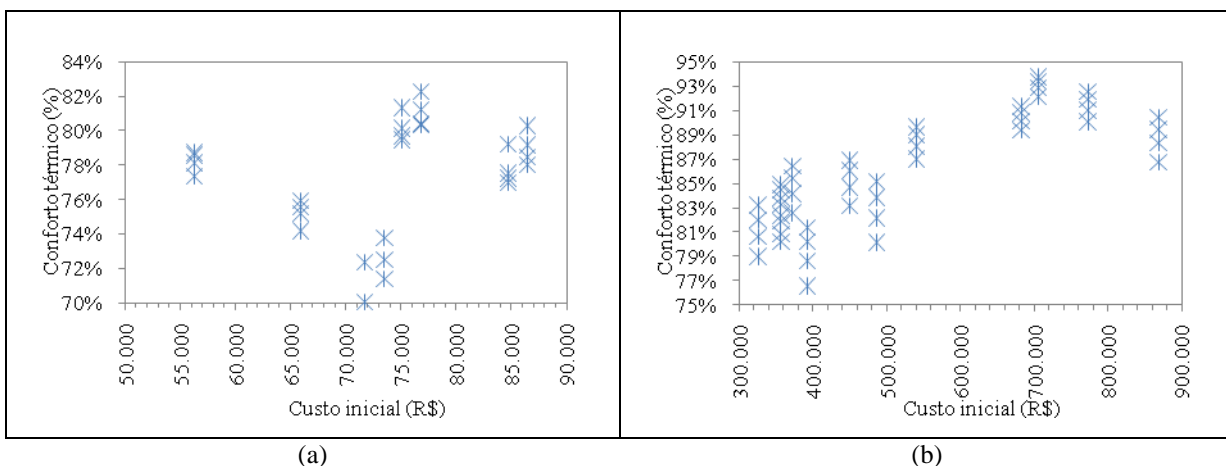
Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F01, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

Já nas alternativas de paredes externas (Figura 76 e Figura 74b) o custo de construção foi mais significativo que na cobertura, principalmente devido à área por esta ocupada. Apesar de o custo operacional ser menor, este é pequeno comparado com o de ocupação, não possibilitando o retorno do investimento em menos de 50 anos. Já o custo de manutenção não possui significativa mudança devido à similaridade dos sistemas construtivos. Apenas uma alternativa (P04) apresentou a economia compatível com o custo de investimento, sendo a única a apresentar período de retorno dentro do tempo estipulado de 50 anos e ter a maior B/C dos sistemas de paredes externas (Tabela 51).

#### 4.2.3.2 Porto Alegre

Os resultados da ACCV dos sistemas construtivos simulados na Edificação 3 são apresentados na Figura 77, Figura 78 e Figura 79. A síntese desta análise está disposta na Tabela 52, com os melhores resultados dentre todos os sistemas construtivos simulados. O custo de projeto utilizado foi o mesmo que na Edificação 3, em BG, e o custo de manutenção não possui significativa mudança, devido aos sistemas construtivos serem semelhantes.

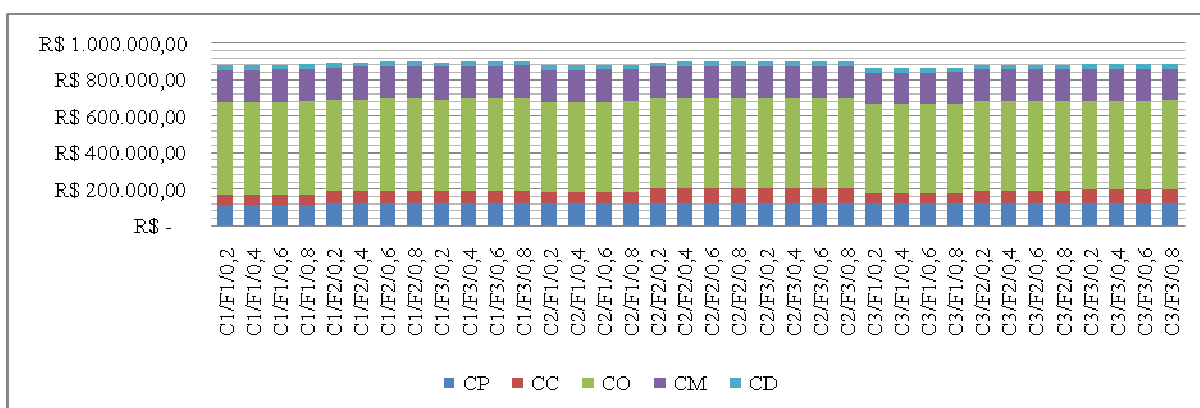
Observa-se uma pequena redução do custo operacional devido ao aumento do desempenho térmico, mas esta redução é menor que em Bento Gonçalves. A relação entre o custo inicial dos sistemas construtivos de cobertura e paredes externas e o desempenho térmico da edificação, é crescente. Assim como ocorre na edificação 3 em Bento Gonçalves, a utilização de materiais de maior massa aumenta o custo de construção.



**Figura 77 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas**

De acordo com a Figura 78 e Figura 77a os sistemas construtivos de cobertura simulados apresentaram custos construtivos e operacionais parecidos, devido ao menor investimento necessário nas coberturas para a melhoria do desempenho térmico da edificação. O sistema base (F01) apresentou o menor custo construtivo e o único a apresentar período de

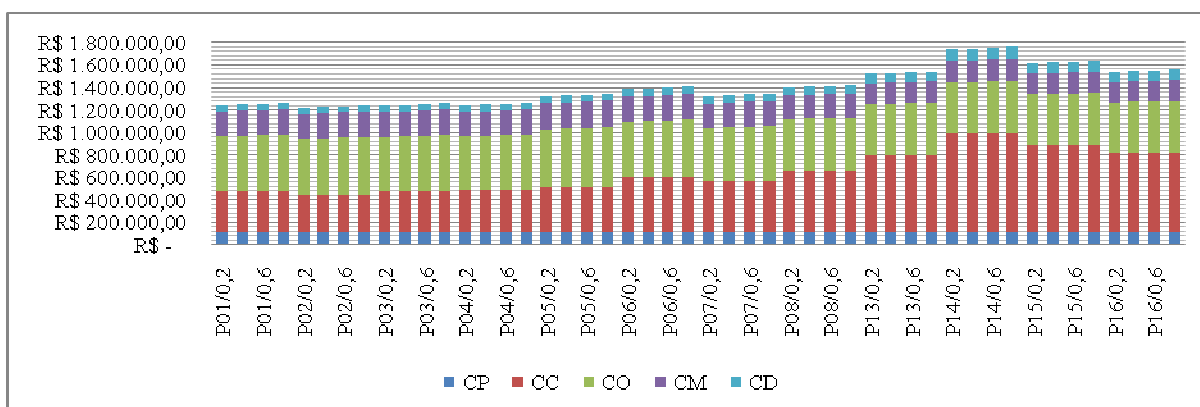
retorno menor que 50 anos, com a utilização de isolante térmico de EPS (C03) (Tabela 52). Apesar do custo de operação ter sido menor nos sistemas F02 e F03 do que no sistema F01, estes necessitam de maior investimento e não apresentam período de retorno menor que o estipulado. Apenas dois sistemas de cobertura apresentam B/C acima de 1, o que demonstra que estes sistemas são viáveis economicamente, apesar do longo período de retorno.



**Figura 78 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 3**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Segundo a Figura 79 e Figura 77b os sistemas construtivos de paredes externas possuem o custo de construção maior e o custo operacional menor quando comparadas com o sistema de coberturas. O maior custo de construção e de redução do gasto em energia elétrica ocorre nos sistemas de paredes duplas, devido a maior massa térmica destas alternativas. Entretanto, mesmo os sistemas de paredes simples apresentaram custo de investimento elevado para amortecimento com a economia do consumo de energia elétrica. Destes sistemas, as alternativas de pré-moldados foram os que apresentaram o maior custo inicial. Poucos sistemas apresentaram custo benefício e apenas uma alternativa apresentou período de retorno menor que o ciclo de vida em estudo da edificação (Tabela 52).



**Figura 79 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 3**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Tabela 52 – Síntese ACCV– Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	C02/F01		C03/F01		P04	
$\alpha$	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]
0,2	1,12	-	5,64	3	1,17	-
0,4	1,09	-	5,56	3	0,72	-
0,6	1,02	-	5,48	4	0,13	-
0,8	0,93	-	4,73	3	-0,39	-

Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F01, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

#### 4.2.4 Edificação 4

##### 4.2.4.1 Bento Gonçalves

Apresentam-se os resultados e uma síntese da ACCV dos sistemas construtivos simulados na Figura 80, Figura 81 e Figura 82 e na Tabela 53. O custo de projeto aumenta devido à necessidade de maior tempo de trabalho, tendo-se acrescentado a mesma quantidade de horas que na Edificação 2 (120 horas), devido a semelhança dos projetos.

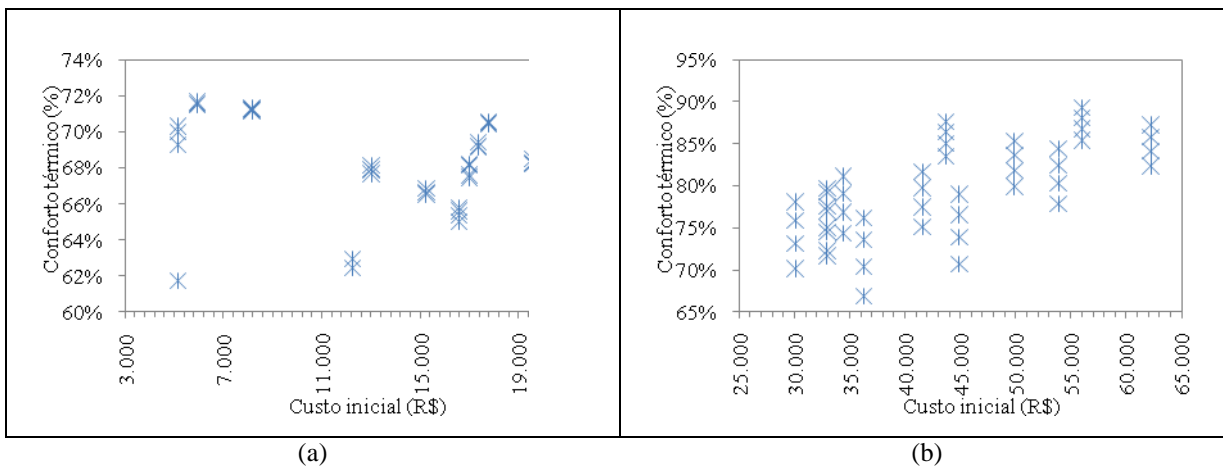


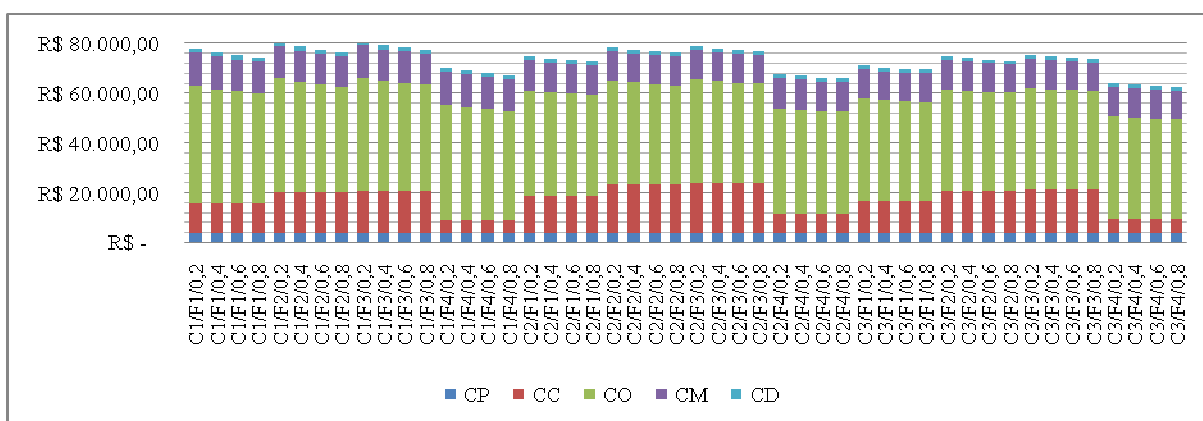
Figura 80 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas

Apresenta-se na Figura 80 e Figura 81 os resultados dos sistemas construtivos de cobertura. Com a utilização do isolante térmico EPS (C03) houve uma redução no gasto de energia elétrica, seguido pelo isolante térmico de lã de vidro. Tendo o EPS um custo de investimento baixo, este apresentou um período de retorno de 2 anos. Já a lã de vidro possui um custo de investimento maior e um período de retorno igualmente maior, de 6 a 12 anos. O sistema base (F04) possui o menor custo de investimento, pois há somente a necessidade de utilização do isolamento térmico. Os demais sistemas construtivos simulados não apresentam período de retorno menor que os 50 anos do ciclo de vida e B/C maior que 1.

Nos sistemas construtivos de paredes externas (Figura 80 e Figura 82) os custos são mais significativos. A economia no custo operacional é alta, assim como o custo de investimento. Destes sistemas, apenas a parede simples P04 apresentou período de retorno

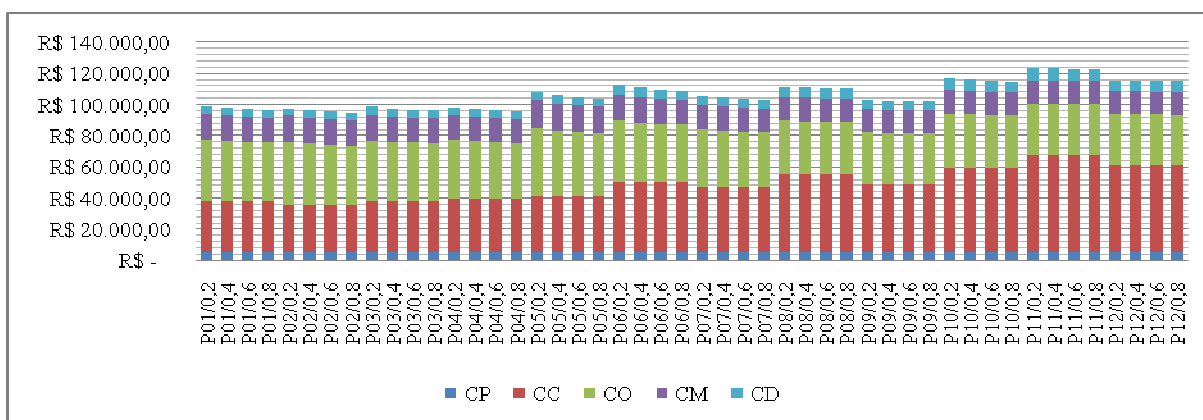


dentro do limite estabelecido, de 6 a 20 anos de retorno do investimento, dependendo da absorvência. Entretanto, quase todas as alternativas apresentaram B/C acima de 0, apesar do período de retorno maior que o ciclo de vida da edificação. Por fim, apesar dos sistemas de paredes duplas apresentarem menor gasto operacional, o alto custo construtivo torna o investimento pouco viável economicamente.



**Figura 81 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 4**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.



**Figura 82 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 4**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

**Tabela 53 – Síntese ACCV– Edificação 4 – Bento Gonçalves**

Sistema Construtivo	Resultados							
	C03/F01		C02/F04		C03/F04		P04	
	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]
$\alpha$								
0,2	0,90	-	1,85	12	9,12	2	1,54	20
0,4	0,98	-	2,12	10	9,86	2	2,24	10
0,6	1,05	-	2,32	9	10,51	2	2,83	7
0,8	1,09	-	2,44	6	10,85	2	3,21	6

Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F04, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

4.2.4.2 Porto Alegre

Os resultados da ACCV dos sistemas construtivos simulados são apresentados na Figura 83, Figura 84 e Figura 85, e na Tabela 54 uma síntese desta análise. Assim como em outros estudos desenvolvidos neste trabalho, o custo de projeto utilizado foi o mesmo que na Edificação 4, em Bento Gonçalves, e o custo de manutenção não possui significativa alteração, devido a similaridade entre os sistemas construtivos analisados.

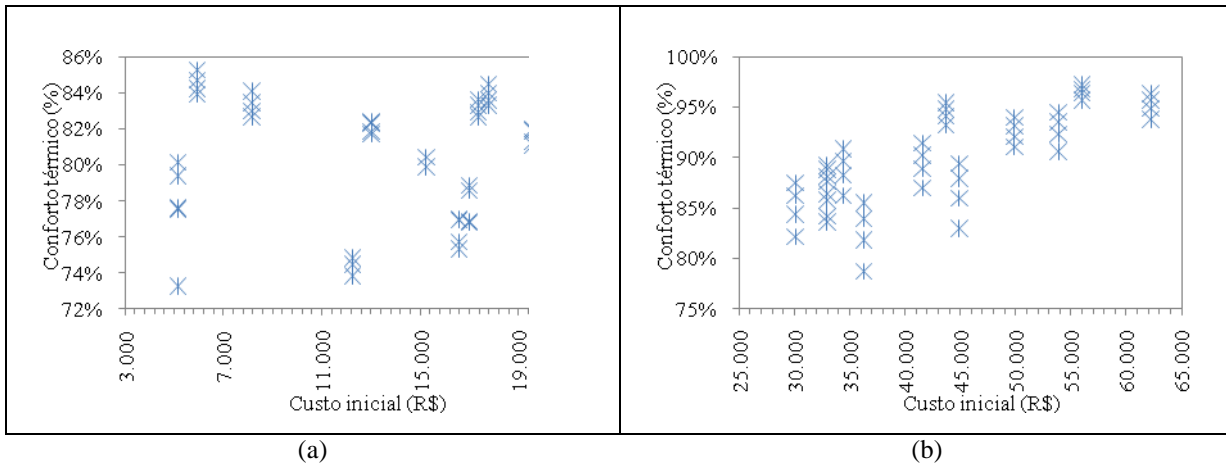


Figura 83 – Relação custo x desempenho térmico: (a) cobertura, e (b) paredes externas

Conforme Figura 84 e Figura 83a as alternativas de coberturas apresentaram aumento gradual do custo e do desempenho térmico conforme o tipo de laje utilizada. O sistema base (F04) apresentou o menor custo construtivo e foi o único a apresentar um período de retorno menor que 50 anos, tanto com a utilização de isolante térmico de lã de vidro (C02) quanto de EPS (C03) (Tabela 54). Apesar do custo de operação ter sido menor nos demais sistemas, o custo de construção foi maior, assim não apresentam período de retorno menor que 50 anos. A maior parte dos sistemas de cobertura apresentam B/C abaixo de 1, demonstrando que estes sistemas não possuem viabilidade econômica.

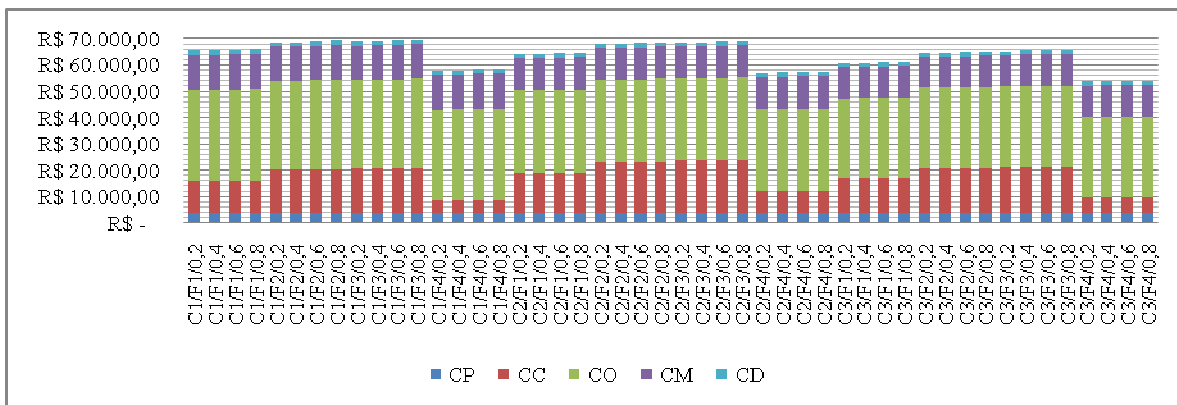
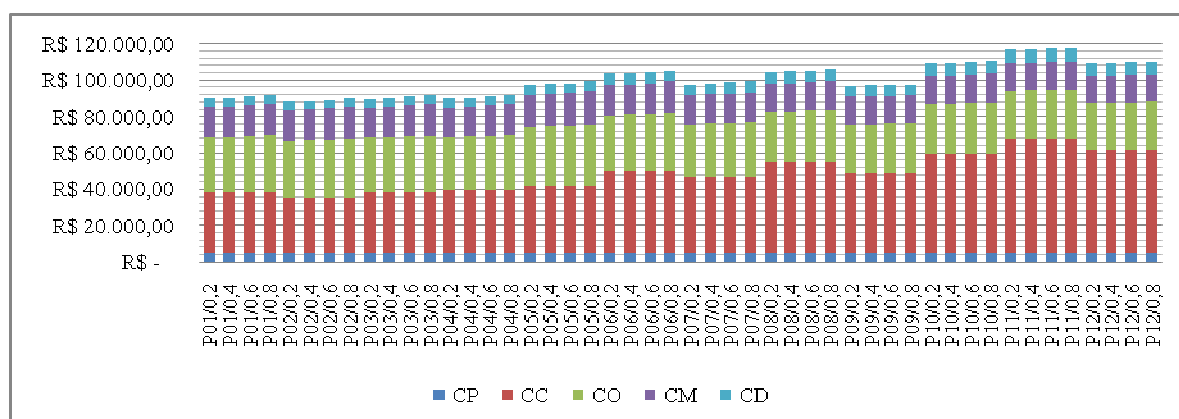


Figura 84 – ACCV – Investimento cobertura – Edificação 4

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.



**Figura 85 – ACCV – Investimento paredes externas – Edificação 4**

CP: custo projetual; CC: custo construção; CO: custo operacional; CM: custo manutenção; CD: custo demolição.

Na Figura 85 e Figura 83b apresentam-se os resultados dos sistemas construtivos de paredes externas. Estes sistemas possuem o custo de construção maior que o de cobertura e custo operacional menor. Nenhum dos sistemas estudados apresentou período de retorno menor que o ciclo de vida em estudo da edificação, pois o custo de investimento é maior que a economia energética. Apenas a alternativa P04 apresenta B/C acima de 1, demonstrando pouca viabilidade econômica, apesar do longo período de retorno.

