

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA VISANDO CERTIFICAÇÃO DE PRÉDIO VERDE

por

Maria Fernanda Baquerizo Martinez

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, outubro de 2009.

# AVALIAÇÃO ENERGÉTICA VISANDO CERTIFICAÇÃO DE PRÉDIO VERDE

por

Maria Fernanda Baquerizo Martinez

Arquiteta e Urbanista

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção de Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arno Krenzinger – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Heitor da Costa Silva – PROPAR/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Wander - UCS

Prof. Dr. Horácio Antonio Vielmo

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, outubro de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, por sua dedicação durante as fases de elaboração desta dissertação.

Aos professores que me deram valiosas orientações.

Ao meu marido, Hebert por todo amor, carinho, compreensão e incentivo, mas acima de tudo pela paciência com minhas angústias durante este percurso.

A minha filha, Gabriela, que não havia nascido, mas me acompanhou durante os nove meses. Obrigado Gabi, por esperar a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Marina e João, por todo amor e carinho dedicados ao longo da minha vida, pelo apoio incondicional em todas as minhas iniciativas e por me ensinarem a nunca desistir dos meus ideais, além de mesmo longe sempre serem pais presentes em minha vida.

A minha amiga Marta, que faz com que eu acredite que tempo não é sinônimo de grandes amizades e sim que grandes amizades transcendem a questão do tempo. Figura presente no desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo o mesmo com sua experiência.

Aos meus familiares que sempre me deram amor e força, valorizando meus potenciais.

A todos os meus amigos e amigas que sempre estiveram presentes me aconselhando e incentivando com carinho e dedicação.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução desse trabalho.

## RESUMO

Nos últimos anos, as alterações na estrutura do setor elétrico e o aumento do valor das tarifas fizeram com que fossem desenvolvidos programas e projetos visando a conscientização do uso eficiente da energia elétrica. Programas com estas características também estão sendo implantados na construção civil para reduzir o consumo de energia, como é o caso das construções verdes e sustentáveis, conhecidas por *green building*. Para avaliar as construções foi criado pelo Conselho Norte-Americano de Construção Verde (*United States Green Building Council - USGBC*) o selo *LEED™ (Leadership in Energy and Environmental Design)*.

Este trabalho tem como objetivo avaliar por desempenho termoenergético um edifício residencial, mostrando meios de redução do consumo de energia elétrica com o sistema de condicionamento ambiental e ao mesmo tempo avaliar os níveis de conforto térmico dos usuários do edifício.

O prédio escolhido para ser objeto deste estudo busca obter a certificação *LEED™* do tipo *Core and Shell*. Este trabalho aborda o pré-requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, do aspecto *Energy & Atmosphere*. Além deste aspecto, é abordado também o crédito 7, Conforto Térmico, do *Indoor Environmental Quality* para avaliar os níveis de conforto térmico proporcionado aos usuários. Para verificar se a edificação em estudo está atendendo estes itens da certificação foi escolhida das três possíveis opções de análises fornecidas pela certificação a opção 1 - Simulação Energética Total da Edificação. O objetivo é demonstrar um aumento no desempenho da edificação proposta comparada com a edificação *baseline* definida conforme a *ASHRAE* [2007], usando o *Building Performance Rating Method* no Apêndice G da *Standard*.

Para a realização da análise foram simulados dois edifícios, o *baseline*, que atende a norma *ASHRAE* [2007] e os propostos nos quais são simulados o prédio conforme o projeto arquitetônico e especificações do arquiteto e também são simuladas as alterações necessárias para que o prédio atenda as exigências do *LEED™*. Com base nos resultados obtidos com as simulações será analisado o consumo de energia elétrica para as cargas regulares estabelecidas no projeto do edifício e comparado com o edifício *baseline*.

As análises de desempenho energético foram realizadas através de simulações computacionais, feitas com o auxílio do programa *EnergyPlus*, versão 3.1. As simulações da edificação são realizadas com quatro dias de projeto definidos pela *ASHRAE* [2005a] e com o arquivo climático anual de Porto Alegre.

Os ambientes da edificação foram declarados no programa por meio de 129 zonas térmicas, sendo que todas elas são atendidas por sistema de ar-condicionado. O sistema de condicionamento ambiental utilizado é modelo mini-split de expansão direta e compressor

rotativo, devido ao fato deste ter sido o tipo de sistema indicado no projeto elaborado para o prédio.

No final são apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas possibilitando a verificação do comportamento energético de alguns dos parâmetros construtivos, como diferentes tipos de vidros, proteções internas e externas das esquadrias, proteções entre os vidros e revestimentos internos.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que o consumo energético do edifício foi reduzido significativamente além de existir uma melhoria do conforto térmico proporcionado aos ocupantes. Para o melhor caso apresentado neste trabalho a redução do consumo de energia elétrica total da edificação chegou a 11,58% quando comparado com o edifício *baseline* e as horas não confortáveis totais anuais para todos os ambientes analisados não ultrapassaram 300 horas. Com esses resultados o prédio em estudo atende o pré-requisito e o crédito avaliados da certificação *LEED™*.

## **ABSTRACT**

### “Energetic Assessment Aiming at Green Building Certification”

Structural changes in the electric utilities sector and the increase in electricity rates in the last few years led to the development of programs and projects aimed at establishing a new awareness for the efficient use of electric power. Programs bearing such features have also been deployed in civil construction in order to reduce energy consumption, as in the case of green and sustainable constructions, better known as green building. The brand LEED™ (Leadership in Energy and Environmental Design) was created by the United States Green Building Council (USGBC) in order to evaluate whether such construction buildings were actually built and stand in environmentally correct operation.

This research is aimed at assessing a residential building by using thermal-energetic performance, presenting means to reduce electric power consumption within the environment conditioning system and, at the same time, evaluate the levels of thermal comfort provided to the users of the building.

The building chosen to be the object of this study is TRYing to obtain the Core and Shell type of the LEED™ certification. The approach of the present work comprises the pre-requisite 2, Minimum Performance in Power Use of the Energy & Atmosphere aspect. In addition, the credit 7, Thermal Comfort aspect of Indoor Environmental Quality is also included to evaluate the levels of thermal comfort granted to the users. In order to verify whether the building under study has met such certification items, the option 1 - Energetic Simulation of Total Building was chosen among the three possible analytical options supplied by the certification. The objective is to demonstrate an increase in the performance of the proposed building in comparison to the baseline building as defined by ASHRAE [2007], using the Building Performance Rating Method in Appendix G of Standard.

Two buildings were simulated for the development of the analysis: the baseline building, where the ASHRAE [2007] standard is attained and the Proposed, where the building is simulated according to the architectural project and the specifications made by the architect, and the changes required for the building to fulfill the LEED™ requirements are also simulated. Therefore, based upon the simulations, the consumption of electric power for the regular charges established by the project regarding the building under study is going to be analyzed in comparison to the baseline building.

The power performance analyses were accomplished through computer simulations carried out with the help of the EnergyPlus program, version 3.1. The building simulations were performed with four project days defined by ASHRAE [2005a] and the annual climatic file from the city of Porto Alegre, Brazil.

The environments of the building were declared in the program by means of 129 thermal zones, all of which serviced by an air-conditioning system. The environmental conditioning system in use is the mini-split model with direct expansion and a rotating compressor owing to the fact that this type of system was indicated by the project designed for the building.

The results obtained by each simulation were eventually presented, making it possible to verify that by changing of energetic behavior of a few building parameters, such as different types of glass, internal as well as external frame protections, protection in-between the glasses, and internal linings and coatings.

From the results obtained, one is able to notice that the power consumption in the building was significantly reduced and improvements in the thermal comfort for the users were observed. For the best case presented in this work, the total reduction in power consumption in the building reached 11.58% when compared with the baseline building, and the total non-comfortable yearly hours for all the environments under analysis did not surpass 300 hours. As these results demonstrate, the building under study satisfies the pre-requisite and the credit as evaluated by the LEED™ certification.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	Apresentação .....	19
1.2	Estrutura da Dissertação .....	20
1.3	Objetivo Geral.....	20
1.3.1	Objetivos Decorrentes .....	21
1.4	Motivação .....	21
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
2.1	Introdução .....	23
2.2	Consumo Energético em Edificações.....	23
2.3	Conforto Térmico e Eficiência Energética .....	27
2.4	Normas de Eficiência Energética.....	30
2.5	Sistemas de avaliação de desempenho ambiental de edifícios .....	32
2.6	Simulações utilizando programas computacionais .....	37
<b>3.</b>	<b>CONCEITOS .....</b>	<b>41</b>
3.1	Introdução .....	41
3.2	Conforto Térmico.....	41
3.2.1	Balço Energético .....	41
3.2.2	Variáveis de Conforto Térmico .....	44
3.2.2.1	Áreas superficiais do corpo e vestimentas.....	44
3.2.2.2	Taxa Metabólica.....	45
3.2.2.3	Variáveis Ambientais .....	46
3.3	Índices de Conforto Térmico .....	48
3.4	Comportamento Térmico dos Materiais .....	51

3.4.1	Transmissão de calor.....	52
3.4.2	Radiação Solar.....	53
3.4.3	Propriedades Térmicas dos Materiais .....	55
	3.4.3.1 Densidade de massa aparente .....	55
	3.4.3.2 Condutividade Térmica .....	56
	3.4.3.3 Calor Específico.....	56
	3.4.3.4 Inércia térmica .....	57
<b>3.5</b>	<b>Green Building .....</b>	<b>57</b>
<b>4.</b>	<b>ESTUDO DE CASO4 .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2</b>	<b>Edificação Simulada.....</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise Bioclimática.....</b>	<b>62</b>
<b>4.4</b>	<b>Arquivo Climático e Dias de Projeto .....</b>	<b>63</b>
<b>4.5</b>	<b>Programa Analysis Bio .....</b>	<b>66</b>
<b>4.6</b>	<b>Programa Simulador Utilizado.....</b>	<b>68</b>
<b>4.7</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>69</b>
<b>5.</b>	<b>SIMULAÇÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelagem da Edificação.....</b>	<b>73</b>
5.2.1	Zonas Térmicas.....	73
5.2.2	Cargas Internas .....	78
	5.2.2.1 Características de ocupação.....	79
	5.2.2.2 Taxa metabólica .....	81
	5.2.2.3 Resistência térmica das vestimentas .....	81
	5.2.2.4 Velocidade interna do ar.....	81
	5.2.2.5 Equipamentos elétricos.....	81

5.2.2.6	Iluminação .....	83
<b>5.3</b>	<b>Caso 1 - Prédio Proposto 01 .....</b>	<b>84</b>
5.3.1	Sistema de Iluminação do Caso 1 .....	84
5.3.2	Janelas do Caso 1 .....	85
5.3.3	Características Construtivas do Caso 1 .....	88
5.3.4	Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 1 .....	90
5.3.5	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 1 .....	92
<b>5.4</b>	<b>Caso 2 – Prédio <i>Baseline</i> .....</b>	<b>94</b>
5.4.1	Sistema de Iluminação do Caso 2 .....	95
5.4.2	Janelas do Caso 2.....	96
5.4.3	Características Construtivas do Caso 2.....	97
5.4.4	Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 2 .....	99
5.4.5	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 2 .....	101
<b>5.5</b>	<b>Caso 3 – Proposto 02 (Vidros) .....</b>	<b>103</b>
5.5.1	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 3 .....	104
<b>5.6</b>	<b>Caso 4 – Proposto 03 (Proteções Internas).....</b>	<b>105</b>
5.6.1	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 4 .....	106
<b>5.7</b>	<b>Caso 5 – Proposto 04 (Proteções entre os Vidros).....</b>	<b>106</b>
5.7.1	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 5 .....	107
<b>5.8</b>	<b>Caso 6 – Proposto 05 (Proteções Externas).....</b>	<b>107</b>
5.8.1	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 6 .....	108
<b>5.9</b>	<b>Caso 7 – Proposto 06 (Vidro Laminado com Proteções).....</b>	<b>109</b>
5.9.1	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 7 .....	109

<b>5.10</b>	<b>Caso 8 – Proposto 07 (Caso Ótimo)</b> .....	<b>110</b>
5.10.1	Janelas do Caso 8.....	111
5.10.2	Características Construtivas do Caso 8.....	112
5.10.3	Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 8 .....	113
5.10.4	Análise dos Resultados da Simulação do Caso 8 .....	114
<b>6.</b>	<b>CERTIFICAÇÃO <i>LEED</i><sup>TM</sup></b> .....	<b>118</b>
6.1	Introdução .....	118
6.2	Avaliação do Desempenho Mínimo no Uso da Energia e de Conforto Térmico.	118
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>122</b>
<b>8.</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>126</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área do corpo no qual o fluxo de calor incidiu	[m <sup>2</sup> ]
$A_{centr}$	Taxa de calor armazenado no centro do corpo	[W/m <sup>2</sup> ]
$A_{ch}$	Área de contato	[m <sup>2</sup> ]
$A_d$	Área superficial de DuBois	[m <sup>2</sup> ]
$A_g$	Superfície do corpo coberta	[m <sup>2</sup> ]
$A_{pel}$	Taxa de calor armazenado na pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$A_{sup}$	Área da superfície	[m <sup>2</sup> ]
$A_v$	Área da vestimenta	[m <sup>2</sup> ]
$C$	Capacidade térmica	[J/K]
$c$	Calor específico	[kJ/kg.K]
$C + R$	Perdas de calor sensível pela pele por convecção e por radiação	[W/m <sup>2</sup> ]
$C_6H_{12}O_6$	Glicose proveniente dos alimentos	[kg]
$CO_2$	Gás carbônico no ar expirado	[kg]
$C_{resp}$	Taxa de perda de calor convectivo na respiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{dif}$	Taxa de calor dissipado por difusão de água pela pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{resp}$	Taxa de perda de calor evaporativo na respiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{transp}$	Taxa de calor dissipado na evaporação da transpiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$f_{cl}$	Fator de vestimentas	[-]
$f_v$	Fator de área da vestimenta	[-]
$F_{p-n}$	Fator de forma entre pessoa e a superfície N	[-]
Hj	Altura de janela	[cm]
$H_2O$	Vapor d'água no ar expirado	[kg]
$h$	Altura do corpo	[m]
$h_c$	Coefficiente de troca de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> .°K]
$h_r$	Coefficiente de troca de calor por radiação	[W/m <sup>2</sup> .°C]
$I_{cl}$	Resistência térmica das roupas	[m <sup>2</sup> .°C/W]
$L$	Espessura	[m]
$L_j$	Largura de janela	[cm]
$M$	Energia metabólica	[W/m <sup>2</sup> ]

$m$	Massa do corpo	[kg]
$O_2$	Oxigênio do ar inspirado	[kg]
$PMV$	Voto médio previsto	[-]
$q$	Densidade de fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q$	Quantidade de calor	[W]
$Q_g$	Calor produzido pelo organismo	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_p$	Calor perdido pelo organismo para o meio ambiente em regime permanente	[W/m <sup>2</sup> ]
$QR$	Quociente respiratório (relação entre vazão de $CO_2$ exalado sobre a vazão $O_2$ inalado)	[l/min]
$Qt$	Carga térmica atuante sobre o corpo	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$	Resistência térmica	[m <sup>2</sup> .K/W]
$RS$	Radiação solar incidente	[W/m <sup>2</sup> ]
$R_{vp}$	Resistência térmica parcial das vestimentas	[m <sup>2</sup> .°C/W]
$SHGC$	Coefficiente de ganho de calor solar	[-]
$t_{bs}$	Temperatura do ar ambiente (bulbo seco)	[K]
$t_{cl}$	Temperatura exterior da vestimenta	[°C]
tep	tonelada equivalente de petróleo	[-]
$T_g$	Temperatura do globo	[K]
$T_{op}$	Temperatura operativa	[°C]
$T_n$	Temperatura da superfície N	[K]
$T_r$	Temperatura média radiante	[K]
$U$	Transmitância térmica	[W/m <sup>2</sup> .K]
UR	Umidade relativa	[%]
$v$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_{O_2}$	Vazão de $O_2$ consumido nas CNTP	[l/min]
$\mu$	Velocidade do ar	[m/s]
$W_{ext}$	Taxa de trabalho externo realizado	[W/m <sup>2</sup> ]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha_s$	Absortância solar	[-]
$\lambda$	Condutividade térmica	[W/m.K]
$\rho$	Densidade de massa aparente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon_v$	Emissividade média da vestimenta ou pele	[-]
$\varepsilon$	Emissividade infravermelho	[-]
$\phi$	Fluxo de calor que incidirá no ambiente interno	[W/m <sup>2</sup> ]
$\rho_s$	Refletância solar	[-]
$\rho_{sv}$	Refletividade solar visível	[-]
$\tau_s$	Transmitância solar	[-]
$\tau_v$	Transmitância solar visível	[-]
$\Delta T$	Variação de temperatura	[K]

## SUBÍNDICES

<i>bs</i>	Bulbo seco
<i>c</i>	Convecção
<i>centr</i>	Centro
<i>ch</i>	Contato
<i>cl</i>	Roupas
<i>d</i>	DuBois
<i>dif</i>	Difusão
<i>ext</i>	Externo
<i>g</i>	Produzido
<i>g</i>	Globo
<i>j</i>	Janela
<i>n</i>	Temperatura da superfície N
<i>O<sub>2</sub></i>	Oxigênio
<i>op</i>	Temperatura operativa
<i>p</i>	Perdido
<i>pel</i>	Pele
<i>p-n</i>	Pessoa e a superfície N
<i>r</i>	Radiação
<i>r</i>	Radiante
<i>resp</i>	Respiração
<i>sup</i>	Superfície
<i>transp</i>	Taxe de calor dissipado na evaporação da transpiração
<i>v</i>	Vestimenta
<i>vp</i>	Parcial das vestimentas

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Participação de cada região do Brasil no consumo de energia elétrica no setor residencial, ano de 2002 até 2007 (GWh). Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2007.....	25
Figura 2.2. Participação de cada estado no consumo de energia elétrica da Região Sul do país, no setor residencial, ano de 2007 (GWh). Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2007.....	25
Figura 2.3. Consumo de energia elétrica por uso final no setor residencial, ano de 2005 (a) e no setor comercial, ano de 2005 (b). Fonte [Correia, 2007a] e [Correia, 2007b].....	26
Figura 2.4. Consumo de energia elétrica por uso final no setor público, ano de 2005 (a) no setor industrial, ano de 2005 (b). Fonte: [Correia, 2007c] e [Correia, 2007d].....	26
Figura 2.5. Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial na região Sul, ano de 2005. Fonte [Procel, 2007].....	27
Figura 3.1. Zonas de conforto térmico de inverno e verão. Fonte da ASHRAE [2004a].....	48
Figura 3.2. Radiação solar incidente em um corpo opaco. Fonte: [Lamberts <i>et al</i> , 2007] [Frota <i>et al</i> , 2003].....	53
Figura 3.3. Radiação solar incidente em um corpo transparente. Fonte: [Sattler, 2005] [Lamberts <i>et al</i> , 2002] .....	55
Figura 3.4. Comportamento de alguns vidros frente á energia radiante. Fonte: [Rivero, 1986] ..	55
Figura 4.1. Planta baixa ilustrativa da tipologia 01 (gfa1 e gfa2) .....	61
Figura 4.3. Planta baixa ilustrativa da tipologia 02 (gfa3) .....	61
Figura 4.4. Planta baixa ilustrativa do pavimento inferior e superior da tipologia 03 (gfl4) .....	62
Figura 4.5. Planta baixa ilustrativa do pavimento inferior e superior da tipologia 04 (gfl5) .....	62
Figura 4.6. Interface do programa <i>Analysis Bio</i> .....	63
Figura 4.7. Carta bioclimática de Porto Alegre originada pelo <i>Analysis Bio</i> .....	67
Figura 5.1. Vista em perspectiva das zonas térmicas do pavimento tipo .....	74
Figura 5.2. Identificação das zonas térmicas do pavimento tipo .....	75
Figura 5.3. Vista em perspectiva das zonas térmicas do 1º pavimento .....	75
Figura 5.4. Identificação das zonas térmicas do 1º pavimento .....	76
Figura 5.5. Vista em perspectiva das zonas térmicas do 15º pavimento .....	76
Figura 5.6. Identificação das zonas térmicas do 15º pavimento .....	76
Figura 5.7. Vistas em perspectiva das fachadas norte/leste, norte/oeste, oeste/sul, sul/leste das zonas térmicas do prédio.....	77
Figura 5.8. Localização das janelas do pavimento tipo (caso 1).....	86
Figura 5.9. Localização das janelas do pavimento térreo (caso 1).....	87
Figura 5.10. Localização das janelas do 15º pavimento (caso 1).....	87

Figura 5.11. Horas anuais não confortáveis (caso 1) .....	92
Figura 5.12. Consumo mensal de energia elétrica (caso 1) .....	93
Figura 5.13. Consumo anual de energia elétrica para cada uso final (caso 1).....	93
Figura 5.14. Horas anuais não confortáveis (caso 2) .....	100
Figura 5.15. Horas anuais não confortáveis (caso 2) .....	101
Figura 5.16. Consumo mensal de energia elétrica (caso 2) .....	102
Figura 5.17. Consumo anual de energia elétrica para cada uso final (caso 2).....	102
Figura 5.18. Horas anuais não confortáveis (caso 2 e caso 8) .....	114
Figura 5.19. Consumo mensal de energia elétrica (caso 8) .....	116
Figura 5.20. Consumo anual de energia elétrica para cada uso final (caso 8).....	116
Figura 6.1. Consumo total anual de energia elétrica para o prédio <i>baseline</i> e das melhores simulações para cada caso simulado .....	119
Figura 6.2. Horas anuais não confortáveis (caso 8) .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Pontuações e pré-requisitos da categoria <i>Energy &amp; Atmosphere</i> do <i>Core and Shell</i> .	35
Tabela 3.1. Taxa de calor metabólico típico para diferentes atividades. Fonte: [Beyer, 2005]....	45
Tabela 3.2. Equações para coeficientes de convecção. Fonte: [Beyer, 2005] .....	48
Tabela 3.3. Valores utilizados no envelope das zonas de conforto térmico de inverno e verão...	49
Tabela 3.4. Escala de conforto térmico. Fonte: <i>ASHRAE</i> [2005a].....	50
Tabela 3.5. Emissividade de superfícies no infravermelho. Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (1998) .....	53
Tabela 3.6. Absortância de cores e superfícies para radiação solar. Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (1998).....	54
Tabela 4.1. Informações horárias constantes no arquivo climático .....	64
Tabela 4.2. Valores dos principais dados climáticos da cidade de Porto Alegre.....	64
Tabela 4.3. Condições climáticas do dia de projeto de verão para temperatura de bulbo seco ....	65
Tabela 4.4. Condições climáticas do dia de projeto de verão para temperatura de bulbo úmido .	65
Tabela 4.5. Condições climáticas do dia de projeto de verão para o conteúdo de umidade.....	66
Tabela 4.6. Condições climáticas do dia de projeto de inverno.....	66
Tabela 4.3. Estratégias bioclimáticas para Porto Alegre originadas pelo <i>Analysis Bio</i> .....	67
Tabela 5.1. Área e volume de cada zona térmica.....	78
Tabela 5.2. Programação para ocupação .....	80
Tabela 5.3. Tipo de ocupação e o número máximo de pessoas de cada zona térmica.....	80
Tabela 5.4. Programação de funcionamento dos equipamentos .....	82
Tabela 5.5. Equipamentos com as potências nominais utilizadas em cada zona térmica .....	82
Tabela 5.6. Programação de funcionamento para o sistema de iluminação .....	83
Tabela 5.8. Sistema de iluminação para cada zona do pavimento térreo e do 15º pavimento (caso 1).....	84
Tabela 5.7. Sistema de iluminação para cada zona do pavimento tipo (caso 1).....	85
Tabela 5.9. Dimensões das janelas do pavimento tipo (caso 1).....	86
Tabela 5.10. Dimensões das janelas do pavimento térreo (caso 1).....	87
Tabela 5.11. Dimensões das janelas do 15º pavimento (caso 1).....	87
Tabela 5.12. Características termofísicas dos materiais construtivos (caso 1) .....	88
Tabela 5.13. Valores de U, R e <i>SHGC</i> para cada elemento construtivo do prédio proposto 01 (caso 1).....	89
Tabela 5.13. Composição das janelas e as características físicas e óticas do vidro utilizado (caso 1).....	90

Tabela 5.14. Características físicas e óticas da veneziana utilizada nos quartos (caso 1).....	90
Tabela 5.16. Capacidades dos sistemas de <i>HVAC</i> por área (caso 1).....	91
Tabela 5.17. Consumo energético por zona (caso 1) .....	94
Tabela 5.18. Iluminação para o pavimento térreo, pavimento tipo e15° pavimento para o prédio <i>baseline</i> (caso 2) e proposto 01 (caso 1).....	96
Tabela 5.19. Iluminação para o pavimento térreo, pavimento tipo e15° pavimento para o prédio <i>baseline</i> (caso 2) e proposto 01 (caso 1).....	96
Tabela 5.19. Dimensões das janelas do pavimento térreo, pavimento tipo e15° pavimento (caso 2).....	97
Tabela 5.20. Valores de referência de U, R e <i>SHGC</i> da <i>ASHRAE</i> [2007].....	98
Tabela 5.22. Composição das janelas e as características físicas e óticas do vidro utilizado (caso 2).....	98
Tabela 5.21. Composição da envoltória e as características termofísicas dos materiais construtivos .....	99
Tabela 5.23. Modificações no prédio <i>baseline</i> para atender a <i>ASHRAE</i> [2007] (caso 2) .....	100
Tabela 5.24. Características físicas e óticas das cortinas internas (caso 2) .....	101
Tabela 5.25. Vidros externos utilizados nas simulações do caso 3.....	103
Tabela 5.26. Características físicas e óticas dos vidros externos utilizados (caso 3).....	104
Tabela 5.27. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para cada vidro (caso 3).....	105
Tabela 5.28. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de cortina interna (caso 4) .....	106
Tabela 5.29. Características físicas e óticas das persianas aplicadas entre os vidros (caso 5) ...	107
Tabela 5.30. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de cortina e persianas entre os vidros (caso 5) .....	107
Tabela 5.31. Características físicas e óticas das telas aplicadas nas janelas (caso 6) .....	108
Tabela 5.32. Características físicas e óticas do brise aplicado nas janelas (caso 6).....	108
Tabela 5.33. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de proteções externas (caso 6) .....	108
Tabela 5.34. Descrição das combinações realizadas para as simulações do caso 7.....	109
Tabela 5.35. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de proteções externas (caso 7) .....	110
Tabela 5.36. Dimensões das janelas do pavimento térreo, pavimento tipo e15° pavimento (caso 8).....	111

Tabela 5.37. Características termofísicas dos materiais construtivos alterados para o caso 8 ...	112
Tabela 5.39. Capacidades dos sistemas de <i>HVAC</i> por área (caso 8).....	113
Tabela 5.40. Horas anuais não confortáveis (caso 2 x caso 8).....	115
Tabela 5.41. Consumo energético anual por zona (caso 8 – prédio proposto 07) .....	117
Tabela 6.1. Custo anual de energia (R\$) para o prédio <i>baseline</i> (caso 2) e o prédio proposto 07 (caso 8).....	120

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

Os indícios da crise energética começaram a surgir após as duas grandes guerras mundiais, e teve seu ápice em 1973, devido à escassez de petróleo. Neste período o mundo teve que tomar providências para reduzir o consumo de todos os seus derivados desse combustível fóssil [Fernandes, 2001].