**Tabela 54 – Síntese ACCV– Edificação 4 – Porto Alegre**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	C02/F04		C03/F04		P04	
	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]	B/C [-]	PbD [a]
0,2	1,28	8	6,27	2	1,17	-
0,4	1,24	8	6,13	2	0,89	-
0,6	1,20	8	5,99	2	0,55	-
0,8	1,13	7	5,85	2	0,07	-

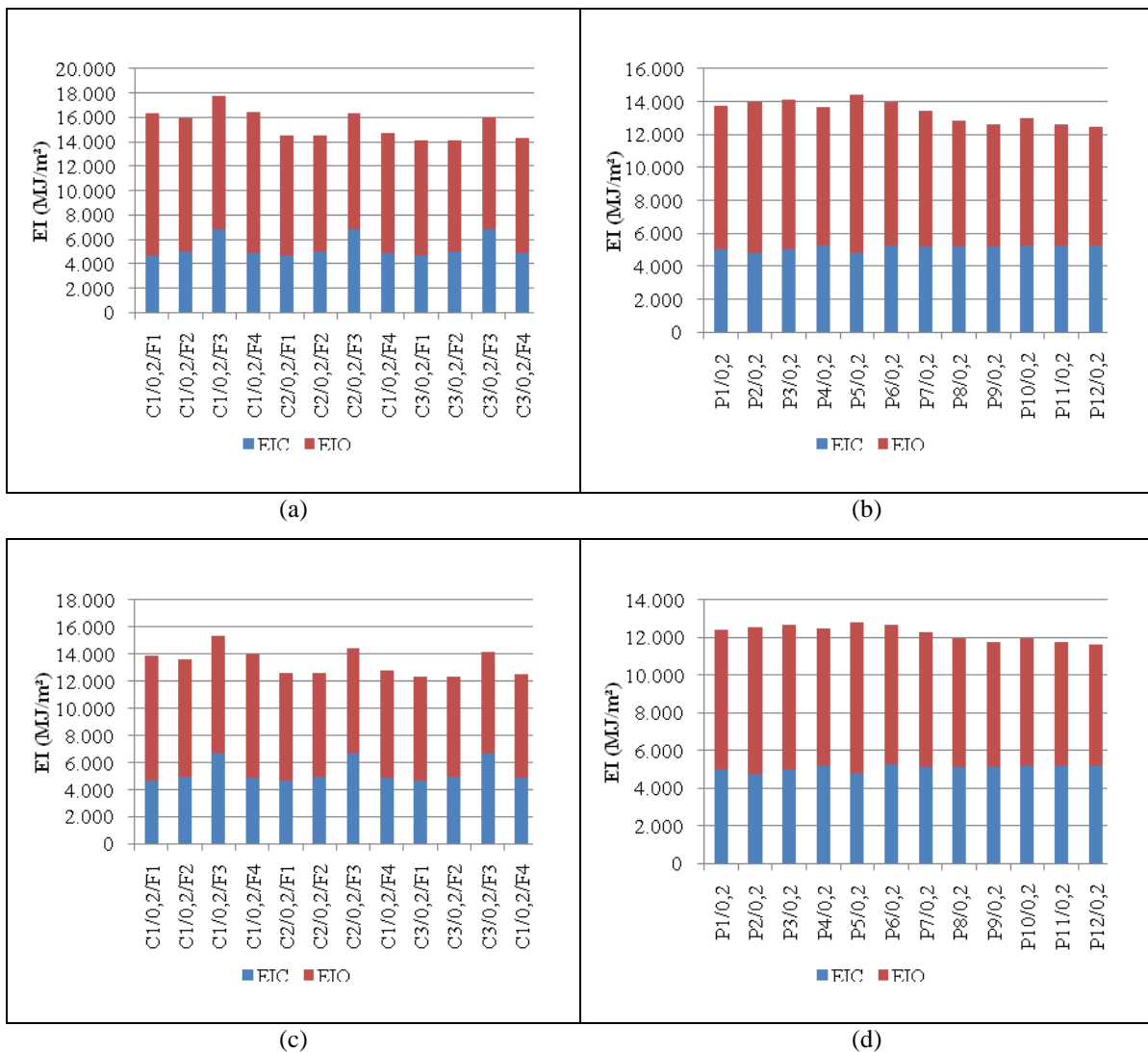
Obs.: sistema construtivo base: C01/0,2/F04, P01/0,2. B/C: relação custo-benefício; PbD: *payback* descontado.

#### 4.2.5 Análise do ciclo de vida energético

Na Figura 86 é apresentada uma síntese do estudo de energia incorporada dos sistemas construtivos utilizados nas simulações, devido à similaridade apresentada pelos resultados. No Apêndice E (Tabelas de 1 a 12) encontram-se os resultados deste estudo. Pode-se observar que os sistemas apresentaram EI operacional maior que a EI inicial e de manutenção tanto no sistema de cobertura quanto no de paredes externas. Conforme o aumento da EI inicial a energia operacional decai.

Ainda conforme Figura 86, assim como ocorre no custo no ciclo de vida, pode-se perceber que a fase mais relevante é a da energia incorporada inicial, com um índice superior

ao da EI operacional durante todo o ciclo de vida da edificação. Principalmente quando há o aumento da massa térmica da edificação para o aumento do desempenho térmico passivo. Desta forma, o consumo de energia elétrica para a manutenção do conforto térmico não é o principal insumo energético das edificações residenciais, com um percentual máximo de 35%, mesmo em um ciclo de vida de 50 anos. Sendo, portanto, os sistemas construtivos de esquadrias, paredes externas e coberturas os que mais influenciam no impacto ambiental da edificação.



**Figura 86 – Síntese ACVE: (a) cobertura e (b) alvenarias externas (Bento Gonçalves); (c) coberturas e (d) alvenarias externas (Porto Alegre)**

Assim, conforme descrito nos itens 2.3.2.5 e 2.3.3 da Revisão Bibliográfica, o impacto do consumo de energia elétrica nas edificações brasileiras é menor que em países da Europa e Austrália, em função do consumo energético e pela forma de produção desta energia, baseada, sobretudo, em fontes fósseis.

#### 4.2.6 Discussão dos resultados

Segundo os dados apresentados para as análises das Edificações verticais 1 e 3, nos climas de Bento Gonçalves e Porto Alegre (itens 4.2.1.1, 4.2.1.2, 4.2.3.1 e 4.2.3.2), observa-se que houve uma redução do consumo de energia elétrica de até 22%, no clima de Bento Gonçalves e de 10%, em Porto Alegre. Em ambas as cidades, o sistema que apresentou a maior redução do consumo de energia elétrica foi o sistema de parede de pré-moldado de concreto e *drywall* com isolante térmico de EPS (P16), com absorvância de 0,8 em Bento Gonçalves e de 0,2 em Porto Alegre. Este resultado corrobora os resultados de análise do desempenho térmico, onde estes sistemas apresentaram o melhor desempenho térmico entre os simulados. Contudo, com o custo de investimento elevado deste sistema não há possibilidade de retorno do investimento em menos de 50 anos.

Já os resultados das análises das Edificações horizontais 2 e 4 (itens 4.2.2.1, 4.2.2.2, 4.2.3.1 e 4.2.3.2) demonstram que os sistemas construtivos de cobertura apresentaram maior influência na redução do consumo de energia elétrica. Nestas edificações houve uma diminuição de até 33% no gasto com energia elétrica (cobertura de telha de fibrocimento com absorvância de 0,8, forro de concreto de 10 cm e isolamento térmico de EPS, sistema C03/F02/0,8) em Bento Gonçalves e de 24% (cobertura de telha de fibrocimento com absorvância de 0,2, forro de concreto de 10 cm e isolamento térmico de EPS, C03/F02/0,2) em Porto Alegre. Já as alternativas de paredes externas de tijolos maciços de 10 cm duplos com EPS apresentaram uma redução de 24% (P12/0,8) e de 17% (P12/0,2), respectivamente, Bento Gonçalves e Porto Alegre. Entretanto, assim como ocorre nas demais edificações, nenhum destes sistemas apresentou retorno do investimento menor que o ciclo de vida da edificação.

Conforme o exposto nos acima se percebe que o aumento do desempenho térmico com o aumento da massa e de absorvância nos climas estudados possui impacto nos custos no ciclo de vida das edificações estudadas. Contudo, esta economia no gasto elétrico do sistema de ar condicionado para manutenção do conforto térmico nos ambientes foi insuficiente para retornar o custo de investimento realizado nestas edificações.

O custo de projeto aumenta devido à necessidade de maior tempo de trabalho para projetar uma edificação com menor gasto operacional, através do estudo das técnicas bioclimáticas, normas brasileiras e índices de desempenho térmico. Além da modelagem e simulações de cada alternativa e das análises dos resultados obtidos, tendo-se acrescentado de 3 a 4 semanas a mais de trabalho, dependendo da edificação. Desta forma, nas edificações que

possuem maior área foi acrescentada uma semana a mais de trabalho que nas edificações horizontais, de menor área construída. A quantidade de horas de trabalho foi mensurada através da percepção e das horas de trabalho dos participantes deste estudo.

Como os sistemas estudados são similares entre si, de forma a simplificar o estudo do impacto ambiental das alternativas simuladas, o custo de manutenção não teve grande variação. As variações ocorrem, principalmente, devido ao uso e manutenção do aparelho de ar condicionado que possui um ciclo de vida útil de 15 anos, calculado por horas de uso (TOLMASQUIM e GUERREIRO, 2010). Assim, sistemas construtivos que apresentaram redução do tempo de utilização do condicionamento ativo, possuem menor custo de manutenção e troca de aparelhos.

Em ambos os climas estudados, nenhum sistema construtivo de maior massa térmica apresentou retorno do investimento menor que o período de 50 anos. Apresentando correlação entre os sistemas construtivos com custo mais elevado e a eficiência no desempenho térmico destes. Dos isolantes térmicos simulados, o EPS obteve os melhores resultados, tanto no desempenho térmico da edificação quanto no econômico. Os resultados em Bento Gonçalves se mostraram melhores que os de Porto Alegre, seguindo o padrão encontrado no estudo de desempenho térmico das edificações.

Por fim, em relação ao estudo de impacto econômico dos sistemas utilizados, apesar dos sistemas de maior massa térmica apresentar menor gasto operacional, o alto custo construtivo torna o investimento pouco viável economicamente. Contudo, a economia energética realizada pelos sistemas de menor massa é, geralmente, baixa para um retorno do investimento em menos de 50 anos. Por fim, apesar das alternativas estudadas apresentarem uma redução do custo operacional de até 24% do custo energético, a taxa de juros praticada atualmente no Brasil inviabiliza a utilização de alternativas construtivas mais caras e o amortecimento deste investimento apenas com a economia gerada pelo menor custo operacional da edificação.

## 5 CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como intuito a investigação da viabilidade técnica e econômica da aplicação de critérios de desempenho térmico da NBR 15575 em edificações residenciais verticais e horizontais, de classe média e baixa. Para o estudo da viabilidade foram utilizados os métodos de análise do custo no ciclo de vida, através do período de retorno descontado e relação custo benefício, e análise do ciclo de vida energético da edificação, através da energia incorporada da edificação. Para tanto, foram simulados quatro diferentes tipos arquitetônicos em dois climas distintos do estado do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves e Porto Alegre, de forma a difundir o estudo na região.

Os resultados obtidos nas simulações das edificações em ambos os climas possuem semelhança com a bibliografia estudada sobre o tema e apresentaram coerência nos dados apresentados. As alterações dos parâmetros construtivos reduziram significativamente o consumo de energia elétrica para manutenção do conforto térmico das edificações. No entanto, com base nas edificações estudadas, pode-se concluir que a melhor solução em termos de desempenho térmico não apresentou os mesmos resultados no desempenho econômico e ambiental. Já que o custo de energia elétrica atual é menor que o custo de investimento (construção), a diferença da energia incorporada operacional é sutil e o aumento da energia incorporada inicial significativo. Contudo, considerando-se a escassez dos recursos naturais e a necessidade de redução do consumo de energia elétrica e sendo a construção civil responsável por significativos impactos ambientais, devem-se adotar medidas de uso racional destes recursos.

Outros objetivos específicos deste trabalho foi de investigar o impacto da aplicação dos critérios da NBR 15575 sobre o projeto e as alterações de especificações de componentes e sistemas de vedação e o impacto sobre o processo de projeto, conforme NBR 15575. A cidade de Bento Gonçalves apresenta um clima composto e ameno, ou seja, com maiores quantidades de energia requeridas para o aquecimento, e não resfriamento, da edificação. Assim, entre as alternativas estudadas pode-se considerar que o uso de materiais apropriados para climas frios e úmidos em paredes e coberturas melhoram o desempenho térmico da edificação, ou seja, altas absorvâncias e massa térmica para aquecimento passivo.

Já para a cidade de Porto Alegre, o uso de materiais apropriados para climas compostos em paredes e coberturas melhoram o desempenho térmico da edificação, pois a cidade possui uma variação térmica grande, com energia requerida tanto para o aquecimento

quanto resfriamento da edificação. A utilização de sistemas de ventilação e de sombreamento da fachada pode melhorar o desempenho térmico de edificações localizadas neste clima, nos períodos quentes do ano. Nos períodos frios o uso de massa térmica para aquecimento passivo da edificação apresentaram bons resultados.

As edificações inseridas em Bento Gonçalves apresentaram melhores resultados em desempenho térmico e econômico que em Porto Alegre ocasionado, principalmente, pelas características climáticas de cada região. O fechamento das venezianas em 29°C proporcionou o desconforto térmico das edificações no verão, principalmente em Porto Alegre. No verão a promoção de sombreamento em temperaturas mais baixas é necessária para manutenção do conforto térmico do ambiente. Já no inverno, o acúmulo de calor no interior da edificação é desejado neste período.

Na Tabela 55 apresenta-se um quadro geral dos resultados encontrados nas simulações. Pode-se observar que baixas transmitâncias térmicas das paredes e coberturas, acrescidas de aumento do atraso térmico, foram mais favoráveis no aumento do desempenho térmico das edificações, tanto no frio quanto no calor, em ambos os climas. Contudo, a baixa transmitância tende a dificultar a saída de calor acumulado no interior dos ambientes, sendo necessária, nos períodos quentes, a utilização de ventilação cruzada diurna e noturna para dissipação de calor. No clima de Bento Gonçalves as altas absorptâncias em paredes e coberturas permitiram um aumento do desempenho das edificações. Já em Porto Alegre, as baixas absorptâncias foram significativamente mais favoráveis.

Ainda de acordo com a Tabela 55, os vidros duplos com câmaras de ar foram os tipos de esquadrias que melhor adequaram as edificações aos climas de Bento Gonçalves e Porto Alegre, devido a menor transmitância térmica destes. Contudo, o uso de grandes áreas envidraçadas em zonas mais frias, como é o caso de Bento Gonçalves, requer maior atenção, devido as maiores perdas de calor no inverno. Em Porto Alegre, esquadrias com mais de 20% de área de piso, mas menores que 30%, promoveram um aumento do desempenho térmico das edificações. Entretanto, deve-se estudar um sistema de sombreamento eficaz para os períodos de calor e um sistema de armazenagem de calor nos períodos frios do ano.

Ressalta-se que, apesar do aumento do desempenho térmico das edificações, as temperaturas internas apresentaram-se abaixo da faixa de temperatura estipulada nos períodos frios. Pois a manutenção do conforto térmico não é possível sem a utilização de fontes internas de calor, como nas simulações térmicas realizadas.



Tabela 55 – Quadro geral dos resultados da análise térmica.

Identif.	Bento Gonçalves (ZB1)	Porto Alegre (ZB3)
<b>Cobertura</b>	<p>Baixa transmitância térmica (<math>\leq 1,00</math> W/m<sup>2</sup>K): aumento de até XX% no desempenho térmico, comparando-se com o sistema base (2,25 W/m<sup>2</sup>K);</p> <p>Atraso térmico: <math>\geq 4</math> horas, comparando com o sistema base (2,6 horas)</p> <p>Alta absortância (<math>\geq 0,6</math>): aumento de até XX%, em comparação com baixas absortâncias (0,2)</p>	<p>Baixa transmitância térmica (<math>\leq 2,00</math> W/m<sup>2</sup>K): aumento de até XX% no desempenho térmico, comparando-se com o sistema base (2,25 W/m<sup>2</sup>K);</p> <p>Atraso térmico: <math>\geq 4</math> horas, comparando com o sistema base (2,6 horas)</p> <p>Baixa absortância (<math>\leq 0,6</math>): aumento de até XX%, em comparação com altas absortâncias (0,8)</p>
<b>Paredes externas</b>	<p>Baixa transmitância térmica (<math>\leq 2,00</math> W/m<sup>2</sup>K): aumento de até XX% no desempenho térmico, comparando-se com o sistema base (2,20 W/m<sup>2</sup>K);</p> <p>Atraso térmico: <math>\geq 6</math> horas, comparando com o sistema base (4,5 horas)</p> <p>Alta absortância (<math>\geq 0,6</math>): aumento de até XX%, em comparação com baixas absortâncias (0,2)</p>	<p>Baixa transmitância térmica (<math>\leq 2,00</math> W/m<sup>2</sup>K): aumento de até XX% no desempenho térmico, comparando-se com o sistema base (2,20 W/m<sup>2</sup>K);</p> <p>Atraso térmico: <math>\geq 6</math> horas, comparando com o sistema base (4,5 horas)</p> <p>Baixa absortância (<math>\leq 0,6</math>): aumento de até XX%, em comparação com altas absortâncias (0,8)</p>
<b>Esquadrias</b>	<p>Vidro duplo com câmara de ar;</p> <p>Área dos vãos: <math>\leq 20\%</math> da área de piso, com redução de até XX% do desconforto térmico.</p>	<p>Vidro duplo com câmara de ar;</p> <p>Área dos vãos: <math>20\% \leq 30\%</math> da área de piso, com aumento de até XX% do desempenho térmico.</p>

Foram ainda identificadas e testadas técnicas e ferramentas de projeto para cálculo e simulação de desempenho térmico, tendo sido utilizado neste trabalho os programas Revit e *EnergyPlus*. Apesar de o Revit possuir a ferramenta de exportação de modelos criados para a simulação em programas de análise térmica e eficiência energética e contar com um programa de análise, embora ainda sem validação, esta integração ainda não é realizada diretamente e de forma adequada.

Os modelos criados no BIM são complexos, devido à precisão destes programas, e por utilizarem famílias de blocos para modelagem. Desta forma, a sua utilização em programas de simulação (no caso *EnergyPlus*), é dificultada, já que este necessita que o volume do modelo seja simplificado para realizar a simulação. O programa de análise térmica própria do Revit também possui variações quanto a outros programas de simulação, por ter cálculos simplificados.

A utilização de programas de simulação para análise de desempenho térmico na fase de projeto se mostra viável técnica e economicamente, com aumento de entre 6 a 20% no custo do projeto, devido ao aumento no tempo de estudo. Este tempo pode ser reduzido com o emprego de outros programas BIM, que possuem ligação direta com o programa *EnergyPlus*,

como *AECOSim Energy Simulator* e *Hevacomp Design Simulation*, ambos da *Bentley BIM solutions*, não utilizados neste trabalho devido ao custo envolvido. O *Revit/Autodesk* possui licença gratuita para trabalhos no meio acadêmico, o mesmo não ocorre com estes programas. Entretanto, esta mesma empresa desenvolveu o *Openstudio*, *plugin* gratuito, desenvolvido principalmente para as fases iniciais de projeto, utilizado neste trabalho para modelagem e simulação no *SketchUp*.

Quanto às avaliações do ciclo de vida, estas são complexas, e requerem uma grande quantidade de dados, muitas vezes não confiáveis. Neste trabalho, fez-se um recorte dos dados estudados, avaliando-se apenas os sistemas construtivos analisados (coberturas e paredes). Esta delimitação se deu devido às edificações serem além da falta de pesquisas completas de ACV nas edificações. Para obter-se um valor estimado do total de EI das edificações utilizou-se os materiais e quantitativos disponibilizados no CUB.

A partir do estudo da ACCV pode-se obter a viabilidade econômica dos sistemas construtivos simulados. Para esta análise, apenas os sistemas construtivos utilizados no estudo de desempenho térmico, ar condicionado e consumo de energia elétrica foram utilizados. Os resultados obtidos demonstraram que o custo de construção é alto, em comparação com o custo da energia elétrica e que, com a taxa de juros praticada no país, o pagamento do investimento geralmente não ocorre em menos de 50 anos.

As coberturas foram os sistemas construtivos estudados que apresentaram as melhores relações custo-benefício. Isto se deve ao baixo custo de investimento, com o uso do EPS como isolante térmico, e com a redução do consumo de energia elétrica. Os sistemas de paredes externas que apresentaram melhor desempenho térmico dentre as soluções estudadas e foram os que apresentaram o maior custo, devido à quantidade de material utilizada, já que são, em sua grande maioria, paredes duplas. Para obter-se um bom desempenho térmico e econômico há a necessidade de se estudar outros novos materiais e sistemas construtivos, que possuam propriedades térmicas próximas dos sistemas construtivos estudados.

Apesar de empreendimentos de habitação de interesse social ter restrições de custo, alternativas facilmente implementadas no processo projetual e com pouco/sem aumento de custo, influencia no desempenho térmico. Tais como a absorvância, o uso de parede externa de blocos cerâmicos de 8 furos e o EPS como isolante térmico em paredes externas e coberturas, que devido ao alto desempenho térmico e baixo custo de construção destes materiais proporcionam um bom custo benefício. O estudo demonstra que, embora algumas

diferenças tenham sido sutis, através de alternativas projetuais planejadas pode-se diminuir o uso de condicionamento de ar artificial.

**Tabela 56 – Quadro geral dos resultados da análise econômica.**

<b>Identif.</b>	<b>Bento Gonçalves (ZB1)</b>	<b>Porto Alegre (ZB3)</b>
<b>Cobertura</b>	Sistemas: C01/F02; C02/F01; C02/F02; C02/F03; C03/F02; C03/F03; C03/F04; Sistema com maior custo benefício: 12,17 Payback descontado: no mínimo 1 ano Absortância: 0,8	Sistemas: C02/F01; C03/F01; Sistema com maior custo benefício: 8,82 Payback descontado: no mínimo 2 anos Absortância: 0,2
<b>Paredes externas</b>	Sistemas P04, P09 Sistema com maior custo benefício: 4,84; Payback descontado: no mínimo 3 anos Absortância: 0,8	Sistemas: P04, P09 Sistema com maior custo benefício: 3,17; Payback descontado: no mínimo 6 anos Absortância: 0,2

A energia incorporada está ligada ao consumo de energia, principalmente na fabricação destes materiais, dado que teve um peso significativo na EI total da edificação. No entanto, o consumo de EI na fase operacional da edificação também é relevante, principalmente devido ao consumo de energia elétrica para aquecimento e resfriamento da edificação, maior que para os demais sistemas (equipamentos e iluminação). O que ocasiona no aumento de infraestrutura para produção de energia elétrica, gerando resíduos na construção e manutenção destes equipamentos.

Desta forma, embora o impacto ambiental pelas hidroelétricas seja menor e este sistema predominar no Brasil, a construção e utilização de termoelétricas é crescente, principalmente no Sul do país, resultante da geração insuficiente de energia elétrica pelas hidroelétricas, o que aumenta a EI da fase operacional da edificação. Ainda, devido à predominância do transporte rodoviário, este possui grande impacto, aumentando consideravelmente a energia incorporada inicial da edificação e mitigando as possíveis vantagens ambientais da matriz energética brasileira.

A utilização do CUB como estratégia para obter-se um valor estimado do total de EI da edificação demonstrou necessidade de maior estudo sobre sua utilização. Com o acréscimo destes valores aos estudados permitiram a obtenção de valores de EI totais. Contudo, certos materiais da lista do CUB, promoveram um aumento da EI inicial muito acima dos demais estudos a respeito desse tema. Desta forma, há necessidade de ampliação deste estudo.

Por fim, ressalta-se que, ainda que alguns sistemas construtivos simulados tenham alcançado bons resultados dentre os sistemas, há margem para melhora. Isto pode ser obtido

para os períodos frios, principal causa de desconforto térmico das edificações estudadas, através do estudo de outros sistemas construtivos, orientação solar, sombreamento das fachadas e o uso de outras estratégias bioclimáticas que permitam sua utilização em climas compostos. Para o desempenho térmico no calor, a principal estratégia é, além das anteriores, ampliar a ventilação cruzada nos ambientes.

## **5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir deste estudo são realizadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Simular as edificações em outras localidades do estado e brasileira, simulando alternativas de técnicas construtivas diversos aos utilizados;
- Investigar os demais requisitos de desempenho da edificação da NBR 15575 e seu impacto econômico e ambiental na edificação;
- Ampliar o estudo da energia incorporada na edificação completa, mensurando outros impactos ambientais das edificações como a geração de CO<sup>2</sup> e de geração de resíduos;
- Realizar um estudo estatístico dos resultados para determinar qual fator (absortância, transmitância térmica, atraso térmico, entre outros) possui maior influência térmica nas edificações residenciais verticais e horizontais;
- Ampliar o estudo da utilização do CUB como estimativa de energia incorporada inicial nas edificações nas primeiras fases do projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAZA, M. LV-11-C029 – High performance buildings using hole building integrated design approach. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., **ASHRAE Transactions**, Atlanta, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040** – Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14041** – Avaliação do Ciclo de Vida: Definição de objetivo e escopo e análise do inventário. Rio de Janeiro: ABNT, 2004 a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14042** – Avaliação do Ciclo de Vida: Avaliação do impacto do ciclo de vida. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220 - 1** – Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220 - 2** – Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220 - 3** – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005 d.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1** - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2010 a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-4** - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro: ABNT, 2010b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-5** - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 5: Requisitos para o sistema de cobertura. Rio de Janeiro: ABNT, 2010c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1** - Edifícios habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AKUTSU, M.; BRITO, A. C.; CHIEPPE, C. P. O efeito da capacidade térmica e da resistência térmica de paredes no desempenho térmico de habitação na cidade de São Paulo. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2012. Juiz de Fora, Brasil: **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

ALMEIDA, J. E. C. **Desempenhos térmico, luminoso e energético de unidades de um conjunto habitacional implantado pelo Programa de Arrendamento Residencial – PAR, em Maceió** – AL. 2005. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmica do espaço habitado), Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFAL, Maceió.

ANDREASI, W. A. **Avaliação do impacto de estratégias bioclimáticas na temperatura interna de edificações no Passo do Lontra, Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2004.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 ADDENDA. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2010.

ARAUJO, G. A. M. **Avaliação dos ganhos em eficiência energética em iluminação adotando a regulamentação de etiquetagem em edificações**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Curso de Pós-graduação em Sistemas de Potência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO IBÉRICA DE POLIESTIRENO EXTRUDIDO (AIPEX). **Soluções de isolamento térmico com poliestireno extrudido (XPS) para uma construção sustentável**. Disponível em: [www.aipex.es](http://www.aipex.es). Acesso em: Nov 2012.

AZHAR, S.; CARLTON, W. A.; OLSEN, D. AHMAD, I. Building information modeling for sustainable design and LEED rating analysis. **Automation in Construction**, v.20, n.2, p. 217-224, mar. 2011.

BAKER, N. V. **The handbook of sustainable refurbishment: Non-domestic buildings**. Londres: Earthscan, 2009.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. **Discrete-Event System Simulation**. 4. ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.

BARBOSA, M. J. **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia), Curso de Pós-graduação em Engenharia da Produção, UFSC, Florianópolis.

BASTOS, A. L. D.; BAUM, D. M.; CORREIA, A. R. Análise de capacidade de aeronaves nos boxes do aeroporto de São Paulo – Congonhas, por meio de ferramenta de simulação computacional. In: VII Simpósio de Transporte Aéreo – SITRAER. Rio de Janeiro, Brasil: **Anais...** Rio de Janeiro: SITRAER, 2008.

BECKER, Maria de Fátima M. Análise e desempenho térmico de uma habitação unifamiliar térrea. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 1993. São Paulo, Brasil: **Anais...** São Paulo: ANTAC, 1993.

BOSI, F. A.; MASSARA, B. *Softwares de análise de performance em arquitetura digital*. In: VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS 2011, Vitória, Brasil: **Anais...** Vitória: ELECS, 2011.

BRASIL. **Eficiência energética em habitações de interesse social**. Caderno 9. Brasília: Ministério das Cidades/Ministério de Minas e Energia, 2005.

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>>. Acesso em: Setembro 2011.

\_\_\_\_\_. **Etiquetagem de Eficiência Energética de Edificações**. Ministério de Minas e Energia/Eletróbrás/Inmetro. 2010a.

\_\_\_\_\_. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** Ministério de Minas e Energia/Eletrobrás/Inmetro. 2010b.

\_\_\_\_\_. **Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.** Ministério de Minas e Energia/Eletrobrás/Inmetro. 2010c.

\_\_\_\_\_. **Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética edificações residenciais.** Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior/Inmetro. 2010d.

CARMODY, J.; SELKOWITZ, S.; ARASTEH, D.; HESCHONG, L. **Residential windows: A guide to new technologies and energy performance.** 2 ed. New York: W. W. Norton & Company, 2000.

CARMODY, J.; SELKOWITZ, S.; LEE, E. S. ARASTEH, D.; WILLMERT, T. **Window systems for high-performance buildings.** New York: W. W. Norton & Company, 2004.

CHEN, T. Y.; BURNETT, J.; CHAU, C. K. Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. **Energy**, v. 26, n.4, p. 323-340, abr. 2001.

CHWIF, L. **Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Concepção: Uma Abordagem Causal.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia), Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: Conforto ambiental.** 2. ed. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

COSTA, E. C. **Física aplicada à construção: Conforto térmico.** 2 ed. São Paulo, Blücher, 1974.

CURCIO, D. R. **Desempenho termo-energético de Habitações de Interesse Social produzidas pelo Programa de Arrendamento Residencial – PAR na cidade de Pelotas/RS.** 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CUNHA, E. G.; ZECHMEISTER, D.; MELO, E. Q.; MASCARÓ, J. J.; VASCONCELLOS, L. de; FRANDOLOSO, M. A. L. **Elementos de arquitetura de climatização natural: Método projetual buscando a eficiência nas edificações.** 2. ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2006.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: Método de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas.

EERE. U.S. **Department of Energy: Energy Efficiency & Renewable Energy – Building Energy Software Tools Directory.** Disponível em: < <http://www.eere.energy.gov/>>. Acesso em: Dez., 2012a.

\_\_\_\_\_. **EnergyPlus Energy Simulation Software: Testing & validation.** Disponível em: < [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/EnergyPlus\\_testing.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/EnergyPlus_testing.cfm)>. Acesso em: Dez., 2012b.

ELETOBRÁS. **Selo Procel edificações – apresentação**. Disponível em: <<http://www.eletobras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={A8468F2A-5813-4D4B-953A-1F2A5DAC9B55}>> Acesso em: Nov., 2011a.

\_\_\_\_\_. **Apresentação Procel Edifica**. Disponível em: <<http://www.eletobras.com/procel>>. Acesso em: Nov., 2011b.

ESCRIVÁ-ESCRIVÁ, G.; ÁLVARES-BEL, C.; PEÑALVO-LÓPES, E. New indices to assess building energy efficiency at the use stage. **Energy and Building**, v. 43, n.2-3, p. 476-484, fev./mar. 2011.

FABRYCKY, W. J.; BLANCHARD, B. S. **Life-cycle cost and economic analysis**. Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 1991.

FAY, M. R. **Comparative life cycle energy studies of typical Australian suburban dwellings**. 1999. PhD. Thesis. Faculty of Architecture, Building and Planning. The University of Melbourne, Melbourne.

FAY, R.; TREOLAR, G.; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis os buildings: a case study. **Building Research and Information**, v.28, n.1, p. 31-41. 2000.

FEE (Fundação de Economia e Estatística). **Resumo estatístico RS – COREDES**. Disponível em: <<http://www.fee.tche.br>>. Acesso em: Dezembro de 2011.

FONSECA, I. C. L.; ALMEIDA, C. C. R.; LOMARDO, L. L. B.; MELLO, E. N. Avaliações de conforto ambiental e eficiência energética do projeto do prédio do Centro de Informações do Cresesb, no Rio de Janeiro. **Ambiente Construído**, v.10, n.2, p. 41-58, abr./jun. 2010.

FREIRE, M. R.; TAHARA, A.; AMORIM, A. L. Investigação sobre ferramentas computacionais de avaliação do desempenho térmico apropriadas ao contexto BIM para aplicação em projetos de HIS. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2012, Juiz de Fora, Brasil: **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

FRONTCZARK, M.; WARGOCKI, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. **Building and Environment**, v.46, n.4, p. 922-937, abr. 2011.

FROTA, A.B; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico: Arquitetura, urbanismo**. 5.ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **Life-cycle costing manual for the Federal Energy Management Program: NIST Handbook 135**. The National Institute of Standards and Technology. U. S. Department of Commerce. Washington, 1995.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **Life-cycle costing manual for the Federal Energy Management Program**. U. S. Department of Energy. Washington, 1996.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.



GHISI, E.; MASSIGNANI, R. F. Thermal performance of bedrooms in a multi-storey residential building in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 730-742, 2007.

GIGLIO, T. G. F.; BARBOSA, M. J. Aplicação de métodos de avaliação do desempenho térmico para analisar painéis de vedação em madeira. **Ambiente Construído**, v.6, n.3, p. 91-103, jul./set. 2006.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GIVONI, B. **Climate Considerations Buildings an Urban Design**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

GRAF, H. F. **Transmitância térmica e energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR 12721**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

GRAF, H. F.; MARCOS, M. H. C.; TAVARES, S. F.; SCHEER, S. Estudo de viabilidade do uso de BIM para mensurar impactos ambientais de edificações por energia incorporada e CO2 incorporado. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2012, Juiz de Fora, Brasil: **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

GRIGOLETTI, G. C.; SATTLER, M. A. Método de avaliação global de desempenho higrotérmico de habitações de interesse social para Porto Alegre – RS – Brasil. **Ambiente Construído**, v.10, n.2, p. 101-114, abr./jun. 2010.

HARDIN, B. **BIM and construction management: Proven tools, methods, and workflows**. Indianapolis: Wiley, 2009.

HASTINGS, R.; WALL, M. **Sustainable solar housing: Strategies and solutions**. Londres: Earthscan, 2009.

HUBERS, H. Collaborative design of parametric sustainable architecture. In: Management and Innovation for a Sustainable Built Environment, Amsterdam, The Netherlands: **Proceedings...** Amsterdam, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Síntese de indicadores sociais – Uma análise das condições de vida da população brasileira**. Estudos e pesquisa, Informação demográfica e socioeconômica, n. 27. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Avaliação do desempenho térmico e energético de edificações e projetos**. Disponível em: <<http://www.ipt.br>> Acesso em: Agosto de 2011.

INTERNACIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION (ISO). **ISO 7730** – Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 3. ed. Genebra, Suíça, 2005.

\_\_\_\_\_. **ISO 7243** – Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). 2. ed. Genebra, Suíça, 1989.

JABER, S.; AJIB, S. Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 43, n.8, p. 1829-1834, ago. 2011.

JOHN, V. M.; PRADO, R. T. A. **Boas práticas para habitação mais sustentável**. São Paulo: Páginas & Letras, 2010.

KRYGIEL, E.; NIES, B. **Green BIM**: Successful sustainable design with building information modeling. Indianapolis: Wiley, 2008.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; ABREU, A. L. P. de; CARLO, J. C.; BATISTA, J; O.; MARINOSKI, D. L. **Desempenho térmico em edificações**. Notas de Aula da disciplina: ECV 5161. LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações). Florianópolis, UFSC, 2007.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa eficiente**: Bioclimatologia e desempenho térmico. Florianópolis: UFSC, 2010.

LAMBERTS, R.; TRIANA, M. A. Levantamento do estado da arte: energia. Projeto: Tecnologias para construção habitacional mais sustentável. **Relatório Projeto Finep**. São Paulo, 2007.

LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; BEASCOCHEA, A. Eficiencia energética en un edificio no-residencial de uso intermitente y altas cargas internas en Argentina. **Ambiente Construído**, v.8, n.1, p. 37-48, jan./mar. 2008.

LBNL. **Getting started with EnergyPlus**, US Department of Energy, v. 7.2, USA, 2012b.

\_\_\_\_\_. **EnergyPlus Input and Output Reference**: The Encyclopedic Reference to *EnergyPlus* Input and Output, US Department Of Energy, Version 7.2, USA, 2012b.

LOBO, F. H. R.; SANTOS, A. P. L.; TAVARES, S; F. Ferramentas de planejamento para levantamento de inventário de emissão de CO<sub>2</sub>: Estudo de caso. **Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial**, v.2, n.2, p. 26-43, dez. 2010.

MACHADO, F. E. F. **A eficiência de técnicas sustentáveis na construção civil medida através do conforto térmico**: Estudo em escola no município de Feliz. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Curso de Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. 2010

MACIEL, A. A. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional da construção de habitações de interesse social através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFPR, Curitiba.

- MARQUES, A. M. **Desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social: Estudo de caso em Imbituba – SC**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.
- MARSH, A. **Performance Analysis and conceptual design**. 1997. Thesis (Doctor of Philosophy). School of Architecture and Fine Arts, University of Western Australia, Austrália.
- MATTEIS, F. de; ALMEIDA, M. M. O. G. **Good, Green, Safe, Affordable Housing**. 1 ed. Verona: Iperresto Edizioni, 2009.
- MEADATI, P.; IRIZARRY, J.; AKNOUKH, A. BIM and concrete formwork repository. In: 47th ASC Annual International Conference, Omaha, USA: **Proceedings...** Ohama: ASC, 2011.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.
- MIBRATZ, J. H. Análise das propriedades térmicas e ópticas de janelas através de simulação computacional. **Relatório IC**, Florianópolis, UFSC, 2007.
- MORELLO, A.; SATTLER, M. Avaliação do desempenho térmico de um protótipo habitacional construído na cidade de Porto Alegre – Período de inverno 2003. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2004, São Paulo, Brasil: **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2004.
- MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; TRIANA, M. A.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas. **Relatório de pesquisa**. Florianópolis, UFSC, 2011.
- MORRISSEY, J.; HORNE, R. E. Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 43, n.4, p. 915-924, abr. 2011.
- NGUYEN, A.-T.; TRAN, Q.-B.; TRAN, D.-Q.; REITER, S. An investigation on climate responsive design strategies of vernacular housing in Vietnam. **Building and Environment**, v.46, n.10, p. 2088-2106, out. 2011.
- OKEIL, A. A holistic approach to energy efficient building forms. **Energy and Buildings**, v. 42, n.9, p. 1437-1444, abr. 2010.
- OLGYAY, V. W. **Arquitectura y clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.
- ORTIZ, O.; BONNET, C.; BRUNO, J. C.; CASTELLS, F. Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain. **Building and Environment**, v.44, n.3, p. 584-594, mar. 2009.
- PARK, J. BIM-Based Parametric Design Methodology for Modernized Korean Traditional Buildings. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v.10, n.2, p. 327-334, nov. 2011.
- PAULA, R. Z. R. **A influência da vegetação no conforto térmico do ambiente construído**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas.

PEDRINI, A. **Integration of low energy strategies to the early stages of design process of office buildings in warm climate**. 2003. Thesis (Doctor of Philosophy). Department of Architecture. The University of Queensland, Queensland.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v.10, n.1, p. 31-51, jan./mar. 2010.

PICCOLI, R. **Análise das alterações no processo de construção decorrente da aplicação de sistemas de certificação ambiental de edificações**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, Porto Alegre.

PIVETTA, J. **Influência de elementos paisagísticos no desempenho térmico de edificação térrea**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento), Curso de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, UEL, Londrina.

POUEY, J. A. **Projeto de edificação residencial unifamiliar para a zona bioclimática 2 com avaliação termo energética por simulação computacional**. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

POZZA, F. **Análise térmica e energética de uma edificação residencial climatizada com sistema de fluxo de refrigerante variável – VRF**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Building**, v. 42, n.10, p. 1592-1600, out. 2010.

REAL, S. A. C. F. **Contributo da análise dos custos do ciclo de vida para projectar a sustentabilidade na construção**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

RIO GRANDE DO SUL, **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Edição eletrônica. Disponível em: < <http://www.scp.rs.gov.br/atlas/default.asp> > Acesso em: Dezembro 2011.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse: A casa ambientalmente sustentável**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

ROMÉRO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 2. ed. São Paulo, ProEditores, 2000.

RORIZ, M. Arquivos climáticos de municípios brasileiros. **Relatório de pesquisa**. ANTAC/DECiv, UFSCar, São Paulo/ São Carlos, Brasil, 2011.

ROSENFELD, E.; JUAN, G. S.; DISCOLI, C.; DICROCE, L.; BREA, B.; MELCHIORI, M. Edificios proto-bioclimaticos en la Argentina: tres ejemplos relevantes. **Ambiente Construído**, v.7, n.3, p. 7-21, jul./set. 2007.

SANTOS, P. M. C. F. S. **Reabilitação energética de um edifício de serviços**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal.

SANTOS, M. M. F.; HAMADA, L.; FARIA, R. W.; NASCIMENTO, P. R. L. Análise da aplicação da etiquetagem de eficiência energética de edificações em empreendimentos hoteleiros. **Revista Brasileira de Energia**, v. 16, n. 1, p.57-72, 2010.

SAKAMOTO, J.; BARBOSA, M. J.; ADACHI, A. Z.; MOURA, J. D. M. Experiment with construction systems applied to low cost buildings for the improvement of methods of evaluation of thermal performance. In: The 18<sup>rd</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianópolis, Brasil: **Anais...** Florianópolis: PLEA, 2001

SATTLER, M. A. **Conforto ambiental na edificação I**. Notas de Aula da disciplina: CI PV-60. NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação). Porto Alegre, UFRGS, 1991a.

\_\_\_\_\_. **Conforto ambiental na edificação II**. Notas de Aula da disciplina: CI PV-60. NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação). Porto Alegre, UFRGS, 1991b.

\_\_\_\_\_. **Habitacões de baixo custo mais sustentáveis: a Casa Alvorada e o Centro Experimental de Tecnologias Habitacionais Sustentáveis**. Coleção Habitare/Finep, 8. Porto Alegre: ANTAC, 2007.

SHAVIV, E. Design Tools for Bio-climatic and passive solar building. **Solar Energy**, v.67, n. 4-6, p.189-204, 1999.

SHERIF, Y. S.; KOLARIK, W. J. Life Cycle Costing: Concept and Practice. **Omega**, v. 9, n. 3. p. 287-296, 1981

SILVA, A. T.; MORO, P. R. P.; KERN, A. P.; GONZÁLEZ, M. A. S.; KOCH, D. B. Parâmetros de sustentabilidade e empreendimentos de habitação de interesse social. In: Congresso Internacional Sustentabilidade e Habitação de Interesse Social, Porto Alegre, Brasil: **Anais...** Porto Alegre: CHIS, 2010

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: Diretrizes e base metodológica**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA JR., H. X. **Aplicação das metodologias de análise estatística e análise do custo do ciclo de vida (ACCV) para o estabelecimento de padrões de eficiência energética: Refrigeradores brasileiros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Mecânica), Curso de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SOARES, R. C.; AMORIM, S. R. L. Aplicação da tecnologia BIM em estudos de viabilidade. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2012, Juiz de Fora, Brasil: **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

SOUZA, F. R.; HISAMOTO, M.; SANTOS, E. T.; MELHADO, S. B. Abordagem para introdução do conceito BIM em empresas incorporadoras e construtoras brasileiras: análise crítica sobre as posturas estratégicas, tática e operacional. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2012, Juiz de Fora, Brasil: **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

TARABIEH, K.; MALKAWI, A. A comparative study to benchmark energy performance using building simulation tools. In: 3<sup>rd</sup> INT'L ASCAAD Conference on Embodying Virtual Architecture. Alexandria, Egypt. **Anais ...** Alexandria: ASCAAD, 2007.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

THORMARK, C. A low energy building in a life cycle – its embodied energy, energy need for a operation and recycling potential. **Building and Environment**, v.37, n.4, p. 429-435, fev. 2002.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A. **Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências: no horizonte descenal (2010-2019)**. Nota técnica DEA 14/10. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, EPE, julho de 2010.

TORRES, M. C. A. **Eficiência energética em edificações**. Notas de Aula: Curso de Especialização em Construção Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Unisinos, outubro/novembro, 2011.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, v.10, n.4, p. 37-58, out./dez. 2010.

UNEP (United Nations Environment Programme). **Buildings can play a key role in combating climate change**. Disponível em: <<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=502&ArticleID=5545&l=en>>. Acesso em: Setembro 2011.

VERBEECK, G.; HENS, H. Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis. **Building and Environment**, v.45, n.4, p. 964-967, abr. 2010.

WEISE, A. D.; SCHULTZ, C. A.; TRIERWEILLER, A. C. Custos imobiliários: a aplicação dos conceitos do custo de Ciclo de Vida. In: II Congresso UFSC de Controladoria e Finanças & Iniciação Científica em Contabilidade, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC/Departamento de Ciências Contábeis/UFSC, 2008.

WEISE, A. D.; SCHULTZ, C. A.; TRIERWEILLER, A. C.; ROCHA, J. M. da; PEREIRA, V. L. D. do V. Os conceitos do custo de ciclo de vida de imóveis aplicado no Facility Management. In: SEGET - VI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro, Rezende. **Anais...** Rezende: ABDB, 2009.

WOODWARD, D. G. Life cycle costing – theory, information acquisition and application. **International Journal of Project Management**, v. 15, v. 6, p. 335-344, 1997.

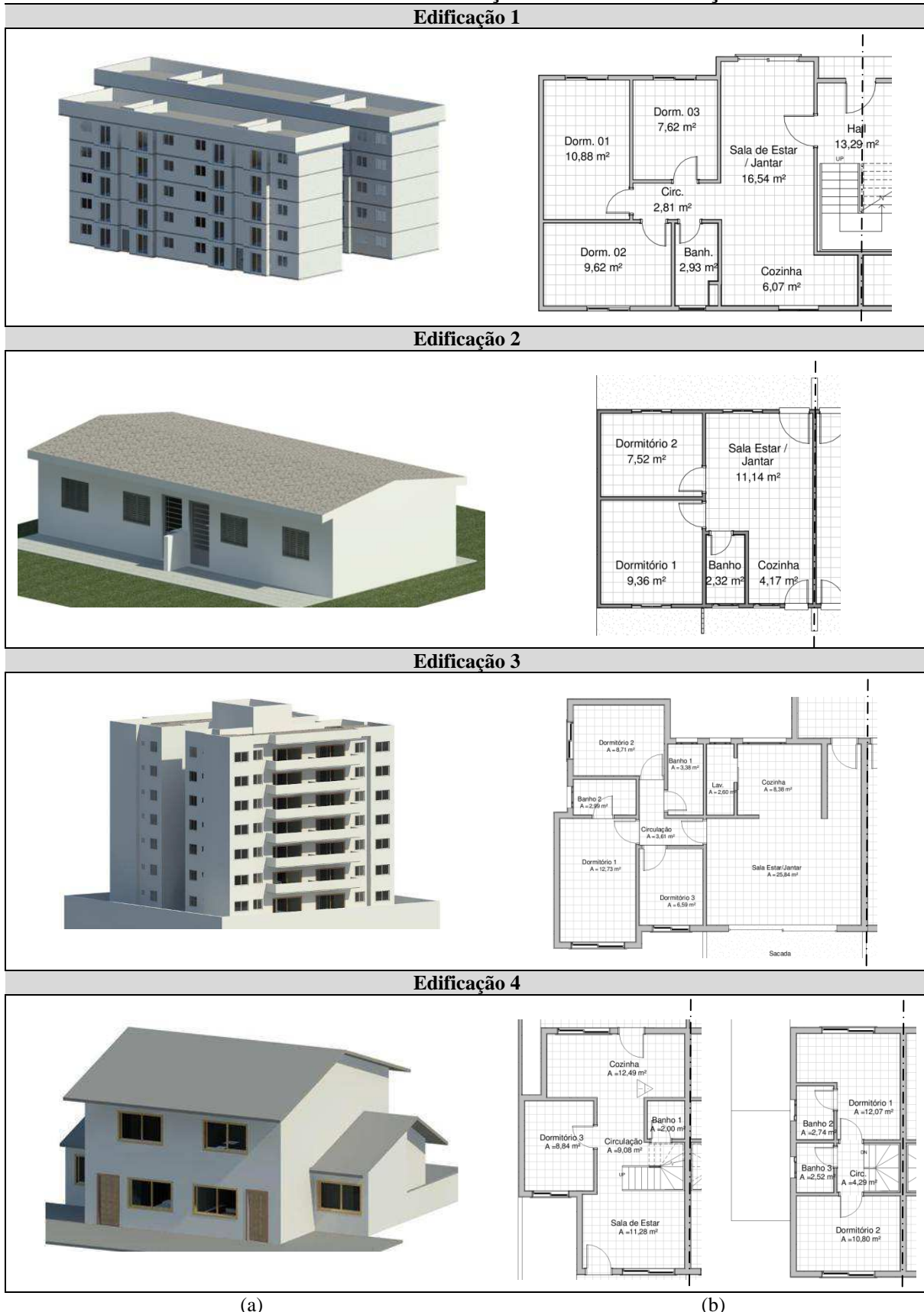
YAN, W.; CULP, C.; GRAF, R. Integrating BIM and gaming for real-time interactive architectural visualization. **Automation in Construction**, v.20, n.4, p. 446-458, jul. 2011.