No Brasil até alguns anos havia pouco interesse em medidas de redução de consumo ou no aumento da eficiência de processos, pois a estrutura do setor elétrico brasileiro nas últimas décadas foi marcada por uma forte influência governamental e pela aplicação de tarifas reduzidas em relação ao mercado internacional. Porém atualmente este cenário está mudando, existe uma preocupação com a redução do consumo e o uso racional da energia elétrica, tanto da parte da iniciativa privada como de órgãos governamentais, devido às recentes alterações na estrutura do setor elétrico e também pelo aumento do consumo de energia elétrica. Desta forma, é crescente o número de programas e projetos implantados visando a conscientização para o uso eficiente da energia elétrica.

Programas com estes objetivos também estão sendo implantados na construção civil visando reduzir o consumo de energia, como é o caso das construções verdes e sustentáveis, conhecidas por sua denominação em língua inglesa como *green building*. Edifícios ou construções verdes são concebidos dentro do conceito de que as edificações agridam o mínimo possível o meio ambiente. Este conceito envolve desde a escolha dos materiais utilizados durante a construção até os custos ambientais e de manutenção do edifício.

Para avaliar se estas construções foram construídas e funcionam de modo ambientalmente correto, foi criado pelo *USGBC* o selo *LEED™*. Para que empreendimentos sejam certificados com este selo, deve ser avaliado o desempenho dos mesmos em seis áreas: sustentabilidade da localização; eficiência no uso da água; eficiência energética e os cuidados com as emissões para a atmosfera; otimização dos materiais e recursos naturais a serem utilizados na construção e operação da edificação; qualidade dos ambientes internos da edificação; e inovações empregadas no projeto da edificação.

Portanto, com base neste contexto apresentado, este trabalho aborda o tema da eficiência energética e qualidade dos ambientes internos da edificação tendo como objetivo: mostrar meios de redução do consumo de energia elétrica e ao mesmo tempo avaliar os níveis de conforto térmico proporcionado aos usuários dos edifícios que buscam obter a certificação *LEED™*.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em oito capítulos, sendo o primeiro introdutório, onde são apresentados os objetivos e a motivação que levaram a realizar o estudo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da bibliografia sobre o tema abordado nesta dissertação.

O Capítulo 3 apresenta alguns conceitos tais como os de conforto térmico, índices de conforto térmico, comportamento térmico dos materiais de construção e *green buildings*, os quais são importantes para o entendimento dos capítulos seguintes.

O Capítulo 4 apresenta as características da edificação escolhida para realização do estudo de caso, a avaliação bioclimática, a metodologia utilizada para avaliação da eficácia das alternativas de medidas que diminuem o consumo energético e proporcionem melhores índices de conforto, assim como os programas utilizados para realizar as simulações computacionais.

O Capítulo 5 descreve as simulações computacionais, onde são apresentados os resultados obtidos e suas respectivas análises, avaliando o conforto térmico dos ambientes da edificação e quais os elementos construtivos que possibilitam a diminuição do consumo de energia elétrica e proporcionam conforto interno nos ambientes.

O Capítulo 6 apresenta se os resultados obtidos com as simulações realizadas do prédio proposto atendem as exigências do pré-requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, do item *Energy & Atmosphere* e o crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality*.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas através dos resultados e das análises das simulações computacionais.

O Capítulo 8 finaliza a dissertação apresentando algumas sugestões de trabalhos futuros.

## 1.3 Objetivo Geral

Estudar o comportamento termoenergético de uma edificação residencial, visando eficiência energética, através da avaliação de diversos parâmetros construtivos e sistemas energéticos eficientes aplicados na edificação que reduz o consumo de energia elétrica. Além disso, este trabalho tem também como objetivo avaliar se os parâmetros construtivos analisados proporcionam aos ocupantes maior conforto térmico no interior dos ambientes. A análise apresentada é baseada em um estudo de caso e simulações usando o programa *EnergyPlus* (versão 3.1.0.027), disponível no site [www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/](http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/).

As alternativas sugeridas nas simulações terão como objetivo atender um pré-requisito do item *Energy & Atmosphere* e um crédito do item *Indoor Environmental Quality* da certificação *LEED™*.

#### 1.3.1 Objetivos Decorrentes

- 1- Selecionar a edificação que tem como objetivo obter a certificação de *Leadership in Energy and Environmental Design - LEED™*, do tipo *Core and Shell*.
- 2- Verificar a influência sobre o consumo de energia elétrica e o conforto térmico dos parâmetros listados a seguir:
  - Diferentes tipos de vidros;
  - Proteções internas e externas das esquadrias;
  - Proteções entre os vidros;
  - Revestimentos internos.
- 3- Analisar se os resultados obtidos com as simulações atendem as exigências do protocolo *LEED™*.

#### 1.4 Motivação

Com as análises termoenergética realizadas foi possível disponibilizar alternativas construtivas que reduzam significativamente o consumo de energia elétrica com a redução da potência necessária para o sistema de condicionamento ambiental para proporcionar aos usuários conforto nos ambientes.

As principais motivações dessa dissertação devem-se ao fato de que atualmente, grande parte das construções, incluindo as do setor residencial, não levam em consideração os recursos da natureza. São construídos em alvenaria, sem proteções contra insolação, sem elementos construtivos termicamente eficientes e apelam para a utilização de ar condicionado, demandando elevado consumo de energia elétrica. Outro fato relevante na escolha do tema foi que no futuro as energias convencionais poderão ser escassas ou, como na crise dos anos 70, elevarem consideravelmente seus preços. Assim, faz-se necessário à adoção de medidas que proporcionam a racionalização no uso de energia elétrica, eliminando desperdícios. A racionalização no uso de energia elétrica é uma tendência mundial, já adotada em diversos países.

Além das motivações descritas anteriormente, o interesse pelo tema desta dissertação deve-se ao fato de que no Brasil o sistema de condicionamento térmico ambiental é um dos maiores responsáveis pelo consumo elevado de energia elétrica, pois, existe uma diversidade dos

usos finais de energia elétrica utilizados nas edificações como o ar condicionado, iluminação, elevadores, bombas e equipamentos de escritório.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

O capítulo anterior apresentou os objetivos do estudo, as motivações que levaram a realizar o estudo e a estrutura da dissertação. Neste capítulo é realizada uma revisão de bibliografias que apresentam assuntos referentes ao tema abordado nesta dissertação, onde foram utilizados alguns conceitos que são detalhados no terceiro capítulo.

### 2.2 Consumo Energético em Edificações

A maior participação da energia elétrica ocorreu simultaneamente a diversas alterações na matriz energética nacional. De fato, o forte crescimento do consumo final, de 62,1 milhões de tep em 1970 para 215,5 milhões de tep em 2007, incorporou algumas mudanças nos padrões de uso da energia. Dentre essas, a mais acentuada foi à perda de participação da biomassa (lenha, bagaço de cana, outras fontes primárias renováveis, carvão vegetal e álcool etílico) que representava 54% do consumo final do país em 1970. No ano de 2007, no entanto, sua participação passou a representar apenas 29,34% do consumo. Essa queda está relacionada diretamente à participação da lenha no item biomassa, porque os demais itens aumentaram a participação. Entre outras alterações, pode-se também destacar o crescimento do uso do gás natural e dos derivados de petróleo [Plano Nacional de Energia 2030].

É igualmente válido destacar que também pelo lado da demanda ocorreram mudanças que contribuíram para as alterações observadas na matriz energética nacional. No caso do aumento do uso da energia elétrica, por exemplo, ocorreu uma ampla expansão do número de consumidores residenciais ligados à rede de distribuição, ampliando os índices de eletrificação no país, bem como a grande penetração de aparelhos eletroeletrônicos nas residências contribuindo, conseqüentemente, para o aumento do consumo residencial do energético. De forma equivalente, o padrão de crescimento do setor de serviços, como o aumento do número de shopping centers e hipermercados, contribuiu para elevar a demanda pelo uso final de condicionamento de ar [Plano Nacional de Energia 2030].

O desempenho energético de um edifício depende de vários fatores que se inter-relacionam, os quais variam desde as estratégias de gerenciamento e manutenção adotadas pela administração, até as condições do clima local, as características arquitetônicas da edificação, os sistemas de instalações e equipamentos utilizados e os fatores humanos/culturais que interferem nas condições de uso. Nesses termos, a tomada de decisão no momento do projeto do edifício é

decisiva, exigindo que o arquiteto e outros profissionais envolvidos na concepção e execução da obra trabalhem em sincronia. Tais medidas são consideradas estruturais, levando em consideração sua influência no produto final e seu poder de permanência no tempo, haja visto o alto custo de reformas posteriores. Além disso, desde a concepção do projeto é essencial considerar as necessidades e as aspirações dos usuários, fatores que, infelizmente, nem sempre são trabalhados de forma integrada, o que resulta em lógicas conflitantes (arquitetos x engenheiros x empresários x usuários) [Veloso, 2004].

O uso de tecnologias sustentáveis pode reduzir em 60% o consumo de energia elétrica dos edifícios até 2050. Os dados são da pesquisa "*Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings*", divulgada em 27 de abril de 2009 pelo WBCSD (*World Business Council for Sustainable Development*). O estudo foi realizado em seis regiões responsáveis por dois terços da produção de energia mundial: Brasil, China, Índia, Japão, Estados Unidos e Continente Europeu. A pesquisa iniciada em 2006 concluiu que as edificações consomem 38% da energia produzida globalmente. A indústria fica um pouco atrás, com 33%. O setor de transporte consome os 26% restantes [Frank, 2009].

Os estudos preliminares e anteprojetos podem ser responsáveis por 50% do potencial de economia de energia. Um dos estágios mais importantes da elaboração de uma edificação é a escolha dos materiais que irão compor a envoltória da mesma, pois caracteriza as necessidades energéticas necessárias para proporcionar o mínimo de conforto nos ambientes internos. Caso as características da envoltória da edificação não sejam pensadas de forma adequada, serão realizadas trocas térmicas significativas com o exterior, fazendo com que seja necessário o uso de equipamentos eletromecânicos para equilibrar a temperatura interior e conseqüentemente aumento do consumo de energia. A busca por este equilíbrio térmico, assim como por corretos níveis de iluminância, é de fundamental importância para o bem-estar dos usuários das edificações [Fernandes, 2001].

Com bom planejamento, é possível construir um edifício que demande 45% menos energia que outro com as mesmas características. Para tanto, é necessário adequar os recintos habitáveis às condições climáticas locais, usando materiais e técnicas apropriadas, tendo em vista o uso racional de energia [Procel, 1994]. Existem também estudos aplicados à demanda final de energia por setor econômico, que incorporam modelos de previsão do potencial de economia de energia, quando considerada a eficiência energética dos equipamentos mais modernos. Para facilitar a conscientização e conseqüentemente obter edificações mais eficientes, seria de grande importância o apoio da política nacional de racionalização de energia em habitações, como já pode ser visto em outros países. É também importante salientar a necessidade de conscientização

por parte dos usuários das edificações no sentido de utilizar corretamente e sem desperdício a energia necessária [Fernandes, 2001].

Na região sul do Brasil, o consumo de energia elétrica, mais especificamente no setor residencial, vem aumentando, atingindo valores significativos comparados com outras regiões brasileiras. Conforme pode ser verificado na Figura 2.1 a região Sul está classificada, desde 2002, como a segunda região que consome mais energia elétrica no setor residencial.

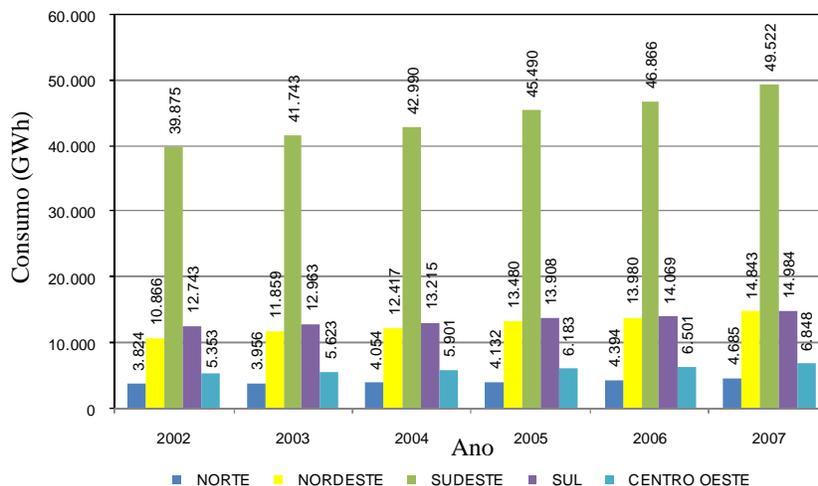


Figura 2.1. Participação de cada região do Brasil no consumo de energia elétrica no setor residencial, ano de 2002 até 2007 (GWh). Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2007

O Estado do Rio Grande do Sul possui a maior participação, entre os estados apresentados na Figura 2.2, no consumo de energia elétrica, reforçando a necessidade de uma maior racionalização do consumo na área residencial.

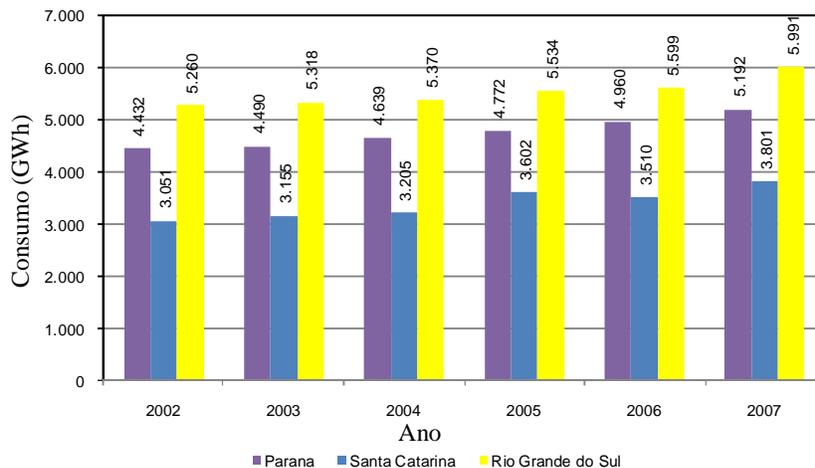


Figura 2.2. Participação de cada estado no consumo de energia elétrica da Região Sul do país, no setor residencial, ano de 2007 (GWh). Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2007

As edificações dos setores residencial, público e comercial consomem 44% do total de energia elétrica consumida no Brasil [Plano Nacional de Energia 2030], sendo esse consumo considerado em função da ocupação e operação das edificações, como elevadores, bombas, equipamentos de automação, iluminação e de forma mais intensa os sistemas de condicionamento térmico ambiental. No setor residencial, os chuveiros elétricos são responsáveis por 24% e sistema de ar condicionado é responsável por 20% do consumo de energia elétrica. Nos setores público e comercial o sistema de ar condicionado é o maior responsável pelo consumo de energia elétrica e no setor industrial o mais responsável pelo maior consumo de energia elétrica é a força motriz representando 68% do total do consumo (Figura 2.3 e Figura 2.4).

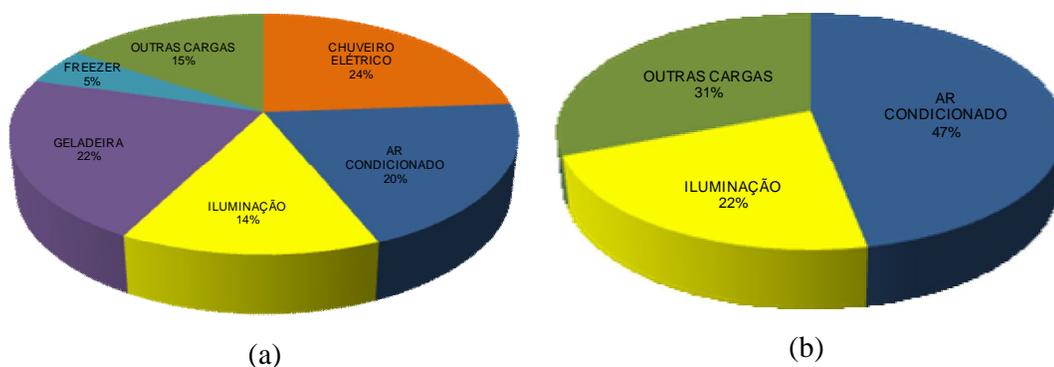


Figura 2.3. Consumo de energia elétrica por uso final no setor residencial, ano de 2005 (a) e no setor comercial, ano de 2005 (b). Fonte [Correia, 2007a] e [Correia, 2007b]

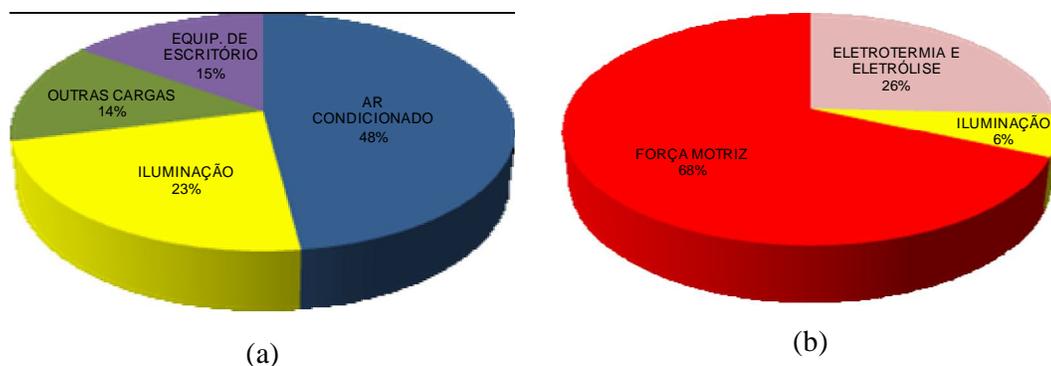


Figura 2.4. Consumo de energia elétrica por uso final no setor público, ano de 2005 (a) no setor industrial, ano de 2005 (b). Fonte: [Correia, 2007c] e [Correia, 2007d]

A seguir, são mostradas, para a região Sul do Brasil, as participações dos eletrodomésticos mais importantes no consumo médio domiciliar, na qual a refrigeração (geladeiras e freezers) – representa 23% e chuveiros elétricos 25% desse consumo. No que se refere ao sistema de ar condicionado (32%), há aparelhos convencionais (ar condicionado) e

outros que podem funcionar com ciclo reverso (ar quente ou frio), percentual que demonstra um impacto acentuado da demanda associada ao conforto térmico, pois o consumo devido ao ar condicionado é elevado.

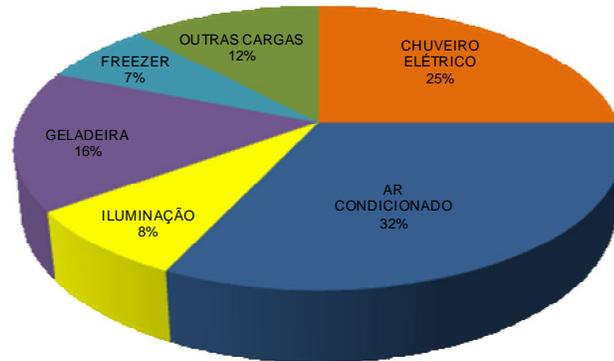


Figura 2.5. Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial na região Sul, ano de 2005. Fonte [Procel, 2007]

Os fatos citados salientam a importância de estudar o consumo de energia elétrica em relação ao uso de ar condicionado no setor residencial na região Sul do Brasil, onde a participação deste uso final no consumo de energia elétrica apresenta-se elevada em relação aos demais usos.

### 2.3 Conforto Térmico e Eficiência Energética

A eficiência energética pode ser entendida como a obtenção de um serviço com alta economia de energia, ou seja, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia [Procel, 2007].

A eficiência energética de uma edificação também vai depender das trocas térmicas entre esta e o ambiente externo. Uma edificação é considerada eficiente termicamente quando o consumo de energia é mínimo, mas o ambiente é confortável para os usuários.

Para avaliar edificações foram propostos três critérios, sendo o primeiro que a edificação deve conter equipamentos e materiais eficientes que estejam de acordo com o local e condições do ambiente; o segundo que a edificação deve proporcionar conforto aos usuários e por último a edificação deve consumir menos energia quando comparada a outra semelhante [Meier *et al*, 2002].

O conforto térmico é considerado uma sensação complexa, que não depende somente de parâmetros exteriores ao indivíduo, mas também de suas condições intrínsecas. O conforto

humano pode ser dividido em vários sub-domínios, dos quais se pode destacar o conforto térmico, visual e ergonômico, qualidade do ar interior e o ruído. O conforto térmico no interior das edificações é fundamental para o bem-estar dos ocupantes, devido ao fato de refletir em maior e melhor produtividade das atividades desempenhadas no local [Grade *et al*, 2001].

Prover conforto térmico ao usuário para que ele possa desempenhar plenamente suas atividades é uma condição inerente à arquitetura, independente do tipo de construção ou do local onde se situa. Hoje, no entanto, a necessidade crescente de reduzir o consumo de energia nas edificações acrescentou mais um desafio a ser superado para o pleno atendimento dessa demanda [Nakamura, 2007]. O cuidado com a orientação quanto à insolação, o bom aproveitamento de recursos como ventilação natural e o sombreamento de fachadas, assim como a especificação criteriosa de materiais são algumas das soluções que, quando inseridas dentro de um contexto global de um projeto, podem contribuir para garantir boas condições de climatização de uma edificação.

A eficiência energética do sistema de condicionamento térmico encontra-se diretamente relacionada às características das edificações, clima, uso e tipo de condicionador de ar. A interação destas características permite determinar o desempenho energético e o conforto térmico das edificações [Baltar, 2006]. O desempenho energético está ligado às trocas de calor da edificação com o meio ambiente, que variam de acordo com a temperatura ambiente, velocidade dos ventos, radiação solar e umidade relativa local, além das condições de ocupação e de operação da edificação. Além disto, a eficiência energética está diretamente relacionada com as questões ambientais, tendo em vista que a energia é obtida a partir do meio-ambiente e, após ser transformada e utilizada, é rejeitada em sua totalidade de volta ao meio ambiente sob diferentes formas de rejeitos [Balestiere, 2002].

O aquecimento ambiental pode ser realizado utilizando-se duas alternativas básicas: o aquecimento por meios artificiais e o aquecimento por meios naturais. Na primeira alternativa, o aquecimento é baseado na energia elétrica ou em combustíveis fósseis através do uso de equipamentos e instalações específicas (por exemplo, aquecedores, condicionadores de ar, caldeiras, entre outros). Na segunda alternativa, o aquecimento é fornecido através do calor produzido pelo sol, podendo ser utilizado como forma de melhorar as condições de conforto quando a temperatura de um determinado ambiente estiver entre 10,5°C e 20°C. Quando a temperatura ficar entre 14°C e 20°C o aquecimento pode ser obtido pelo aquecimento solar passivo com isolamento térmico, que ocorre quando se utilizam os ganhos de calor interno (proveniente pessoas, aparelhos elétricos, entre outros) evitando a perda de calor da edificação para o exterior, utilizando-se isolamento térmico ou de massa térmica com aquecimento solar

passivo. Neste caso, o calor solar fica armazenado nas paredes das edificações e é devolvido para o interior do ambiente nas horas mais frias, quase sempre no período noturno. Quando a temperatura ficar entre 10,5°C e 14°C o uso do aquecimento solar passivo é indicado, porém o isolamento deve ser mais intenso, pois quanto mais baixas as temperaturas, maiores serão as perdas de calor [Lamberts *et al*, 1997].

As edificações onde o vidro é o material predominante na construção das fachadas podem atingir temperaturas superficiais elevadas. A carga de calor nesses tipos de construções é irradiada e afeta quem fica próximo das fachadas. Nessa situação, mesmo em um ambiente que apresente temperatura interna em torno de 22°C, a radiação térmica emitida pelo pano de vidro sobre os usuários irá causar desconforto.

Os vidros, por serem um item de grande impacto no desempenho energético de uma edificação, devem ter sua especificação respaldada em suas propriedades técnicas. Existem disponíveis no mercado vidros de alta tecnologia, multicamadas, cujo desempenho térmico pode até se equiparar ao de uma solução como de brise externo.

Foi demonstrado que a utilização de vidros que reduzem a transmissão de carga térmica no interior do edifício faz com que exista um aumento no consumo de energia elétrica com a iluminação artificial. Do ponto de vista energético, constatou-se que, para uma eficiente especificação do tipo de vidro e tamanho da abertura de uma determinada edificação deve ser dada maior atenção às suas características de transmitância térmica do que lumínica, devido ao consumo energético proveniente da utilização de aparelhos de ar condicionado ser maior do que o de iluminação artificial [Fernandes, 2001].

Com aplicações de sistemas de ar-condicionado com maior eficiência energética incorporada, inovações e incrementos tecnológicos na área de materiais os projetos estão obtendo bons níveis de conforto sem elevar a carga térmica ou abrir mão da liberdade de desenhar, utilizando Como exemplo destes materiais podem ser citados brises e persianas, que passaram a ser produzidos em vários padrões e com diferentes matérias-primas, além disso tem-se as películas de poliéster que, aplicadas sobre os vidros das fachadas, reduzem o ofuscamento causado pela luminosidade e bloqueiam os raios UV.

As inovações em produtos disponíveis no mercado para solução de projeto térmico estão acontecendo, mas o projeto como um todo sempre deve ser pensado em proporcionar conforto térmico de maneira natural.

O clima afeta a execução, a segurança, o conforto e o desempenho das edificações. O estudo da climatologia aplicada à construção, portanto, é imprescindível em todas as fases do projeto arquitetônico, além disso, envolve um processo interativo, onde devem ser levados em

conta a influência do clima na edificação e a influência da edificação sobre o clima do entorno [Goulart, 1993].

O clima de Porto Alegre é marcado pelas constantes entradas de frentes frias. Essas características fazem com que o clima mostre-se constantemente úmido e com quedas bruscas de temperatura, durante todo o ano. As estratégias arquitetônicas bioclimáticas para esta região, portanto, devem atender tanto ao clima quente quanto ao clima frio para proporcionar conforto interno aos ambientes [Papst, 1999].

Em regiões que possuem estações do ano bem definidas, também foi verificado que o uso da inércia térmica em edificações, além de amortecer os picos de temperatura externa, proporciona um atraso no pico máximo e mínimo na temperatura interna. Uma edificação que possui pouca inércia segue muito próxima a variação da temperatura externa, e com uma inércia infinita, a temperatura interna permaneceria constante [Papst, 1999].

#### 2.4 Normas de Eficiência Energética

Na década de 70 a crise do petróleo resultou em transformação do mercado de energia de diversos países. Durante este período foram lançados diversos programas de incentivo à redução do consumo de energia elétrica. Devido a estes fatos, atualmente, muitos países possuem normas ou lei em eficiência energética de edificações, que os ajudam a alcançar uma maior eficiência nas construções. A *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, fundada em 1894, uma associação internacional que em 1975 implantou a sua primeira norma de eficiência energética para projetos e construções de novas edificações, a *ASHRAE Standard 90 (ASHRAE, 1975)*. Em 1989, a *ASHRAE* implantou a *Standard 90.1* que considera a envoltória da edificação, sistemas de condicionamento de ar, iluminação artificial e aquecimento de água incluindo ainda motores e equipamentos. Os climas são classificados em unidade graus/dia de aquecimento e resfriamento, os quais representam os limites para os componentes opacos e transparentes. Além das cidades americanas, a *ASHRAE Standard 90.1* também classifica o clima de oito cidades brasileiras. A versão mais atual desta norma é de 2007.

Em 1985, foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, e gerido por uma Secretaria Executiva subordinada à Eletrobrás. Em 18 de julho de 1991, o PROCEL foi transformado em Programa de Governo, tendo suas abrangência e responsabilidade ampliadas. O objetivo do PROCEL é promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais. O Programa utiliza recursos da Eletrobrás e da Reserva Global de Reversão - RGR - fundo federal

constituído com recursos das concessionárias, proporcionais ao investimento de cada uma. Utiliza, também, recursos de entidades internacionais [Procel, 2009].

Em 1993, o PROCEL elaborou o Selo Procel de Economia de Energia concedido anualmente, aos equipamentos elétricos que apresentam os melhores índices de eficiência energética dentro das suas categorias. Sua finalidade é estimular a fabricação nacional de produtos eletroeletrônicos mais eficientes no item economia de energia, e orientar o consumidor, no ato da compra, a adquirir equipamentos que apresentam melhores níveis de eficiência energética [Procel, 2009].

Depois da crise do setor elétrico, em 2001, o Brasil começou a estabelecer ações para estimular o uso eficiente da energia elétrica. O primeiro passo foi à elaboração da Lei Nº 10.295, publicada pelo Ministério de Minas e Energia em 17 de outubro de 2001, a qual estabelece a criação de mecanismos que resultem em edificações mais eficientes energeticamente (BRASIL, 2001). Em dezembro de 2001, esta lei foi regulamentada pelo Decreto Nº 4.059, advertindo que os fabricantes e importadores de máquinas e aparelhos consumidores de energia são obrigados a adotar níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética, de acordo com os estudos referentes a cada máquina e aparelho. Este decreto também determina que as edificações atendam a níveis máximos de consumo ou mínimo de eficiência energética, estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica, institui e define competências do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE e determina a constituição do Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações – GT MME. [Brasil, 2001].

Em 2003, após alguns anos de estudos e discussões entre diversas instituições, ocorreu o lançamento do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações - Procel Edifica, sendo que em 2006 teve a aprovação da versão experimental da regulamentação para edificações comerciais, de serviços e públicos, sendo que a aprovação final desta regulamentação ocorreu em 2008 [Canazio, 2007].

A regulamentação para Etiquetagem de Eficiência Energética para Edificações tem como objetivo criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. e aplicável a edifícios com área útil superior a 500 m<sup>2</sup> ou atendidos por alta tensão (grupo tarifário A). Pode ser fornecida uma etiqueta para o edifício completo ou para parte deste. Ela é dita parcial quando referente à envoltória ou combinando a envoltória com um dos outros dois sistemas – iluminação ou condicionamento de ar. [Canazio, 2007].

Esta proposta de regulamentação é de caráter voluntário e foi implantada em março de 2009. Esta proposta poderá ter caráter obrigatório e a edificação será avaliada de acordo com requisitos que variam de mais eficiente (eficiência A) a menos eficiente (eficiência E). Para cada requisito será atribuído um valor e de acordo com a pontuação final o edifício será classificado.

## 2.5 Sistemas de avaliação de desempenho ambiental de edifícios

Embora não exista uma classificação formal neste sentido, os esquemas de avaliação ambiental disponíveis podem ser claramente separados em duas categorias. De um lado, temos aqueles orientados para o mercado, isto é, desenvolvidos para ser facilmente absorvidos por projetistas ou para receber e divulgar o reconhecimento do mercado pelos esforços dispensados para melhorar a qualidade ambiental de projetos, execução e gerenciamento operacional. Estes esquemas têm estrutura mais simples e estão vinculados a algum tipo de certificação de desempenho. Este é o caso do *Building Establishment Environmental Assessment Method – BEEAM*, do *Building Environmental Assessment Method - HK-BEAM*, do *Leadership in Energy and Environmental Design - LEED™* e do *Buildings Environmental Performance – France - CSTB ESCALE* (NIBEL *et al.*, 2000). Do outro lado, estão os esquemas de avaliação orientados para pesquisa, como o *Building Environmental Performance Assessment Criteria - BEPAC* e seu sucessor, o *Green Building Challenge - GBC*. Nesse segundo caso, a ênfase é o desenvolvimento de uma metodologia abrangente e com fundamentação científica, que possa orientar o desenvolvimento de novos sistemas [Silva *et al.*, 2003].

A seguir, está detalhado o sistema de avaliação de edifícios o *Leadership in Energy and Environmental Design - LEED™*, uma vez que foi o sistema na qual a edificação em estudo será submetida para avaliação de desempenho ambiental do empreendimento.

Em 1996, foram iniciados nos Estados Unidos os trabalhos para desenvolvimento do *LEED™*, com o objetivo de facilitar a transferência de conceitos de construção ambientalmente responsável para os profissionais e para a indústria de construção americana e proporcionar reconhecimento junto ao mercado pelos esforços despendidos para essa finalidade [USGBC, 1996].

Este protocolo, que está em sua terceira versão, permite avaliar de forma global o desempenho ambiental do edifício ao longo de todo o seu ciclo de vida. O critério mínimo de nivelamento exigido para avaliação de um edifício pelo *LEED™* é o cumprimento de uma série de pré-requisitos. Satisfeitos os pré-requisitos, passa-se à etapa de classificação do desempenho, em que a atribuição de créditos indica o grau de conformidade do atendimento aos itens avaliados.

A singularidade do *LEED*<sup>TM</sup> resulta principalmente do fato de ser um documento consensual, aprovado pelas 13 categorias da indústria de construção americana, representadas no conselho gestor do esquema. O apoio de associações e fabricantes de materiais e produtos favoreceu a ampla disseminação deste esquema nos EUA, que começa a estender-se para o Canadá. Este sistema é constituído por um *checklist* que atribui créditos para o atendimento de critérios pré-estabelecidos, basicamente ações de projeto, construção ou gerenciamento que contribuam para reduzir os impactos ambientais de edifícios.

Com uma estrutura simples, o *LEED*<sup>TM</sup> é um meio termo entre critérios puramente prescritivos e especificação de desempenho. Tem por referência princípios ambientais e de uso de energia consolidados em normas e recomendações de organismos de terceira parte com credibilidade reconhecida, como a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers – ASHRAE*; a *American Society for Testing and Materials – ASTM*; a *U.S. Environmental Protection Agency – EPA*; e o *U.S. Department of Energy – DOE*. Estas práticas de efetividade já conhecida são então balanceadas com princípios emergentes, de forma a estimular a adoção de tecnologias e conceitos inovadores [Silva *et al*, 2003].

O sistema *LEED*<sup>TM</sup> tem parâmetros específicos para contemplar diferentes edificações. A regra *LEED*<sup>TM</sup> *New Construction* aplica-se a empreendimentos de escritórios em que o proprietário ou locatário detenha 51% ou mais da ocupação. Nesse caso, a certificação trata a construção como sede de empresa e avalia desempenho de núcleo, fechamentos, móveis, luminárias e todos os demais itens internos. Nos edifícios de escritórios em que o proprietário ou um locatário isolado não detenha mais da metade da ocupação, a regra que deve ser aplicada é a *LEED*<sup>TM</sup> *Core and Shell Development Projects (LEED*<sup>TM</sup> - *CS*), que certifica apenas o núcleo e o envoltório. Os ocupantes podem, no entanto, obter classificações independentes para o interior de seus escritórios em acordo com a regra *LEED*<sup>TM</sup> *Commercial Interior (LEED*<sup>TM</sup> - *CI*). "Somadas, as regras *LEED*<sup>TM</sup> - *CS* e *LEED*<sup>TM</sup> - *CI* equivalem à *LEED*<sup>TM</sup> *New Construction*". Além dos parâmetros para construções comerciais, o *LEED*<sup>TM</sup> oferece regras para outros cinco tipos de edificação: *LEED*<sup>TM</sup> - *MB*, para múltiplas edificações num mesmo sítio, tais como condomínios corporativos, campi e instalações governamentais; *LEED*<sup>TM</sup> - *EB*, para maximização da operação e da manutenção de edifícios existentes; *LEED*<sup>TM</sup> - *H*, para projeto e construção de edifícios residenciais; *LEED*<sup>TM</sup> - *ND*, para desenvolvimento de loteamentos, urbanismo e equipamentos comunitários; e *LEED*<sup>TM</sup> - *LS*, para projetos escolares [Afalo *et al*, 2007].

O *LEED*<sup>TM</sup> *Core and Shell – CS* possui quatro níveis de certificação [USGBC, 2009]:

- Certificado *LEED*<sup>TM</sup> (40 - 49 pontos)

- *LEED™* Prata (50 - 59 pontos)
- *LEED™* Ouro (60 - 79 pontos)
- *LEED™* Platina (80 e acima pontos)

No *LEED™*, todos os créditos têm peso idêntico, ainda que seja notável a concentração de créditos em determinadas categorias. A certificação de desempenho é conferida com base no total de créditos obtidos, não sendo necessário, portanto, atender a um número mínimo de créditos em cada uma das categorias.

O processo é dividido em fases, sendo que a primeira é o registro da edificação no *USGBC*. A segunda é a pré-certificação, concedida com base no desempenho dos itens previstos em projeto. A certificação real ocorre somente após a conclusão da obra, quando todos os sistemas são rigorosamente auditados, para verificar se os pré-requisitos e a pontuação obtida em projeto foram de fato cumpridos. Após essa etapa, a edificação certificada terá o direito de usar o selo *LEED™* pelo período de dois anos. Ao final desse prazo, para conservar a certificação o edifício deve ser reavaliado, em termos de operação sustentável dos sistemas, a cada dois anos. Se não houver interesse na renovação, perde-se o direito de usar o selo [*USGBC*, 1996].

As pontuações do *LEED™* são divididas nos seguintes grupos:

- *Sustainable Sites* – sustentabilidade da localização;
- *Water Efficiency* – eficiência no uso da água;
- *Energy & Atmosphere* – eficiência energética e os cuidados com as emissões para a atmosfera;
- *Materials & Resources* – otimização dos materiais e recursos naturais a serem utilizados na construção e operação da edificação;
- *Indoor Environmental Quality* – qualidade dos ambientes internos da edificação;
- *Innovation & Design Process* – inovações empregadas no projeto da edificação.

Este trabalho aborda o aspecto *Energy & Atmosphere* e o edifício a ser estudado visa certificação do tipo *Core and Shell*. Nesta categoria, a certificação é realizada para o terreno e para as áreas comuns da edificação, sendo que o empreendedor não tem responsabilidade sobre o projeto das áreas internas de cada unidade.

As pontuações e pré-requisitos da categoria *Energy & Atmosphere* do *Core and Shell* devem atender a Tabela 2.1, a qual estabelece que a edificação que visa certificação *LEED™* deve possuir pré-requisitos mínimos e os créditos os quais podem chegar a um total de 28 pontos [*USGBC*, 2009].

Tabela 2.1. Pontuações e pré-requisitos da categoria *Energy & Atmosphere* do *Core and Shell*

PRÉ – REQUISITO/CRÉDITO	ITENS		PONTOS	
Pré - requisito 1	Comissionamento dos Sistemas de Energia do Prédio		0	
Pré - requisito 2	Desempenho Mínimo no Uso da Energia		0	
	Prédios Novos	Prédios Reformados	0	
Pré - requisito 3	10%	5%	0	
	Não Uso de CFC'S		0	
Crédito 1		12%	8%	3
		14%	10%	4
		16%	12%	5
		18%	14%	6
		20%	16%	7
		22%	18%	8
		24%	20%	9
		26%	22%	10
		28%	24%	11
		30%	26%	12
		32%	28%	13
		34%	30%	14
		36%	32%	15
		38%	34%	16
		40%	36%	17
		42%	38%	18
	44%	40%	19	
	46%	42%	20	
	48%	44%	21	
Crédito 2	Geração de Energia Renovável	Energia Renovável		
		1%	4	
Crédito 3	Melhoria no Comissionamento		2	
Crédito 4	Melhoria no Uso de Gases Refrigerantes		2	
Crédito 5.1	Medições e Verificações – Prédio <i>Baseline</i>		3	
Crédito 5.2	Medições e Verificações Individuais		3	
Crédito 6	Energia Verde		2	

Com base nos pré-requisitos e créditos da categoria *Energy & Atmosphere* do *Core and Shell*, será considerado no desenvolvimento deste trabalho, o pré-requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, com o intuito de atingir os melhores resultados através da verificação do comportamento termo-energético de diversos materiais.

O pré-requisito 2 tem como objetivo obter o nível mínimo de eficiência energética para os edifícios propostos e seus sistemas, sendo que para a edificação em estudo por ser um prédio novo é de 10% de redução do consumo de energia elétrica. Para tanto os edifícios projetados deverão estar em conformidade com os requerimentos obrigatórios constantes das seções 5.4, 6.4, 7.4, 8.4, 9.4 e 10.4 da *ASHRAE* [2007], e os requerimentos de *performance* da mesma *Standard*.

Este trabalho contempla diretamente a análise e desenvolvimento das seções 5.4 - *Building Envelope* e 6.4 - *Heating, Ventilating, and Air Conditioning*. As seções 7.4 - *Service Water Heating*, 8.4 - *Power Distribution*, 9.4 - *Lighting* e 10.4- *Electric Motors* deverão ser desenvolvidas por outros profissionais com conhecimento do *ASHRAE* [2007], e as definições daí advindas serão colocadas nas simulações energéticas para avaliar o desempenho das mesmas.

A obtenção deste pré-requisito 2 será feita pela Opção 1 - Simulação Energética Total da Edificação. O objetivo é demonstrar um aumento na *performance* da edificação proposta comparada com a edificação *baseline* definida conforme a *ASHRAE* [2007], usando o *Building Performance Rating Method* no Apêndice G do *Standard*. Para obtenção dos pontos o projeto proposto deverá diminuir o consumo energético em relação à edificação *baseline* em 10%.

Para a realização da análise foram simulados dois edifícios, o *baseline*, no qual atende a norma *ASHRAE* [2007] e os Propostos nos quais são simulados o prédio conforme o projeto arquitetônico e especificações do arquiteto e também são simuladas as alterações necessárias para que prédio atenda as exigências do *LEED™*. Para tanto, com base nas simulações será analisado o consumo de energia elétrica para as cargas regulares estabelecidas no projeto do edifício em estudo quando comparado com o edifício *baseline*.

Para todas as simulações realizadas um dos parâmetros que será avaliado se refere ao conforto térmico interno de cada ambiente da edificação analisado. O principal objetivo desta análise será verificar se para cada alteração sugerida para o projeto da edificação no intuito de atender o pré-requisitos 2 do item *Energy & Atmosphere* está refletindo de que forma no conforto térmico dos ambientes. O método utilizado neste trabalho de análise de conforto térmico está baseado nos critérios estabelecidos na *ASHRAE* [2007], sendo este o mesmo exigido para atender o crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality* da certificação. Este crédito tem como objetivo fornecer ambiente termicamente confortável que colabore com o conforto e bem estar dos ocupantes.

Além da verificação do pré-requisito, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, do item *Energy & Atmosphere* será verificado se os resultados obtidos com as simulações atendem a exigência do crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality*.

Para maximizar a precisão e eficácia dos estudos, serão utilizadas simulações computacionais do consumo anual de energia do empreendimento de acordo com a metodologia validada pelo *USGBC*, que consiste no uso das prescrições da norma *ASHRAE* [2007] e da utilização do programa *EnergyPlus* para o processamento de dados.

## 2.6 Simulações utilizando programas computacionais

A simulação computacional possibilita a identificação do efeito de cada fator isoladamente, o que nem sempre é possível em um caso real. A utilização de ferramentas computacionais pode ocorrer tanto na fase de projeto como durante a construção da edificação, fornecendo a vantagem e a possibilidade de testar soluções mais eficientes sem a necessidade de intervir na edificação. Além disso, a facilidade de manipulação das variáveis envolvidas na edificação, o baixo custo e a redução do tempo de simulação contribuem ainda mais para uma maior utilização dos programas computacionais [Ramos, 2007].

Os programas computacionais disponíveis, antes de serem utilizados devem ser validados, isto é, ter os resultados comparados com outros programas de simulação existentes, através da comparação é possível verificar o grau de precisão. Existe um método, chamado *BESTEST (Building Energy Simulation Test)*, o qual é adotado pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)* como norma para teste e avaliação de programas computacionais para análise energética de edificações *ASHRAE* [2005a]

O programa escolhido para ser utilizado neste trabalho para análise energética de edificação residencial em estudo foi o *EnergyPlus*, devido às vantagens e funcionalidades oferecidas. Este programa computacional foi validado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, o qual utilizou o método *ANSI/ASHRAE Standard 140*. Para o sistema de validação foram simulados 18 casos, incluindo construções de baixa e alta inércia térmica, com e sem janelas em diversas exposições solares, com e sem proteção solar externa, com ou sem temperaturas pré-ajustadas, com ou sem ventilação noturna, e com ou sem sistema de condicionamento de ar. A carga anual e o pico para aquecimento e refrigeração previstos pelo *EnergyPlus* para 13 diferentes casos foram comparados com os resultados de 8 outros programas de simulação energética. O máximo e mínimo de modelos com temperaturas não controladas (*free-floating*) foram comparados por 4 diferentes casos. A condução no solo foi comparada apenas em um caso, em virtude das limitações dos outros programas. Baseado em 62 comparações isoladas de resultados, o *EnergyPlus* manteve-se dentro do intervalo de resultados de 8 outros programas para 58 comparações. Para os outros 4 casos que os resultados excederam os limites do intervalo, a variação foi menor que 5,6% [Henninger *et al*, 2004].

Existem diversos trabalhos publicados que utilizaram *EnergyPlus*, como programa computacional de simulação energética, os quais avaliam diferentes tipos de materiais para serem utilizados nas fachadas, dimensionam sistemas de ventilação, analisa o conforto térmico de algumas edificações, estudos para implantação de sistema central de climatização. Seguem abaixo alguns exemplos de trabalhos realizados:

Foi analisado a influência termoenergética de 6 diferentes tipos de vidros com e sem película aplicados às fachadas de dois tipos de edificações com condicionamento de ar: um de teste geométrico, denominada assim por possuir uma geometria incomum em edificações e outra de teste de sombreamento, denominada assim devido a presença de marquises em algumas janelas. Os resultados demonstraram que na edificação de teste geométrico com 12,5% de sua área das fachadas coberta por janelas, simplesmente aplicando película nos vidros pode-se reduzir em cerca de até 75% a taxa de transferência de calor instantânea pelas janelas e o fluxo de calor diário médio pelas janelas. Já na edificação de teste de sombreamento com 25% de sua área das fachadas coberta por janelas, este índice foi de 70%. Em relação à carga térmica, o uso de um tipo de película reduziu cerca de 8% a potência de ar resfriado na edificação de teste geométrico e cerca de 24% na edificação de teste de sombreamento [Pereira, 2002].

Através de simulações utilizando o programa *EnergyPlus* foram analisadas as condições de conforto térmico de uma edificação popular padrão, inserida em 4 cidades brasileiras. Os resultados obtidos para o conforto térmico nos dias analisados mostraram-se coerentes com as condições externas e internas da residência, indicando que o programa é um aplicativo confiável. Outra vantagem do programa é de permitir uma análise fácil quanto aos resultados de conforto térmico, pois ao seu término cria um arquivo no formato Excel de fácil aplicação [Wallauer, 2003].

Foram realizadas simulações para a implantação de um sistema central de climatização com aquecimento a gás em uma edificação comercial de alto consumo, onde foram simuladas e analisadas algumas alternativas factíveis para reduzir a carga térmica da edificação, a fim de avaliar possibilidades de reduzir a potência necessária de equipamentos de climatização e, conseqüentemente, o consumo energético e os custos relacionados. Os resultados demonstraram que é possível reduzir significativamente a carga térmica de uma edificação e que o sistema central proposto apresentou um consumo energético menor que o de energia elétrica [Verdi, 2003].

Foi realizada uma análise do desempenho energético de edificações comerciais com base na influência da transmitância e da capacidade térmica das paredes externas e coberturas de edificações comerciais. Foram simulados casos com diferentes condições de carga interna, absorvância solar externa, padrão de uso, razão de área de janelas nas fachadas, entre outros parâmetros; sempre analisando a influência destes em relação ao consumo anual de energia elétrica das edificações. Adotaram-se três climas: Florianópolis, Curitiba e São Luís. Foram adotadas duas tipologias. Para analisar os ganhos e as perdas de calor dos componentes opacos da edificação realizou-se o cálculo do balanço térmico das edificações. Na análise dos casos

observou-se que o aumento da transmitância térmica das paredes da tipologia 1 para todos os climas analisados proporcionou uma redução do consumo anual da edificação, principalmente para os casos simulados em conjunto com alta densidade de carga interna ou alto padrão de uso e com baixa absorvância solar externa. Nos casos referentes à tipologia 2, notou-se que o aumento da transmitância térmica da cobertura representou um aumento do consumo anual da edificação para todos os casos simulados nos três climas adotados. Foram analisados os picos de carga do sistema de condicionamento de ar e o dimensionamento da potência da máquina calculada pelo programa *EnergyPlus*, que deve ser instalada nos ambientes para que estes permaneçam em condições de conforto [USGBC, 2009].

Como objetivo de verificar se o programa *EnergyPlus* representa bem o comportamento térmico de uma edificação, foi realizada uma comparação entre resultados computacionais, obtidos através do programa *EnergyPlus* e experimentos, medidos in loco, do comportamento térmico de um ambiente condicionado e um ambiente não condicionado. Para tanto, foram monitorados dados climáticos de radiação, velocidade do vento e temperatura, no período de 11 a 20 de janeiro de 2002 e produziu-se um arquivo climático. Simultaneamente, fez-se a aquisição das temperaturas de uma sala-teste, localizada no terceiro pavimento de um prédio na cidade de Porto Alegre, bem como das salas adjacentes. As temperaturas do ar de insuflamento e de retorno dos condicionadores de ar, localizados na sala-teste, foram medidas durante o dia, em seis dias do período de monitoramento. Mediu-se também a velocidade do ar de retorno e determinou-se a potência sensível de refrigeração. Os resultados da carga térmica e temperatura ambiente da sala-teste obtidos nas simulações foram comparados com os dados experimentais do período de monitoramento, concluindo-se que o programa *EnergyPlus* representa bem o comportamento térmico de uma edificação "termicamente pesada" para coeficiente de convecção detalhado, necessitando pesquisa para as demais edificações [Grings, 2003].

Foi realizado um estudo sobre a influência que alguns parâmetros têm no desempenho termoenergético de uma edificação com um sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta, visando auxiliar na busca por soluções que aumentem a eficiência energética das construções brasileiras. Para tal, foi utilizado o programa simulador *EnergyPlus*. Os resultados mostram que as orientações e os tipos de vidro alteram sensivelmente tanto a potência requerida pelo sistema de condicionamento de ar quanto os consumos elétricos anuais do sistema de condicionamento de ar, das lâmpadas e total; a análise econômica mostra que a utilização de película nos vidros é economicamente viável em boa parte dos casos avaliados e a comparação da temperatura da face interna dos vidros estudados mostram diferenças significativas [Pereira, 2005].

Foi avaliado o cálculo da iluminação natural efetuado pelo programa *EnergyPlus*, através da comparação das iluminâncias internas calculadas através da simulação realizada pelos programas *Energyplus*, *Daysim/Radiance* e *TropLux*. Para esta avaliação também são comparadas as iluminâncias externas calculadas pelo *EnergyPlus* com as medidas. As simulações foram realizadas para salas quadradas, retangulares rasas e profundas; com três tamanhos diferentes de aberturas, para a cidade de Florianópolis. A partir destas simulações obtiveram-se valores de iluminância e fator de luz diurna. Para uma melhor verificação da diferença entre os programas foram realizadas simulações, para o modelo de sala quadrada com abertura em 50% da fachada, para as cidades de Belém, Brasília, Florianópolis, Genebra e Oslo. Em um segundo momento foi avaliado o modelo de céu utilizado pelo programa *EnergyPlus*, através da comparação entre as iluminâncias externas obtidas através da Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis (EMIN-Floripa) e as calculadas, para cada uma das classes de céu. A partir destas análises encontrou-se uma diferença superior a 50% entre as iluminâncias calculadas pelos programas que utilizam modelos de céu diferentes. A principal conclusão deste trabalho foi a verificação das deficiências existentes no programa *EnergyPlus* que tem maior influência no cálculo da iluminação natural, sendo elas: o cálculo da parcela de luz refletida no ambiente, e o cálculo das iluminâncias externas maiores que as medidas; surgindo a necessidade de desenvolvimento de um modelo de céu dinâmico mais adequado às características de céu encontrado em Florianópolis [Melo, 2008].