YOSHIDA, R. **Das normas em conforto térmico ao projecto de arquitectura: estudo de caso para edifícios de habitação – Zona Bioclimática Brasileira Z3 – Brasil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura Bioclimática), Curso de Pós-graduação em Arquitectura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

ZAZZINI, P.; CHELLA, F.; SCARDUZIO, A. Numerical and experimental analysis of light pipes' performances: comparison of the obtained results. The 23<sup>rd</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland: **Anais...** Geneva: PLEA, 2006.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES**



(a)

(b)

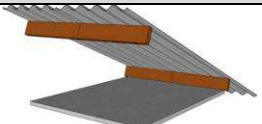
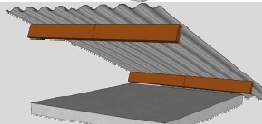
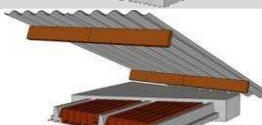
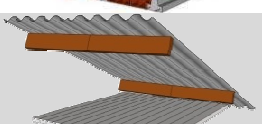
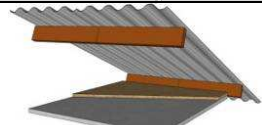
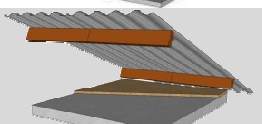

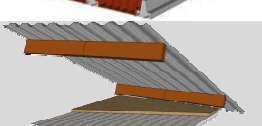
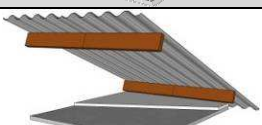
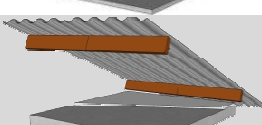
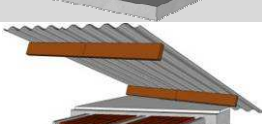
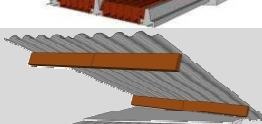
**Figura A.1 – Apresentação das edificações estudadas: (a) perspectiva e (b) planta baixa parcial**





## APÊNDICE C – PROPRIEDADES TÉRMICAS

**Tabela C.1 – Propriedades da cobertura**

Sistema construtivo		Propriedades		
Identificação	Composição	U [W/m <sup>2</sup> K]	φ [h]	
<b>C01</b>		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Forro de concreto (e: 3,0cm)	2,25	2,6
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Laje de concreto (e: 10,0cm)	2,06	4,0
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Laje mista (e: 12,0cm)	1,93	3,6
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Laje PVC	1,76	1,3
<b>C02</b>		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Lã de vidro (e: 2,5cm); 4º: Forro de concreto (e: 3 cm)	1,00	-
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Lã de vidro (e: 2,5cm); 4º: Laje de concreto (e: 10cm)	0,96	-
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Lã de vidro (e: 2,5cm); 4º: Laje mista (e: 12cm)	0,93	-
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: Lã de vidro (e: 2,5cm); 4º camada: Laje PVC	0,89	-
<b>C03</b>		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: EPS (e: 3cm); 4º camada: Forro de concreto (e: 3 cm)	0,77	-
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: EPS (e: 3cm); 4º camada: Laje de concreto (e: 10 cm)	0,74	-
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: EPS (e: 3cm); 4º camada: Laje mista (e: 12,0cm)	0,73	-
		1º camada: Telha de fibrocimento pintada; 2º camada: Câmara de ar (≥ 5,0cm); 3º camada: EPS (e: 3cm); 4º camada: Laje PVC	0,70	-

Fonte: ABNT (2005d); Morishita et al. (2011)

Tabela C.2 – Propriedades das paredes

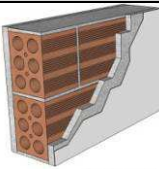
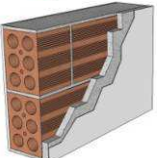
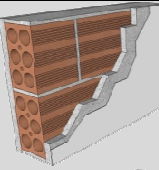
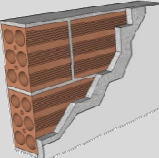
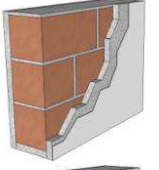
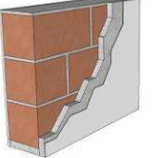
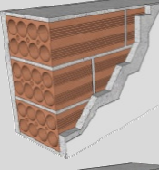
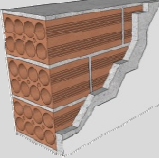
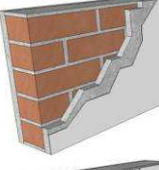
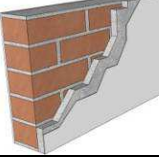
Identificação	Sistema construtivo Composição	Propriedade	
		U [W/m <sup>2</sup> K]	φ [h]
<b>P01</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos (14 cm), 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	2,20	4,5
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos (14 cm), 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	2,37	4,2
<b>P02</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos (9 cm), 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	2,43	3,3
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos (9 cm), 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	2,59	3,0
<b>P03</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 2 furos (14 cm), 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	2,43	3,8
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 2 furos (14 cm), 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	2,62	3,5
<b>P04</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 8 furos (19 cm), 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	1,80	5,5
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 8 furos (19 cm), 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	1,96	5,3
<b>P05</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço (10 cm), 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	3,13	3,8
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço (10 cm), 4º camada: gesso (e: 0,2 cm), 5º camada: pintura	2,70	3,9

Tabela C.2 – Propriedades das paredes – continuação

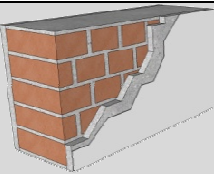
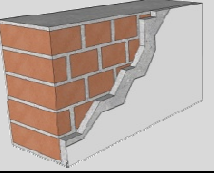
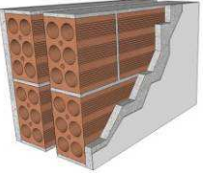
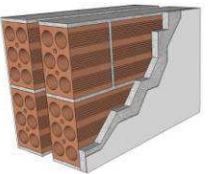
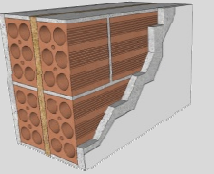
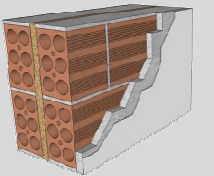
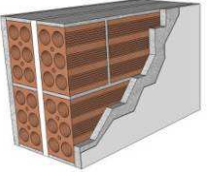
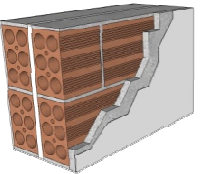
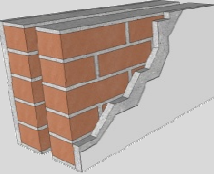
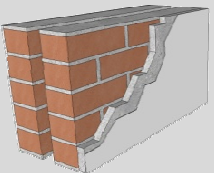
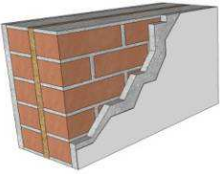
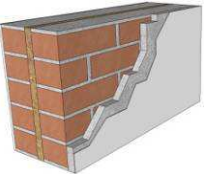
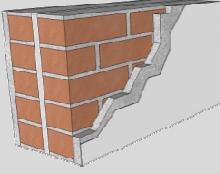
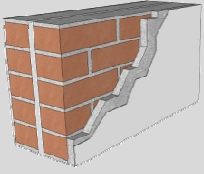

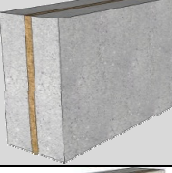

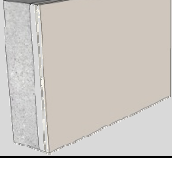
<b>P06</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço (22 cm), 4º camada: argamassa (e: 2,5cm), 5º camada: pintura	2,25	6,8
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço (22 cm), 4º camada: gesso (e: 0,2cm), 5º camada: pintura	2,11	6,6
<b>P07</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos duplo (9 cm), 4º camada: câmara de ar, 5º camada: argamassa (e: 2,5cm), 6º camada: pintura	1,52	6,5
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos duplo (9cm), 4º camada: câmara de ar, 5º camada: gesso (e: 0,2cm), 6º camada: pintura	1,69	6,3
<b>P08</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos duplo (9 cm), 4º camada: lâ de vidro, 5º camada: argamassa (e: 2,5cm), 6º camada: pintura	0,82	-
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos duplo (9 cm), 4º camada: lâ de vidro, 5º camada: gesso (e: 0,2cm), 6º camada: pintura	1,00	-
<b>P09</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos duplo (9 cm), 4º camada: EPS, 5º camada: argamassa (e: 2,5cm), 6º camada: pintura	0,66	-
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: bloco cerâmico 6 furos duplo (9 cm), 4º camada: EPS, 5º camada: gesso (e: 0,2cm), 6º camada: pintura	0,83	-
<b>P10</b>  	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço duplo (10 cm), 4º camada: câmara de ar, 5º camada: argamassa (e: 2,5cm), 6º camada: pintura	2,30	6,6
	1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço duplo (10 cm), 4º camada: câmara de ar, 5º camada: gesso (e: 0,2 cm), 6º camada: pintura	2,48	6,3

Tabela C.2 – Propriedades das paredes – continuação

P11		1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço duplo (10 cm), 4º camada: lã de vidro, 5º camada: argamassa (e: 2,5cm), 6º camada: pintura	1,01	-
		1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço duplo (10 cm), 4º camada: lã de vidro, 5º camada: gesso (e: 0,2 cm), 6º camada: pintura	1,18	-
P12		1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço duplo (10 cm), 4º camada: EPS, 5º camada: argamassa (e: 2,5cm), 6º camada: pintura	0,77	-
		1º camada: pintura, 2º camada: argamassa (e: 2,5cm), 3º camada: tijolo maciço duplo (10 cm), 4º camada: EPS, 5º camada: gesso (e: 0,2 cm), 6º camada: pintura	0,95	-
P13		1º camada: pintura, 2º camada: pré-moldado de concreto (e: 10cm), 3º camada: câmara de ar, 4º camada: <i>drywall</i> , 5º camada: pintura	0,65	-
P14		1º camada: pintura, 2º camada: pré-moldado de concreto (e: 10cm), 3º camada: lã de vidro, 4º camada: concreto (e: 10cm), 5º camada: pintura	2,10	-
P15		1º camada: pintura, 2º camada: pré-moldado de concreto (e: 10cm), 3º camada: lã de vidro, 4º camada: <i>drywall</i> , 5º camada: pintura	1,00	-
P16		1º camada: pintura, 2º camada: pré-moldado de concreto (e: 10cm), 3º camada: EPS, 4º camada: <i>drywall</i> , 5º camada: pintura	0,77	-

Fonte: ABNT (2005d)

Tabela C.3 – Propriedade dos vidros

Sistema construtivo			Parâmetros térmicos								
Ident.	Descrição	e [m]	Ts	Rs	Rs	Tv	Rv	Rv	Tir	ε	k [W/m.K]
E01	Vidro claro 3 mm	0,003	0,837	0,075	0,075	0,898	0,081	0,081	0	0,84	0,9
E02	Vidro claro 6 mm	0,006	0,775	0,071	0,071	0,881	0,08	0,08	0	0,84	0,9
E03	Vidro duplo 3-3mm	Vidro claro 3 mm		Câmara de ar			Vidro claro 3 mm				
E04	Vidro duplo 6-3mm	Vidro claro 6 mm		Câmara de ar			Vidro claro 3 mm				
E05	V. reflexivo 6 mm	0,006	0,066	0,341	0,493	0,08	0,41	0,37	0	0,84	0,9

Fonte: Optics 5.2a, 2010 apud POZZA, 2011; Carmody et al. (2004)



## APÊNDICE D – ENERGYPLUS

A modelagem das edificações, utilizadas neste trabalho, no sistema BIM foi realizada no Revit/Autodesk. Para tanto, foi utilizada o *template* de componentes BIM desenvolvida em parceria pelos escritórios Luis Contier e GDP – Gerenciamento e desenvolvimento de projetos, disponibilizada no site do Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior no início de 2011.

Este *template* fornece um arquivo precarregado com as famílias de sistemas mais utilizados em projetos de HIS, em acordo com as exigências da NBR 6492/1994 - Representação de Projetos de Arquitetura e NBR 15.873 - Norma de Coordenação Modular para Edificações e possuem campo para inserir o código Sinapi. Algumas destas famílias foram modificadas para estarem de acordo com as especificações de materiais utilizadas nesta pesquisa.

Após a modelagem das Edificações no sistema BIM, exportou-se os dados para o formato gbXML, o qual permite utilizar os dados do BIM em programas de simulação, como, por exemplo, Ecotect e *EnergyPlus*. Contudo, este formato apresentou incompatibilidade com o programa. Desta forma, as edificações foram remodeladas através do plugin *Open Studio* no *Google SketchUp*.

Com as edificações modeladas, criou-se uma biblioteca com os dados de entrada: materiais e sistemas construtivos, padrões de ocupação, iluminação e energia utilizada, ar condicionado, padrão de aberturas e fechamento de esquadrias, dados climáticos das cidades, temperatura de solo, entre outros. Erros que apareceram no processo de simulação das edificações foram reparados nesta fase do trabalho. Com as simulações dos sistemas estudados finalizadas, utilizou-se o Excel para organizar os dados de saída e permitir a análise dos resultados. Na Figura D.1 apresenta-se um fluxograma do método de modelagem.

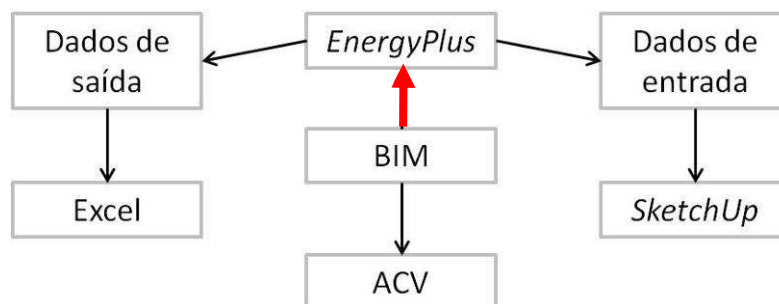


Figura D.1 – Fluxograma de modelagem das edificações

## APÊNDICE E – CUB

O Custo Unitário Básico (CUB) serve como parâmetro na determinação dos custos básicos da construção civil. Para isto, é realizada uma pesquisa dos preços de diferentes insumos empregados na construção de edificações. Cada tipo de edificação possui uma proporção de participação de cada um destes componentes.

Assim como o CUB é utilizado como indicador monetário, poderia ser utilizado para estimar o total de energia incorporada inicial da edificação, quando nas fases iniciais de projeto onde ainda não há todo o inventário de materiais a serem utilizados ou no estudo de apenas um dos elementos da edificação.

Para o cálculo da estimativa de EI inicial através do CUB, retirou-se da lista os materiais duplicados como, por exemplo, o cimento, telha de fibrocimento, portas, janelas, tintas, entre outros. Como exemplo, detalhou-se o cálculo do cimento. As estimativas de energia incorporada inicial dos demais materiais seguiram o mesmo procedimento de cálculo.

Dados:

CUB: HIS vertical (4 pavimentos)  
Quantidade = 57,01434 kg

Material: Cimento portland CP 32 II  
EI: 4,2

EI total: 56,39876 kg x 4,2

EI total: 236,87 MJ/kg

**Tabela E.1 – Energia incorporada estimada através do CUB HIS vertical – Edificação 1**

Material	Quant.	Unid	Dens.	Total [kg]	EI [MJ/kg]	Total [MJ/kg]
Chapa de compensado plastificado 18mm	0,82	m <sup>2</sup>	550,00	8,11	8,00	64,86
Aço CA 50 $\phi$ 10mm	18,44	kg		18,44	30,00	553,05
Concreto FCK 20Mpa conv. Br. 1 e 2 pré- mist.	0,28	m <sup>3</sup>	2.300,00	635,35	3,10	1.969,59
Cimento portland cp 32 II	57,01	kg		57,01	4,20	239,46
Areia média	0,18	m <sup>3</sup>	1.515,00	265,85	0,05	13,29
Brita n <sup>o</sup> 2	-	m <sup>3</sup>	1.650,00	-	0,15	-
Tijolo de 8 furos 9x19x19cm	59,87	uni		149,67	2,90	434,03
Bloco de concreto 19x19x39cm	1,34	uni		14,82	1,00	14,82
Telha de fibrocimento ondulada 6mm	0,41	m <sup>2</sup>	1.920,00	4,70	6,00	28,21
Porta interna semi-oca p/ pintura	0,09	uni		1,74	3,50	6,08
Esquadria de correr de alumínio anodizado	-	m <sup>2</sup>	2.700,00	-	210,00	-
Janela de correr de chapa dobrada	0,31	m <sup>2</sup>	7.850,00	0,00	30,00	0,04
Fechadura interna média cromada	0,09	uni		0,08	55,00	4,54
Azulejo branco 15X15	1,82	m <sup>2</sup>	2.000,00	10,91	6,20	67,64
Tampo de mármore 2,00X0,6 m	0,01	uni		0,02	1,00	0,02
Placa de gesso 70X70 cm	2,50	m <sup>2</sup>	800,00	5,99	4,50	26,96
Vidro liso transparente 4mm	0,18	m <sup>2</sup>	2.500,00	1,80	18,50	33,25
Tinta latex pva	2,30	l		3,00	65,00	194,75
Emulsão asfáltica impermeabilizante	1,75	kg		1,75	51,00	89,41
Fio de cobre anti chama	36,12	m		7,22	83,00	599,63
Disjuntor tripolar 70 A	0,36	uni		0,12	85,00	10,50

Bacia sanitária com caixa acoplada	0,04	uni	0,90	25,00	22,61
------------------------------------	------	-----	------	-------	-------

**Tabela E.1 – Energia incorporada estimada através do CUB HIS vertical – Edificação 1 – continuação**

Registro de pressão cromado $\phi$ ½	0,28	uni	0,03	95,00	3,06
Tubo de ferro galvanizado com costura $\phi$ 2 1/2	0,30	m	2,12	33,80	71,61
Tubo de PVC rígido reforçado $\phi$ 150mm	0,58	m	1,64	80,00	131,03
<b>Total [MJ/m<sup>2</sup>]</b>					<b>4.578,45</b>

**Tabela E.2 – Energia incorporada estimada através do CUB HIS horizontal – Edificação 2**

Material	Quant.	Unid	Dens.	Total [kg]	EI [MJ/kg]	Total [MJ/kg]
Chapa de compensado plastificado 18mm	1,52	m <sup>2</sup>	550,00	15,08	8,00	120,68
Aço CA 50 $\phi$ 10mm	18,28	kg		18,28	30,00	548,27
Concreto FCK 20 Mpa conv. Br. 1 e 2 pré- mist	0,26	m <sup>3</sup>	2300,00	601,66	3,10	1.865,14
Cimento portland cp 32 II	56,40	kg		56,40	4,20	236,87
Areia média	0,17	m <sup>3</sup>	1515,00	261,53	0,05	13,08
Brita n°2	-	m <sup>3</sup>	1650,00	-	0,15	-
Tijolo de 8 furos 9x19x19cm	58,58	uni		146,45	2,90	424,70
Bloco de concreto 19x19x39cm	-	uni		-	1,00	-
Telha de fibrocimento ondulada 6mm	2,86	m <sup>2</sup>	1920,00	32,93	6,00	197,61
Porta interna semi-oca p/ pintura	0,11	uni		2,26	3,50	7,90
Esquadria de correr de alumínio anodizado	-	m <sup>2</sup>	2700,00	-	210,00	-
Janela de correr de chapa dobrada	0,24	m <sup>2</sup>	7850,00	0,00	30,00	0,03
Fechadura interna média cromada	0,12	uni		0,10	55,00	5,70
Azulejo branco 15X15	1,89	m <sup>2</sup>	2000,00	11,32	6,20	70,17
Tampo de mármore 2,00X0,6 m	0,01	uni		0,02	1,00	0,02
Placa de gesso 70X70 cm	2,47	m <sup>2</sup>	800,00	5,93	4,50	26,71
Vidro liso transparente 4mm	0,13	m <sup>2</sup>	2500,00	1,32	18,50	24,42
Tinta latex pva	2,00	l		2,60	65,00	168,94
Emulsão asfáltica impermeabilizante	1,23	kg		1,23	51,00	62,95
Fio de cobre anti chama	15,59	m		3,12	83,00	258,78
Disjuntor tripolar 70 A	0,08	uni		0,03	85,00	2,44
Bacia sanitária com caixa acoplada	0,06	uni		1,42	25,00	35,50
Registro de pressão cromado $\phi$ 1/2	0,19	uni		0,02	95,00	2,05
Tubo de ferro galvanizado com costura $\phi$ 2 1/2	0,01	m		0,07	33,80	2,40
Tubo de PVC rígido reforçado $\phi$ 150mm	0,52	m		1,46	80,00	117,17
<b>Total [MJ/m<sup>2</sup>]</b>						<b>4.191,50</b>

**Tabela E.3 – Energia incorporada estimada através do CUB CM vertical – Edificação 3**

Material	Quant.	Unid	Dens.	Total [kg]	EI [MJ/kg]	Total [MJ/kg]
Chapa de compensado plastificado 18mm	1,42	m <sup>2</sup>	550,00	14,05	8,00	112,41
Aço CA 50 $\phi$ 10mm	28,25	kg		28,25	30,00	847,52
Concreto FCK 20 Mpa conv. Br. 1 e 2 pré- mist	0,27	m <sup>3</sup>	2.300,00	623,85	3,10	1.933,94
Cimento portland cp 32 II	65,35	kg		65,35	4,20	274,47
Areia média	0,21	m <sup>3</sup>	1.515,00	311,62	0,05	15,58
Brita n°2	0,03	m <sup>3</sup>	1.650,00	45,59	0,15	6,84
Tijolo de 8 furos 9x19x19cm	62,45	uni		156,14	2,90	452,79
Bloco de concreto 19x19x39cm	0,81	uni		8,95	1,00	8,95
Telha de fibrocimento ondulada 6mm	0,12	m <sup>2</sup>	1.920,00	1,44	6,00	8,62
Porta interna semi-oca p/ pintura	0,16	uni		3,12	3,50	10,91
Esquadria de correr de alumínio anodizado	0,08	m <sup>2</sup>	2.700,00	0,00	210,00	0,07





## APÊNDICE F – TRANSPORTE

Conforme descrito no item 3.5.2.1, a energia para o transporte dos materiais foi estimada para cada material separadamente e para cada cidade estudada (Bento Gonçalves e Porto Alegre). Detalhou-se, como exemplo, o cálculo do transporte do cimento, as estimativas de energia incorporada de transporte dos demais materiais seguiram o mesmo procedimento de cálculo.