Realização de um estudo exploratório de uma simulação computacional em que há um sistema fotovoltaico interligado a rede de um ambiente climatizado e avaliam-se os efeitos e possibilidades de interação entre o sistema de condicionamento de ar e o sistema fotovoltaico na edificação. Utilizando a ferramenta de simulação computacional *EnergyPlus*, foram desenvolvidas duas linhas de análise para a aplicação fotovoltaica na edificação, a primeira que pretende minimizar o consumo elétrico anual e uma segunda que pretende aliviar o sistema elétrico no horário de pico observado para esta edificação, nas duas linhas de pesquisa também se estuda o efeito do sombreamento dos arranjos fotovoltaicos sobre a edificação. A declaração detalhada de materiais, superfícies de transferência de calor, zonas térmicas, equipamentos e horários de utilização compõem o estudo de caso de forma personalizada, buscando aproximar-se da realidade. O trabalho exemplifica a atuação oportuna de sistemas fotovoltaicos com sistemas de refrigeração, e demonstra quantitativamente as vantagens da aplicação destes sistemas em edificações difundindo a aplicação da tecnologia solar fotovoltaica e a aplicação do programa *EnergyPlus* como poderosa ferramenta de análise [Silva, 2008].

### 3. CONCEITOS

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos e os índices de conforto térmico, além da conceituação do comportamento térmico dos materiais de construção. Estes conceitos serão utilizados no Capítulo 5 para realizar a verificação de alguns elementos construtivos que possibilitam a diminuição do consumo de energia elétrica e a análise termoenergética da edificação em estudo, e também embasar a análise do conforto térmico no interior dos ambientes verificando se estão de acordo com os índices de conforto térmico especificado na *ASHRAE* [2007]. Além destes conceitos, neste capítulo são apresentados também os prédios verdes (*green building*), pois a edificação escolhida como objeto de estudo tem como objetivo aplicar os conceitos desenvolvidos para este tipo de edificação para obtenção da certificação *LEED*<sup>TM</sup>.

#### 3.2 Conforto Térmico

O conforto térmico pode ser definido como o estado mental que expressa à satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. A não satisfação pode ser causada por sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio [Lamberts *et al*, 2007].

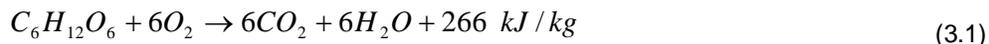
O corpo humano continuamente gera calor, com dissipação variando aproximadamente de 100 W para uma pessoa sedentária e até 1000 W para uma pessoa em exercício extremo. Para evitar o desconforto térmico, a temperatura do corpo deve ser mantida dentro de uma faixa estreita. O calor dissipado pelo corpo deve ser efetuado de maneira lenta e cuidadosa para ficar dentro da faixa desejada de conforto térmico [Beyer, 2005].

As trocas de calor são realizadas através da pele, sendo ela o principal órgão termorregulador do organismo. Através do fluxo sanguíneo o organismo regula a temperatura da pele, quanto mais intenso o fluxo maior a temperatura.

##### 3.2.1 Balanço Energético

Estar em conforto energético significa dissipar a quantidade de calor que está sendo produzida pelo corpo, sendo capaz de manter a temperatura interna do tórax em torno de 37°C. Na prática este conceito é difícil de ser atingido, pois o ser humano está constantemente realizando movimentos, alterando a taxa de dissipação de calor e conseqüentemente o equilíbrio com o meio ambiente [Pereira, 2005].

Existem algumas equações empíricas que são usadas para relatar as percepções de conforto e as trocas térmicas existentes entre o corpo e o meio ambiente. As trocas térmicas podem ser equacionadas no balanço energético de uma pessoa, sendo que a energia metabólica ( $M$ ) da mesma é obtida pela oxidação da glicose proveniente dos alimentos, conforme a expressa na reação [Beyer, 2005]:



onde:  $C_6H_{12}O_6$  - glicose proveniente dos alimentos

$O_2$  - oxigênio do ar inspirado

$CO_2$  - gás carbônico no ar expirado

$H_2O$  - vapor d'água no ar expirado

A energia metabólica ( $M$ ) total produzida no corpo é distribuída entre uma parcela necessária para as atividades internas vitais do organismo, como circulação, respiração, digestão, e a outra parcela de energia metabólica pode ser despendida como trabalho externo ( $W_{ext}$ ) como atividades musculares. A quantidade de calor produzido ( $Q_g$ ) pelo organismo pode ser definido pela equação(3.2):

$$Q_g = M - W_{ext} \quad (3.2)$$

onde:  $Q_g$  - calor produzido pelo organismo [W/m<sup>2</sup>]

$M$  - energia metabólica [W/m<sup>2</sup>]

$W_{ext}$  - taxa de trabalho externo realizado [W/m<sup>2</sup>]

Dependendo da atividade que o ser humano executa a cada momento, há maior ou menor necessidade de dissipação de calor produzido pelo metabolismo. Este calor é dissipado através de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente envolvendo [Beyer, 2005]:

- **Trocas térmicas sensíveis** – Envolvem variações de temperatura (convecção, radiação e condução).
- **Trocas térmicas latentes** – Provêm da mudança do estado líquido para vapor e do estado de vapor para líquido, sem variações de temperatura (evaporação).

O calor perdido para o ambiente através das trocas secas é denominado calor sensível e é função das diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente. O calor perdido através das trocas úmidas é denominado calor latente e envolve mudanças de fase, o suor (líquido) passa para o estado gasoso através da evaporação [Lamberts *et al*, 2007].

O organismo se caracteriza por sempre estar dissipando calor ( $Q$ ) para manter a temperatura corporal com o objetivo de alcançar o equilíbrio térmico do corpo. Essa dissipação ocorre através da:

- **Pele**
  - Perda sensível de calor, por convecção ( $C$ ) e radiação ( $R$ );
  - Perda latente de calor, por evaporação da transpiração ( $E_{transp}$ ) e evaporação da umidade dissipada através da pele ( $E_{dif}$ ).
- **Respiração**
  - Perda sensível de calor, por convecção ( $C_{resp}$ );
  - Perda latente de calor, por evaporação ( $E_{resp}$ ).

A quantidade de calor perdido pelo organismo para o meio ambiente em regime permanente pode ser calculado através da equação (3.3 [Beyer, 2005]).

$$Q_p = (C_{resp} + E_{resp})[(C + R) + (E_{dif} + E_{transp})] \quad (3.3)$$

onde:  $Q_p$  - calor perdido pelo organismo para o meio ambiente em regime permanente [ $W/m^2$ ]

$C_{resp}$  - taxa de perda de calor convectivo na respiração [ $W/m^2$ ]

$E_{resp}$  - taxa de perda de calor evaporativo na respiração [ $W/m^2$ ]

$C + R$  - perdas de calor sensível pela pele por convecção e por radiação [ $W/m^2$ ]

$E_{dif}$  - taxa de calor dissipado por difusão de água pela pele [ $W/m^2$ ]

$E_{transp}$  - taxa de calor dissipado na evaporação da transpiração [ $W/m^2$ ]

O corpo também pode estar em regime transiente de aquecimento ou resfriamento, armazenando ou perdendo calor  $A$ , no centro do corpo ( $A_{centr}$ ) ou na pele ( $A_{pel}$ ). Este regime ocorre quando existe uma mudança da temperatura do corpo devido ao desenvolvimento de alguma atividade.

O conforto térmico de uma pessoa está diretamente relacionado com a forma como ocorrem as trocas de calor citadas acima com o ambiente (calor produzido e calor perdido). Estas trocas podem ser dimensionadas através da equação (3.4 que expressa o balanço térmico de uma pessoa [Beyer, 2005]:

$$M - W_{ext} = (C_{resp} + E_{resp})[(C + R) + (E_{dif} + E_{transp})] + A_{centr} + A_{pel} \quad (3.4)$$

onde:  $A_{centr}$  - taxa de calor armazenado no centro do corpo [ $W/m^2$ ]

$A_{pel}$  - taxa de calor armazenado na pele [ $W/m^2$ ]

Os termos das equações (3.3 e (3.4 têm unidades de energia por unidades de área ( $W/m^2$ ) e são referenciadas à superfície externa do corpo desnudo ( $A_d$ ).

### 3.2.2 Variáveis de Conforto Térmico

Existem algumas variáveis que influenciam no conforto térmico, como áreas superficiais do corpo e vestimentas, taxa metabólica, temperatura do ar, temperatura média radiante, temperatura operativa, umidade relativa e velocidade do ar. As duas primeiras variáveis são chamadas de pessoais ou subjetivas, por não dependerem do ambiente, enquanto as outras são denominadas de variáveis ambientais. Variáveis como idade, sexo, raça, hábitos alimentares, peso, altura etc., também exercem influência nas condições de conforto de cada pessoa [Lamberts *et al*, 2007].

#### 3.2.2.1 Áreas superficiais do corpo e vestimentas

A vestimenta equivale a uma resistência térmica interposta entre o corpo e o meio, ou seja, ela representa uma barreira para as trocas de calor por convecção [Lamberts *et al*, 2007]. Quanto maior a quantidade de roupas, maior o isolamento em torno do corpo e menores serão as perdas de calor.

A vestimenta funciona como isolante térmico, pois mantém junto ao corpo uma camada de ar mais aquecido ou menos aquecido, conforme seja mais ou menos isolante, conforme seu ajuste ao corpo e a porção do corpo que cobre [Beyer, 2005].

É possível calcular a área superficial do corpo desnudo através da equação (3.5 proposta por DuBois [Beyer, 2005]:

$$A_d = 0,202m^{0,425} h^{0,725} \quad (3.5)$$

onde:  $A_d$  - área superficial de DuBois (área de pele) [m<sup>2</sup>]

$m$  - massa do corpo [kg]

$h$  - altura do corpo [m]

Existe ainda, um fator de correção ( $f_v$ ), chamado fator de área da vestimenta, o mesmo deve ser aplicado aos termos de transferência de calor da pele. Este fator pode ser calculado pela equação (3.6 [Beyer, 2005].

$$f_v = A_v / A_d \quad (3.6)$$

onde:  $f_v$  - fator de área da vestimenta

$A_v$  - área da vestimenta [m<sup>2</sup>]

A resistência térmica das vestimentas pode ser calculada pela equação (3.7 [Beyer, 2005]:

$$R_v = 0,835 \sum R_{vp} + 0,024955 \quad (3.7)$$

onde:  $R_{vp}$  - resistência térmica parcial das vestimentas [  $m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$  ]

A resistência térmica das vestimentas é expressa em  $m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$  ou em clo, onde 1 clo equivale a  $0,1555 m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

### 3.2.2.2 Taxa Metabólica

O homem é um animal homeotérmico, isto é seu organismo mantém constante a temperatura corporal. Essa temperatura é de ordem de  $37^\circ\text{C}$ , podendo variar de  $36,1^\circ$  a  $37,2^\circ\text{C}$ , sendo  $32^\circ\text{C}$  o limite inferior e  $42^\circ\text{C}$  o limite superior para sobrevivência. Como a temperatura do organismo deve ser mantida constante, o sistema termo-regulador do homem varia conforme a temperatura do meio, isto faz com que reduza ou aumenta as perdas de calor [Lamberts *et al*, 2007] [Frota *et al*, 2003].

O organismo adquire energia a partir de elementos combustíveis orgânicos. Porém, de toda energia produzida pelo organismo humano, apenas 20% é transformada em potencialidade de trabalho. Os 80% restantes são transformados em calor que deve ser dissipado para que a temperatura interna do organismo seja mantida em equilíbrio [Lamberts *et al*, 2005]. Este processo de produção de energia interna a partir de elementos combustíveis orgânicos foi denominado metabolismo [Frota *et al*, 2003].

A produção de energia metabólica aumenta proporcionalmente conforme o exercício físico realizado, dependendo da atividade, pessoa e condições nas quais a atividade é realizada. Devido a este motivo, nos estudos das condições ótimas de conforto térmico é necessário conhecer a energia gasta durante as atividades físicas. A Tabela 3.1 mostra taxas metabólicas típicas em diferentes atividades físicas para um adulto médio ( $A_d = 1,8m^2$ ) [Beyer, 2005].

Tabela 3.1. Taxa de calor metabólico típico para diferentes atividades. Fonte: [Beyer, 2005]

<b>Atividade</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>Atividade</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
Dormindo	40	Dirigindo carro – veículo pesado	185
Reclinado	45	Trabalho mecânico – leve	115
Sentado quieto	60	Trabalho mecânico – médio	140
De pé, relaxado	70	Trabalho mecânico – pesado	235
Caminhando no plano – 0,89m/s	115	Dançando – devagar	140
Caminhando no plano – 1,34m/s	150	Dançando – rápido	255
Caminhando no plano – 1,79m/s	220	Exercícios de ginástica – leve	175
Lendo sentado	55	Exercícios de ginástica – pesado	235
Escrevendo	60	Jogando tênis	240
Dirigindo carro – devagar	60	Jogando futebol, basquetebol – devagar	290
Dirigindo carro – rápido	115	Jogando futebol, basquetebol – rápido	440

Existem alguns métodos para calcular a taxa de calor metabólico produzida pelo corpo, sendo que um deles pode ser através da medição da taxa do consumo respiratório de oxigênio e produção de dióxido de carbono conforme a equação (3.8 [Beyer, 2005]):

$$M = 352 (0,23 QR + 0,77) V_{O_2} / A_d \quad (3.8)$$

onde:  $QR$  - quociente respiratório (relação entre vazão de  $CO_2$  exalado sobre a vazão  $O_2$  inalado)

$V_{O_2}$  - vazão de  $O_2$  consumido nas CNTP (0°C e 1 atm) [l/min]

O valor de  $QR$  depende da atividade, da dieta e condições física da pessoa, sendo que para um adulto médio para atividades leves o valor do  $QR$  pode ser considerado 0,83 e para atividades pesadas  $QR$  aumenta para 1,0.

O trabalho mecânico externo realizado pelos músculos durante uma tarefa pode ser expresso como eficiência mecânica do corpo ( $\mu$ ). Quando as atividades são de baixo nível energético, sendo uma atividade que não realiza trabalho externo, a eficiência mecânica é considerada igual a zero. Na equação(3.9 é possível estimar o valor da eficiência mecânica do corpo [Beyer, 2005]:

$$\mu = 0,0436M + 1,943 \quad (3.9)$$

onde:  $\mu$  - eficiência mecânica em %.

OBS: Se a taxa metabólica for inferior a 70W/m<sup>2</sup>, considerar  $\mu$  igual a zero.

### 3.2.2.3 Variáveis Ambientais

Existem dois grupos de variáveis ambientais que descrevem o ambiente térmico, aqueles que podem ser medidos diretamente e aqueles que devem ser calculados a partir de outras medidas. Entre as variáveis que podem ser medidas diretamente são: temperatura do ar, temperatura do bulbo úmido, temperatura de orvalho, pressão parcial de vapor d'água, pressão atmosférica total, umidade relativa, umidade absoluta ou conteúdo de umidade e velocidade do ar.

As variáveis ambientais importantes que devem ser calculadas são: temperatura média radiante ( $T_r$ ) e temperatura operativa ( $T_{op}$ ). A temperatura radiante é a temperatura de uma superfície exposta ao ambiente. A temperatura média radiante pode ser calculada pela medição das temperaturas das paredes, piso e forro e as posições entre estas e as pessoas. Como a maioria dos materiais construtivos possui alta emitância ( $\varepsilon$ ) no infravermelho, pode utilizar a equação (3.10 para calcular a temperatura média radiante [Beyer, 2005]:

$$T_r = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_n F_{p-n} \quad (3.10)$$

onde:  $T_r$  - temperatura média radiante [K]

$T_n$  - temperatura da superfície N [K]

$F_{p-n}$  - fator de forma entre pessoa e a superfície N

A forma mais simples para determinar a temperatura média radiante é utilizar a temperatura de globo, que consiste num termômetro colocado no centro de uma esfera metálica oca com diâmetro de 15 cm pintada internamente e externamente de preto fosco. A temperatura de globo resulta do balanço entre trocas de calor do globo por radiação e convecção. Sendo assim a temperatura média radiante pode ser calculada por [Beyer, 2005]:

$$T_r^4 = T_g^4 + c \sqrt{\mu} (T_g - T_{bs}) \quad (3.11)$$

onde:  $T_g$  - temperatura do globo [K]

$\mu$  - velocidade do ar [m/s]

$T_{bs}$  - temperatura do ar ambiente [K]

$C$  - 0,247

A temperatura operativa ( $T_{op}$ ) pode ser definida como uma média ponderada entre a temperatura média radiante ( $T_r$ ) e a temperatura do ar ambiente ( $T_{bs}$ ), ponderada pelos coeficientes de troca de calor por convecção e por radiação. Isto porque uma pessoa constantemente efetua trocas sensíveis por radiação e convecção. A temperatura operativa ( $T_{op}$ ) pode ser calculada pela equação (3.12) [Beyer, 2005]:

$$T_{op} = (h_r t_r + h_c t_{bs}) / (h_r + h_c) \quad (3.12)$$

onde:  $T_{op}$  - temperatura operativa [°C]

$h_r$  - coeficiente de troca de calor por radiação [W/m<sup>2</sup>.°C]

$t_r$  - temperatura média radiante [°C]

$h_c$  - coeficiente de troca de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>.°C]

$t_{bs}$  - temperatura do ar ambiente [°C]

Em condições normais o valor de  $h_r$  pode ser calculado por:

$$h_r = 4,7 \varepsilon_v \quad (3.13)$$

onde:  $\varepsilon_v$  - emissividade média da vestimenta ou pele

O valor de  $h_c$  pode ser calculado com base na Tabela 3.2:

Tabela 3.2. Equações para coeficientes de convecção. Fonte: [Beyer, 2005]

Equação	Limites	Condições
$h_c = 8,3\mu^{0,6}$	$0,2 < \mu < 4,0$	Sentado
$h_c = 3,1$	$0 < \mu < 0,2$	Sentado
$h_c = 8,3\mu^{0,53}$	$0,5 < \mu < 2,0$	Caminhando
$h_c = 14,8\mu^{0,69}$	$0,15 < \mu < 1,5$	Parado em pé
$h_c = 4,0$	$0 < \mu < 0,15$	Parado em pé

Obs:  $\mu$  é a velocidade do ar sobre a pessoa em m/s e  $h_c$  em  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

Com o auxílio das ferramentas computacionais existentes para a simulação do desempenho termoenergético de edificações, esses parâmetros conseguem ser mapeados, mas trazê-los para dentro das zonas de conforto térmico depende das modificações realizadas no envoltório da edificação e do controle da temperatura operativa.

Os sistemas de ar condicionado controlam a temperatura do ar da zona e não a temperatura operativa, sendo assim, o trabalho está focando alterações na envoltória da edificação para diminuir a temperatura média radiante das superfícies.

### 3.3 Índices de Conforto Térmico

A análise do conforto térmico dos ambientes da edificação em estudo é realizada com base nas zonas de conforto térmico de inverno e de verão definidos em *ASHRAE* [2004a], projetar um sistema de ar condicionado que atenda estas zonas de conforto é um grande desafio para a engenharia e a arquitetura. A Figura 3.1 mostra as zonas de conforto térmico de inverno e verão definidas pela *ASHRAE* [2004a].

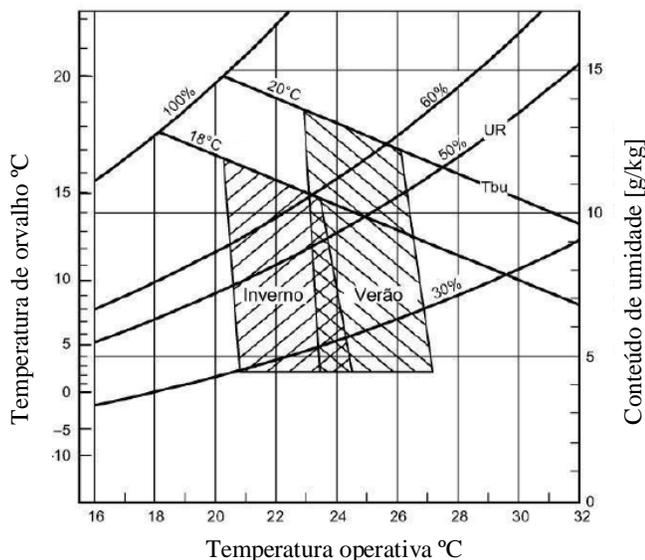


Figura 3.1. Zonas de conforto térmico de inverno e verão. Fonte da *ASHRAE* [2004a]

As zonas de conforto térmico foram obtidas dentro de determinadas condições, tais como:

- A resistência térmica das vestimentas das pessoas 0,5 clo no verão que corresponde a uma combinação de roupas, que pode ser uma calça e uma camisa de manga curta;
- A resistência térmica das vestimentas das pessoas 1,0 clo no inverno que corresponde uma combinação de roupas que pode ser de uma calça e camisa de manga comprida, a uma resistência térmica de 0,155 m<sup>2</sup>.k/W.
- A atividade física das pessoas é do tipo sedentária com 108 e 118W de liberação de energia metabólica, considerado a área de pele de 1,8 m<sup>2</sup> ASHRAE [2004a].

No centro das zonas de conforto térmico a temperatura média do ar de inverno é de 22°C e de verão é de 24,5°C.

Os valores utilizados para gerar o envelope das zonas de conforto térmico da ASHRAE [2004a], estão apresentados na Tabela 3.3.

As temperaturas operativas são avaliadas dentro dos valores médios das fronteiras das zonas de conforto térmico de verão e inverno estabelecidos em ASHRAE [2004a]. Na zona de conforto térmico de verão a temperatura média utilizada é de 27,4°C, que corresponde à média das temperaturas 26,8 e 27,9 °C ou aos valores de PMV = +0,5. Na zona de conforto térmico de inverno, a temperatura média utilizada é de 20,4°C, que corresponde à média das temperaturas 19,6 e 21,2 ou aos valores de PMV = -0,5.

A umidade relativa para avaliação do conforto térmico está entre 30 e 60%.

Tabela 3.3. Valores utilizados no envelope das zonas de conforto térmico de inverno e verão

	$T_{op}$ [°C]	UR	$\mu$ [m/s]	Met	clo	PMV
Inverno	19,6	86	0,10	1,1	1	-0,5
	23,9	66	0,10	1,1	1	+0,5
	25,7	15	0,10	1,1	1	+0,5
	21,2	20	0,10	1,1	1	-0,5
Verão	23,6	67	0,10	1,1	0,5	-0,5
	26,8	56	0,10	1,1	0,5	+0,5
	27,9	13	0,10	1,1	0,5	+0,5
	24,7	16	0,10	1,1	0,5	-0,5

onde: UR – umidade relativa (%)

PMV - voto médio previsto, adimensional

O voto médio estimado *PMV* (*Predicted Mean Vote*) foi desenvolvido por Fanger ASHRAE [2005b], ele relaciona o conforto térmico com variáveis fisiológicas nas equações de

balanço de energia empíricas para relatar as percepções de conforto e as trocas térmicas existentes entre corpo e o ambiente.

O *PMV* é o índice representativo dos votos de um grande grupo de pessoas, oriundo dos estudos de Fanger (1970), em câmaras climatizadas, onde as pessoas registravam seus votos sobre a escala de conforto térmico, como a sugerida pela *ASHRAE*, (1997), ou ISO 10551, (1995):

Tabela 3.4. Escala de conforto térmico. Fonte: *ASHRAE* [2005a]

<i>PMV</i>	Sensação Térmica
+3	Quente
+2	Morno
+1	Levemente morno
0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Gelado

Na Tabela 3.4 é possível notar que para a sensação térmica ser confortável o índice de *PMV* deve ser zero, sendo que para o frio é negativo e para o calor é positivo.

O índice de *PMV* pode ser determinado somente quando a atividade (taxa metabólica) e as vestimentas (resistência térmica) são conhecidas, e os parâmetros físicos são medidos, tais como: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar, conforme previsto na Norma ISO 7726/85. O índice pode ser calculado com a equação [[Lamberts *et al*, 2002] [Beyer, 2005]]:

$$PMV = \left[ \left( 0,303^{(0,036 \times M)} + 0,028 \right) \times Q_t \right] \quad (3.14)$$

onde:  $Q_t$  - carga térmica atuante sobre o corpo [W/m<sup>2</sup>]

A diferença entre o calor produzido pelo corpo e o trocado com o meio ambiente é denominada carga térmica e é expressa pela equação [Lamberts *et al*, 2002]:

$$Q_t = M - 3,05 \times (5,73 - 0,007 \times M - P_a) - 0,42 \times (M - 58,15) - 0,0173 \times M \times (5,87 - P_a) - 0,0014 \times M \times (34 - t) - 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273) \times 4 - (trm + 273) \times 4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t) \quad (3.15)$$

sendo:

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 \times I_{cl} \quad (3.16)$$

$$h_c = 2,38 \times (t_{cl} - t) \quad (3.17)$$

onde:  $f_{cl}$  - Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu

$I_{cl}$  - Resistência térmica das roupas [ $m^2 \cdot ^\circ C / W$ ]

$t_{cl}$  - temperatura exterior da vestimenta [ $^\circ C$ ]

$h_c$  - coeficiente de convecção [ $W/m^2$ ]

As máquinas de ar condicionado não controlam a temperatura operativa da zona e sim, a temperatura interna do ar nos ambientes. Com isso, para manter a temperatura operativa dentro da zona de conforto térmico, depende exclusivamente das alterações dos elementos construtivos do prédio, ou seja, aquelas que influenciam diretamente na temperatura média radiante das superfícies. Portanto a análise do conforto térmico dos ambientes da edificação em estudo foi realizada com base nas horas não confortáveis para cada simulação realizada. Estas horas, representam a quantidade de horas das 8.760 horas do ano que no interior dos ambientes, quando ocupados, as temperaturas operativas encontravam-se fora da área da zona de conforto térmico de verão e inverno estabelecido na *ASHRAE* [2004a]. Conforme apresentado na

Figura 3.1 para a zona de conforto térmico as temperaturas operativas são avaliadas dentro dos valores médio das fronteiras das zonas de conforto térmico de verão e inverno, sendo assim, para o verão a temperatura média utilizada para o período de verão é de  $27,4^\circ C$  e para o período de inverno de  $20,4^\circ C$ .

### 3.4 Comportamento Térmico dos Materiais

Os materiais construtivos possuem grande influência no desempenho térmico e energético de uma edificação. Devido a isto, torna-se necessário conhecer as trocas de energia da edificação com o meio ambiente. A intensidade das trocas de energia ocorre através dos fechamentos (opacos ou transparentes) em função de fatores como: temperaturas internas e externas das edificações, absorvância, emissividade, transmitância, intensidade da radiação solar e propriedades térmicas dos materiais construtivos [Lamberts *et al*, 2007] [ABNT, 2003].

Os fechamentos opacos constituem a parte da envoltória que não transmite diretamente a radiação solar para o interior da edificação. Nesse caso, a transmissão de calor ocorre quando há uma diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa da envoltória [Santos, 2002] [Frota *et al*, 2003], sendo que o calor flui sempre da superfície mais quente para a mais fria.

Os fechamentos transparentes são as janelas, portas ou qualquer outro elemento transparente da envoltória da edificação. Estes são responsáveis pelas principais trocas térmicas, pois transmitem uma parcela significativa de radiação solar para o interior da edificação. Os

fechamentos transparentes têm geralmente alta transmitância térmica, ou seja, são bons condutores de calor.

### 3.4.1 Transmissão de calor

A condição necessária para ocorrer a transmissão de calor é a existência de dois corpos com temperaturas diferentes, pois um dos corpos, aquele que possuir maior temperatura, irá ceder parte de sua energia térmica para o corpo que possui menor temperatura. O processo continua até que as temperaturas se igualem, ou seja, até que os dois corpos atinjam o equilíbrio térmico.

O fluxo de calor que atravessa em um corpo opaco, como uma parede, pode ser calculado pela equação (3.18 [Lamberts *et al*, 2007]):

$$q = Ux(T_{ext} - T_{int}) = Ux\Delta T \quad (3.18)$$

onde:  $q$  - densidade de fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  - variação de temperatura [K]

$U$  - transmitância térmica [W/m<sup>2</sup>.K]

O fluxo de calor que incidirá no ambiente interno será dado pela equação [Lamberts *et al*, 2007]:

$$\phi = qxA \quad (3.19)$$

onde:  $\phi$  - fluxo de calor que incidirá no ambiente interno [W/m<sup>2</sup>]

$A$  - área do corpo no qual o fluxo de calor incidiu [m<sup>2</sup>]

Existem três formas de transmissão de calor:

- **Condução** – quando a troca é realizada por contato molecular, ou melhor, por contato entre as moléculas dos corpos. Ocorre em sólidos [Lamberts *et al*, 2007].
- **Convecção** – quando os corpos estão em contato molecular e um deles, pelo menos, é um fluido. O processo possui duas fases: na primeira o calor se transmite por condução, na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo [Lamberts *et al*, 2007].
- **Radiação** - ocorre mediante uma dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com maior temperatura se converte em energia radiante que chega até o corpo com menor temperatura, onde é absorvida numa proporção que depende das propriedades da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor [Lamberts *et al*, 2007].

As propriedades da superfície receptora são representadas pela emissividade (quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura) do corpo (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. Emissividade de superfícies no infravermelho. Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (1998)

<b>Tipo de superfície</b>	$\varepsilon$
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,90
Concreto aparente	0,80 / 0,95
Telha de barro	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela	0,90/0,95
Pintura: branca	0,90
Pintura: amarela	0,90
Pintura: verde claro	0,90
Pintura: “alumínio”	0,50
Pintura: verde escuro	0,90
Pintura: vermelha	0,90
Pintura: preta	0,90

### 3.4.2 Radiação Solar

Radiação solar é a energia radiante que incide sobre um corpo opaco é em parte absorvida e em parte refletida, como se pode observar na Figura 3.2.

$$RS = (\alpha_s \times RS) + (\rho_s \times RS), \text{ sendo } \alpha_s + \rho_s = 1 \quad (3.20)$$

onde:  $RS$  - radiação solar incidente [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\alpha_s$  - absorptância solar

$\rho_s$  - refletância solar

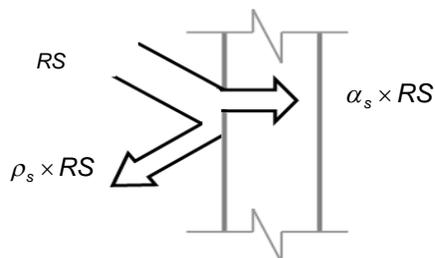


Figura 3.2. Radiação solar incidente em um corpo opaco. Fonte: [Lamberts *et al*, 2007] [Frota *et al*, 2003].

A Tabela 3.6 apresenta a absorvância para alguns materiais e algumas cores utilizados na construção civil.

Tabela 3.6. Absorvância de cores e superfícies para radiação solar. Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (1998)

<b>Tipo de superfície</b>	$\alpha$
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15
Concreto aparente	0,65 / 0,80
Telha de barro	0,75 / 0,80
Tijolo aparente	0,65 / 0,80
Reboco claro	0,30 / 0,50
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98
Vidro comum de janela	Transparente
Pintura: branca	0,20
Pintura: amarela	0,30
Pintura: verde claro	0,40
Pintura: "alumínio"	0,40
Pintura: verde escuro	0,70
Pintura: vermelha	0,74
Pintura: preta	0,97

A energia radiante absorvida por um corpo opaco se transforma em energia térmica e a refletida só sofre modificação de direção.

Quando a energia radiante incide sobre um corpo transparente ela é em parte absorvida, refletida e transmitida, como se pode observar na Figura 3.3. Um corpo ao receber energia radiante, reage seletivamente, o que significa que a quantidade de energia que absorve, reflete ou transmite depende do comprimento de onda do raio incidente. Com o vidro acontece um fenômeno similar como mostra a

Figura 3.4. A radiação solar incidente em corpos transparentes pode ser calculada através da equação [Lamberts *et al*, 2007]:

$$RS = (\alpha_s \times RS) + (\rho_s \times RS) + (\tau_s \times RS), \text{ sendo } \alpha_s + \rho_s + \tau_s = 1 \quad (3.21)$$

onde:  $\tau_s$  - transmitância solar

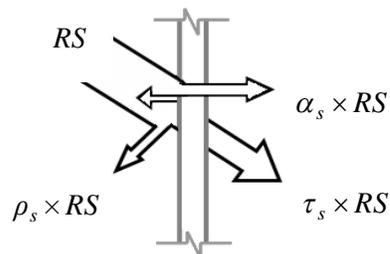


Figura 3.3. Radiação solar incidente em um corpo transparente. Fonte: [Sattler, 2005] [Lamberts *et al*, 2002]

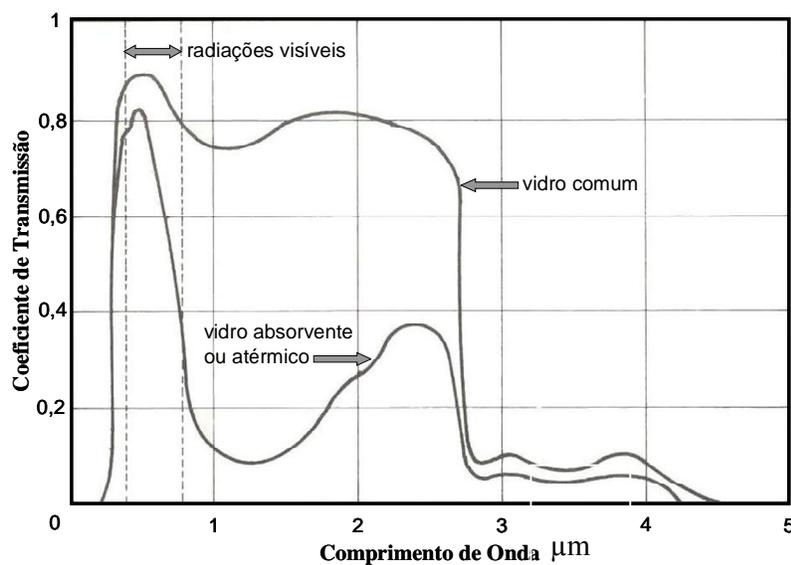


Figura 3.4. Comportamento de alguns vidros frente á energia radiante. Fonte: [Rivero, 1986]

### 3.4.3 Propriedades Térmicas dos Materiais

Os materiais construtivos são caracterizados devido a sua condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $c$ ) em função de sua densidade de massa aparente ( $\rho$ ).

#### 3.4.3.1 Densidade de massa aparente

Densidade de massa aparente é o quociente da massa pelo volume de um corpo, expresso em  $\text{kg}/\text{m}^3$  [ABNT, 2003], representada pela equação:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.22)$$

onde :  $\rho$  - densidade de massa aparente [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  - massa do corpo [kg]

$v$  - volume [ $\text{m}^3$ ]

### 3.4.3.2 Condutividade Térmica

Condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade desse de conduzir calor. Condutividade térmica equivale a quantidade de calor ( $Q$ ) transmitida através de uma espessura ( $L$ ), numa direção normal a superfície de área ( $A_{sup}$ ), devido a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre duas superfícies, sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas do gradiente de temperatura.

A quantidade de calor que atravessa, por exemplo, uma parede, por segundo, está relacionada aos seguintes fatores: diretamente proporcional à área da parede ( $A_{sup}$ ), diretamente proporcional à diferença de temperaturas entre o interior da habitação e o exterior, e inversamente proporcional à espessura da parede.

A condutividade térmica de um material é calculada através da equação [Lamberts *et al*, 2007]:

$$\lambda = \frac{Q \times L}{\Delta T \times A} \quad (3.23)$$

onde :  $\lambda$  - condutividade térmica [W/m.K]

$Q$  - quantidade de calor [W]

$L$  - espessura [m]

$A_{sup}$  - área da superfície [m<sup>2</sup>]

Com frequência, a densidade é tomada como um indicador de condutividade, pois materiais com densidade elevada normalmente possuem condutividade também elevada, mas não existe uma relação direta entre as duas quantidades. A aparente relação é devida ao fato de o ar possuir uma condutividade baixa, e os materiais leves tendem a ser porosos, assim, contendo mais ar, possuindo menor condutividade [ABNT, 2003].

O coeficiente de condutividade térmica é uma característica da natureza do material. Corresponde à quantidade de energia, sob a forma de calor, que passa, num segundo, através de 1 m<sup>2</sup> de superfície, quando a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é de 1°C.

### 3.4.3.3 Calor Específico

Calor específico é definido como a quantidade de calor que cada grama de uma substância necessita trocar para variar sua temperatura em 1°C. Quanto menor o calor específico de uma substância, mais facilmente ela pode sofrer variações em sua temperatura. É possível determinar o calor específico de uma substância a partir da quantidade de calor cedida a um corpo dessa substância, da variação térmica que ele sofre, e da massa deste corpo, através da equação [Rivero, 1986]:

$$c = \frac{Q}{m \times \Delta T} \quad (3.24)$$

onde :  $c$  - calor específico [J/kg.K]

Também é possível determinar o calor específico de uma substância a partir da capacidade térmica de um corpo composto por ela e da massa desse corpo, através da equação [Rivero, 1986]:

$$c = \frac{C}{m} \quad (3.25)$$

onde:  $C$  - capacidade térmica [J/K]

#### 3.4.3.4 Inércia térmica

Inércia térmica é uma característica das edificações que está relacionada com a sua capacidade térmica. Quanto maior a inércia térmica de um corpo, menor será a variação de sua temperatura para uma determinada quantidade de calor fornecida. Nas edificações, quanto maior a inércia térmica dos materiais que a compõe, menor será a mudança da temperatura interna na edificação com o aumento da temperatura exterior. Essa propriedade está ligada à massa e ao calor específico dos materiais construtivos [Santos, 2002].

As propriedades térmicas dos materiais construtivos, assim como a transmitância, absorvância e emissividade solar podem ser determinadas através de tabelas que constam no Projeto 02: 135.07-002 (2003) de norma da ABNT: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do calor solar de elementos e componentes de edificações.

### 3.5 Green Building

Edifícios possuem em geral uma vida útil bastante longa. Desta forma, as decisões tomadas durante o seu projeto têm grande influência e implicações tanto para o futuro dos seus ocupantes como para a sociedade como um todo. Itens como o desempenho inicial e a habilidade de melhorar o desempenho ao longo do tempo assumem considerável importância.

O *Green Guide* (Guia Verde) da *ASHRAE* define como *green building* (edifício verde) aquele cuja concepção é realizada tendo em vista a preservação da natureza e a ordem natural das coisas, sendo o seu projeto concebido sob a ótica de reduzir o impacto negativo humano sobre o meio natural ao seu redor, no que concerne a matéria, recursos e outros processos existentes na natureza *ASHRAE* [2003].

O *USGBC* considera que as construções que reduzem o consumo de recursos tais como energia, materiais, água e terra, são denominados *green building USGBC* [2009]. De acordo com a *USGBC*, as construções devem também reduzir a carga ecológica como emissão de gases de efeito estufa, substâncias de destruição da camada de ozônio, e rejeitos líquidos e sólidos, melhorando também o conforto interno do ambiente, seja térmico, lumínico ou acústico. Edifícios representam um significativo investimento financeiro, onde devem ser observados aspectos ecológicos relacionados com cada material adquirido. O valor dos edifícios é normalmente avaliado de forma limitada e baseado em aspectos tais como: localização, qualidade, função e estética. O conceito de *green building* adiciona ainda uma série de outros aspectos a serem avaliados, gerando benefícios diretos e indiretos, tais como operar de forma passiva, serem mais eficientes no uso de energia e de água, necessidade de menores casas de máquinas e de equipamentos de infra-estrutura, consumir menos recursos para a sua construção, e apresentar tendência de ser mais simples na sua operação assegurando uma vida mais longa.

Um edifício com conceito *green building* segundo [U. S. *Department of Energy*, 2005] pode apresentar uma economia de 30% no consumo de energia, 35% de redução de emissão de gás carbono, 30% a 50% de redução de consumo de água e 50% a 90% em relação ao descarte de resíduos. Apresentam ainda como benefícios uma redução de custos operacionais, maior avaliação do imóvel e acréscimos de valores, atendendo principalmente aos interesses emergentes das organizações no que se refere à melhoria e manutenção da qualidade de vida, no resultado do trabalho e nas relações com os consumidores.

Edifícios construídos dentro destes princípios oferecem inúmeros benefícios para a comunidade, tais como apoiar a economia local através da demanda de materiais de construção produzidos atendendo às especificações e mão de obra do local, bem como proteger os recursos naturais como água e ar.

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados com os intercâmbios térmicos entre o homem e o meio, governados por múltiplas variáveis, umas dependendo do próprio homem (idade, sexo, raça, hábitos alimentares, peso, altura, atividades que realizam e roupas que usam) e outras sobre as variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura do bulbo úmido, temperatura de orvalho, temperatura operativa, pressão de vapor d'água, pressão atmosférica total, umidade relativa, umidade absoluta ou conteúdo de umidade, velocidade do ar). Vale ressaltar que toda a energia produzida pelo ser humano deve ser eliminada na quantia exata, devido ao fato de que se a perda que ocorrer for insuficiente ocasionará a sensação de calor e se for em excesso, de frio. Foi também conceituado neste capítulo, conforto térmico e os parâmetros que serão utilizados para avaliação de conforto

interno dos ambientes da edificação estudada. Além disso, foi apresentada a influência das propriedades térmicas dos materiais construtivos diante o desempenho térmico e energético das edificações, pois quando adequados às necessidades dos usuários consomem menor quantidade de energia para condicionamento térmico. Foram definidos os *green building* com suas características e os benefícios obtidos com esse tipo de construção.

No próximo capítulo será apresentado o estudo de caso, onde serão descritas as características construtivas, ocupação, hábitos diários e equipamentos elétricos da edificação onde foi realizado o estudo. Serão também apresentados os programas computacionais utilizados, um para realizar a análise bioclimática do local e o outro as simulações termoenergéticas, assim como o método utilizado para avaliar o conforto térmico e o consumo energético da edificação estudada.

## 4. ESTUDO DE CASO4

### 4.1 Introdução

O capítulo anterior descreveu os conceitos utilizados para analisar os materiais construtivos que possibilitam a diminuição do consumo de energia elétrica de uma edificação e proporcionam índices satisfatórios de conforto térmico para um grupo de pessoas em um determinado ambiente. Entretanto, para realizar estas análises é necessário conhecer as características da edificação onde foi realizado o estudo de caso. Neste capítulo é apresentado o edifício escolhido como estudo, como as características de projeto com a apresentação de plantas baixas ilustrativas, o clima típico da região e as estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas para suprir o percentual de desconforto. Para avaliar a eficácia das medidas sugeridas como alternativa para diminuir o consumo energético e ao mesmo tempo proporcionar índices satisfatórios de conforto, foi desenvolvido um método que, a partir da análise do consumo mensal dos ambientes existentes na edificação, avalia a utilização racional de elementos construtivos com base em simulações computacionais, sendo os resultados das alternativas de maior relevância avaliados e comparados entre eles.

### 4.2 Edificação Simulada

Para realizar o estudo de caso foi escolhida uma edificação residencial. A edificação tem como objetivo obter a certificação *LEED*<sup>TM</sup>. A construtora solicitou que não fosse divulgado o nome do empreendimento que está em fase de construção.

O projeto arquitetônico foi realizado para um edifício de 15 pavimentos, com 51 unidades de apartamentos. A edificação foi projetada com quatro tipos diferentes de apartamento, um dormitório, dois dormitórios e *Loft* (apartamento duplex com ambientes integrados). No projeto também está previsto salão de festas, piscina, academia, área verde preservada, *solarium* na cobertura, espaço *gourmet*, estacionamento para visitantes e bicicletário. A seguir são apresentadas as plantas ilustrativas de cada tipologia de apartamento.

A Figura 4.1 ilustra a planta baixa da tipologia 01, apartamento com 95,13 m<sup>2</sup> de área com dois dormitórios (suítes), situada na fachada leste da edificação. Esta tipologia será referenciada no trabalho como gfa1 e gfa2.

A Figura 4.2 ilustra a planta baixa da tipologia 02, apartamento com 78,21 m<sup>2</sup> de área com um dormitório (suíte), situada na fachada norte da edificação. Esta tipologia será referenciada no trabalho como gfa3.

A Figura 4.3 ilustra a planta baixa da tipologia 03, loft dois pavimentos com 83,13 m<sup>2</sup> de área construída com um dormitório (suíte), situada na fachada oeste da edificação. Esta tipologia será referenciada no trabalho como gfl4.

A Figura 4.4 ilustra a planta baixa da tipologia 04, loft de dois pavimentos com 76,29 m<sup>2</sup> de área construída com um dormitório (suíte), situada na fachada oeste da edificação. Esta tipologia será referenciada no trabalho como gfl5.



Figura 4.1. Planta baixa ilustrativa da tipologia 01 (gfa1 e gfa2)



Figura 4.2. Planta baixa ilustrativa da tipologia 02 (gfa3)

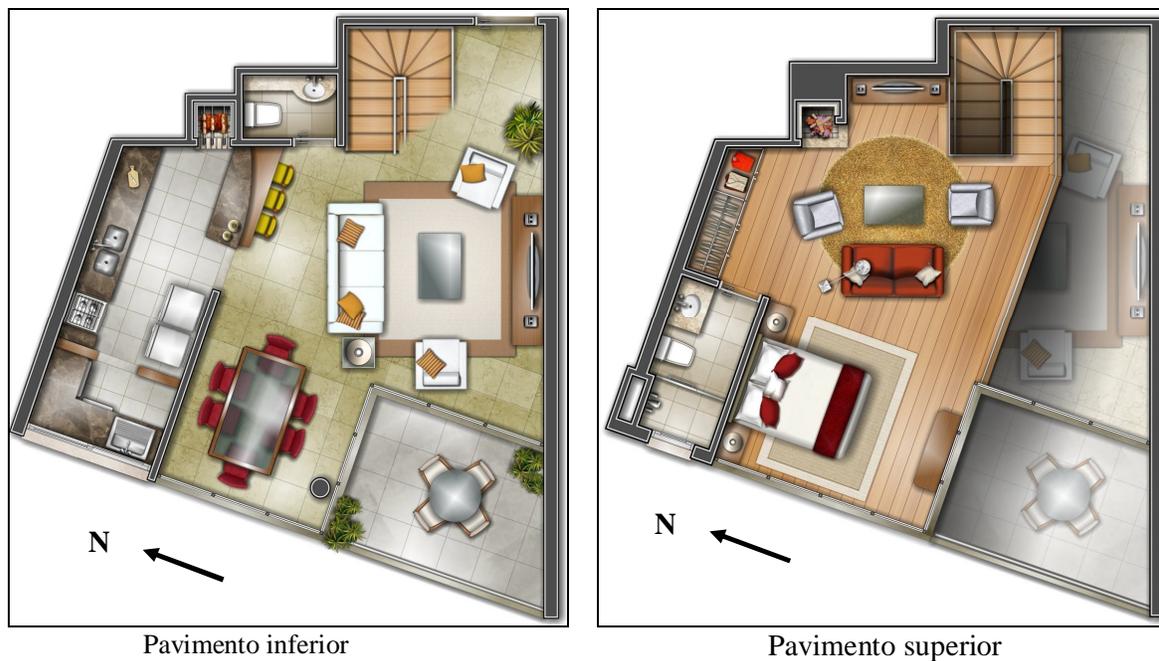


Figura 4.3. Planta baixa ilustrativa do pavimento inferior e superior da tipologia 03 (gf14)

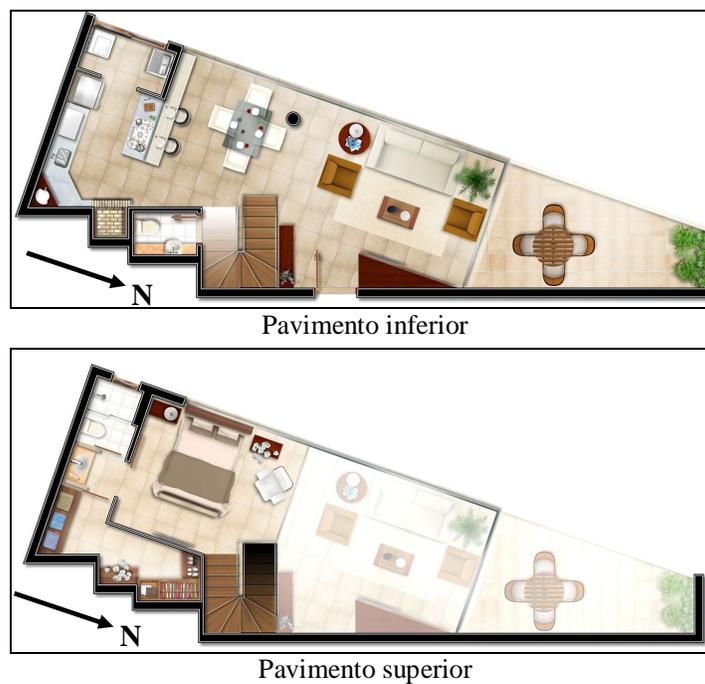


Figura 4.4. Planta baixa ilustrativa do pavimento inferior e superior da tipologia 04 (gf15)

### 4.3 Análise Bioclimática

A adoção de estratégias bioclimáticas, definidas como regras que se destinam a orientarem a edificação tirando partido das condições climáticas de cada local, pode influenciar significativamente o desempenho de uma edificação em termos do conforto térmico no seu

interior e, conseqüentemente, dos seus ocupantes. Como o consumo energético depende das condições de conforto que os ocupantes querem atingir, se a edificação estiver pouco adaptada ao clima será necessário maior consumo de energia para atingir as condições de conforto térmico pretendido, porém quando são utilizadas as estratégias bioclimáticas corretas, a edificação está mais próxima de atingir as condições de conforto térmico ou de diminuir os respectivos consumos energéticos para atingir esses fins.

Pelos fatos apresentados anteriormente observa-se que foi indispensável realizar uma análise bioclimática do local onde a edificação em estudo está localizada, para que possam ser aplicadas estratégias bioclimáticas corretas. Para determinar estas estratégias bioclimáticas foi utilizado o programa *Analysis Bio*, desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE/UFSC), que utiliza arquivo climático para realizar as análises, Figura 4.5.

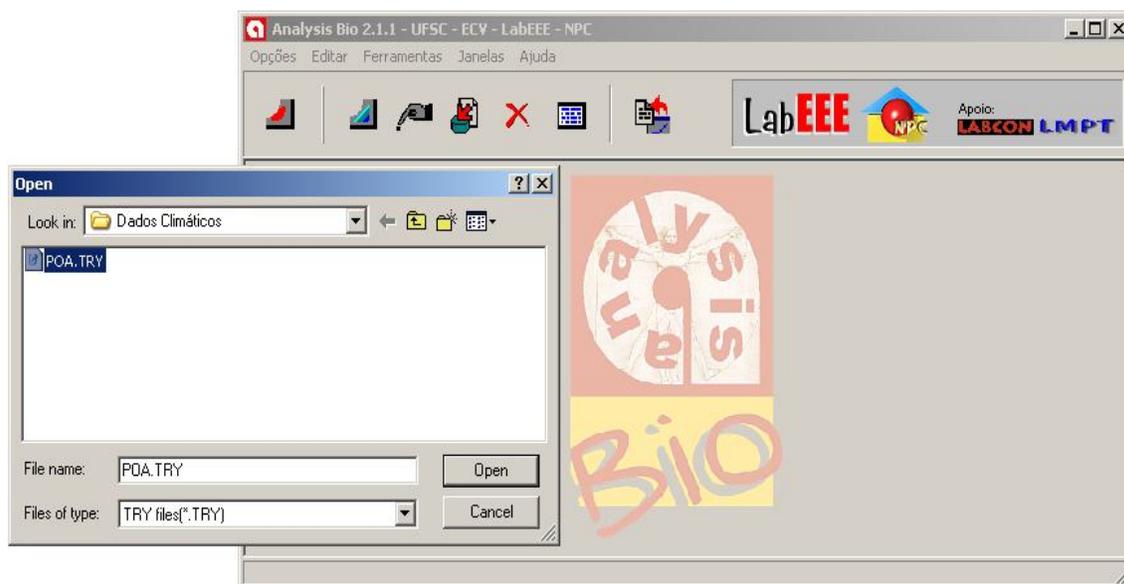


Figura 4.5. Interface do programa *Analysis Bio*

#### 4.4 Arquivo Climático e Dias de Projeto

A simulação com a utilização do arquivo climático de uma determinada cidade é utilizada para prever o consumo elétrico de uma edificação, tanto para de ar condicionado, como para o consumo do outros equipamentos elétricos ou o consumo total da edificação (soma dos dois anteriores). Os arquivos climáticos são necessários quando se deseja simular durante um período do ano pré-definido pelo usuário (*run periods*). Um arquivo climático começa com a medição em uma localidade ou estação, de vários dados meteorológicos horários por um longo período de 10 anos ou mais. A partir de um tratamento estatístico de dados, escolhem-se os meses que melhor

representam o clima da localidade medida. O arquivo climático é a compilação dos doze meses mais representativos. Este arquivo contém informações climáticas horárias para as 8760 horas do ano. Na Tabela 4.1 são listadas as informações horárias constantes em arquivo climático para Porto Alegre.