Dados:

3 km = 35 MJ

Capacidade de carga: 14 ton

1 km = x            logo, x = 11,67 MJ

Distância até canteiro: 28 km

$11,67 \text{ MJ} / 14 \text{ ton} = 0,8335 \text{ MJ/ton}$

$28 \text{ km} \times 0,8335 / 1000 \text{ kg} = 0,023 \text{ MJ/ton/km}$

**Tabela F.1 – Locais de produção, capacidade do transporte e índices (MJ/t/km).**

Dados Material	Bento Gonçalves			Porto Alegre	
	Peso Total [ton]	Distância [Km]	Índice EI	Distância [Km]	Índice EI
Cimento	14	1,4	0,001167	13,6	0,011337
Cal	20	117	0,06827	9,7	0,00566
Aço	25	117	0,054616	13,8	0,006442
Areia	18,18	117	0,075104	13,6	0,00873
Brita	8,25	24,6	0,034798	12,2	0,017257
Madeira - Pinos	9,6	118	0,143444	33,5	0,040723
Madeira - Eucalipto	9,6	118	0,143444	33,5	0,040723
Compensado	13	6	0,005386	45,9	0,041204
Tijolos maciços	18	135	0,087525	27,1	0,01757
Tijolos 6 Furos	14	117	0,097528	10,8	0,009003
Blocos	18	120	0,0778	8,1	0,005252
Tintas	14	3,1	0,002584	3,5	0,002918
Vidros	1,5	2,8	0,021784	9,4	0,073132
Azulejo	26	1,7	0,000763	3,5	0,001571
Piso	26	1,7	0,000763	3,5	0,001571
Impermeabilizante	14	46,2	0,038511	4,9	0,004085
Canos de Pvc	10	26,4	0,030809	7,3	0,008519
Forro de pvc	8	120	0,17505	11,9	0,017359
Fiação elétrica	14	4,7	0,003918	6	0,005001
Lona	26	45,7	0,020512	28	0,012568
Telha de fibrocimento	15	30,3	0,023573	9,1	0,00708
Louças	10,5	1,3	0,001445	10,9	0,012115

**APÊNDICE G – MÉDIAS DE TEMPERATURAS INTERNAS**  
**EDIFICAÇÃO 1 – BENTO GONÇALVES**

**Tabela G.1 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 1 – Bento Gonçalves**

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
Ident.	$\alpha$	F01		F02		F03	
		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
C01	0,2	28,8	4,3	27,7	5,9	28,4	5,0
	0,4	30,8	4,7	29,4	6,3	30,1	5,4
	0,6	32,4	5,0	30,6	6,6	31,5	5,8
	0,8	33,7	5,4	31,7	6,9	32,7	6,1
C02	0,2	28,3	6,7	27,3	8,1	28,0	7,1
	0,4	29,3	6,9	28,3	8,3	28,9	7,3
	0,6	30,1	7,1	29,1	8,5	29,7	7,5
	0,8	30,9	7,3	29,7	8,6	30,3	7,7
C03	0,2	28,2	7,4	27,2	8,8	27,9	7,8
	0,4	28,9	7,6	27,9	8,9	28,6	7,9
	0,6	29,5	7,7	28,5	9,1	29,2	8,0
	0,8	30,1	7,8	29,1	9,2	29,7	8,2

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

**Tabela G.2 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 1 – Bento Gonçalves**

Sistema Constr.	Resultados [°C]											
	P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
0,2	29,0	9,2	29,3	8,4	29,0	8,6	28,8	9,7	28,9	8,1	28,3	9,7
0,4	29,6	9,3	29,8	8,6	29,6	8,8	29,3	9,8	29,6	8,3	28,8	9,9
0,6	30,0	9,4	30,3	8,7	30,1	8,9	29,7	9,9	30,1	8,4	29,2	10,0
0,8	30,4	9,5	30,9	8,8	30,6	9,0	30,0	10,0	30,6	8,5	29,6	10,1
$\alpha$	P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2	28,8	10,0	28,8	11,1	28,8	11,9	28,1	12,1	28,3	12,8	28,3	13,3
0,4	29,3	10,1	29,1	11,2	29,0	11,9	28,4	12,3	28,5	13,0	28,5	13,5
0,6	29,7	10,2	29,4	11,3	29,2	12,0	28,7	12,5	28,7	13,2	28,7	13,7
0,8	30,0	10,2	29,6	11,4	29,4	12,0	28,9	12,7	28,8	13,4	28,8	13,8

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

**Tabela G.3 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 1 – Bento Gonçalves**

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
Ident.	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
E01	29,0	9,2	27,5	8,8	27,8	8,8
E02	29,0	9,2	27,4	8,8	27,7	8,8
E03	28,9	9,6	27,2	9,2	27,5	9,3
E04	28,8	9,6	27,1	9,2	27,4	9,3
E05	28,2	8,9	26,3	8,3	26,4	8,3

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 1 – PORTO ALEGRE

Tabela G.4 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
Ident.	$\alpha$	F01		F02		F03	
		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
C01	0,2	32,3	7,2	31,3	8,6	31,9	8,0
	0,4	34,7	7,9	32,9	9,3	33,8	8,6
	0,6	36,9	8,5	34,6	10,0	35,8	9,2
	0,8	38,4	8,9	36,2	10,5	37,3	9,6
C02	0,2	31,6	9,6	30,9	10,6	31,4	10,0
	0,4	32,6	10,0	31,7	11,1	32,2	10,4
	0,6	33,7	10,4	32,5	11,5	33,1	10,8
	0,8	34,8	10,8	33,2	11,9	34,1	11,2
C03	0,2	31,5	10,4	30,9	11,3	31,2	10,7
	0,4	32,2	10,7	31,4	11,7	31,9	11,1
	0,6	32,9	11,0	31,9	12,1	32,5	11,4
	0,8	33,6	11,3	32,5	12,4	33,1	11,7

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.5 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema Constr.		Resultados [°C]											
$\alpha$		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
0,2		30,8	11,3	31,2	10,6	31,0	10,9	30,6	11,8	31,0	10,5	30,3	11,9
0,4		31,5	11,7	31,9	11,1	31,7	11,3	31,1	12,2	31,8	11,0	30,7	12,4
0,6		32,1	12,1	32,7	11,5	32,3	11,8	31,6	12,6	32,5	11,5	31,2	12,9
0,8		32,6	12,5	33,5	11,9	33,1	12,2	32,1	13,0	33,3	11,9	31,7	13,4
$\alpha$		P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2		30,5	12,1	30,3	13,1	30,3	13,8	30,0	13,8	30,0	14,5	30,0	14,9
0,4		31,0	12,5	30,7	13,4	30,5	14,0	30,3	14,2	30,2	14,8	30,1	15,2
0,6		31,5	12,8	31,0	13,7	30,7	14,3	30,6	14,5	30,4	15,0	30,3	15,4
0,8		31,9	13,2	31,3	14,0	30,9	14,5	30,9	14,8	30,7	15,3	30,5	15,6

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.6 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
Ident.	$\alpha$	Base		20%		25%	
		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
E01		30,8	11,3	31,0	11,6	31,1	11,7
E02		30,8	11,3	30,9	11,5	31,0	11,7
E03		30,7	11,6	30,8	11,9	30,9	12,1
E04		30,7	11,5	30,8	11,8	30,8	12,1
E05		30,3	10,6	30,4	10,7	30,5	10,8

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 2 – BENTO GONÇALVES

Tabela G.7 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados							
		F01		F02		F03		F04	
Ident.	$\alpha$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$
C01	0,2	28,4	7,4	27,3	8,5	28,0	8,0	28,7	7,3
	0,4	30,4	7,6	29,0	8,8	29,7	8,3	30,9	7,4
	0,6	32,2	7,8	30,2	9,1	31,2	8,4	32,6	7,6
	0,8	33,6	8,0	31,3	9,3	32,5	8,6	34,1	7,8
C02	0,2	27,6	9,4	26,8	10,4	27,3	9,8	28,0	9,1
	0,4	28,6	9,6	27,6	10,6	28,3	9,9	29,0	9,2
	0,6	29,5	9,7	28,4	10,8	29,1	10,1	29,9	9,3
	0,8	30,3	9,9	29,1	10,9	29,8	10,2	30,9	9,4
C03	0,2	27,4	10,1	26,7	11,0	27,2	10,4	27,8	9,7
	0,4	28,1	10,2	27,3	11,1	27,8	10,5	28,6	9,8
	0,6	28,9	10,3	27,8	11,2	28,5	10,6	29,2	9,8
	0,8	29,4	10,4	28,4	11,4	29,1	10,7	29,9	9,9

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.8 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema Constr.		Resultados											
		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$		$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$
0,2		28,4	11,4	28,7	10,5	28,4	10,8	28,1	11,9	28,3	10,2	27,5	11,8
0,4		29,1	11,6	29,5	10,7	29,2	11,0	28,7	12,0	29,2	10,5	28,1	12,0
0,6		29,7	11,7	30,2	10,9	29,9	11,2	29,3	12,1	29,9	10,7	28,7	12,1
0,8		30,2	11,8	30,8	11,1	30,5	11,3	29,8	12,2	30,6	10,8	29,2	12,2
$\alpha$		P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2		28,1	12,2	28,0	13,2	27,9	13,8	27,3	13,9	27,3	14,6	27,4	15,1
0,4		28,7	12,3	28,4	13,3	28,2	13,8	27,6	14,1	27,6	14,8	27,6	15,2
0,6		29,2	12,4	28,8	13,4	28,5	13,9	27,9	14,3	27,8	14,9	27,8	15,3
0,8		29,6	12,5	29,1	13,4	28,8	14,0	28,2	14,4	28,0	15,0	27,9	15,4

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.9 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$
E01	28,4	11,4	27,6	10,3	27,9	10,2
E02	28,3	11,4	27,6	10,3	27,9	10,2
E03	28,2	11,7	27,4	10,7	27,6	10,8
E04	28,2	11,7	27,4	10,7	27,6	10,7
E05	27,8	11,2	26,6	10,1	26,7	10,0

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 2 – PORTO ALEGRE

Tabela G.10 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados							
		F01		F02		F03		F04	
Ident.	$\alpha$	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
C01	0,2	31,5	9,7	30,4	10,8	31,1	10,3	31,9	9,7
	0,4	33,7	10,1	32,0	11,2	32,9	10,7	34,2	10,0
	0,6	36,0	10,4	33,6	11,7	34,7	11,0	36,4	10,2
	0,8	37,8	10,7	35,1	12,0	36,4	11,3	38,3	10,4
C02	0,2	30,6	11,7	30,0	12,5	30,4	12,0	31,0	11,4
	0,4	31,6	11,9	30,7	12,8	31,2	12,2	32,1	11,6
	0,6	32,5	12,1	31,4	13,0	32,0	12,4	33,2	11,8
	0,8	33,5	12,3	32,0	13,3	32,8	12,6	34,2	12,0
C03	0,2	30,4	12,3	29,8	13,0	30,2	12,6	30,8	11,9
	0,4	31,1	12,5	30,4	13,2	30,8	12,7	31,5	12,1
	0,6	31,7	12,6	30,8	13,4	31,4	12,9	32,3	12,2
	0,8	32,4	12,8	31,3	13,6	32,0	13,1	33,0	12,4

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.11 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Constr.		Resultados											
		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
0,2		30,2	12,6	30,7	11,8	30,3	12,1	29,9	13,1	30,4	11,7	29,6	13,2
0,4		30,9	12,9	31,6	12,1	31,2	12,4	30,5	13,4	31,3	12,1	30,0	13,7
0,6		31,7	13,1	32,4	12,4	32,0	12,7	31,1	13,7	30,5	14,1	30,5	14,1
0,8		32,3	13,4	33,3	12,7	32,8	13,0	31,7	14,0	33,1	12,8	31,1	14,4
$\alpha$		P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2		29,8	13,3	29,5	14,3	29,4	14,9	29,2	15,0	29,2	15,6	29,1	15,9
0,4		30,3	13,6	29,9	14,6	29,7	15,1	29,5	15,3	29,4	15,8	29,3	16,1
0,6		30,9	13,9	30,2	14,8	29,9	15,3	29,8	15,6	29,6	16,0	29,5	16,3
0,8		31,4	14,2	30,5	15,0	30,1	15,5	30,0	15,9	29,8	16,2	29,6	16,5

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.12 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
E01	30,2	12,6	30,5	12,6	30,6	12,6
E02	30,2	12,6	30,4	12,6	30,6	12,6
E03	30,0	12,8	30,3	12,9	30,4	13,0
E04	30,0	12,8	30,2	12,9	30,3	13,0
E05	29,7	12,5	29,8	12,5	29,9	12,3

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 3 – BENTO GONÇALVES

Tabela G.13 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
		F01		F02		F03	
Ident.	$\alpha$	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
C01	0,2	28,3	5,3	27,4	6,5	27,9	5,9
	0,4	29,7	5,6	28,8	6,9	29,3	6,2
	0,6	31,1	5,9	29,8	7,2	30,4	6,5
	0,8	32,3	6,2	30,6	7,5	31,3	6,8
C02	0,2	27,8	7,2	27,1	8,2	27,6	7,6
	0,4	28,7	7,5	27,8	8,5	28,4	7,8
	0,6	29,4	7,7	28,6	8,7	29,1	8,1
	0,8	29,9	7,9	29,2	8,9	29,6	8,2
C03	0,2	27,7	7,9	27,0	8,7	27,5	8,2
	0,4	28,4	8,1	27,6	8,9	28,1	8,4
	0,6	29,0	8,2	28,1	9,2	28,7	8,5
	0,8	29,4	8,4	28,6	9,4	29,2	8,7

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.14 – Temperaturas internas – Paredes externas– Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Constr.		Resultados [°C]											
		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
0,2		28,4	9,7	28,6	9,3	28,4	9,9	28,2	10,4	28,3	8,7	27,9	10,0
0,4		28,9	9,9	29,1	9,5	28,8	10,0	28,6	10,6	29,0	8,9	28,3	10,2
0,6		29,3	10,0	29,5	9,6	29,2	10,2	29,0	10,7	29,5	9,0	28,7	10,4
0,8		29,6	10,2	29,8	9,8	29,5	10,3	29,3	10,9	29,9	9,2	29,1	10,6
$\alpha$		P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2		28,2	10,6	28,2	11,5	28,3	12,0	27,8	11,7	28,0	12,3	28,1	12,7
0,4		28,5	10,8	28,5	11,7	28,4	12,2	28,1	11,9	28,2	12,5	28,2	12,9
0,6		28,9	10,9	28,7	11,8	28,6	12,3	28,3	12,1	28,3	12,6	28,3	13,0
0,8		29,2	11,1	28,9	11,9	28,8	12,4	28,5	12,3	28,5	12,8	28,5	13,1

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.15 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
		Base		20%		25%	
Ident.		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
E01		28,4	9,7	27,4	9,3	27,7	9,3
E02		28,4	9,7	27,3	9,3	27,6	9,3
E03		28,2	10,2	27,1	9,7	27,4	9,8
E04		28,1	10,2	27,0	9,7	27,3	9,8
E05		27,2	9,3	26,1	8,8	26,2	8,8

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 3 – PORTO ALEGRE

Tabela G.16 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
		F01		F02		F03	
Ident.	$\alpha$	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
C01	0,2	31,7	7,9	30,8	9,0	31,3	8,5
	0,4	33,4	8,5	32,1	9,6	32,7	9,0
	0,6	35,2	9,1	33,4	10,2	34,2	9,6
	0,8	36,6	9,6	34,8	10,7	35,6	10,1
C02	0,2	31,1	9,8	30,6	10,7	30,9	10,2
	0,4	31,9	10,2	31,2	11,1	31,6	10,5
	0,6	32,8	10,6	31,8	11,5	32,3	10,9
	0,8	33,6	10,9	32,5	11,8	33,0	11,3
C03	0,2	31,0	10,5	30,6	11,3	30,8	10,8
	0,4	31,6	10,8	31,0	11,6	31,4	11,1
	0,6	32,2	11,1	31,5	11,9	31,9	11,4
	0,8	32,8	11,4	31,9	12,2	32,3	11,6

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.17 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema Constr.		Resultados [°C]											
		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
0,2		31,0	12,0	31,1	11,6	30,9	12,2	30,8	12,7	31,1	11,1	30,6	12,4
0,4		31,4	12,4	31,7	12,0	31,4	12,5	31,1	13,0	31,7	11,5	31,0	12,8
0,6		31,9	12,7	32,2	12,3	31,8	12,8	31,5	13,3	32,3	11,9	31,4	13,2
0,8		32,4	13,0	32,7	12,6	32,2	13,2	31,8	13,6	32,9	12,3	31,8	13,6
$\alpha$		P07		P08		P13		P14		P15		P16	
0,2		30,7	12,9	30,7	13,8	30,7	14,4	30,5	14,2	30,6	14,9	30,6	15,3
0,4		31,1	13,2	30,9	14,1	30,9	14,6	30,8	14,5	30,8	15,1	30,7	15,4
0,6		31,4	13,5	31,1	14,3	31,0	14,8	31,1	14,7	31,0	15,2	30,9	15,6
0,8		31,7	13,8	31,3	14,5	31,2	14,9	31,3	15,0	31,1	15,4	31,0	15,7

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.18 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
		Base		20%		25%	
Ident.		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
E01		31,0	12,0	30,9	12,0	31,0	12,1
E02		31,0	12,0	30,9	12,0	31,0	12,0
E03		30,8	12,4	30,8	12,4	30,9	12,5
E04		30,8	12,4	30,8	12,4	30,8	12,5
E05		30,5	11,4	30,5	11,4	30,5	11,4

Obs.: sistema construtivo base: E01.



## EDIFICAÇÃO 4 – BENTO GONÇALVES

Tabela G.19 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados							
		F01		F02		F03		F04	
Ident.	$\alpha$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$
C01	0,2	27,0	8,4	26,5	9,2	26,8	8,9	27,1	8,3
	0,4	28,2	8,6	27,4	9,5	27,9	9,1	28,3	8,5
	0,6	29,3	8,8	28,4	9,6	28,8	9,3	29,5	8,7
	0,8	30,4	9,0	29,1	9,7	29,6	9,4	30,5	8,9
C02	0,2	26,6	9,9	26,2	10,4	26,5	10,1	26,7	9,7
	0,4	27,2	10,0	26,7	10,5	27,0	10,2	27,4	9,8
	0,6	27,8	10,1	27,1	10,7	27,5	10,3	27,9	9,9
	0,8	28,3	10,2	27,6	10,7	28,0	10,4	28,4	10,0
C03	0,2	26,5	10,3	26,1	10,8	26,4	10,5	26,7	10,1
	0,4	26,9	10,4	26,5	10,9	26,8	10,5	27,1	10,2
	0,6	27,4	10,5	26,8	11,0	27,2	10,6	27,6	10,3
	0,8	27,8	10,5	27,1	11,0	27,5	10,7	27,9	10,3

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.20 – Temperaturas internas – Paredes externas– Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema Constr.		Resultados											
		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$		$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$
0,2		27,0	11,2	27,2	10,7	26,9	11,4	26,8	12,0	27,1	10,0	26,5	11,4
0,4		27,7	11,4	28,0	10,9	27,6	11,6	27,3	12,2	28,0	10,2	27,1	11,7
0,6		28,4	11,5	28,8	11,0	28,3	11,7	27,9	12,3	28,9	10,3	27,7	12,0
0,8		29,1	11,6	29,5	11,2	28,9	11,8	28,4	12,4	29,7	10,5	28,2	12,1
$\alpha$		P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2		26,7	12,2	26,6	13,3	26,6	14,0	26,4	13,5	26,5	14,3	26,5	14,8
0,4		27,2	12,4	27,0	13,5	26,9	14,2	26,8	13,8	26,7	14,5	26,7	14,9
0,6		27,7	12,6	27,3	13,6	27,1	14,3	27,1	14,0	27,0	14,7	26,9	15,1
0,8		28,2	12,7	27,6	13,7	27,4	14,4	27,4	14,3	27,2	14,9	27,1	15,3

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.21 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo	Resultados [°C]					
	Base		20%		25%	
	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$	$T_{i_{m\acute{a}x}}$	$T_{i_{m\acute{i}n}}$
E01	27,0	11,2	26,5	10,9	26,7	10,8
E02	27,0	11,2	26,4	10,9	26,6	10,8
E03	26,8	11,5	26,3	11,2	26,5	11,2
E04	26,8	11,5	26,2	11,2	26,4	11,2
E05	26,2	10,9	25,7	10,6	25,7	10,5

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 4 – PORTO ALEGRE

Tabela G.22 – Temperaturas internas – Coberturas – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados							
		F01		F02		F03		F04	
Ident.	$\alpha$	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
C01	0,2	30,5	10,6	30,0	11,3	30,3	11,1	30,7	10,6
	0,4	31,7	11,0	30,9	11,7	31,3	11,4	31,9	10,9
	0,6	32,9	11,3	31,8	12,0	32,2	11,7	33,1	11,2
	0,8	34,0	11,6	32,6	12,4	33,2	12,0	34,2	11,5
C02	0,2	30,1	12,0	29,8	12,5	30,0	12,2	30,3	11,8
	0,4	30,7	12,2	30,2	12,7	30,5	12,4	30,8	12,0
	0,6	31,1	12,4	30,6	12,9	30,9	12,6	31,4	12,2
	0,8	31,6	12,6	31,0	13,2	31,3	12,8	32,0	12,4
C03	0,2	30,0	12,4	29,8	12,8	29,9	12,6	30,2	12,2
	0,4	30,4	12,6	30,1	13,0	30,3	12,7	30,6	12,4
	0,6	30,8	12,7	30,3	13,2	30,6	12,9	31,0	12,5
	0,8	31,1	12,9	30,6	13,4	30,9	13,1	31,4	12,7

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.23 – Temperaturas internas – Paredes externas – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema Constr.		Resultados											
		P01		P02		P03		P04		P05		P06	
$\alpha$		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
0,2		30,1	13,0	30,3	12,6	30,0	13,2	29,8	13,8	30,3	12,0	29,7	13,4
0,4		30,7	13,5	31,0	13,0	30,6	13,6	30,3	14,2	31,1	12,5	30,2	14,0
0,6		31,3	13,9	31,7	13,4	31,2	14,0	30,7	14,6	31,9	13,0	30,7	14,4
0,8		31,9	14,2	32,4	13,8	31,8	14,4	31,2	14,9	32,8	13,5	31,2	14,9
$\alpha$		P07		P08		P09		P10		P11		P12	
0,2		29,7	14,0	29,6	15,0	29,5	15,7	29,5	15,4	29,4	16,0	29,4	16,5
0,4		30,2	14,4	29,9	15,4	29,8	15,9	29,8	15,7	29,6	16,3	29,6	16,6
0,6		30,6	14,8	30,2	15,7	30,0	16,2	30,0	16,0	29,9	16,5	29,8	16,8
0,8		31,0	15,1	30,4	15,9	30,2	16,3	30,3	16,3	30,1	16,7	29,9	17,0