Tabela 4.1. Informações horárias constantes no arquivo climático

<b>Informação climática</b>	<b>Unidade</b>	<b>Informação climática</b>	<b>Unidade</b>
Data e hora	-	Velocidade do vento	m/s
Temperatura de bulbo seco	°C	Direção do vento	°
Temperatura de bulbo úmido	°C	Índice de nebulosidade do céu (0 a 1)	-
Temperatura de orvalho	°C	Índice de opacidade do céu (0 a 1)	-
Umidade relativa	%	Radiação horizontal extraterrestre	Wh/m <sup>2</sup>
Conteúdo de umidade	g <sub>w</sub> /kg <sub>a</sub>	Radiação global horizontal	Wh/m <sup>2</sup>
Pressão atmosférica	Pa	Radiação direta	Wh/m <sup>2</sup>
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	Radiação direta normal	Wh/m <sup>2</sup>
Entalpia	kJ/kg	Radiação difusa horizontal	Wh/m <sup>2</sup>
Claridade zenital	Cd/m <sup>2</sup>	Temperatura do solo	°C
Visibilidade	Km	Iluminação horizontal global	lux
Altura das nuvens	m	Iluminação horizontal difusa	lux
Profundidade da neve	cm	Iluminação normal direta	lux
Número de dias sem cair neve	-	Precipitação de água	mm

Na Tabela 4.2 estão apresentadas a média anual e os valores máximo e mínimo obtidos a partir da média horária dos dados do arquivo climático da cidade de Porto Alegre.

Tabela 4.2. Valores dos principais dados climáticos da cidade de Porto Alegre

	$T_{bs}$ [°C]	$T_{bu}$ [°C]	Pressão [kPa]	Índice de nebulosidade	Radiação global [Wh/m <sup>2</sup> ]	Radiação direta [Wh/m <sup>2</sup> ]	Velocidade do vento [m/s]
Máxima	36,5	27,5	103,2	1	1106	1011	13
Média	19,2	16,9	101,3	0,5	197,9	147,2	2,0
Mínima	1,3	1,3	99,5	0	0	0	0

Os arquivos climáticos podem ser obtidos na página oficial do *EnergyPlus* no formato *EPW* (*EnergyPlus Weather*), próprio do *EnergyPlus*, cujos valores estão resumidos na Tabela 4.2. Porém, o arquivo climático de Porto Alegre, utilizado neste trabalho, foi desenvolvido pelo (LABEEE/UFSC).

Os dias de projeto (*design day*) são utilizados para dimensionar o sistema de ar condicionado da edificação. A metodologia para a determinação dos dias de projeto está definida

em *ASHRAE* [2005a], e as informações incluídas para estes dias são, valores de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento com direção em várias frequências de ocorrências. Os dados para os dias de projeto de Porto Alegre foram levantados durante o ano de 1982 a 1993 pela *ASHRAE* [2001].

Os dias de projeto são obtidos nas condições de umidade e temperatura de bulbo seco e bulbo úmido baseados em frequência de ocorrências cumulativas anuais. Para os dias de projeto de verão estas frequências são de 0,4, 1,0 e 2,0% das 8760 horas, já para os dias de projeto de inverno 99 e 99,6% das 8760 horas. Isso significa dizer que, acima da frequência de ocorrência cumulativa escolhida para o dia de projeto, o sistema de ar-condicionado pode não ser capaz de manter a temperatura média do ar da zona na temperatura de controle do termostato.

Neste trabalho para garantir que o condicionamento de ar condicionado tenha rendimento satisfatório, utilizou-se com 0,4% da frequência de ocorrência cumulativa anual para o verão e 99,6% para o inverno. Isto significa que, no verão o sistema de condicionamento de ar não será capaz de manter a temperatura de projeto de verão do ambiente em no máximo 0,4% das 8760 horas do ano, e no inverno este sistema será capaz de manter a temperatura de projeto de inverno do ambiente em no mínimo 99,6% destas horas. A temperatura de controle do *set point* do termostato utilizada para o verão foi de 25°C e para o inverno foi de 22°C, nas simulações realizadas neste trabalho.

Foram simulados quatro dias de projeto, sendo três para o verão e um para o inverno. Para o verão foram considerados três dias do mês de janeiro, pois se considera o mês mais quente do ano. Os três dias de projeto baseam-se na temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e conteúdo de umidade. As Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5 apresentam as condições climáticas dos três dias de projeto de verão.

Tabela 4.3. Condições climáticas do dia de projeto de verão para temperatura de bulbo seco

Cidade	T bs [°C]	MT bu [°C]	U média [m/s]	D
Porto Alegre	35	24,5	3	290°

onde : MTbu – é a média coincidente dos valores de temperatura de bulbo úmido na temperatura de bulbo seco indicada para cada dia

U média – é a média coincidente dos valores da velocidade do vento na temperatura de bulbo seco indicada para cada dia

D – é a direção do vento (N=0°; L=90°; S=180°; O=270°)

Tabela 4.4. Condições climáticas do dia de projeto de verão para temperatura de bulbo úmido

Cidade	T bu [°C]	MT bu [°C]	U média [m/s]	D
Porto Alegre	26	31,8	3	290°

Tabela 4.5. Condições climáticas do dia de projeto de verão para o conteúdo de umidade

Cidade	W [gw/kg]	MT bu [°C]	T orvalho [°C]	U média [m/s]	D
Porto Alegre	19,5	28,5	24,5	3	290°

A Tabela 4.6 apresenta as condições climáticas do dia de projeto de inverno para a temperatura de bulbo seco em 4,4°C, que é o valor máximo da temperatura de bulbo seco na frequência de ocorrência cumulativa anual de 99,6% das 8760 horas da distribuição normal da temperatura de bulbo seco para a cidade de Porto Alegre.

Tabela 4.6. Condições climáticas do dia de projeto de inverno

Cidade	T bs [°C]	T bu [°C]	UR	D	U média [m/s]
Porto Alegre	4,4	4,4	100%	240°	0,7

#### 4.5 Programa Analysis Bio

O Programa *Analysis Bio*, desenvolvido pelo LABEEEE/UFSC plota as temperaturas e umidades das 8.760 horas do *TRY* sobre a carta psicrométrica (diagrama que simplifica o estudo das propriedades do ar, tais como temperatura e umidade), onde se pode obter a razão de umidade do ar ( $W$  [g/kg]) em função das temperaturas de bulbo seco ( $T_{bs}$  [°C]) e úmido ( $T_{bu}$  [°C]), visando indicar as estratégias mais apropriadas para obtenção de conforto para cada período do ano.

O arquivo *TRY* utilizado nas análises foi obtido no site do LABEEEE/UFSC e são referentes à cidade de Porto Alegre no ano de 1954.

Observando a carta bioclimática de Porto Alegre, Figura 4.6, é perceptível a variação climática que ocorre ao longo do ano. A mancha alongada, constituída por pontos, representa cada hora do ano e percorre desde a região onde é indicado o aquecimento artificial até o início da zona de ar condicionado. Extraíndo da carta os percentuais respectivos de cada zona, têm-se as estratégias bioclimáticas que devem ser adotadas para se obter conforto térmico nas edificações, onde 22,7% total das horas do ano haverá conforto e 77,3% haverá desconforto, sendo 51,6% causado pelo frio e 25,7% pelo calor (Tabela 4.7). Estas condicionantes climáticas deixam a cidade 77,3% do tempo anual fora da zona de conforto estabelecida pela carta bioclimática.

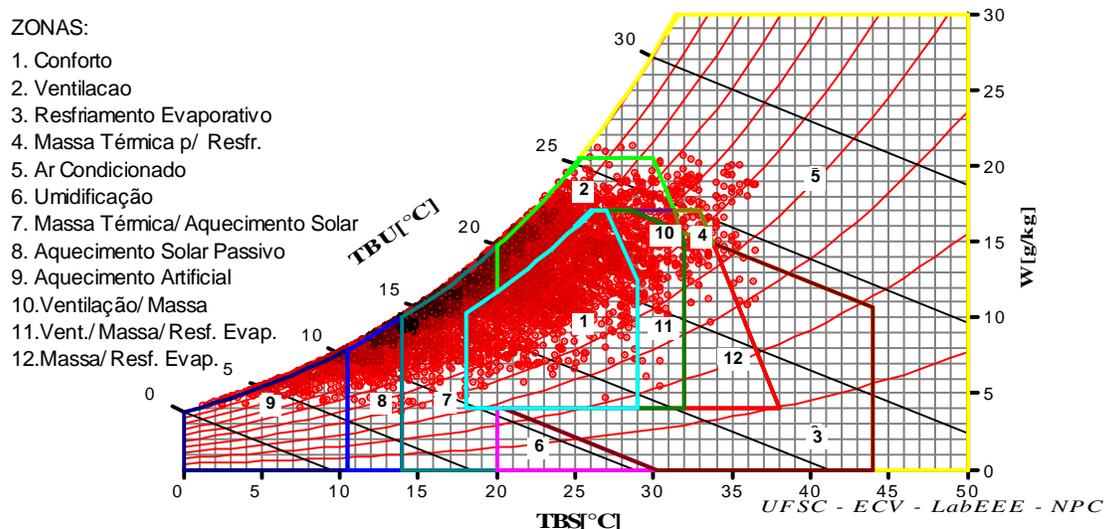


Figura 4.6. Carta bioclimática de Porto Alegre originada pelo *Analysis Bio*

Tabela 4.7. Estratégias bioclimáticas para Porto Alegre originadas pelo *Analysis Bio*

<b>CONFORTO</b>	<b>22,7 %</b>
<b>DESCONFORTO</b>	<b>77,3 %</b>
<b>FRIO</b>	<b>51,6 %</b>
Massa Térmica para Aquecimento Solar	33,8 %
Aquecimento Solar Passivo	11,8 %
Aquecimento Artificial	6,07 %
<b>CALOR</b>	<b>25,7 %</b>
Ventilação	23,3 %
Massa Térmica para Resfriamento	4,79 %
Resfriamento Evaporativo	4,46 %
Ar Condicionado	1,28 %

Sendo assim, as estratégias bioclimáticas de maior relevância a serem adotadas para amenizar o desconforto térmico pelo frio na edificação em estudo são: a massa térmica (33,8 %), podendo ser solucionada com o uso da energia térmica proveniente da radiação solar, que fica armazenada nas paredes das edificações e é transferida para o interior do ambiente nas horas mais frias, quase sempre no período noturno. A segunda é o aquecimento solar passivo (11,8%), esta estratégia é realizada através de bom isolamento térmico, para evitar a perda de calor. E a última estratégia a ser adotada para diminuir o desconforto pelo frio, é aquecimento artificial (6,07%), ela é representada por fontes energéticas como energia elétrica ou combustível, devido ao uso de equipamentos e instalações específicas, como ar condicionado.

A estratégia bioclimática de maior relevância a ser adotada em relação ao desconforto pelo calor foi à ventilação (23,3%), ela melhora as condições internas, pois controlando a ventilação durante o dia pode reduzir o ingresso de ar quente e incrementar a ventilação noturna.

#### 4.6 Programa Simulador Utilizado

O programa computacional utilizado para realizar a análise energética (consumo de energia), o cálculo de carga térmica (dimensionamento do sistema de *HVAC - Heating, Ventilating and Air-Conditioning*) e o conforto térmico (horas não confortáveis) da edificação residencial estudada foi o *EnergyPlus*, programa de simulação de edificações oficial do Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Escrito em linguagem Fortran 90, o *EnergyPlus* reúne as melhores características e capacidades de outros 2 programas de simulação termoenergética, *BLAST* e *DOE-2*, possui estrutura modular bem organizada para facilitar a adição de rotinas, módulos e a comunicação com outros programas. A atualização do programa é feita regularmente e disponibilizada gratuitamente pela rede mundial de computadores. Como dito no Capítulo 1, a versão do *EnergyPlus* utilizada neste trabalho é a 3.1.0.027, lançada em abril de 2009.

O *EnergyPlus* possui três algoritmos de solução distintos, o *CondFD (Conduction Finite Difference)* ou Condução por Diferenças Finitas, algoritmo de solução que usa técnica de Diferença Finitas em 1-Dimensão, considera apenas o calor sensível e não leva em conta o armazenamento ou a difusão de umidade nos elementos da construção. O *EMPD (Effective Moisture Penetration Depth)*, ou Modelo de Profundidade Efetiva de Penetração de Umidade que considera a difusão de calor sensível e o armazenamento de umidade nas superfícies internas, porém precisa de informações adicionais das características de umidade dos materiais. O por último, o escolhido para ser utilizado no trabalho, o *CTF (Conduction Transfer Function)*, ou Função de Transferência por Condução, que considera apenas o calor sensível e não leva em consideração o armazenamento ou difusão de umidade nos elementos de construção [*EnergyPlus*, 2009].

Para as simulações realizadas no programa *EnergyPlus* ele não exige a utilização de arquivos climáticos com 8.760 horas no caso de simulação de períodos curtos e permite gerar arquivos com frações de hora (por exemplo, quinze minutos). O programa ainda permite que o usuário escolha, no arquivo *IDF*, qual tipo de período será simulado: usando dias de projeto, arquivo climático ou os dois tipos simultaneamente, este último sendo utilizado neste trabalho. O programa *EnergyPlus* utiliza o arquivo climático (*weather file*).

Neste trabalho através das simulações realizadas no programa *EnergyPlus*, com os arquivo climático e os dias de projeto foram avaliados:

- As horas não confortáveis em função das diferentes combinações de parâmetros construtivos (diferentes tipos de vidros, proteções internas e externas das esquadrias, proteções entre os vidros e revestimentos internos). Estas horas significam a quantidade de horas totais das 8.760 do ano que no interior dos ambientes (zonas térmicas), quando ocupado, em relação temperatura operativa, encontram-se fora da área da zona de conforto térmico de verão e inverno.
- A capacidade e potência nominal do sistema de ar condicionado, que calcula a capacidade e a potência nominal de aquecimento e refrigeração necessária para adequar a edificação nas diferentes estações do ano. É escolhida à maior potência de refrigeração entre o arquivo climático e os dias de projeto para a seleção da máquina de ar condicionado média do ar da zona de temperatura de controle do termostato durante todo o período de funcionamento do sistema de ar condicionado;
- A capacidade do sistema de ar condicionado de refrigeração e aquecimento dimensionado por área ( $m^2$ ) de cada ambiente;
- A relação do consumo energético anual para cada ambiente simulado, com o objetivo de verificar a influência do consumo energético de cada ambiente simulado em relação ao consumo energético total do prédio;
- A relação do consumo energético anual por área ( $m^2$ ) por zona, tornando possível realizar uma análise mais equilibrada, pois considera o tamanho do ambiente;
- O consumo de energia elétrica, que dimensiona o consumo anual através do somatório do consumo mensal da edificação, estes relacionados aos sistemas de ar condicionado, iluminação e equipamentos elétricos.

#### 4.7 Metodologia

A metodologia utilizada para avaliar se a edificação residencial em estudo atende as exigências de um pré-requisito da certificação *LEED*<sup>TM</sup> no requisito energia e proporciona conforto térmico no interior dos ambientes. Foi primeiramente realizado um estudo detalhado da edificação, descrevendo as zonas térmicas a serem simuladas, as fontes de calor da edificação provenientes da ocupação, taxa metabólica, resistência térmica das vestimentas, equipamentos elétricos, iluminação, sistema de condicionamento de ar (*HVAC*) e das propriedades térmicas dos materiais construtivos. Posteriormente, alguns parâmetros construtivos, (diferentes tipos de vidros, proteções internas e externas das esquadrias, proteções entre os vidros e revestimentos

internos) foram simulados e avaliados. A seguir são apresentadas as etapas da metodologia utilizada:

1°. Com base no projeto arquitetônico e nas especificações técnicas desenvolvidos para a edificação em estudo, foi simulado o prédio proposto 01 no *EnergyPlus* (caso 1). Neste primeiro caso foram dimensionados os sistemas de ar condicionado para os dias de projeto para cada ambiente analisado (zona térmica) e depois foi realizada a relação da potência do sistema de ar condicionado dimensionado por área (m<sup>2</sup>) de cada ambiente. Com base no arquivo climático utilizado nas simulações, nesta primeira etapa também foi possível, apresentar o consumo com o sistema de ar condicionado por área (m<sup>2</sup>) de cada ambiente, elaborar gráficos referentes às horas não confortáveis em relação à temperatura operativa das 8.760 horas do ano para cada ambiente (zona térmica) e dos consumos elétricos mensais referentes ao sistema de *HVAC*, iluminação e equipamentos elétricos para toda edificação em estudo.

2°. A segunda etapa foi a simulação do prédio *baseline* (caso 2), o qual consiste na adaptação das características do caso 1- prédio proposto 01, para o mesmo atender o Apêndice G da norma *ASHRAE* [2007], estar em conformidade com os requerimentos obrigatórios constantes das seções 5.4, 6.4, 7.4, 8.4, 9.4 e 10.4, e os requerimentos de *performance* da mesma *Standard*. Com base nos dados obtidos com as simulações do prédio *baseline* foram analisadas as horas não confortáveis em relação à temperatura operativa das 8.760 horas do ano para cada ambiente (zona térmica) e os consumos elétricos mensais referentes ao sistema de *HVAC*, iluminação e equipamentos elétricos para toda a edificação.

3°. Com base nos dados da simulação do prédio proposto 01 (caso 1) e alterando os parâmetros construtivos, como, diferentes tipos de vidros, proteções internas e externas das esquadrias, proteções entre os vidros e revestimentos internos, nesta etapa simula-se o caso 3 (tipos de vidros), o caso 4 (proteções internas), o caso 5 (proteções entre os vidros), o caso 6 (proteções externas) e o caso 7 (combinações de vidro laminado com proteções). Para cada caso foi analisado o consumo elétrico anual referente ao sistema de *HVAC*, iluminação e equipamentos elétricos para toda a edificação e comparados com o consumo elétrico anual do prédio *baseline* (caso 2).

4°. Após a realização da terceira etapa foram comparados os resultados obtidos entre elas, verificando se através de diferentes elementos construtivos é possível atender o pré-requisito 2 do item *Energy & Atmosphere* da certificação *LEED*<sup>TM</sup>, o qual exige que o consumo energético do prédio proposto 01 (caso 01) deva reduzir em 10% em relação ao prédio *baseline*

(caso 02). Após a comparação entre os materiais, simula-se o prédio proposto 07 (caso 8 – caso ótimo), que engloba os elementos construtivos que tiveram os melhores resultados.

5°. Na última etapa com base nas demais realizadas anteriormente foi verificado se para o prédio proposto 07 (caso 8 – caso ótimo) a redução do consumo de energia elétrica obtida em relação ao prédio *baseline* (caso 2) atende o pré-requisito 2 do item *Energy & Atmosphere* e se a quantidade de horas não confortáveis em relação a temperatura operativa atende o crédito 7 do item *Indoor Environmental Quality*. Este crédito tem como objetivo fornecer ambiente termicamente confortável que colabore com o conforto e bem estar dos ocupantes.

A análise dos resultados obtidos com as simulações realizadas no *EnergyPlus* são apresentados no formato *CSV (Comma Separated Values)*, formato este que pode ser lido pela maioria dos editores eletrônicos de planilhas. Neste trabalho foi utilizado o *Excel*.

Nas planilhas que contêm resultados horários para cada zona foi possível obter as potências dos sistemas de *HVAC* (refrigeração e aquecimento) considerando os quatro dias de projeto (um de inverno e três de verão), sendo que para o período de inverno indicou a potência máxima de aquecimento em cada zona ao longo das 24 horas simuladas, e para o período de verão potência máxima de refrigeração que foi solicitada em cada zona ao longo das 72 horas simuladas (três dias de projeto). Comparando as duas potências máximas, uma para o período de verão e outra para o período de inverno, determinou a de maior valor como sendo a potência necessária do sistema *HVAC* para atender durante o ano. O sistema de condicionamento de ar dimensionado não será capaz de manter a temperatura de projeto de verão do ambiente em no máximo 0,4% das 8760 horas do ano, e no inverno este sistema será capaz de manter a temperatura de projeto de inverno do ambiente em no mínimo 99,6% destas horas. As temperaturas de controle do *set point* do termostato utilizadas para o verão foi de 25°C e para o inverno foi de 22°C.

As planilhas também possuem resultados horários para cada zona, das horas não confortáveis em relação a temperatura operativa para cada ambiente, sendo que esses dados também são apresentados em uma coluna, sendo que foi baseado no arquivo climático, com isso os resultados obtidos se referem à quantidade horas em relação as 8.760 horas do ano.

Em todos os casos simulados os equipamentos elétricos, características de ocupação, taxa metabólica e resistência térmica das vestimentas foram considerados os mesmos.

Neste capítulo foram apresentados os dados da edificação em estudo, o clima típico do local onde a mesma está sendo construída, além da carta bioclimática gerada através do programa *Analysis Bio*, e também foi apresentado uma metodologia para realizar análise energética e o conforto térmico através do uso do programa computacional *EnergyPlus*.

No próximo capítulo foi realizada uma caracterização da edificação, referentes às características construtivas, ocupação, sistema de condicionamento de ar, sistema de iluminação e equipamentos, hábitos diários, assim como a modelagem da edificação (zonas térmicas), fontes de calor e simulações realizadas com o *EnergyPlus*. Com os resultados obtidos nas simulações, apresentados em forma de gráficos, foram realizadas análises que avaliam a eficácia dos parâmetros construtivos na redução do consumo de energia elétrica e conforto térmico.

## 5. SIMULAÇÕES

### 5.1 Introdução

A partir das características do projeto do edifício escolhido como estudo, do clima típico da região e das estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas para propiciar um nível de conforto adequado nos ambientes, que foram apresentados no capítulo anterior, foi possível avaliar a eficácia do uso de diferentes elementos construtivos visando diminuir o consumo energético e proporcionar índices satisfatórios de conforto térmico aos usuários. Este capítulo descreve outras características importantes para as avaliações realizadas como, a ocupação de cada ambiente, equipamentos e hábitos diários. Além disso, apresentadas as simulações computacionais realizadas no *EnergyPlus* de forma a avaliar a influência de diversas alternativas construtivas e os resultados obtidos e suas respectivas análises. Para tanto, faz-se inicialmente uma caracterização detalhada da edificação estudada e dos parâmetros avaliados definindo os casos a serem simulados.

### 5.2 Modelagem da Edificação

#### 5.2.1 Zonas Térmicas

Zonas térmicas são definidas no *EnergyPlus* como “um volume de ar a uma temperatura uniforme” [*EnergyPlus*, 2009]. Desta forma, cada zona térmica define um sistema independente de controle térmico. Dividir uma edificação em zonas térmicas possibilita analisar separadamente a resposta termoenergética de diferentes ambientes da mesma. Isto permite, por exemplo, identificar setores da edificação que demandam uma maior ou menor potência de condicionamento de ar, o que é impossível de ser obtido caso haja apenas uma zona térmica.

A edificação em estudo foi projetada para um edifício de 15 pavimentos, sendo que no 1º pavimento está previsto a construção do *hall*, espaço *gourmet*, administração e casa do zelador. Do 2º pavimento ao 14º pavimento está previsto a construção de 51 unidades de apartamentos, sendo que em todos os pavimentos são constituídos pelos apartamentos 01, 02 e 03 e os *lofts* 04 e 05 por possuírem pé direito duplo foram projetados para serem construídos nos pavimentos ímpares (3º, 5º, 7º, 9º, 11º e 13º). No último pavimento, o 15º, foi projetado para o salão de festas e o espaço *fitness*.

Após a avaliação de todos os ambientes onde estavam previstas as instalações de sistemas de ar condicionado, a edificação foi modulada em 15 zonas térmicas. Estas zonas térmicas são

constituídas de 262 superfícies de troca térmica, sendo 218 superfícies divididas entre paredes, pisos e tetos; e 44 superfícies de janelas.

A Figura 5.1 mostra em perspectiva as zonas térmicas moduladas para o pavimento tipo, bem como alguns detalhes do projeto, as paredes interna e externas, as esquadrias e os brises na fachada. O pavimento tipo é constituído de cinco tipologias diferentes de apartamento, o apartamento 01 com duas suítes (95,13m<sup>2</sup>) representado em azul; o apartamento 02 também com duas suítes (95,13m<sup>2</sup>) representado em vermelho; o apartamento 03 com uma suíte (78,21m<sup>2</sup>) representado em ciano; o *loft* 04 também com uma suíte (83,13m<sup>2</sup>) representado em verde; e o *loft* 05 também com uma suíte (76,29 m<sup>2</sup>) representado em laranja. Os apartamentos possuem pé-direito de 2,85 m e os *lofts* possuem pé-direito duplo de 5,70 m.

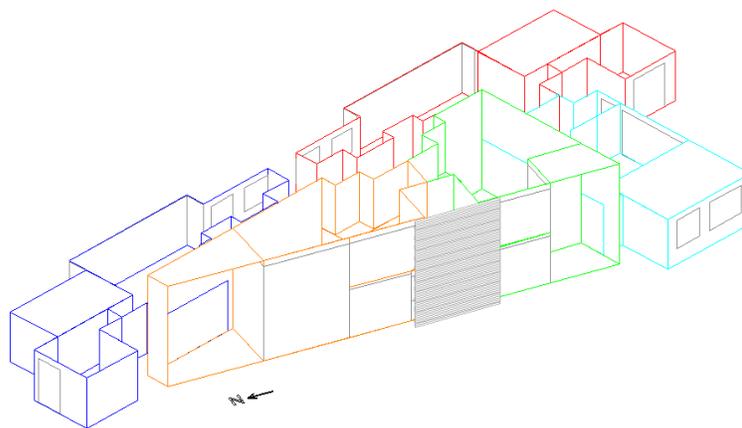


Figura 5.1. Vista em perspectiva das zonas térmicas do pavimento tipo

A Figura 5.2 mostra 10 das 15 zonas térmicas do pavimento tipo moduladas para a edificação. Todas as zonas que iniciam com A1 (em azul) se referem ao apartamento 01, com A2 (em vermelho) ao apartamento 02, com A3 (em ciano) ao apartamento 03, com L4 (em verde) ao *loft* 04 e com L5 (em laranja) ao *loft* 05. As zonas A1A, A2A e A3A englobam área de serviço, cozinha e sala dos respectivos apartamentos. As zonas A1B, A2B e A3B englobam os dormitórios 01 dos respectivos apartamentos. As zonas A1C e A2C englobam os dormitórios 02 dos respectivos apartamentos. Já os *lofts* 04 e 05 foram divididos em duas zonas a L4 e a L5, sendo que as duas zonas englobam todos os ambientes condicionados, área de serviço, cozinha, sala e dormitório de cada *loft*, pois estes ambientes não possuem elementos de separação entre os eles.