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela G.24 – Temperaturas internas – Esquadrias – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados [°C]					
		Base		20%		25%	
Ident.		Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>	Ti <sub>máx</sub>	Ti <sub>mín</sub>
E01		30,1	13,0	30,0	13,0	30,2	13,1
E02		30,0	13,0	30,0	13,0	30,1	13,0
E03		29,9	13,3	29,9	13,3	30,0	13,4
E04		29,9	13,3	29,9	13,2	30,0	13,4
E05		29,5	12,6	29,5	12,6	29,5	12,5

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## APÊNDICE H – MÉDIAS DE GRAUS-HORA

### EDIFICAÇÃO 1 – BENTO GONÇALVES

Tabela H.1 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 1 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados [h]								
		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	1	3872	4887	0	3195	5565	0	2972	5788
	0,4	50	3436	5274	6	2943	5811	2	2799	5959
	0,6	150	3092	5518	28	2740	5992	8	2644	6108
	0,8	256	2823	5681	65	2579	6116	28	2505	6227
F02	0,2	0	3749	5011	0	3156	5604	0	2962	5798
	0,4	5	3299	5456	0	2900	5860	0	2769	5991
	0,6	44	2945	5771	2	2678	6080	0	2582	6178
	0,8	113	2649	6000	11	2493	6256	2	2442	6316
F03	0,2	0	3712	5048	0	3130	5630	0	2932	5828
	0,4	26	3306	5428	2	2891	5867	0	2765	5995
	0,6	90	2986	5684	13	2700	6047	4	2615	6141
	0,8	179	2733	5848	37	2535	6188	13	2468	6279

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.2 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 1 – Bento Gonçalves

Sistema Constr.		Resultados [h]								
		P01			P02			P03		
$\alpha$		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
0,2		2	2448	6310	5	2621	6134	2	2609	6149
0,4		10	2278	6472	17	2416	6327	12	2408	6340
0,6		25	2114	6621	42	2246	6472	32	2230	6498
0,8		49	1956	6755	76	2072	6612	61	2063	6636
$\alpha$		P04			P05			P06		
0,2		1	2353	6406	1	2811	5948	1	2503	6256
0,4		5	2185	6570	10	2568	6182	1	2301	6458
0,6		15	2035	6710	32	2358	6370	4	2120	6636
0,8		31	1876	6853	65	2173	6522	15	1945	6800
$\alpha$		P07			P08			P13		
0,2		1	2256	6503	2	1906	6852	2	1675	7083
0,4		5	2106	6649	3	1788	6969	2	1582	7176
0,6		13	1952	6795	7	1669	7084	5	1488	7267
0,8		26	1801	6933	13	1566	7181	7	1372	7381
$\alpha$		P14			P15			P16		
0,2		0	1963	6797	0	1710	7050	1	1521	7238
0,4		1	1828	6931	1	1593	7166	1	1427	7332
0,6		1	1705	7054	1	1490	7269	1	1336	7423
0,8		1	1582	7177	1	1386	7373	1	1233	7526

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.3 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 1 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados [h]								
		Base			20%			25%		
Ident.		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
E01		2	2448	6310	0	2826	5934	0	2710	6050
E02		2	2461	6297	0	2854	5906	0	2739	6021
E03		1	2378	6381	0	2785	5975	0	2629	6131
E04		1	2404	6355	0	2822	5938	0	2677	6083
E05		0	2829	5931	0	3444	5316	0	3400	5360

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 1 – PORTO ALEGRE

Tabela H.4 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	194	2956	5610	170	2187	6403	161	1889	6710
	0,4	414	2559	5787	267	1930	6563	231	1718	6811
	0,6	663	2256	5841	374	1742	6644	302	1555	6903
	0,8	865	1980	5915	494	1570	6696	383	1426	6951
F02	0,2	120	2834	5806	110	2070	6580	108	1807	6845
	0,4	268	2407	6085	190	1819	6751	169	1593	6998
	0,6	450	2061	6249	266	1594	6899	225	1432	7103
	0,8	642	1770	6348	348	1413	6999	282	1295	7183
F03	0,2	168	2786	5806	150	2085	6525	142	1829	6789
	0,4	333	2408	6019	234	1850	6676	208	1646	6906
	0,6	539	2125	6096	317	1667	6776	265	1500	6995
	0,8	739	1858	6163	416	1501	6843	333	1372	7055

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.5 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Constr.		P01			P02			P03		
$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	
0,2	108	1807	6845	130	1958	6672	114	1941	6705	
0,4	174	1551	7035	209	1693	6858	188	1677	6895	
0,6	238	1349	7173	289	1461	7010	263	1440	7057	
0,8	308	1163	7289	391	1263	7106	354	1247	7159	
$\alpha$	P04			P05			P06			
0,2	96	1710	6954	113	2093	6554	78	1833	6849	
0,4	147	1455	7158	197	1802	6761	128	1558	7074	
0,6	204	1269	7287	287	1544	6929	188	1312	7260	
0,8	264	1090	7406	390	1312	7058	255	1102	7403	
$\alpha$	P07			P08			P13			
0,2	95	1594	7071	88	1271	7401	83	1045	7632	
0,4	141	1380	7239	115	1115	7530	106	930	7724	
0,6	193	1209	7358	147	976	7637	128	828	7804	
0,8	245	1038	7477	186	847	7727	154	739	7867	
$\alpha$	P14			P15			P16			
0,2	67	1294	7399	65	1006	7689	65	820	7875	
0,4	88	1072	7600	82	853	7825	77	697	7986	
0,6	118	907	7735	101	722	7937	89	592	8079	
0,8	149	762	7849	123	606	8031	106	511	8143	

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.6 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		Base			20%			25%		
Ident.	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	
E01	108	1807	6845	128	1668	6964	150	1544	7066	
E02	104	1827	6829	125	1690	6945	144	1570	7046	
E03	92	1758	6910	107	1594	7059	123	1450	7187	
E04	88	1786	6886	103	1632	7025	117	1486	7157	
E05	50	2286	6424	57	2209	6494	59	2167	6534	

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 2 – BENTO GONÇALVES

Tabela H.7 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	0	3374	5386	0	2723	6037	0	2542	6218
	0,4	32	3039	5689	0	2543	6217	0	2387	6373
	0,6	130	2768	5862	11	2383	6366	0	2258	6502
	0,8	244	2537	5979	34	2234	6492	8	2140	6612
F02	0,2	0	3233	5527	0	2679	6081	0	2508	6252
	0,4	0	2861	5899	0	2495	6265	0	2353	6407
	0,6	26	2612	6122	0	2321	6439	0	2203	6557
	0,8	85	2378	6297	1	2160	6599	0	2080	6680
F03	0,2	0	3207	5553	0	2668	6092	0	2504	6256
	0,4	14	2896	5850	0	2498	6262	0	2358	6402
	0,6	69	2648	6043	1	2337	6422	0	2223	6537
	0,8	151	2441	6168	15	2194	6551	1	2109	6650
F04	0,2	0	3324	5436	0	2724	6036	0	2541	6219
	0,4	50	3016	5694	1	2546	6213	0	2403	6357
	0,6	158	2760	5842	25	2393	6342	4	2279	6477
	0,8	270	2552	5938	64	2249	6447	23	2160	6577

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.8 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema		Resultados [h]								
Constr.		P01			P02			P03		
$\alpha$		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
0,2		0	2080	6680	0	2301	6459	0	2285	6475
0,4		1	1873	6886	8	2068	6684	3	2048	6709
0,6		12	1683	7065	31	1864	6865	15	1846	6899
0,8		30	1514	7216	66	1690	7004	42	1657	7061
$\alpha$		P04			P05			P06		
0,2		0	1945	6815	0	2497	6263	0	2131	6629
0,4		0	1748	7012	1	2249	6510	0	1906	6854
0,6		2	1551	7207	15	2012	6733	0	1698	7062
0,8		11	1380	7369	44	1799	6917	1	1493	7266
$\alpha$		P07			P08			P09		
0,2		0	1812	6948	0	1319	7441	0	988	7772
0,4		0	1618	7142	0	1180	7580	0	881	7879
0,6		1	1443	7316	0	1046	7714	0	793	7967
0,8		8	1283	7469	1	933	7826	0	727	8033
$\alpha$		P10			P11			P12		
0,2		0	1438	7322	0	1013	7747	0	793	7967
0,4		0	1239	7521	0	901	7859	0	712	8048
0,6		0	1076	7684	0	792	7968	0	637	8123
0,8		0	939	7821	0	708	8052	0	571	8189

Tabela H.9 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		Base			20%			25%		
Ident.		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
E01		0	2080	6680	0	2376	6384	0	2329	6431
E02		0	2091	6669	0	2393	6367	0	2342	6418
E03		0	2005	6755	0	2295	6465	0	2222	6538
E04		0	2022	6738	0	2320	6440	0	2249	6511
E05		0	2306	6454	0	2712	6048	0	2699	6061

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 2 – PORTO ALEGRE

Tabela H.10 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Constr.		Resultados [h]								
		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	127	2337	6296	69	1510	7181	57	1239	7464
	0,4	315	2025	6420	154	1331	7275	117	1121	7522
	0,6	546	1768	6446	234	1198	7328	171	1026	7563
	0,8	758	1562	6440	333	1086	7341	227	948	7585
F02	0,2	54	2172	6534	35	1387	7338	31	1127	7602
	0,4	173	1845	6742	77	1195	7488	58	1004	7698
	0,6	308	1553	6899	138	1049	7573	99	911	7750
	0,8	471	1318	6971	194	937	7629	141	839	7780
F03	0,2	95	2156	6509	55	1419	7286	46	1178	7536
	0,4	234	1852	6674	123	1245	7392	91	1064	7605
	0,6	406	1613	6741	183	1127	7450	139	974	7647
	0,8	600	1418	6742	258	1022	7480	184	900	7676
F04	0,2	160	2266	6334	104	1514	7142	88	1272	7400
	0,4	384	1987	6389	193	1363	7204	155	1157	7448
	0,6	626	1762	6372	309	1235	7216	222	1070	7468
	0,8	814	1584	6362	427	1124	7209	306	998	7456

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.11 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Constr.		Resultados [h]								
		P01			P02			P03		
$\alpha$		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
0,2		46	1178	7536	72	1391	7297	54	1358	7348
0,4		101	1009	7650	146	1190	7424	119	1152	7489
0,6		158	871	7731	232	1030	7498	191	989	7580
0,8		224	763	7773	330	895	7535	272	852	7636
$\alpha$		P04			P05			P06		
0,2		32	1056	7672	52	1575	7133	22	1180	7558
0,4		66	901	7793	125	1305	7330	44	971	7745
0,6		117	779	7864	86	807	7867	86	807	7867
0,8		167	673	7920	302	945	7513	140	663	7957
$\alpha$		P07			P08			P09		
0,2		30	957	7773	23	666	8071	16	515	8229
0,4		59	817	7884	34	583	8143	28	458	8274
0,6		107	722	7931	56	510	8194	38	405	8317
0,8		148	617	7995	83	448	8229	54	353	8353
$\alpha$		P10			P11			P12		
0,2		9	611	8140	7	412	8341	6	304	8450
0,4		20	500	8240	14	341	8405	11	258	8491
0,6		42	410	8308	25	290	8445	18	217	8525
0,8		55	339	8366	43	241	8476	28	182	8550

Tabela H.12 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		Resultados [h]								
		Base			20%			25%		
Ident.		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
E01		46	1178	7536	71	1106	7583	89	1075	7596
E02		45	1186	7529	67	1115	7578	83	1084	7593
E03		39	1121	7600	53	1012	7695	67	969	7724
E04		36	1134	7590	50	1028	7682	62	984	7714
E05		24	1391	7345	27	1384	7349	29	1377	7354

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 3 – BENTO GONÇALVES

Tabela H.13 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados [h]								
		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	0	3790	4970	0	3175	5585	0	2982	5778
	0,4	18	3408	5334	2	2966	5792	0	2819	5941
	0,6	75	3092	5593	11	2783	5966	4	2674	6082
	0,8	145	2849	5766	28	2621	6111	12	2548	6200
F02	0,2	0	3687	5073	0	3155	5605	0	2969	5791
	0,4	1	3334	5425	0	2941	5819	0	2806	5954
	0,6	17	3025	5718	0	2737	6023	0	2636	6124
	0,8	55	2768	5937	3	2566	6191	0	2506	6254
F03	0,2	0	3637	5123	0	3128	5632	0	2944	5816
	0,4	7	3299	5454	0	2925	5835	0	2789	5971
	0,6	40	3017	5703	4	2746	6010	1	2645	6114
	0,8	93	2784	5883	14	2588	6158	4	2524	6232

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.14 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Constr.		Resultados [h]								
		P01			P02			P03		
$\alpha$		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
0,2		0	2518	6242	0	2616	6144	0	2480	6280
0,4		1	2367	6392	2	2460	6298	1	2332	6427
0,6		7	2228	6525	11	2306	6443	6	2198	6556
0,8		16	2101	6643	26	2171	6563	14	2069	6677
$\alpha$		P04			P05			P06		
0,2		0	2324	6436	0	2879	5881	0	2586	6174
0,4		0	2207	6553	1	2662	6097	0	2408	6352
0,6		2	2088	6670	11	2487	6262	0	2252	6508
0,8		7	1969	6784	28	2315	6417	3	2107	6650
$\alpha$		P07			P08			P13		
0,2		0	2281	6479	0	2000	6760	0	1810	6950
0,4		0	2169	6591	0	1904	6856	0	1740	7020
0,6		1	2051	6708	0	1816	6944	0	1660	7100
0,8		5	1936	6819	2	1726	7032	1	1588	7171
$\alpha$		P14			P15			P16		
0,2		0	2110	6650	0	1880	6880	0	1702	7058
0,4		0	1993	6767	0	1795	6965	0	1630	7130
0,6		0	1895	6865	0	1700	7060	0	1560	7200
0,8		0	1798	6962	0	1617	7143	0	1495	7265

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.15 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		Resultados [h]								
		Base			20%			25%		
Ident.		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
E01		0	2518	6242	0	2824	5936	0	2721	6039
E02		0	2541	6219	0	2854	5906	0	2749	6011
E03		0	2428	6332	0	2760	6000	0	2631	6129
E04		0	2458	6302	0	2804	5956	0	2671	6089
E05		0	3058	5702	0	3436	5324	0	3399	5361

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 3 – PORTO ALEGRE

Tabela H.16 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	172	2859	5729	154	2109	6497	149	1835	6776
	0,4	326	2501	5933	234	1875	6651	210	1654	6896
	0,6	516	2204	6040	309	1686	6765	263	1516	6981
	0,8	720	1943	6097	402	1525	6833	323	1400	7037
F02	0,2	116	2760	5884	113	2029	6618	112	1765	6883
	0,4	234	2389	6137	172	1795	6793	156	1584	7020
	0,6	363	2061	6336	240	1582	6938	207	1430	7123
	0,8	516	1783	6461	302	1424	7034	253	1300	7207
F03	0,2	150	2698	5912	141	2033	6586	139	1775	6846
	0,4	275	2363	6122	211	1807	6742	190	1609	6961
	0,6	426	2082	6252	270	1615	6875	240	1476	7044
	0,8	584	1826	6350	350	1474	6936	285	1362	7113

Obs.: sistema construtivo base: F01, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.17 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Constr.		P01			P02			P03		
$\alpha$		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
0,2		149	1584	7027	155	1684	6921	144	1536	7080
0,4		200	1388	7172	217	1480	7063	195	1352	7213
0,6		255	1209	7296	278	1297	7185	245	1176	7339
0,8		310	1048	7402	346	1124	7290	300	1021	7439
$\alpha$		P04			P05			P06		
0,2		136	1390	7234	146	1906	6708	119	1619	7022
0,4		179	1210	7371	216	1657	6887	169	1396	7195
0,6		226	1051	7483	291	1442	7027	221	1195	7344
0,8		268	922	7570	370	1260	7130	278	1023	7459
$\alpha$		P07			P08			P13		
0,2		135	1338	7287	135	1001	7624	136	795	7829
0,4		174	1168	7418	163	883	7714	158	707	7895
0,6		215	1008	7537	190	771	7799	178	628	7954
0,8		257	889	7614	221	687	7852	203	559	7998
$\alpha$		P14			P15			P16		
0,2		109	1054	7597	111	758	7891	113	577	8070
0,4		138	886	7736	133	654	7973	131	495	8134
0,6		170	754	7836	155	554	8051	147	431	8182
0,8		200	639	7921	184	472	8104	169	380	8211

Obs.: sistema construtivo base: P01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.18 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		Base			20%			25%		
Ident.		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
E01		149	1584	7027	144	1601	7015	162	1493	7105
E02		141	1603	7016	138	1621	7001	156	1520	7084
E03		127	1488	7145	128	1515	7117	140	1384	7236
E04		122	1526	7112	119	1552	7089	132	1425	7203
E05		69	2181	6510	68	2188	6504	71	2147	6542

Obs.: sistema construtivo base: E01.



## EDIFICAÇÃO 4 – BENTO GONÇALVES

Tabela H.19 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	0	3352	5408	0	2932	5828	0	2814	5946
	0,4	2	3062	5696	0	2784	5976	0	2697	6063
	0,6	22	2827	5911	0	2641	6119	0	2585	6175
	0,8	59	2631	6070	3	2520	6237	0	2492	6268
F02	0,2	0	3288	5472	0	2931	5829	0	2832	5928
	0,4	0	3013	5747	0	2784	5976	0	2699	6061
	0,6	2	2784	5974	0	2631	6129	0	2586	6174
	0,8	17	2585	6158	0	2518	6242	0	2482	6278
F03	0,2	0	3245	5515	0	2903	5857	0	2791	5969
	0,4	0	2997	5763	0	2759	6001	0	2680	6080
	0,6	10	2782	5968	0	2627	6133	0	2580	6180
	0,8	31	2597	6132	0	2512	6248	0	2492	6268
F04	0,2	0	3290	5470	0	2922	5838	0	2810	5950
	0,4	3	3031	5726	0	2778	5982	0	2701	6059
	0,6	23	2814	5923	0	2640	6120	0	2587	6173
	0,8	64	2626	6070	6	2520	6234	0	2494	6266

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.20 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema		Resultados [h]								
Constr.		P01			P02			P03		
$\alpha$		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
0,2		0	2480	6280	0	2611	6149	0	2426	6335
0,4		0	2232	6528	0	2350	6410	0	2187	6573
0,6		0	2011	6750	1	2115	6645	0	1968	6792
0,8		2	1816	6943	8	1911	6842	1	1776	6984
$\alpha$		P04			P05			P06		
0,2		0	2244	6516	0	2900	5861	0	2565	6196
0,4		0	2028	6732	0	2592	6168	0	2288	6472
0,6		0	1829	6931	1	2315	6444	0	2051	6709
0,8		0	1650	7110	10	2077	6674	0	1839	6921
$\alpha$		P07			P08			P09		
0,2		0	2181	6579	0	1757	7003	0	1448	7313
0,4		0	1975	6785	0	1591	7170	0	1309	7452
0,6		0	1775	6985	0	1434	7326	0	1189	7571
0,8		0	1604	7156	0	1284	7476	0	1082	7678
$\alpha$		P10			P11			P12		
0,2		0	1936	6824	0	1543	7217	0	1279	7482
0,4		0	1724	7037	0	1389	7372	0	1157	7603
0,6		0	1538	7222	0	1246	7514	0	1047	7714
0,8		0	1364	7396	0	1120	7640	0	937	7823

Tabela H.21 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		Base			20%			25%		
Ident.		Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
E01		0	2477	6283	0	2713	6047	0	2619	6141
E02		0	2494	6266	0	2734	6026	0	2640	6120
E03		0	2413	6347	0	2673	6088	0	2546	6214
E04		0	2434	6326	0	2699	6061	0	2580	6180
E05		0	2869	5891	0	3112	5648	0	3080	5680

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## EDIFICAÇÃO 4 – PORTO ALEGRE

Tabela H.22 – Nível de conforto térmico – Coberturas – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		C01			C02			C03		
Ident.	$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto
F01	0,2	60	2283	6417	45	1717	6998	42	1547	7171
	0,4	146	2014	6600	81	1560	7119	65	1430	7265
	0,6	252	1780	6728	123	1440	7197	93	1343	7324
	0,8	370	1592	6798	161	1330	7269	124	1258	7378
F02	0,2	39	2196	6525	32	1684	7044	32	1512	7216
	0,4	99	1919	6742	55	1523	7182	47	1388	7325
	0,6	167	1684	6909	86	1384	7290	67	1292	7401
	0,8	252	1489	7019	116	1278	7366	87	1204	7469
F03	0,2	50	2156	6554	40	1676	7044	37	1514	7209
	0,4	118	1902	6740	70	1518	7172	57	1407	7296
	0,6	195	1683	6882	104	1402	7254	82	1322	7356
	0,8	286	1520	6954	139	1310	7311	107	1233	7420
F04	0,2	69	2222	6469	50	1712	6998	46	1556	7158
	0,4	158	1970	6632	93	1563	7104	76	1442	7242
	0,6	272	1756	6732	137	1445	7178	108	1355	7297
	0,8	392	1575	6793	180	1339	7241	137	1272	7351

Obs.: sistema construtivo base: F04, C01 com  $\alpha$  de 0,2.

Tabela H.23 – Nível de conforto térmico – Paredes externas – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Constr.		P01			P02			P03		
$\alpha$	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	
0,2	47	1387	7326	53	1512	7195	45	1337	7378	
0,4	86	1158	7516	105	1264	7391	79	1112	7569	
0,6	137	949	7674	165	1042	7553	127	911	7722	
0,8	191	787	7782	228	869	7663	178	766	7816	
$\alpha$	P04			P05			P06			
0,2	37	1166	7557	54	1809	6897	35	1455	7270	
0,4	65	960	7735	112	1479	7169	66	1162	7532	
0,6	101	804	7855	184	1223	7353	109	949	7702	
0,8	139	663	7958	268	1001	7491	158	770	7832	
$\alpha$	P07			P08			P09			
0,2	35	1103	7622	32	753	7975	32	562	8166	
0,4	60	910	7790	47	644	8069	41	473	8246	
0,6	91	764	7905	67	530	8163	54	399	8307	
0,8	126	621	8013	87	442	8231	67	330	8363	
$\alpha$	P10			P11			P12			
0,2	28	792	7940	26	518	8216	25	351	8384	
0,4	42	628	8090	35	412	8313	32	283	8445	
0,6	63	500	8197	48	326	8386	42	238	8480	
0,8	89	395	8276	66	257	8437	52	194	8514	

Tabela H.24 – Nível de conforto térmico – Esquadrias – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema		Resultados [h]								
Construtivo		Base			20%			25%		
Ident.	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	Calor	Frio	Conforto	
E01	47	1384	7329	45	1403	7312	54	1325	7381	
E02	46	1396	7318	45	1414	7301	52	1338	7370	
E03	39	1334	7387	37	1353	7370	44	1257	7459	
E04	37	1351	7372	36	1371	7353	42	1281	7437	
E05	20	1756	6984	20	1762	6978	22	1738	7000	

Obs.: sistema construtivo base: E01.