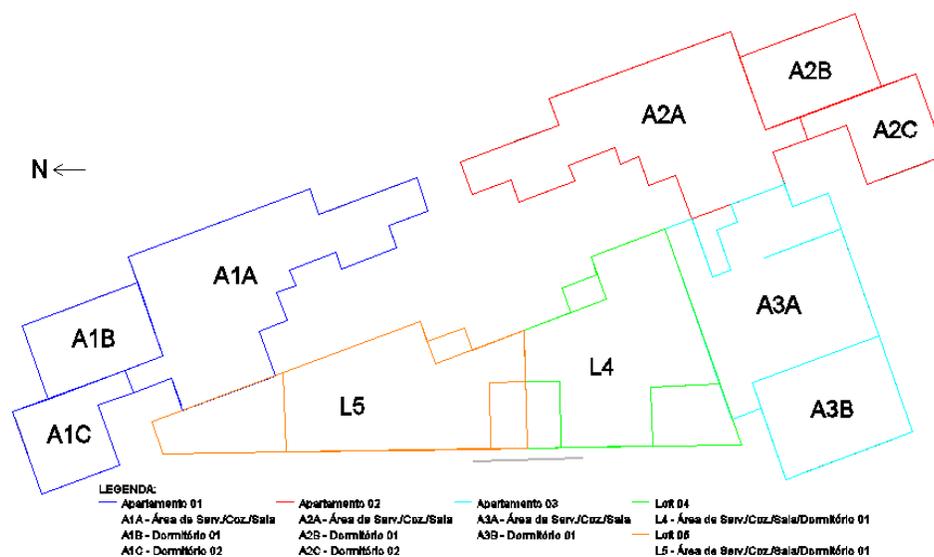


Figura 5.2. Identificação das zonas térmicas do pavimento tipo

A Figura 5.3 mostra em perspectiva as zonas térmicas do 1º pavimento, o qual é constituído pelo *hall* de entrada, casa do zelador, administração, casa dos medidores e espaço *gourmet*. Para este pavimento, foram moduladas três zonas térmicas: (i) a HA (*hall* de entrada, em vermelho), (ii) EG (espaço *gourmet* em azul), e AD (administração, em laranja), pois são os únicos ambientes deste pavimento que está prevista a instalação de ar condicionado. O *hall* possui pé-direito duplo de 6,25 m e os das duas outras zonas, 3,10 m.

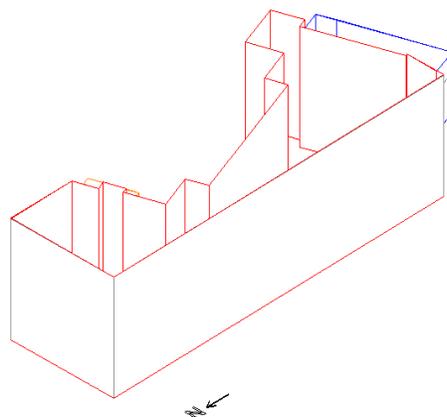


Figura 5.3. Vista em perspectiva das zonas térmicas do 1º pavimento

A Figura 5.4 mostra as três zonas térmicas moduladas para o 1º pavimento, a HA (*hall* de entrada) em vermelho, EG (espaço *gourmet*) em azul e AD (administração) em laranja.

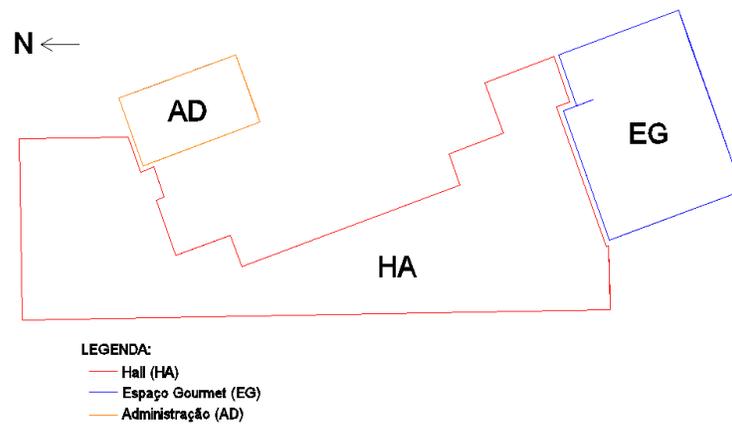


Figura 5.4. Identificação das zonas térmicas do 1º pavimento

No 15º pavimento foram moduladas duas zonas térmicas, a SF (salão de festas) e FT (*fitness*), as quais podem ser observadas em perspectivas na Figura 5.5 e em planta baixa na Figura 5.6. As duas zonas possuem pé-direito de 2,65 m.

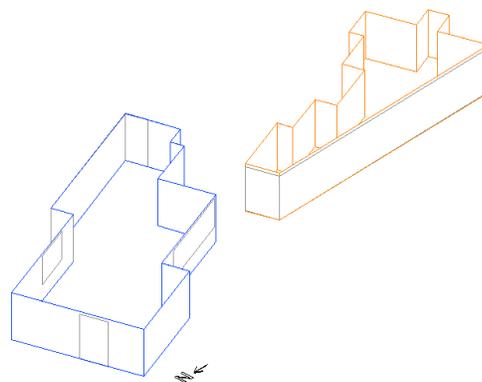


Figura 5.5. Vista em perspectiva das zonas térmicas do 15º pavimento

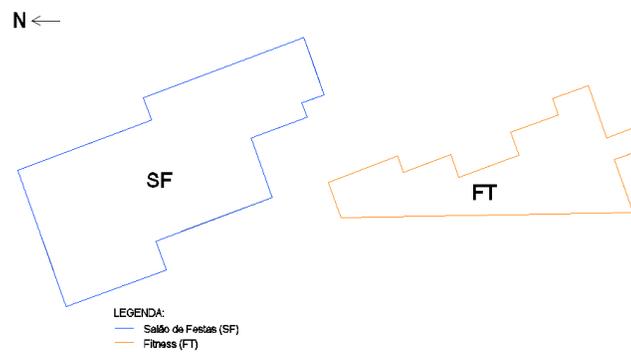


Figura 5.6. Identificação das zonas térmicas do 15º pavimento

Para o cálculo do consumo de energia elétrica total da edificação, as 10 zonas térmicas moduladas para o pavimento tipo foram replicadas do 2º pavimento até o 14º pavimento, sendo assim para este cálculo a edificação passou a possuir um total de 129 zonas térmicas. Estas zonas térmicas são constituídas de 1.997 superfícies de troca térmica, sendo 1.687 divididas entre paredes, pisos e tetos; e 310 de janelas, conforme demonstrado a Figura 5.7, onde se observa também em perspectiva as fachadas de todas as zonas térmicas do prédio.

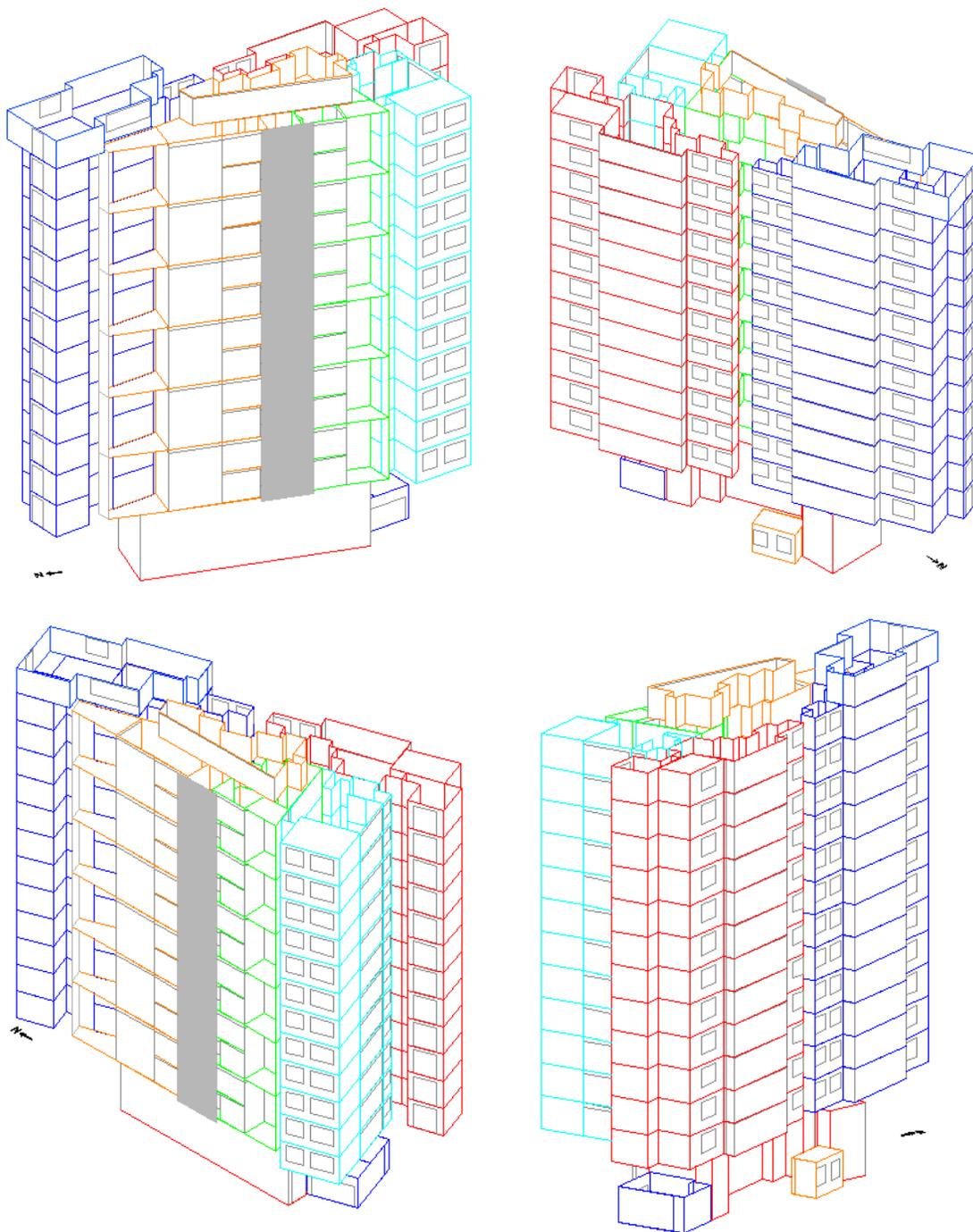


Figura 5.7. Vistas em perspectiva das fachadas norte/leste, norte/oeste, oeste/sul, sul/leste das zonas térmicas do prédio

Todas as fachadas são marcadas pelo grande número de janelas (em cinza) nos ambientes. As paredes voltadas para as fachadas do *hall*, do espaço *gourmet*, do *fitness*, do salão de festas e das salas de estar de todos os apartamentos, possuem mais de 90% da área total envidraçada.

Para definição dos sistemas de condicionamento de ar independente do tipo expansão direta são utilizados os dados de área e o volume de cada zona térmica modelada, os quais podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Área e volume de cada zona térmica

Zona Térmica	Área	Volume
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	54,63 m <sup>2</sup>	155,7 m <sup>3</sup>
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	17,22 m <sup>2</sup>	49,08 m <sup>3</sup>
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	14,56 m <sup>2</sup>	41,50 m <sup>3</sup>
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	54,63 m <sup>2</sup>	155,7 m <sup>3</sup>
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	17,22 m <sup>2</sup>	49,08 m <sup>3</sup>
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	14,56 m <sup>2</sup>	41,50 m <sup>3</sup>
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	49,20 m <sup>2</sup>	140,2 m <sup>3</sup>
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	24,94m <sup>2</sup>	71,08 m <sup>3</sup>
L4* (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	48,17 m <sup>2</sup>	274,6 m <sup>3</sup>
L5* (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	45,11 m <sup>2</sup>	257,1 m <sup>3</sup>
HA* (Hall)	92,54 m <sup>2</sup>	578,4 m <sup>3</sup>
EG (Espaço <i>gourmet</i> )	31,30 m <sup>2</sup>	97,03 m <sup>3</sup>
AD (Administração)	10,63 m <sup>2</sup>	32,95 m <sup>3</sup>
SF (Salão de festas)	86,87 m <sup>2</sup>	230,2 m <sup>3</sup>
FT (Fitness)	46,51 m <sup>2</sup>	123,3 m <sup>3</sup>

\* zonas que possuem pé-direito duplo

### 5.2.2 Cargas Internas

A carga térmica dos ambientes além das condições ambientais externas, do micro-clima da zona e dos elementos construtivos da edificação é influenciada também pelas cargas internas, dentre elas, o calor liberado pelas pessoas, equipamentos elétricos, sistema de iluminação e infiltração. Nas zonas térmicas do prédio, portanto, estão também informadas as cargas internas,

como o número de pessoas e tipo de atividade física, potência elétrica referente ao sistema de iluminação e dos equipamentos previstos de serem instalados. Essas cargas têm grande importância na constituição das zonas térmicas e contribuem consideravelmente para o balanço de energia da zona.

O ganho total de calor da zona referente às cargas internas é composto pelas parcelas de energia por convecção (parcela de energia adicionada ao ar da zona), por radiação (distribuído nas superfícies das zonas) e pelo calor latente (adicionado como carga do sistema de ar-condicionado) obtidas em várias proporções das fontes internas de energia.

As características de ocupação, taxa metabólica, resistência térmica das vestimentas, velocidade interna do ar, equipamentos elétricos, iluminação são iguais em todas as simulações e são descritas a seguir:

#### 5.2.2.1 Características de ocupação

Para o cálculo do calor liberado pelas pessoas em cada zona térmica foi levada em consideração a programação da ocupação, a quantidade máxima de pessoas existentes em cada uma delas, além da taxa metabólica para cada pessoa. As programações das ocupações utilizadas foram baseadas na *ASHRAE* [1989] e na funcionalidade de cada zona, sendo que para alguns ambientes, como *hall*, espaço *gourmet* salão de festas, administração, e *fitness*, as programações foram elaboradas, pois ambientes com estas funcionalidades não existiam na norma. Nas salas, quartos, *lofts*, *hall* e *fitness* foram considerados as programações de ocupação apresentado na Tabela 5.2 em todos os dias da semana e para o espaço *gourmet* e salão de festas somente para finais de semanas e feriados. A seguir, na Tabela 5.2, são apresentadas as programações de ocupação utilizadas para cada ambiente, sendo que as programações foram realizadas com base na porcentagem da ocupação por hora.

Na Tabela 5.3 estão apresentados o número máximo de pessoas utilizado nas simulações para cada zona.

Para o cálculo do calor liberado pelos os ocupantes para o interior do ambiente o programa relaciona a porcentagem estipulada por hora de ocupação (Tabela 5.2) pela quantidade máxima de pessoas (Tabela 5.3).

Do total de calor sensível produzido pelas pessoas 0,5 foi definido como fração de energia térmica radiante de onda longa (padrão do programa). O calor sensível e latente são calculados pelo programa *EnergyPlus*.

Tabela 5.2. Programação para ocupação

Horas por dia	Sala (A1A/A2A/A3A) %	Quartos (A1B/A1C/A2B/A2C/A3B) %	Lofts (L4/L5) %	Hall (HA) %	Espaço Gourmet e Salão de festas (EG/SF) %	Adm. (AD) %	Fitness (FT) %
1 (24 à 1h)	0	67	67	10	100	0	0
2 (1 às 2h)	0	67	67	10	100	0	0
3 (2 às 3h)	0	67	67	10	100	0	0
4 (3 às 4h)	0	67	67	10	0	0	0
5 (4 às 5h)	0	67	67	10	0	0	0
6 (5 às 6h)	0	67	67	10	0	0	0
7 (6 às 7h)	21	45	67	100	0	0	100
8 (7 às 8h)	21	27	49	100	0	100	100
9 (8 às 9h)	21	0	21	50	0	100	25
10 (9 às 10h)	21	0	21	50	0	100	25
11 (10 a 11h)	21	0	21	50	25	100	25
12 (11 às 12h)	21	0	21	100	25	100	25
13 (12 às 13h)	21	0	21	100	100	0	50
14 (13 às 14h)	21	0	21	100	100	0	50
15 (14 às 15h)	21	0	21	50	100	100	25
16 (15 às 16h)	21	0	21	50	25	100	25
17 (16 às 17h)	21	0	21	50	25	100	25
18 (17 às 18h)	67	0	67	100	25	100	25
19 (18 às 19h)	67	0	67	100	25	100	100
20 (19 às 20h)	45	21	67	100	100	0	100
21 (20 às 21h)	45	21	67	100	100	0	100
22 (21 às 22h)	33	33	67	100	100	0	100
23 (22 às 23h)	0	67	67	50	100	0	0
24 (23 às 24h)	0	67	67	50	100	0	0

Tabela 5.3. Tipo de ocupação e o número máximo de pessoas de cada zona térmica

Zona Térmica	Nº Máximo de Pessoas
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	4
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	2
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	1
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	4
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	2
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	1
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	4
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	2
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	2
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	2
HÁ (Hall)	5
EG (Espaço gourmet)	28
AD (Administração)	1
SF (Salão de festas)	44
FT (Fitness)	4

### 5.2.2.2 Taxa metabólica

A taxa metabólica está diretamente relacionada ao nível de atividade física desenvolvida pelas pessoas em cada ambiente. Para a edificação simulada cada pessoa durante o ano inteiro possui uma taxa metabólica de 60 W/m<sup>2</sup> por encontrar-se sentado, exceto no *fitness* que foi considerado as pessoas em atividade com 175 W/m<sup>2</sup>. Sendo a área superficial aproximada de uma pessoa mediana igual a 1,8 m<sup>2</sup>, conforme descrito no Capítulo 3, cada ocupante ao estar sentado dissipa ao ambiente 108 W, fazendo atividade física 315 W.

### 5.2.2.3 Resistência térmica das vestimentas

A resistência térmica das vestimentas dos ocupantes foi definida conforme a ASRHAE [2004a], foi considerado dois valores um durante o período de verão e o outro para o período de inverno:

VERÃO: calça + camisa de manga curta = 0,5 clo

INVERNO: calça + camisa de manga comprida = 1,0 clo

### 5.2.2.4 Velocidade interna do ar

A velocidade média do ar no ambiente também é um parâmetro que influencia na análise de conforto térmico. A velocidade do ar utilizada na simulações foi baseada na ASRHAE [2004a], de 0,1 m/s durante o ano todo.

### 5.2.2.5 Equipamentos elétricos

Os equipamentos elétricos existentes no interior dos ambientes, exceto sistema de iluminação e HVAC, possuem diversas potências nominais, as quais estão relacionadas com as funcionalidades dos ambientes.

As programações de funcionamento dos equipamentos relacionam as porcentagens por hora de utilização total da potência de equipamentos estabelecida para cada ambiente. Estas programações foram baseadas na ASHRAE [1989], na Tabela 5.4, são apresentadas as programações de funcionamento dos equipamentos para cada ambiente.

Nas salas, quartos, *lofts* e *fitness* foram considerados as programações de funcionamento dos equipamentos apresentadas na Tabela 5.4 em todos os dias da semana e para o espaço *gourmet* e salão de festas somente para finais de semanas e feriados.

Tabela 5.4. Programação de funcionamento dos equipamentos

Horas por dia	Sala (A1A/A2A /A3A) %	Quartos (A1B/A1C/A2 B/A2C /A3B) %	Lofts (L4/L5) %	Espaço Gourmet e Salão de festas (EG/SF) %	Adm. (AD) %	Fitness (FT) %
1 (24 à 1h)	19	3	22	90	0	0
2 (1 às 2h)	19	3	22	90	0	0
3 (2 às 3h)	19	3	22	90	0	0
4 (3 às 4h)	19	3	22	50	0	0
5 (4 às 5h)	19	3	22	50	0	0
6 (5 às 6h)	19	3	22	50	0	0
7 (6 às 7h)	30	6	36	50	0	90
8 (7 às 8h)	70	6	76	50	100	90
9 (8 às 9h)	34	3	34	50	100	25
10 (9 às 10h)	34	3	36	50	100	25
11 (10 a 11h)	34	3	36	50	100	25
12 (11 às 12h)	61	3	64	50	100	25
13 (12 às 13h)	61	3	64	90	0	90
14 (13 às 14h)	34	3	36	90	0	90
15 (14 às 15h)	34	3	36	90	100	25
16 (15 às 16h)	34	3	36	50	100	25
17 (16 às 17h)	34	3	36	50	100	25
18 (17 às 18h)	84	3	87	50	100	25
19 (18 às 19h)	94	3	97	90	0	90
20 (19 às 20h)	34	9	43	90	0	90
21 (20 às 21h)	34	9	43	90	0	90
22 (21 às 22h)	23	20	43	90	0	90
23 (22 às 23h)	19	12	31	90	0	0
24 (23 às 24h)	19	12	31	90	0	0

Na Tabela 5.5 estão apresentados todos os equipamentos com potência nominal considerado para cada zona.

Tabela 5.5. Equipamentos com as potências nominais utilizadas em cada zona térmica

Zona Térmica	Equipamentos e Potência Nominal
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	Geladeira (200W) Televisão (100W)
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	Televisão (100W)
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	Televisão (100W)
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	Geladeira (200W) Televisão (100W)
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	Televisão (100W)
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	Televisão (100W)
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	Geladeira (200W) Televisão (100W)
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	Televisão (100W)
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	Geladeira (200W) Televisão (100W)
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	Geladeira (200W) Televisão (100W)
EG (Espaço gourmet)	Geladeira (200W)
AD (Administração)	Computador (100W)
SF (Salão de festas)	Geladeira (200W)
FT (Fitness)	2 Esteiras (3.000W) 2 Bicicletas (2.000W)

Para o cálculo do calor liberado pelos equipamentos elétricos para o interior do ambiente o programa relaciona a porcentagem estipulada por hora de utilização (Tabela 5.4) pelas potências nominais dos equipamentos (Tabela 5.5).

Do calor total liberado pelos equipamentos elétricos é dividido em uma parcela de 0,30 de energia radiante e 0,70 de energia conectiva. O calor latente não participa do ganho de energia da zona térmica.

#### 5.2.2.6 Iluminação

Para o sistema de iluminação foram previstos dois tipos de sistemas, um conforme o projeto luminotécnico desenvolvido para o empreendimento e outro conforme as exigências da ASRHAE [2007], sendo assim, os dois sistemas serão apresentados para cada caso simulado.

As programações de funcionamento do sistema de iluminação relacionam porcentagens por hora de utilização sobre a potência estabelecida para o sistema de iluminação. Estas programações foram baseadas na ASHRAE [1989], na Tabela 5.6, são apresentadas as programações de funcionamento para o sistema de iluminação para cada ambiente.

Tabela 5.6. Programação de funcionamento para o sistema de iluminação

<b>Horas por dia</b>	<b>Sala (A1A/A2 A/ A3A) %</b>	<b>Quartos (A1B/A1C/A2 B/A2C /A3B) %</b>	<b>Lofts (L4/L5) %</b>	<b>Hall (HA) %</b>	<b>Espaço Gourmet e Salão de festas (EG/SF) %</b>	<b>Adm. (AD) %</b>	<b>Fitness (FT) %</b>
1 (24 à 1h)	0	0	0	100	100	0	0
2 (1 às 2h)	0	0	0	100	100	0	0
3 (2 às 3h)	0	0	0	100	100	0	0
4 (3 às 4h)	0	0	0	100	0	0	0
5 (4 às 5h)	0	0	0	100	0	0	0
6 (5 às 6h)	0	0	0	100	0	0	0
7 (6 às 7h)	29	66	95	100	0	0	90
8 (7 às 8h)	59	23	85	100	0	100	90
9 (8 às 9h)	0	0	0	10	0	100	90
10 (9 às 10h)	0	0	0	10	0	100	90
11 (10 a 11h)	0	0	0	10	25	100	90
12 (11 às 12h)	0	0	0	10	25	100	90
13 (12 às 13h)	0	0	0	10	25	0	90
14 (13 às 14h)	0	0	0	10	25	0	90
15 (14 às 15h)	0	0	0	50	25	100	90
16 (15 às 16h)	0	0	0	50	25	100	90
17 (16 às 17h)	0	0	0	50	25	100	90
18 (17 às 18h)	0	0	0	100	50	100	90
19 (18 às 19h)	0	0	0	100	100	100	90
20 (19 às 20h)	63	31	90	100	100	0	90
21 (20 às 21h)	63	31	90	100	100	0	90
22 (21 às 22h)	47	47	90	100	100	0	90
23 (22 às 23h)	31	63	90	100	100	0	0
24 (23 às 24h)	31	63	90	100	100	0	0

As características do sistema de condicionamento de ar (*HVAC*), do sistema de iluminação, da dimensão das esquadrias e as propriedades térmicas dos materiais construtivos, entre elas densidade de massa aparente, condutividade térmica, calor específico, absorvância solar e emissividade solar, sofrem variações para os casos simulados. Devido a isto, em cada simulação são descritas as características destas variáveis.

### 5.3 Caso 1 - Prédio Proposto 01

A primeira simulação realizada foi a do projeto elaborado para o prédio em estudo. As características construtivas e o sistema de iluminação foram baseados no projeto arquitetônico, projeto luminotécnico, e no memorial descritivo desenvolvido para o empreendimento e o sistema de *HVAC* foi dimensionado com base na necessidade de resfriamento e aquecimento para cada ambiente, detalhados a seguir.