## APÊNDICE H – ENERGIA INCORPORADA – SÍNTESE

### EDIFICAÇÃO 1 – BENTO GONÇALVES

**Tabela I.1 – EI – Coberturas – Edificação 1 – Bento Gonçalves**

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.619,87	8.281,458	12.901,33
	0,4	4.619,87	8.233,518	12.853,39
	0,6	4.619,87	8.223,798	12.843,67
	0,8	4.619,87	8.231,724	12.851,60
C1/F2	0,2	4.679,08	8.180,495	12.859,57
	0,4	4.679,08	8.104,306	12.783,38
	0,6	4.679,08	8.068,701	12.747,78
	0,8	4.679,08	8.061,901	12.740,98
C1/F3	0,2	5.055,91	8.176,998	13.232,91
	0,4	5.055,91	8.126,143	13.182,05
	0,6	5.055,91	8.107,205	13.163,11
	0,8	5.055,91	8.103,768	13.159,68
C2/F1	0,2	4.621,20	7.944,028	12.565,23
	0,4	4.621,20	7.919,387	12.540,59
	0,6	4.621,20	7.907,516	12.528,72
	0,8	4.621,20	7.903,931	12.525,14
C2/F2	0,2	4.680,41	7.884,341	12.564,75
	0,4	4.680,41	7.849,349	12.529,76
	0,6	4.680,41	7.826,942	12.507,35
	0,8	4.680,41	7.820,916	12.501,32
C2/F3	0,2	5.057,24	7.902,776	12.960,02
	0,4	5.057,24	7.876,528	12.933,77
	0,6	5.057,24	7.860,133	12.917,37
	0,8	5.057,24	7.852,766	12.910,01
C3/F1	0,2	4.623,77	7.848,518	12.472,29
	0,4	4.623,77	7.834,027	12.457,80
	0,6	4.623,77	7.823,147	12.446,92
	0,8	4.623,77	7.818,592	12.442,37
C3/F2	0,2	4.682,98	7.799,605	12.482,58
	0,4	4.682,98	7.776,305	12.459,28
	0,6	4.682,98	7.759,958	12.442,94
	0,8	4.682,98	7.748,078	12.431,06
C3/F3	0,2	5.059,81	7.822,709	12.882,52
	0,4	5.059,81	7.804,551	12.864,36
	0,6	5.059,81	7.791,881	12.851,69
	0,8	5.059,81	7.783,737	12.843,55

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.2 – EI – Paredes externas – Edificação 1 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.679,08	7.757,76	12.436,84
	0,4	4.679,08	7.685,44	12.364,52
	0,6	4.679,08	7.642,50	12.321,58
	0,8	4.679,08	7.617,29	12.296,37
P2	0,2	4.501,50	8.122,77	12.624,27
	0,4	4.501,50	8.041,79	12.543,29
	0,6	4.501,50	7.988,00	12.489,50
	0,8	4.501,50	7.956,30	12.457,80
P3	0,2	4.679,08	8.051,75	12.730,83
	0,4	4.679,08	7.962,00	12.641,07
	0,6	4.679,08	7.898,27	12.577,34
	0,8	4.679,08	7.863,06	12.542,14
P4	0,2	4.847,70	7.553,88	12.401,58
	0,4	4.847,70	7.490,95	12.338,65
	0,6	4.847,70	7.444,13	12.291,82
	0,8	4.847,70	7.416,45	12.264,15
P5	0,2	4.519,77	8.419,24	12.939,00
	0,4	4.519,77	8.277,03	12.796,79
	0,6	4.519,77	8.181,42	12.701,19
	0,8	4.519,77	8.116,94	12.636,70
P6	0,2	4.897,82	7.751,98	12.649,80
	0,4	4.897,82	7.620,78	12.518,60
	0,6	4.897,82	7.528,57	12.426,39
	0,8	4.897,82	7.470,46	12.368,28
P7	0,2	4.813,08	7.413,53	12.226,61
	0,4	4.813,08	7.360,88	12.173,96
	0,6	4.813,08	7.326,92	12.139,99
	0,8	4.813,08	7.304,49	12.117,57
P8	0,2	4.814,41	7.045,53	11.859,93
	0,4	4.814,41	7.012,15	11.826,56
	0,6	4.814,41	6.993,83	11.808,24
	0,8	4.814,41	6.980,56	11.794,97
P13	0,2	4.176,64	6.864,43	11.041,08
	0,4	4.176,64	6.844,60	11.021,24
	0,6	4.176,64	6.831,78	11.008,42
	0,8	4.176,64	6.826,00	11.002,65
P14	0,2	4.210,73	7.054,36	11.265,08
	0,4	4.210,73	6.992,08	11.202,81
	0,6	4.210,73	6.945,38	11.156,10
	0,8	4.210,73	6.918,33	11.129,06
P15	0,2	4.177,97	6.826,75	11.004,72
	0,4	4.177,97	6.792,67	10.970,64
	0,6	4.177,97	6.767,74	10.945,71
	0,8	4.177,97	6.749,46	10.927,44
P16	0,2	4.180,54	6.705,08	10.885,62
	0,4	4.180,54	6.688,67	10.869,21
	0,6	4.180,54	6.671,09	10.851,63
	0,8	4.180,54	6.655,92	10.836,46

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

## EDIFICAÇÃO 1 – PORTO ALEGRE

Tabela I.3 – EI – Coberturas – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.597,60	6.696,42	11.294,02
	0,4	4.597,60	6.750,16	11.347,76
	0,6	4.597,60	6.800,48	11.398,08
	0,8	4.597,60	6.860,22	11.457,82
C1/F2	0,2	4.655,65	6.610,15	11.265,80
	0,4	4.655,65	6.652,61	11.308,26
	0,6	4.655,65	6.694,93	11.350,58
	0,8	4.655,65	6.748,97	11.404,62
C1/F3	0,2	5.012,98	6.616,88	11.629,86
	0,4	5.012,98	6.653,23	11.666,21
	0,6	5.012,98	6.699,73	11.712,71
	0,8	5.012,98	6.750,48	11.763,46
C2/F1	0,2	4.598,93	6.455,33	11.054,26
	0,4	4.598,93	6.486,24	11.085,17
	0,6	4.598,93	6.511,45	11.110,38
	0,8	4.598,93	6.541,85	11.140,78
C2/F2	0,2	4.656,98	6.407,99	11.064,97
	0,4	4.656,98	6.435,11	11.092,09
	0,6	4.656,98	6.465,66	11.122,64
	0,8	4.656,98	6.498,11	11.155,09
C2/F3	0,2	5.014,31	6.427,36	11.441,68
	0,4	5.014,31	6.454,76	11.469,07
	0,6	5.014,31	6.484,60	11.498,91
	0,8	5.014,31	6.509,05	11.523,36
C3/F1	0,2	4.601,50	6.395,02	10.996,52
	0,4	4.601,50	6.418,08	11.019,58
	0,6	4.601,50	6.444,06	11.045,56
	0,8	4.601,50	6.462,89	11.064,39
C3/F2	0,2	4.659,55	6.354,75	11.014,30
	0,4	4.659,55	6.375,62	11.035,17
	0,6	4.659,55	6.398,73	11.058,27
	0,8	4.659,55	6.424,05	11.083,60
C3/F3	0,2	5.016,88	6.374,98	11.391,86
	0,4	5.016,88	6.396,40	11.413,28
	0,6	5.016,88	6.419,04	11.435,92
	0,8	5.016,88	6.444,83	11.461,71

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.4 – EI – Paredes externas – Edificação 1 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.655,65	6.354,75	11.010,40
	0,4	4.655,65	6.452,86	11.108,51
	0,6	4.655,65	6.556,90	11.212,55
	0,8	4.655,65	6.662,34	11.317,99
P2	0,2	4.483,44	6.553,24	11.036,67
	0,4	4.483,44	6.658,43	11.141,86
	0,6	4.483,44	6.767,86	11.251,29
	0,8	4.483,44	6.880,15	11.363,59
P3	0,2	4.655,65	6.514,74	11.170,39
	0,4	4.655,65	6.616,44	11.272,09
	0,6	4.655,65	6.730,56	11.386,21
	0,8	4.655,65	6.849,43	11.505,07
P4	0,2	4.818,96	6.249,10	11.068,06
	0,4	4.818,96	6.341,49	11.160,45
	0,6	4.818,96	6.438,11	11.257,07
	0,8	4.818,96	6.542,31	11.361,27
P5	0,2	4.500,74	6.711,03	11.211,77
	0,4	4.500,74	6.814,18	11.314,92
	0,6	4.500,74	6.938,99	11.439,73
	0,8	4.500,74	7.074,82	11.575,56
P6	0,2	4.866,23	6.335,42	11.201,65
	0,4	4.866,23	6.424,09	11.290,32
	0,6	4.866,23	6.533,33	11.399,56
	0,8	4.866,23	6.656,04	11.522,27
P7	0,2	4.785,41	6.175,47	10.960,87
	0,4	4.785,41	6.261,74	11.047,15
	0,6	4.785,41	6.355,63	11.141,04
	0,8	4.785,41	6.448,77	11.234,18
P8	0,2	4.786,74	5.981,64	10.768,38
	0,4	4.786,74	6.048,47	10.835,21
	0,6	4.786,74	6.116,21	10.902,95
	0,8	4.786,74	6.190,29	10.977,03
P13	0,2	4.174,86	5.888,27	10.063,13
	0,4	4.174,86	5.944,57	10.119,43
	0,6	4.174,86	5.999,06	10.173,93
	0,8	4.174,86	6.052,27	10.227,13
P14	0,2	4.209,15	5.948,78	10.157,93
	0,4	4.209,15	6.015,47	10.224,62
	0,6	4.209,15	6.090,60	10.299,76
	0,8	4.209,15	6.167,67	10.376,82
P15	0,2	4.176,19	5.838,19	10.014,39
	0,4	4.176,19	5.893,60	10.069,80
	0,6	4.176,19	5.951,46	10.127,66
	0,8	4.176,19	6.011,46	10.187,65
P16	0,2	4.178,76	5.778,06	9.956,83
	0,4	4.178,76	5.823,58	10.002,34
	0,6	4.178,76	5.872,56	10.051,33
	0,8	4.178,76	5.920,54	10.099,30

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

## EDIFICAÇÃO 2 – BENTO GONÇALVES

Tabela I.5 – EI – Coberturas – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.734,38	11.612,31	16.346,69
	0,4	4.734,38	11.331,85	16.066,22
	0,6	4.734,38	11.222,79	15.957,16
	0,8	4.734,38	11.306,13	16.040,51
C1/F2	0,2	5.015,26	10.947,60	15.962,86
	0,4	5.015,26	10.523,93	15.539,19
	0,6	5.015,26	10.242,81	15.258,07
	0,8	5.015,26	10.066,06	15.081,32
C1/F3	0,2	6.789,14	11.001,63	17.790,77
	0,4	6.789,14	10.699,42	17.488,56
	0,6	6.789,14	10.526,31	17.315,45
	0,8	6.789,14	10.460,06	17.249,21
C1/F4	0,2	4.916,64	11.544,83	16.461,47
	0,4	4.916,64	11.408,18	16.324,82
	0,6	4.916,64	11.415,80	16.332,44
	0,8	4.916,64	11.439,86	16.356,50
C2/F1	0,2	4.740,69	9.784,77	14.525,46
	0,4	4.740,69	9.663,85	14.404,54
	0,6	4.740,69	9.559,20	14.299,89
	0,8	4.740,69	9.491,79	14.232,48
C2/F2	0,2	5.021,57	9.516,29	14.537,86
	0,4	5.021,57	9.280,91	14.302,48
	0,6	5.021,57	9.097,43	14.119,00
	0,8	5.021,57	8.963,91	13.985,48
C2/F3	0,2	6.795,45	9.570,18	16.365,63
	0,4	6.795,45	9.414,94	16.210,39
	0,6	6.795,45	9.310,41	16.105,86
	0,8	6.795,45	9.210,88	16.006,33
C2/F4	0,2	4.922,95	9.839,69	14.762,64
	0,4	4.922,95	9.773,14	14.696,09
	0,6	4.922,95	9.744,60	14.667,55
	0,8	4.922,95	9.734,30	14.657,25
C3/F1	0,2	4.752,88	9.319,80	14.072,68
	0,4	4.752,88	9.243,32	13.996,20
	0,6	4.752,88	9.163,65	13.916,53
	0,8	4.752,88	9.101,61	13.854,49
C3/F2	0,2	5.033,76	9.130,11	14.163,87
	0,4	5.033,76	8.953,56	13.987,33
	0,6	5.033,76	8.812,20	13.845,96
	0,8	5.033,76	8.696,90	13.730,66
C3/F3	0,2	6.807,64	9.186,42	15.994,07
	0,4	6.807,64	9.060,03	15.867,67
	0,6	6.807,64	8.966,71	15.774,36
	0,8	6.807,64	8.906,43	15.714,07
C3/F4	0,2	4.935,14	9.390,93	14.326,07
	0,4	4.935,14	9.340,71	14.275,85
	0,6	4.935,14	9.312,70	14.247,84
	0,8	4.935,14	9.305,13	14.240,27

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.6 – EI – Paredes externas – Edificação 2 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	5.015,26	8.696,90	13.712,16
	0,4	5.015,26	8.543,67	13.558,93
	0,6	5.015,26	8.421,83	13.437,09
	0,8	5.015,26	8.327,21	13.342,47
P2	0,2	4.785,01	9.209,45	13.994,47
	0,4	4.785,01	9.025,46	13.810,47
	0,6	4.785,01	8.894,47	13.679,48
	0,8	4.785,01	8.823,95	13.608,96
P3	0,2	5.015,26	9.104,90	14.120,16
	0,4	5.015,26	8.911,92	13.927,18
	0,6	5.015,26	8.758,78	13.774,04
	0,8	5.015,26	8.644,88	13.660,14
P4	0,2	5.233,89	8.427,23	13.661,12
	0,4	5.233,89	8.262,74	13.496,63
	0,6	5.233,89	8.154,36	13.388,25
	0,8	5.233,89	8.074,98	13.308,88
P5	0,2	4.808,70	9.583,70	14.392,40
	0,4	4.808,70	9.315,74	14.124,43
	0,6	4.808,70	9.103,22	13.911,92
	0,8	4.808,70	8.959,01	13.767,70
P6	0,2	5.298,88	8.706,48	14.005,36
	0,4	5.298,88	8.445,17	13.744,05
	0,6	5.298,88	8.255,57	13.554,45
	0,8	5.298,88	8.117,64	13.416,52
P7	0,2	5.189,01	8.226,49	13.415,49
	0,4	5.189,01	8.085,24	13.274,24
	0,6	5.189,01	7.992,81	13.181,81
	0,8	5.189,01	7.918,04	13.107,04
P8	0,2	5.195,32	7.668,99	12.864,31
	0,4	5.195,32	7.579,22	12.774,54
	0,6	5.195,32	7.510,83	12.706,15
	0,8	5.195,32	7.457,13	12.652,45
P9	0,2	5.207,51	7.382,20	12.589,70
	0,4	5.207,51	7.319,50	12.527,01
	0,6	5.207,51	7.269,84	12.477,35
	0,8	5.207,51	7.228,87	12.436,38
P10	0,2	5.236,38	7.738,76	12.975,14
	0,4	5.236,38	7.591,53	12.827,91
	0,6	5.236,38	7.468,69	12.705,07
	0,8	5.236,38	7.388,15	12.624,53
P11	0,2	5.242,69	7.382,57	12.625,26
	0,4	5.242,69	7.293,62	12.536,31
	0,6	5.242,69	7.220,70	12.463,39
	0,8	5.242,69	7.160,78	12.403,47
P12	0,2	5.254,88	7.178,63	12.433,51
	0,4	5.254,88	7.116,19	12.371,07
	0,6	5.254,88	7.062,16	12.317,04
	0,8	5.254,88	7.017,03	12.271,91

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).



## EDIFICAÇÃO 2 – PORTO ALEGRE

Tabela I.7 – EI – Coberturas – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.701,45	9.150,50	13.851,95
	0,4	4.701,45	9.425,52	14.126,98
	0,6	4.701,45	9.766,72	14.468,17
	0,8	4.701,45	10.138,14	14.839,59
C1/F2	0,2	4.976,85	8.636,17	13.613,02
	0,4	4.976,85	8.789,54	13.766,39
	0,6	4.976,85	9.043,19	14.020,04
	0,8	4.976,85	9.352,88	14.329,73
C1/F3	0,2	6.658,56	8.708,51	15.367,07
	0,4	6.658,56	8.930,70	15.589,26
	0,6	6.658,56	9.207,66	15.866,22
	0,8	6.658,56	9.512,97	16.171,53
C1/F4	0,2	4.885,41	9.131,18	14.016,59
	0,4	4.885,41	9.427,06	14.312,47
	0,6	4.885,41	9.752,80	14.638,20
	0,8	4.885,41	10.070,94	14.956,35
C2/F1	0,2	4.707,77	7.891,78	12.599,55
	0,4	4.707,77	8.033,15	12.740,92
	0,6	4.707,77	8.192,57	12.900,34
	0,8	4.707,77	8.364,30	13.072,07
C2/F2	0,2	4.983,17	7.648,20	12.631,37
	0,4	4.983,17	7.732,67	12.715,83
	0,6	4.983,17	7.843,15	12.826,32
	0,8	4.983,17	7.976,95	12.960,11
C2/F3	0,2	6.664,87	7.737,59	14.402,47
	0,4	6.664,87	7.851,30	14.516,18
	0,6	6.664,87	7.984,77	14.649,65
	0,8	6.664,87	8.132,02	14.796,90
C2/F4	0,2	4.891,72	7.939,39	12.831,11
	0,4	4.891,72	8.104,11	12.995,83
	0,6	4.891,72	8.277,15	13.168,87
	0,8	4.891,72	8.455,77	13.347,49
C3/F1	0,2	4.719,96	7.578,29	12.298,25
	0,4	4.719,96	7.683,52	12.403,48
	0,6	4.719,96	7.796,85	12.516,81
	0,8	4.719,96	7.917,17	12.637,13
C3/F2	0,2	4.995,36	7.387,15	12.382,50
	0,4	4.995,36	7.452,25	12.447,60
	0,6	4.995,36	7.531,32	12.526,67
	0,8	4.995,36	7.622,04	12.617,40
C3/F3	0,2	6.677,06	7.471,89	14.148,95
	0,4	6.677,06	7.559,09	14.236,15
	0,6	6.677,06	7.654,72	14.331,78
	0,8	6.677,06	7.757,40	14.434,46
C3/F4	0,2	4.903,91	7.629,98	12.533,89
	0,4	4.903,91	7.753,41	12.657,32
	0,6	4.903,91	7.881,48	12.785,39
	0,8	4.903,91	8.011,26	12.915,17

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.8 – EI – Paredes externas – Edificação 2 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.976,85	7.471,89	12.448,75
	0,4	4.976,85	7.508,24	12.485,09
	0,6	4.976,85	7.570,72	12.547,58
	0,8	4.976,85	7.651,26	12.628,12
P2	0,2	4.753,56	7.791,04	12.544,60
	0,4	4.753,56	7.831,54	12.585,10
	0,6	4.753,56	7.903,30	12.656,86
	0,8	4.753,56	7.989,23	12.742,80
P3	0,2	4.976,85	7.731,43	12.708,28
	0,4	4.976,85	7.764,15	12.741,01
	0,6	4.976,85	7.834,91	12.811,76
	0,8	4.976,85	7.924,25	12.901,11
P4	0,2	5.188,61	7.299,55	12.488,16
	0,4	5.188,61	7.331,39	12.520,00
	0,6	5.188,61	7.389,86	12.578,46
	0,8	5.188,61	7.467,85	12.656,46
P5	0,2	4.776,00	8.025,32	12.801,32
	0,4	4.776,00	8.048,07	12.824,07
	0,6	4.776,00	8.125,55	12.901,55
	0,8	4.776,00	8.229,80	13.005,80
P6	0,2	5.249,89	7.449,47	12.699,36
	0,4	5.249,89	7.467,13	12.717,02
	0,6	5.249,89	7.534,47	12.784,36
	0,8	5.249,89	7.629,33	12.879,22
P7	0,2	5.145,10	7.170,22	12.315,32
	0,4	5.145,10	7.201,24	12.346,34
	0,6	5.145,10	7.255,90	12.401,00
	0,8	5.145,10	7.326,07	12.471,17
P8	0,2	5.151,41	6.801,83	11.953,25
	0,4	5.151,41	6.829,47	11.980,88
	0,6	5.151,41	6.872,09	12.023,51
	0,8	5.151,41	6.921,61	12.073,03
P9	0,2	5.163,60	6.607,07	11.770,67
	0,4	5.163,60	6.632,81	11.796,41
	0,6	5.163,60	6.665,42	11.829,02
	0,8	5.163,60	6.701,83	11.865,44
P10	0,2	5.189,98	6.799,87	11.989,85
	0,4	5.189,98	6.814,14	12.004,12
	0,6	5.189,98	6.850,77	12.040,75
	0,8	5.189,98	6.906,31	12.096,29
P11	0,2	5.196,29	6.569,14	11.765,43
	0,4	5.196,29	6.584,55	11.780,84
	0,6	5.196,29	6.613,89	11.810,18
	0,8	5.196,29	6.652,95	11.849,24
P12	0,2	5.208,48	6.433,61	11.642,09
	0,4	5.208,48	6.449,59	11.658,07
	0,6	5.208,48	6.474,70	11.683,18
	0,8	5.208,48	6.504,43	11.712,91

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

### EDIFICAÇÃO 3 – BENTO GONÇALVES

**Tabela I.9 – EI – Coberturas – Edificação 3 – Bento Gonçalves**

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.466,27	3.331,97	7.798,24
	0,4	4.466,27	3.316,50	7.782,78
	0,6	4.466,27	3.310,64	7.776,91
	0,8	4.466,27	3.308,45	7.774,72
C1/F2	0,2	4.487,69	3.305,98	7.793,67
	0,4	4.487,69	3.287,37	7.775,06
	0,6	4.487,69	3.276,33	7.764,01
	0,8	4.487,69	3.271,19	7.758,88
C1/F3	0,2	4.624,05	3.302,95	7.927,00
	0,4	4.624,05	3.288,21	7.912,26
	0,6	4.624,05	3.279,78	7.903,83
	0,8	4.624,05	3.276,92	7.900,97
C2/F1	0,2	4.466,75	3.239,83	7.706,58
	0,4	4.466,75	3.231,84	7.698,59
	0,6	4.466,75	3.210,60	7.677,35
	0,8	4.466,75	3.223,30	7.690,05
C2/F2	0,2	4.488,17	3.227,97	7.716,14
	0,4	4.488,17	3.218,35	7.706,52
	0,6	4.488,17	3.227,29	7.715,46
	0,8	4.488,17	3.205,33	7.693,51
C2/F3	0,2	4.624,53	3.231,15	7.855,69
	0,4	4.624,53	3.222,01	7.846,54
	0,6	4.624,53	3.216,01	7.840,54
	0,8	4.624,53	3.211,84	7.836,37
C3/F1	0,2	4.467,68	3.217,08	7.684,76
	0,4	4.467,68	3.210,19	7.677,87
	0,6	4.467,68	3.204,95	7.672,63
	0,8	4.467,68	3.202,27	7.669,95
C3/F2	0,2	4.489,10	3.207,41	7.696,51
	0,4	4.489,10	3.199,66	7.688,76
	0,6	4.489,10	3.193,86	7.682,96
	0,8	4.489,10	3.188,89	7.677,99
C3/F3	0,2	4.625,46	3.210,77	7.836,23
	0,4	4.625,46	3.203,67	7.829,14
	0,6	4.625,46	3.198,79	7.824,25
	0,8	4.625,46	3.194,54	7.820,00

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.10 – EI – Paredes externas – Edificação 3 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.487,69	3.186,55	7.674,24
	0,4	4.487,69	3.139,51	7.627,20
	0,6	4.487,69	3.105,73	7.593,42
	0,8	4.487,69	3.081,63	7.569,32
P2	0,2	4.379,43	3.281,38	7.660,81
	0,4	4.379,43	3.229,84	7.609,27
	0,6	4.379,43	3.191,27	7.570,69
	0,8	4.379,43	3.163,70	7.543,13
P3	0,2	4.487,69	3.151,23	7.638,92
	0,4	4.487,69	3.106,01	7.593,70
	0,6	4.487,69	3.073,38	7.561,07
	0,8	4.487,69	3.049,77	7.537,46
P4	0,2	4.590,49	3.033,35	7.623,84
	0,4	4.590,49	2.995,58	7.586,07
	0,6	4.590,49	2.968,56	7.559,05
	0,8	4.590,49	2.948,85	7.539,34
P5	0,2	4.390,56	3.514,38	7.904,95
	0,4	4.390,56	3.436,59	7.827,16
	0,6	4.390,56	3.377,43	7.768,00
	0,8	4.390,56	3.335,82	7.726,39
P6	0,2	4.621,05	3.216,79	7.837,84
	0,4	4.621,05	3.155,32	7.776,37
	0,6	4.621,05	3.106,73	7.727,77
	0,8	4.621,05	3.073,13	7.694,18
P7	0,2	4.569,38	2.997,42	7.566,81
	0,4	4.569,38	2.962,83	7.532,22
	0,6	4.569,38	2.936,28	7.505,66
	0,8	4.569,38	2.916,95	7.486,34
P8	0,2	4.569,87	2.809,24	7.379,10
	0,4	4.569,87	2.790,62	7.360,48
	0,6	4.569,87	2.776,44	7.346,30
	0,8	4.569,87	2.765,89	7.335,76
P13	0,2	4.181,37	2.713,03	6.894,41
	0,4	4.181,37	2.700,65	6.882,02
	0,6	4.181,37	2.692,06	6.873,44
	0,8	4.181,37	2.684,99	6.866,37
P14	0,2	4.180,25	2.847,87	7.028,12
	0,4	4.180,25	2.820,10	7.000,35
	0,6	4.180,25	2.797,87	6.978,12
	0,8	4.180,25	2.779,75	6.960,00
P15	0,2	4.181,86	2.716,45	6.898,31
	0,4	4.181,86	2.699,42	6.881,27
	0,6	4.181,86	2.686,99	6.868,85
	0,8	4.181,86	2.677,09	6.858,94
P16	0,2	4.182,78	2.640,94	6.823,73
	0,4	4.182,78	2.631,47	6.814,25
	0,6	4.182,78	2.623,60	6.806,38
	0,8	4.182,78	2.618,02	6.800,80

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

## EDIFICAÇÃO 3 – PORTO ALEGRE

Tabela I.11 – EI – Coberturas – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.429,28	2.878,01	7.307,29
	0,4	4.429,28	2.884,57	7.313,85
	0,6	4.429,28	2.895,20	7.324,47
	0,8	4.429,28	2.911,53	7.340,81
C1/F2	0,2	4.450,28	2.853,63	7.303,90
	0,4	4.450,28	2.863,14	7.313,41
	0,6	4.450,28	2.872,29	7.322,57
	0,8	4.450,28	2.884,70	7.334,97
C1/F3	0,2	4.579,58	2.857,70	7.437,29
	0,4	4.579,58	2.863,89	7.443,47
	0,6	4.579,58	2.873,52	7.453,11
	0,8	4.579,58	2.884,95	7.464,53
C2/F1	0,2	4.429,76	2.815,51	7.245,27
	0,4	4.429,76	2.817,74	7.247,50
	0,6	4.429,76	2.822,55	7.252,30
	0,8	4.429,76	2.829,08	7.258,83
C2/F2	0,2	4.450,76	2.805,14	7.255,90
	0,4	4.450,76	2.806,71	7.257,47
	0,6	4.450,76	2.809,95	7.260,71
	0,8	4.450,76	2.815,81	7.266,57
C2/F3	0,2	4.580,06	2.808,97	7.389,03
	0,4	4.580,06	2.810,79	7.390,85
	0,6	4.580,06	2.814,69	7.394,76
	0,8	4.580,06	2.821,03	7.401,10
C3/F1	0,2	4.430,69	2.800,66	7.231,35
	0,4	4.430,69	2.802,24	7.232,93
	0,6	4.430,69	2.803,79	7.234,47
	0,8	4.430,69	2.807,90	7.238,59
C3/F2	0,2	4.451,69	2.791,22	7.242,91
	0,4	4.451,69	2.791,57	7.243,26
	0,6	4.451,69	2.793,19	7.244,87
	0,8	4.451,69	2.796,64	7.248,33
C3/F3	0,2	4.580,99	2.796,05	7.377,04
	0,4	4.580,99	2.796,44	7.377,43
	0,6	4.580,99	2.798,22	7.379,22
	0,8	4.580,99	2.801,91	7.382,91

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.12 – EI – Paredes externas – Edificação 3 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.450,28	2.789,32	7.239,60
	0,4	4.450,28	2.817,25	7.267,52
	0,6	4.450,28	2.850,64	7.300,92
	0,8	4.450,28	2.883,96	7.334,23
P2	0,2	4.345,29	2.834,83	7.180,11
	0,4	4.345,29	2.863,20	7.208,48
	0,6	4.345,29	2.894,00	7.239,28
	0,8	4.345,29	2.928,84	7.274,12
P3	0,2	4.450,28	2.771,83	7.222,10
	0,4	4.450,28	2.801,06	7.251,34
	0,6	4.450,28	2.832,50	7.282,78
	0,8	4.450,28	2.883,96	7.334,23
P4	0,2	4.549,84	2.715,64	7.265,48
	0,4	4.549,84	2.745,79	7.295,63
	0,6	4.549,84	2.778,19	7.328,04
	0,8	4.549,84	2.814,09	7.363,93
P5	0,2	4.355,84	2.950,28	7.306,12
	0,4	4.355,84	2.975,07	7.330,91
	0,6	4.355,84	3.009,66	7.365,49
	0,8	4.355,84	3.050,78	7.406,62
P6	0,2	4.578,66	2.796,02	7.374,68
	0,4	4.578,66	2.827,18	7.405,84
	0,6	4.578,66	2.867,12	7.445,78
	0,8	4.578,66	2.910,71	7.489,37
P7	0,2	4.529,39	2.698,65	7.228,04
	0,4	4.529,39	2.728,98	7.258,36
	0,6	4.529,39	2.762,25	7.291,64
	0,8	4.529,39	2.797,26	7.326,65
P8	0,2	4.529,87	2.612,17	7.142,04
	0,4	4.529,87	2.640,71	7.170,58
	0,6	4.529,87	2.668,83	7.198,70
	0,8	4.529,87	2.697,69	7.227,56
P13	0,2	4.157,16	2.570,18	6.727,35
	0,4	4.157,16	2.593,87	6.751,04
	0,6	4.157,16	2.618,50	6.775,66
	0,8	4.157,16	2.642,85	6.800,01
P14	0,2	4.156,09	2.609,72	6.765,81
	0,4	4.156,09	2.638,46	6.794,55
	0,6	4.156,09	2.668,00	6.824,08
	0,8	4.156,09	2.699,89	6.855,97
P15	0,2	4.157,64	2.553,59	6.711,24
	0,4	4.157,64	2.579,41	6.737,06
	0,6	4.157,64	2.605,09	6.762,74
	0,8	4.157,64	2.630,85	6.788,49
P16	0,2	4.158,57	2.524,45	6.683,02
	0,4	4.158,57	2.545,77	6.704,34
	0,6	4.158,57	2.568,15	6.726,73
	0,8	4.158,57	2.590,35	6.748,92

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

## EDIFICAÇÃO 4 – BENTO GONÇALVES

Tabela I.13 – EI – Coberturas – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.731,66	8.602,36	13.334,02
	0,4	4.731,66	8.374,34	13.106,00
	0,6	4.731,66	8.202,27	12.933,93
	0,8	4.731,66	8.077,11	12.808,77
C1/F2	0,2	4.890,53	8.363,19	13.253,72
	0,4	4.890,53	8.090,29	12.980,82
	0,6	4.890,53	7.909,05	12.799,59
	0,8	4.890,53	7.770,82	12.661,36
C1/F3	0,2	5.900,32	8.334,47	14.234,79
	0,4	5.900,32	8.114,02	14.014,34
	0,6	5.900,32	7.959,67	13.859,99
	0,8	5.900,32	7.821,32	13.721,64
C1/F4	0,2	6.426,48	8.507,57	14.934,05
	0,4	6.426,48	8.322,07	14.748,55
	0,6	6.426,48	8.183,62	14.610,11
	0,8	6.426,48	8.065,51	14.491,99
C2/F1	0,2	4.735,23	7.723,22	12.458,46
	0,4	4.735,23	7.609,16	12.344,39
	0,6	4.735,23	7.503,69	12.238,92
	0,8	4.735,23	7.430,43	12.165,66
C2/F2	0,2	4.894,10	7.631,88	12.525,98
	0,4	4.894,10	7.506,94	12.401,04
	0,6	4.894,10	7.390,94	12.285,04
	0,8	4.894,10	7.296,41	12.190,51
C2/F3	0,2	5.903,89	7.642,82	13.546,72
	0,4	5.903,89	7.523,51	13.427,41
	0,6	5.903,89	7.420,91	13.324,81
	0,8	5.903,89	7.343,17	13.247,06
C2/F4	0,2	6.430,05	7.700,15	14.130,21
	0,4	6.430,05	7.598,75	14.028,80
	0,6	6.430,05	7.509,10	13.939,15
	0,8	6.430,05	7.444,66	13.874,72
C3/F1	0,2	4.742,13	7.509,75	12.251,88
	0,4	4.742,13	7.416,89	12.159,02
	0,6	4.742,13	7.336,24	12.078,37
	0,8	4.742,13	7.273,38	12.015,50
C3/F2	0,2	4.901,00	7.440,03	12.341,03
	0,4	4.901,00	7.344,54	12.245,54
	0,6	4.901,00	7.247,35	12.148,35
	0,8	4.901,00	7.176,37	12.077,37
C3/F3	0,2	5.910,79	7.455,46	13.366,25
	0,4	5.910,79	7.365,65	13.276,44
	0,6	5.910,79	7.279,95	13.190,74
	0,8	5.910,79	7.211,86	13.122,64
C3/F4	0,2	6.436,95	7.493,82	13.930,76
	0,4	6.436,95	7.413,14	13.850,09
	0,6	6.436,95	7.344,36	13.781,31
	0,8	6.436,95	7.295,84	13.732,79

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.14 – EI – Paredes externas – Edificação 4 – Bento Gonçalves

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.890,53	7.162,23	12.052,76
	0,4	4.890,53	6.991,58	11.882,11
	0,6	4.890,53	6.878,92	11.769,45
	0,8	4.890,53	6.844,11	11.734,64
P2	0,2	4.569,92	7.383,28	11.953,20
	0,4	4.569,92	7.208,24	11.778,16
	0,6	4.569,92	7.087,53	11.657,45
	0,8	4.569,92	7.009,36	11.579,28
P3	0,2	4.890,53	7.080,40	11.970,93
	0,4	4.890,53	6.918,08	11.808,61
	0,6	4.890,53	6.842,80	11.733,33
	0,8	4.890,53	6.764,05	11.654,59
P4	0,2	5.194,97	6.851,82	12.046,79
	0,4	5.194,97	6.712,91	11.907,88
	0,6	5.194,97	6.603,48	11.798,45
	0,8	5.194,97	6.528,35	11.723,32
P5	0,2	4.602,90	7.900,14	12.503,05
	0,4	4.602,90	7.650,03	12.252,94
	0,6	4.602,90	7.465,92	12.068,83
	0,8	4.602,90	7.356,92	11.959,82
P6	0,2	5.285,47	7.236,81	12.522,28
	0,4	5.285,47	7.014,49	12.299,95
	0,6	5.285,47	6.849,09	12.134,56
	0,8	5.285,47	6.754,53	12.040,00
P7	0,2	5.132,47	6.765,91	11.898,38
	0,4	5.132,47	6.632,87	11.765,34
	0,6	5.132,47	6.529,98	11.662,45
	0,8	5.132,47	6.457,87	11.590,34
P8	0,2	5.136,04	6.321,43	11.457,47
	0,4	5.136,04	6.242,36	11.378,40
	0,6	5.136,04	6.176,21	11.312,24
	0,8	5.136,04	6.128,59	11.264,62
P9	0,2	5.142,93	6.089,84	11.232,77
	0,4	5.142,93	6.030,62	11.173,55
	0,6	5.142,93	5.984,80	11.127,74
	0,8	5.142,93	5.949,67	11.092,60
P10	0,2	5.122,79	6.414,14	11.536,93
	0,4	5.122,79	6.311,40	11.434,19
	0,6	5.122,79	6.223,08	11.345,86
	0,8	5.122,79	6.154,95	11.277,74
P11	0,2	5.126,36	6.103,69	11.230,05
	0,4	5.126,36	6.087,66	11.214,02
	0,6	5.126,36	6.032,16	11.158,52
	0,8	5.126,36	5.987,37	11.113,73
P12	0,2	5.133,25	5.975,82	11.109,08
	0,4	5.133,25	5.957,24	11.090,49
	0,6	5.133,25	5.919,66	11.052,91
	0,8	5.133,25	5.884,81	11.018,06

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).



## EDIFICAÇÃO 4 – PORTO ALEGRE

Tabela I.15 – EI – Coberturas – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
C1/F1	0,2	4.690,21	6.302,47	10.992,68
	0,4	4.690,21	6.312,67	11.002,88
	0,6	4.690,21	6.337,08	11.027,29
	0,8	4.690,21	6.376,30	11.066,51
C1/F2	0,2	4.845,98	6.145,38	10.991,36
	0,4	4.845,98	6.161,80	11.007,78
	0,6	4.845,98	6.200,37	11.046,35
	0,8	4.845,98	6.263,29	11.109,27
C1/F3	0,2	5.803,54	6.130,53	11.934,08
	0,4	5.803,54	6.147,38	11.950,92
	0,6	5.803,54	6.181,21	11.984,75
	0,8	5.803,54	6.214,64	12.018,18
C1/F4	0,2	6.382,86	6.237,25	12.620,11
	0,4	6.382,86	6.251,62	12.634,48
	0,6	6.382,86	6.273,38	12.656,24
	0,8	6.382,86	6.300,40	12.683,26
C2/F1	0,2	4.693,78	5.742,30	10.436,08
	0,4	4.693,78	5.760,55	10.454,34
	0,6	4.693,78	5.782,77	10.476,55
	0,8	4.693,78	5.805,51	10.499,29
C2/F2	0,2	4.849,55	5.677,07	10.526,62
	0,4	4.849,55	5.688,33	10.537,88
	0,6	4.849,55	5.712,90	10.562,46
	0,8	4.849,55	5.742,66	10.592,21
C2/F3	0,2	5.807,12	5.690,23	11.497,34
	0,4	5.807,12	5.706,37	11.513,49
	0,6	5.807,12	5.725,91	11.533,03
	0,8	5.807,12	5.754,33	11.561,44
C2/F4	0,2	6.385,24	5.720,41	12.105,65
	0,4	6.385,24	5.742,00	12.127,24
	0,6	6.385,24	5.764,63	12.149,87
	0,8	6.385,24	5.780,02	12.165,26
C3/F1	0,2	4.700,68	5.597,35	10.298,02
	0,4	4.700,68	5.615,38	10.316,06
	0,6	4.700,68	5.635,59	10.336,27
	0,8	4.700,68	5.653,92	10.354,60
C3/F2	0,2	4.856,45	5.546,07	10.402,52
	0,4	4.856,45	5.558,49	10.414,94
	0,6	4.856,45	5.573,38	10.429,83
	0,8	4.856,45	5.595,40	10.451,85
C3/F3	0,2	5.814,01	5.566,84	11.380,85
	0,4	5.814,01	5.580,51	11.394,52
	0,6	5.814,01	5.598,71	11.412,72
	0,8	5.814,01	5.617,44	11.431,45
C3/F4	0,2	6.393,32	5.581,69	11.975,01
	0,4	6.393,32	5.601,38	11.994,70
	0,6	6.393,32	5.620,29	12.013,61
	0,8	6.393,32	5.640,09	12.033,41

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

Tabela I.16 – EI – Paredes externas – Edificação 4 – Porto Alegre

Sistema Construtivo		EIC	EIO	EI
Ident.	$\alpha$	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )
P1	0,2	4.813,38	5.558,49	10.371,87
	0,4	4.813,38	5.608,85	10.422,23
	0,6	4.813,38	5.686,16	10.499,54
	0,8	4.813,38	5.782,50	10.595,87
P2	0,2	4.535,06	5.691,83	10.226,89
	0,4	4.535,06	5.751,01	10.286,07
	0,6	4.535,06	5.832,24	10.367,30
	0,8	4.535,06	5.929,58	10.464,63
P3	0,2	4.845,98	5.506,39	10.352,37
	0,4	4.845,98	5.558,34	10.404,33
	0,6	4.845,98	5.632,48	10.478,46
	0,8	4.845,98	5.722,20	10.568,18
P4	0,2	5.140,84	5.343,05	10.483,89
	0,4	5.140,84	5.395,40	10.536,23
	0,6	5.140,84	5.461,47	10.602,31
	0,8	5.140,84	5.539,86	10.680,70
P5	0,2	4.566,30	5.996,34	10.562,65
	0,4	4.566,30	6.042,32	10.608,62
	0,6	4.566,30	6.137,17	10.703,47
	0,8	4.566,30	6.259,35	10.825,66
P6	0,2	5.226,18	5.581,25	10.807,43
	0,4	5.226,18	5.627,93	10.854,11
	0,6	5.226,18	5.710,41	10.936,59
	0,8	5.226,18	5.811,02	11.037,20
P7	0,2	5.080,26	5.290,22	10.370,48
	0,4	5.080,26	5.344,18	10.424,44
	0,6	5.080,26	5.409,32	10.489,58
	0,8	5.080,26	5.485,42	10.565,68
P8	0,2	5.083,83	5.022,77	10.106,60
	0,4	5.083,83	5.070,51	10.154,34
	0,6	5.083,83	5.125,23	10.209,06
	0,8	5.083,83	5.185,66	10.269,49
P9	0,2	5.090,72	4.879,11	9.969,83
	0,4	5.090,72	4.920,77	10.011,49
	0,6	5.090,72	4.965,59	10.056,31
	0,8	5.090,72	5.014,17	10.104,90
P10	0,2	5.071,42	5.046,17	10.117,59
	0,4	5.071,42	5.092,51	10.163,93
	0,6	5.071,42	5.152,45	10.223,87
	0,8	5.071,42	5.222,22	10.293,64
P11	0,2	5.074,99	4.859,89	9.934,88
	0,4	5.074,99	4.906,14	9.981,13
	0,6	5.074,99	4.954,48	10.029,47
	0,8	5.074,99	5.013,50	10.088,49
P12	0,2	5.081,88	4.755,11	9.836,99
	0,4	5.081,88	4.794,75	9.876,64
	0,6	5.081,88	4.836,63	9.918,52
	0,8	5.081,88	4.879,70	9.961,58

Obs.: EIC: energia incorporada de construção e manutenção; EIO: energia incorporada operacional (50 anos).

## **ANEXOS**

## ANEXO A

Tabela A.1 – Energia incorporada (EI) nos principais materiais de construção brasileiros.

Material	EI (MJ/kg)	EI (MJ/m <sup>3</sup> )	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Aço laminado CA 50A	30,00	235500,00	7850
Alumínio lingote	98,20	265140,00	2700
Alumínio anodizado	210,00	567000,00	2700
Areia	0,05	80,00	1515
Blocos cerâmicos	2,90	4060,00	1400
Brita	0,15	247,50	1650
Cal virgem	3,00	4500,00	1500
Cimento Portland	4,20	8190,00	1950
Cobre	75,00	669975,00	8933
Fibra de vidro	24,00	768,00	32
Fibrocimento – telha	6,00	9600,00	1920
Gesso	4,00	5720,00	800
Madeira – aparelhada seca forno	3,50	2100,00	600
Madeira – aparelhada seca ar livre	0,50	300,00	600
Madeira – laminada colada	7,50	4875,00	650
Madeira – MDF	9,00	5850,00	1000
Polietileno de alta densidade	95,00	90250,00	950
Poliuretano	83,80	92180,00	35
Solvente – tolueno	67,90	74690,00	1100
Tinta acrílica	61,00	79300,00	1,3
Tinta óleo	98,10	127530,00	1,3
Tinta PVA látex	65,00	84500,00	1,3
Tubulação PVC	80,00	104000,00	1300
Vidro plano	18,50	46250,00	2500

Fonte: adaptado de Tavares (2006).

Tabela A.2 – Consumo primário de energia por fontes (% MJ) em materiais de construção.

Fontes	Fósseis não renováveis							Renováveis				
	Combustível	Gás Natural	GLP	Coque de petróleo	Outras secund.	Carvão mineral	Coque de carvão	Eletricidade	Carvão vegetal	Lenha	Outras primárias renováveis	Outras
Aço e ferro	1	6					71	10				12
Alumínio	21	7			4		10	54				4
Areia	99							1				
Argamassa	86			10				4				
Cal	12							8	80			
Cerâmica revestimento	15	68	5					12				
Cerâmica vermelha	4		8					2	85			1
Cimento	3			61		8		12	9			7
Cobre	10	44					5	41				
Concreto	82			9				9				
Fibrocimento	84		2					14				
Impermeabilizantes	10	30			34			26				
Madeira	83							17				
Pedra	85							15				
Plásticos	10	30			34			26				
Tintas	90							10				
Outros materiais	8	11				7	10	20	9		35	

Fonte: adaptado de Tavares (2006).

## ANEXO B

Tabela B.1 – Tempo de vida útil de sistemas da edificação.

Sistemas	Vida útil de projeto [a]	
	Mínimo	Superior
Estrutura	≥ 40	≥ 60
Pisos internos	≥ 13	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 30

Fonte: adaptado de NBR 15575-1 (ABNT, 2010a).

Tabela B.2 – Tempo de vida útil de partes da edificação.

Partes da edificação	Vida útil de projeto [a]	
	Mínimo	Superior
Ar condicionado*	-	15
Estrutura principal	≥ 40	≥ 60
Vedação interna	≥ 20	≥ 30
Vedação externa	≥ 40	≥ 60
Estrutura da cobertura	≥ 20	≥ 30
Telhamento	≥ 13	≥ 20
Calhas e coletores de água aparentes	≥ 4	≥ 6
Rufos, calhas internas e demais complementos	≥ 8	≥ 12
Revestimento interno aderido	≥ 13	≥ 20
Piso externo	≥ 13	≥ 20
Pintura interna	≥ 3	≥ 4
Pintura externa	≥ 8	≥ 12
Esquadrias internas	≥ 8	≥ 12
Portas externas, corta-fogo, gradis	≥ 13	≥ 20
Complementos de esquadrias internas	≥ 4	≥ 6
Esquadrias externas	≥ 20	≥ 30
Tubulações e demais componentes hidrossanitários	≥ 20	≥ 30
Reservatórios de água, redes alimentadoras	≥ 13	≥ 20
Componentes desgastáveis e de substituição periódica	≥ 3	≥ 4

Fonte: adaptado de NBR 15575-1 (ABNT, 2010a), exceto: (\*).TOLMASQUIM e GUERREIRO (2010)