#### 5.3.1 Sistema de Iluminação do Caso 1

As lâmpadas utilizadas para o sistema de iluminação do Caso 1 foram baseadas no projeto luminotécnico desenvolvido para o prédio em estudo, sendo que para o pavimento tipo está previsto uma carga instalada referente ao sistema de iluminação total de 5.254 W, para o pavimento térreo de 2.005 W e para o 15º pavimento de 1.280 W. Nas Tabela 5.8 e Tabela 5.7 estão mostrados os tipos de luminária e as potências nominais (W) referente ao sistema de iluminação para cada zona. As programações de funcionamento utilizadas nas simulações para o sistema de iluminação foram baseadas nos dados apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.7. Sistema de iluminação para cada zona do pavimento térreo e do 15º pavimento (caso 1)

Zona Térmica	Tipos de Luminária				Potência nominal (W)
	Halopin	Fluorescente Tubular			
	1X60W	1X23W	4X14W	2X35W	
HA (Hall)	24	0	0	0	1.440
EG (Espaço gourmet)	3	7	2	0	453
AD (Administração)		0	2	0	112
SF (Salão de festas)	17	0	0	0	1.020
FT (Fitness)	0	0	0	5	260
<b>TOTAL</b>	<b>54</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3.285</b>

Tabela 5.8. Sistema de iluminação para cada zona do pavimento tipo (caso 1)

Zona Térmica	Tipos de Luminária					Potência nominal (W)
	Plafon Decorativo	Halopin	Dicróica	Fluorescente Compacta		
	1X60W	1X60W	1X50W	2X26W	1X20W	
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	2	1	6	3	1	656
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	1	0	0	2	0	164
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	1	3	0	0	0	240
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	2	1	6	3	1	656
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	1	0	0	2	0	164
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	1	3	0	0	0	240
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	1	3	9	2	1	814
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	1	0	3	0	0	210
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	1	7	8	5	2	1180
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	1	4	7	5	1	930
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>	<b>22</b>	<b>39</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>5.254</b>

### 5.3.2 Janelas do Caso 1

O prédio em estudo possui suas áreas de fachadas compostas por grande parte de janelas, constituindo um grande número de superfícies de trocas térmicas na edificação, totalizando em torno de 6.000 m<sup>2</sup> e 76% da área total de parede.

As Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 apresentam as localizações das janelas para cada pavimento. No pavimento tipo são ao todo 28 janelas, nos pavimentos térreo e 15° são 8 janelas em cada um deles, totalizando 44 janelas para os três pavimentos. Com a replicação do pavimento tipo o prédio passa a possuir um total de 310 janelas.

As dimensões das janelas foram obtidas com base no projeto arquitetônico. As Tabela 5.9, Tabela 5.10 e Tabela 5.11 apresentam as dimensões das 44 janelas, e a porcentagem da área da janela em relação à área da parede a qual cada uma será instalada.

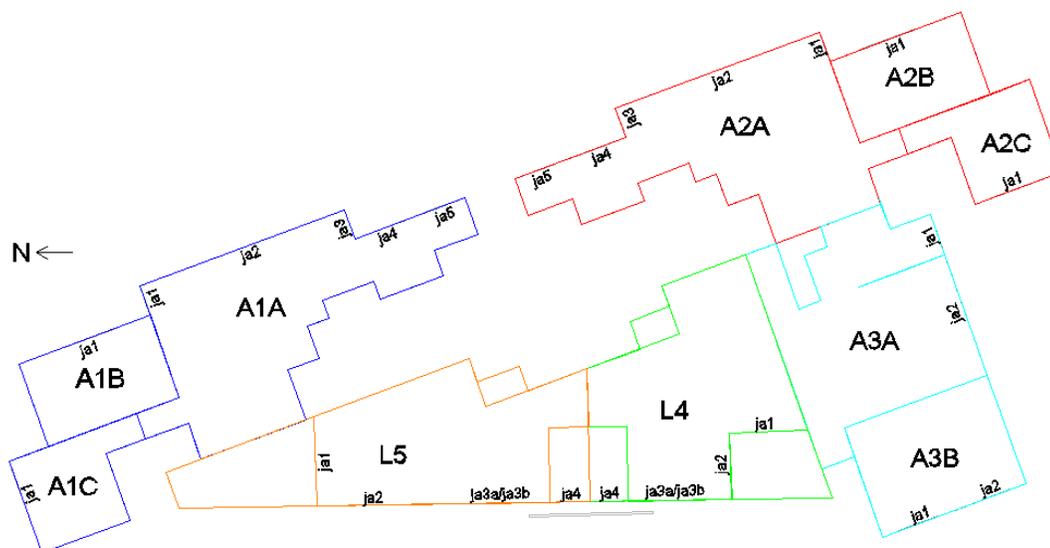


Figura 5.8. Localização das janelas do pavimento tipo (caso 1)

Tabela 5.9. Dimensões das janelas do pavimento tipo (caso 1)

Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%	Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	ja1	90 x 282	77	A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	ja1	135 x 139	38
	ja2	830 x 282	100		já2	460 x 249	85
	ja3	90 x 282	77	A3B (Dormitório 01 do AP 03)	ja1	160 x 159	29
	ja4	145 x 139	23		já2	220 x 159	41
	ja5	165 x 139	38	L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	ja1	292 x 535	92
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	ja1	220 x 159	23		ja2	250 x 535	95
	A1C (Dormitório 02 do AP 01)	ja1	150 x 249		36	ja3a	296 x 270
ja3b		396 x 250	88		ja4	197,5 x 139	39
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	ja1	90 x 282	77	L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	ja1	317 x 535	90
	ja2	830 x 282	100		ja2	480 x 535	95
	ja3	90 x 282	77		ja3a	343 x 270	95
	ja4	145 x 139	23		ja3b	411 x 250	88
	ja5	165 x 139	38	ja4	197,5 x 139	42	
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	ja1	220 x 159	23				
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	ja1	150 x 249	36				

onde: Lj x Hj são a largura e altura das janelas;

% são as porcentagens das áreas das janelas em relação as áreas das paredes as quais serão instaladas.

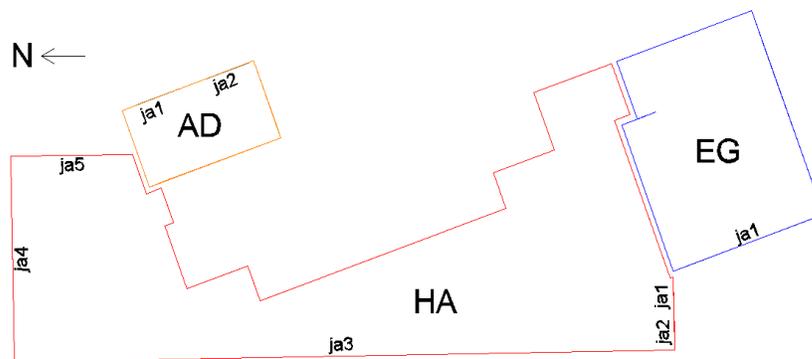


Figura 5.9. Localização das janelas do pavimento térreo (caso 1)

Tabela 5.10. Dimensões das janelas do pavimento térreo (caso 1)

Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%	Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%
EG (Espaço gourmet)	ja1	415 x 210	57	HA (Hall)	ja1	166 x 625	100
	AD (Administração)	ja1	140 x 159		34	ja2	39,8 x 625
	ja2	140 x 159	28		ja3	2049 x 625	100
					ja4	618 x 625	100
					ja5	379 x 625	100

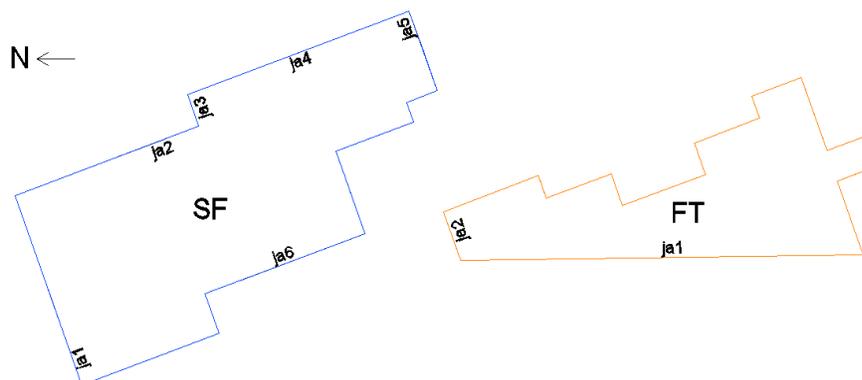


Figura 5.10. Localização das janelas do 15º pavimento (caso 1)

Tabela 5.11. Dimensões das janelas do 15º pavimento (caso 1)

Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%	Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%
SF (Salão de festas)	ja1	150 x 249	20	FT (Fitness)	ja1	1420 x 249	94
	ja2	220 x 159	19		ja2	177 x 249	94
	ja3	90 x 265	78				
	ja4	830 x 265	100				
	ja5	90 x 265	78				
	ja6	460 x 159	46				

### 5.3.3 Características Construtivas do Caso 1

Para fazer a simulação é necessário fornecer ao *EnergyPlus* a descrição das propriedades termofísicas dos materiais que compõem os elementos construtivos da edificação. As características dos materiais utilizados foram obtidas através do Projeto 02: 135.07-002, LABEEE/UFSC, de levantamentos realizados junto aos fornecedores de materiais ou pela própria biblioteca do programa.

A Tabela 5.12 descreve as camadas e os materiais utilizados na edificação em estudo, além da densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ), calor específico ( $c$ ), absorvância solar ( $\alpha_s$ ) e emissividade infravermelho ( $\varepsilon$ ) de cada material.

Tabela 5.12. Características termofísicas dos materiais construtivos (caso 1)

Materiais		$L$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.K]	$C$ [J/kg.K]	$\alpha_s$ -	$\varepsilon$ -
PAREDES EXTERNAS salas e dormitórios dos apartamentos e <i>lofts</i> , <i>hall</i> , administração, espaço <i>gourmet</i> , salão de festas	pastilha porcelanizada	0,005	1922	1,79	1040	0,65	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	bloco cerâmico furado	0,19	1121	0,6	830	0,63	0,9
	reboco na cor branca	0,02	1858	0,69	830	0,2	0,9
PAREDES EXTERNAS cozinha e área de serviço dos apartamentos e <i>lofts</i> e <i>fitness</i>	pastilha porcelanizada	0,005	1922	1,79	1040	0,65	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	bloco cerâmico furado	0,19	1121	0,6	830	0,63	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	azulejo na cor branca	0,007	1922	1,79	1040	0,65	0,9
PAREDES INTERNAS salas e dormitórios dos apartamentos e <i>lofts</i> , <i>hall</i> , administração, espaço <i>gourmet</i> , salão de festas	reboco na cor branca	0,02	1858	0,69	830	0,2	0,9
	bloco cerâmico furado	0,14	1121	0,57	830	0,63	0,9
	reboco na cor branca	0,02	1858	0,69	830	0,2	0,9
PAREDES INTERNAS cozinha e área de serviço dos apartamentos e <i>lofts</i> e <i>fitness</i>	azulejo na cor branca	0,007	1922	1,79	1040	0,65	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	bloco cerâmico furado	0,14	1121	0,57	830	0,63	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	azulejo na cor branca	0,007	1922	1,79	1040	0,65	0,9
PISO/FORRO salas dos apartamentos e <i>lofts</i> , <i>hall</i> , administração, espaço <i>gourmet</i> , salão de festas, <i>fitness</i>	porcelanato ou cerâmica na cor creme	0,01	1922	1,79	1040	0,65	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	laje nervurada de concreto	0,05	2243	1,72	830	0,32	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	forro de gesso na cor branca	0,01	480,6	0,06	830	0,32	0,9

Continuação da Tabela 5.12

Materiais		$L$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.K]	$C$ [J/kg.K]	$\alpha_s$ -	$\epsilon$ -
PISO/FORRO dormitórios dos apartamentos e <i>lofts</i>	laminado de madeira	0,007	881,0	0,11	1380	0,7	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	laje nervurada de concreto	0,05	2243	1,72	830	0,32	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	forro de gesso na cor branca	0,01	480,6	0,06	830	0,32	0,9
COBERTURA <i>fitness</i> e salão de festas	telha cerâmica	0,03	1922	0,72	830	0,2	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	laje nervurada de concreto	0,05	2243	1,72	830	0,32	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	forro de gesso na cor branca	0,01	480,6	0,06	830	0,32	0,9
JANELA de todos as esquadrias do prédio	vidro simples incolor (V1)	0,003					
	câmara de ar	0,01					
	vidro simples incolor (V1)	0,003					

A Tabela 5.13 apresenta os valores de  $U$  (transmitância térmica),  $R$  (resistência térmica) e  $SHGC$  (coeficiente de ganho de calor solar) para cada elemento construtivo.

Tabela 5.13. Valores de  $U$ ,  $R$  e  $SHGC$  para cada elemento construtivo do prédio proposto 01 (caso 1)

Elementos	$U$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$R$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$SHGC$
PAREDES EXTERNAS			
salas e dormitórios dos apartamentos e <i>lofts</i> , <i>hall</i> , administração, espaço <i>gourmet</i> , salão de festas	1,91	0,52	
PAREDES EXTERNAS cozinha e área de serviço dos apartamentos e <i>lofts</i> e <i>fitness</i>	1,95	0,51	
PAREDES INTERNAS			
salas e dormitórios dos apartamentos e <i>lofts</i> , <i>hall</i> , administração, espaço <i>gourmet</i> , salão de festas	1,84	0,54	
PAREDES INTERNAS cozinha e área de serviço dos apartamentos e <i>lofts</i> e <i>fitness</i>	1,88	0,53	
PISO/FORRO			
salas dos apartamentos e <i>lofts</i> , <i>hall</i> , administração, espaço <i>gourmet</i> , salão de festas, <i>fitness</i>	1,33	0,75	
PISO/FORRO dormitórios dos apartamentos e <i>lofts</i>	1,25	0,80	
COBERTURA <i>fitness</i> e salão de festas	1,02	0,98	
JANELA de todos as esquadrias do prédio			7,89

onde:  $U$  - transmitância térmica [W/m<sup>2</sup>.K];  
 $R$  - resistência térmica [m<sup>2</sup>.K/W];  
 $SHGC$  - coeficiente de ganho de calor solar.

A Tabela 5.14 descreve a composição das janelas, que são formadas por vidros duplos com camada de ar entre eles e as propriedades físicas e óticas do vidro utilizado, referente à transmitância solar ( $\tau_s$ ), refletividade solar ( $\rho_s$ ) interna e externa, transmitância solar visível ( $\tau_v$ ), refletividade solar visível ( $\rho_v$ ) interna e externa, transmitância infravermelho ( $T_{iv}$ ), emissividade infravermelho ( $\varepsilon$ ) interna e externa, além da condutividade térmica ( $\lambda$ ).

Tabela 5.14. Composição das janelas e as características físicas e óticas do vidro utilizado (caso 1)

Especificação do vidro		Vidro comum claro										
JANELA	V1	$L$	$\tau_s$	$\rho_s$	$\rho_s$	$\tau_v$	$\rho_v$	$\rho_v$	$T_{iv}$	$\varepsilon$	$\varepsilon$	$\lambda$
		[cm]		exterior	interior		Exterior	interior		Exterior	interior	[W/m.K]
JANELA	V1	0,3	0,85	0,08	0,08	0,9	0,08	0,08	0	0,84	0,84	1
	câmara de ar											
JANELA	V1	0,3	0,85	0,08	0,08	0,9	0,08	0,08	0	0,84	0,84	1

A Tabela 5.15 descreve a composição das venezianas projetadas para serem instaladas na parte externa das janelas dos quartos dos apartamentos. Os dados apresentados foram retirados do banco de dados do programa de simulação *EnergyPlus*, sendo os mesmos valores médios, que substitui uma simulação detalhada e trabalhosa que considera todos os dados das venezianas.

Tabela 5.15. Características físicas e óticas da veneziana utilizada nos quartos (caso 1)

Nome da veneziana	$L$	$\tau_s$	$\rho_s$	$\tau_v$	$\rho_v$	$\varepsilon$	$\lambda$	$L_{cv}$
	[cm]						[W/m.K]	[cm]
Veneziana 01	0,3	0,6	0,12	0,6	0,12	0,9	0,1	5

onde:  $L_{cv}$  é a distância da veneziana em relação ao vidro

#### 5.3.4 Sistema de HVAC do Caso 1

Para o dimensionamento das potências do sistema de HVAC foi utilizado um recurso do *EnergyPlus*, que tem como objetivo obter os resultados das potências de aquecimento e resfriamento para os dias de projeto sob determinadas configurações de simulações das zonas térmicas, de modo que a potência da máquina indicada atenda à potência máxima de condicionamento de cada zona térmica.

Para o sistema dimensionado foi utilizado um modelo mini-split de expansão direta e compressor rotativo, devido ao fato deste ter sido o tipo de sistema indicado no projeto elaborado para o prédio. As 15 zonas térmicas possuem um sistema de HVAC independente com

capacidade e potência nominal calculadas de modo automático pelo *EnergyPlus*. A temperatura do ar interna programada para as simulações do prédio proposto 01 no inverno é de 22°C e no verão de 25°C.

A renovação de ar foi considerada de 0,0075 m<sup>3</sup>/s por pessoa, a fim de obedecer à normalização imposta pela Anvisa, porém como os condicionadores de ar do tipo mini-split não possuem renovação de ar, no projeto esta renovação é garantida por um sistema de ventilação para renovação de ar forçada, dotado de um exaustor do tipo centrífugo instalado em cada zona térmica.

Para a edificação estudada cada zona térmica possui áreas (m<sup>2</sup>) diferentes entre elas, sendo assim, na Tabela 5.16 estão citadas as capacidades dos equipamentos de ar condicionado para o dia de projeto de inverno e verão por área (m<sup>2</sup>) de cada zona, tornando possível verificar a representatividade de cada zona térmica da edificação em relação ao sistema de ar condicionado.

Tabela 5.16. Capacidades dos sistemas de *HVAC* por área (caso 1)

Zona Térmica	Área (m <sup>2</sup> )	Aquecimento Capacidade (W/m <sup>2</sup> )	% Aquecimento	Refrigeração Capacidade (W/m <sup>2</sup> )	% Refrigeração
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	54,63	41,57	6,83	100,8	5,50
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	17,22	22,24	3,66	34,28	1,87
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	14,56	20,00	3,29	29,77	1,62
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	54,63	37,54	6,17	97,85	5,34
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	17,22	21,62	3,55	35,19	1,92
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	14,56	52,48	8,63	81,91	4,47
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	49,20	19,37	3,18	30,63	1,67
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	24,94	38,40	6,31	57,56	3,14
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	48,17	53,18	8,74	187,8	10,25
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	45,11	69,18	11,37	276,2	15,07
HA ( <i>Hall</i> )	92,54	41,03	6,74	332,8	18,15
EG (Espaço <i>gourmet</i> )	31,30	34,98	5,75	87,11	4,75
AD (Administração)	10,63	18,67	3,07	97,77	5,33
SF (Salão de festas)	86,87	59,50	9,78	82,74	4,51
FT ( <i>Fitness</i> )	46,51	78,66	12,93	300,6	16,40

### 5.3.5 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 1

Variáveis pessoais (taxa metabólica e resistência térmica das vestimentas) e ambientais (temperatura do ar, temperatura média radiante, temperatura operativa, umidade relativa e velocidade do ar) exercem influência nas condições de conforto térmico de cada pessoa.

Para a avaliação em relação ao conforto térmico para cada caso simulado será analisada a quantidade de horas, das 8.760 horas existentes em um ano que os ocupantes ficam fora da área de conforto em relação à temperatura operativa. Para a zona de conforto térmico, as temperaturas operativas foram avaliadas dentro dos valores médios das fronteiras das zonas de conforto térmico de verão e inverno. Desta forma, para o verão a temperatura média utilizada para o período de verão é de 27,4°C e para o período de inverno de 20,4°C [ASHRAE, 2004a], conforme

Figura 3.1.

Para o caso 1 na Figura 5.11 para cada zona simulada é apresentada a quantidade de horas não confortáveis das 8.760 horas existentes no ano, isto é, as temperaturas operativas ficaram superiores a 27,4 °C ou inferiores a 20,4°C, durante o verão e inverno, respectivamente.

Para o caso 1, as zonas que apresentam maior quantidade de horas não confortáveis das 15 zonas analisadas, são as salas dos apartamentos (A1A e A2A) com 12%, o *loft* 5 com 10%, *fitness* com 21% e o *hall* com 23%, de horas não confortáveis das 8760 horas do ano. Para a redução destas porcentagens serão necessárias alterações dos elementos construtivos do prédio para reduzir a temperatura média radiante das superfícies.

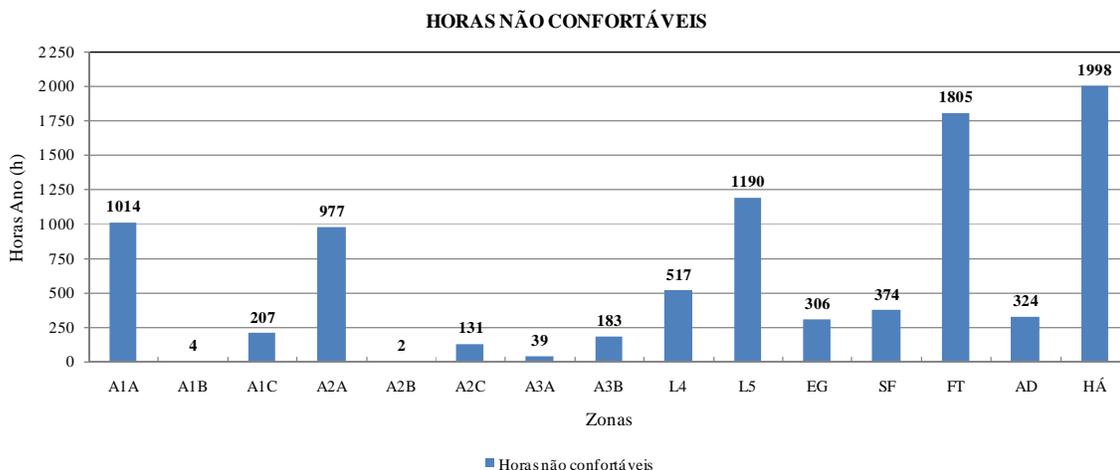


Figura 5.11. Horas anuais não confortáveis (caso 1)

Outra análise importante é referente ao consumo anual de energia elétrica (Figura 5.12 e Figura 5.13). Nesta análise, o consumo relacionado ao sistema de ar condicionado é o de maior

representatividade do consumo total da edificação (251.743 kWh/ano), sendo para aquecimento (51.359 kWh/ano), para refrigeração (167.021 kWh/ano) e para ventilação (33.363 kWh/ano). O consumo anual para atender os 15 pavimentos do prédio é de 413.965 kWh (sistema de condicionamento de ar, sistema de iluminação, e equipamentos em geral), sendo o mês de janeiro o de maior consumo (49.591 kWh) e o de setembro o de menor consumo (23.952 kWh).

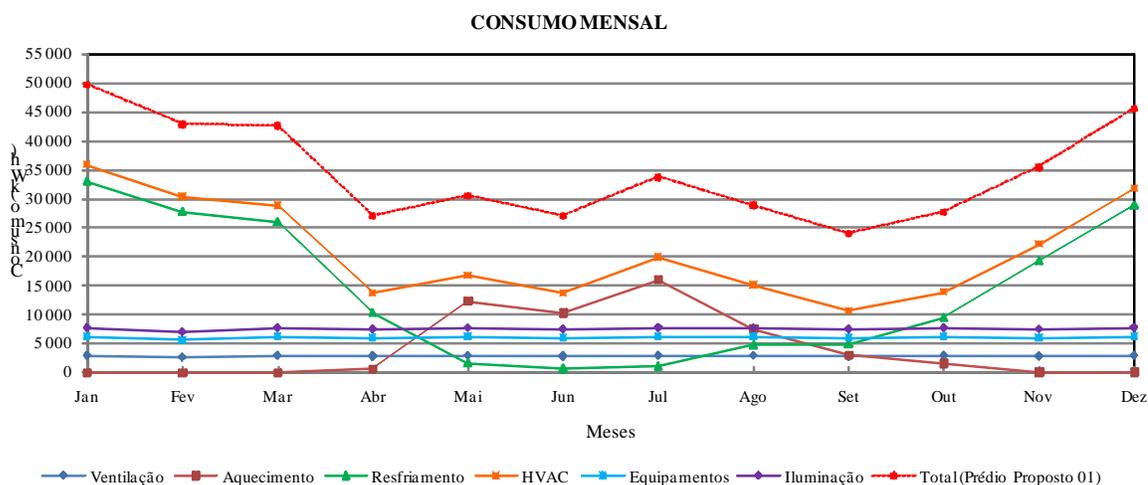


Figura 5.12. Consumo mensal de energia elétrica (caso 1)

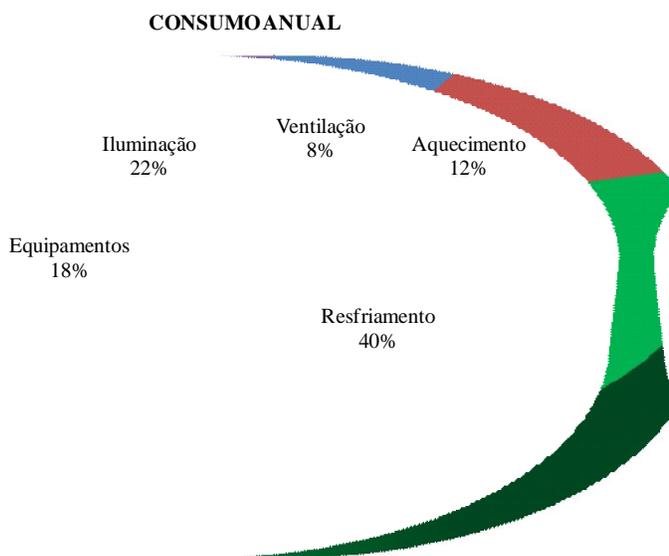


Figura 5.13. Consumo anual de energia elétrica para cada uso final (caso 1)

Na Tabela 5.17 estão apresentados os consumos energéticos anuais referentes ao sistema de ar condicionado para cada zona simulada, com o objetivo de demonstrar o impacto de cada uma delas em relação ao consumo energético de todas as zonas. Nesta tabela também estão

citadas o consumo anual por área (m<sup>2</sup>) de cada zona, tornando possível realizar uma avaliação mais equilibrada, pois considera o tamanho do ambiente.

Tabela 5.17. Consumo energético por zona (caso 1)

Zona Térmica	Consumo referente ao sistema HVAC (kWh/ano)	%	Área (m <sup>2</sup> )	kWh/ano/m <sup>2</sup>
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	3.714	7,46	54,63	67,99
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	661,0	1,33	17,22	38,39
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	528,9	1,06	14,56	36,33
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	3.638	7,31	54,63	66,60
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	685,4	1,38	17,22	39,80
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	741,2	1,49	14,56	50,91
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	1.611	3,24	49,20	32,75
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	1.070	2,15	24,94	42,90
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	4.173	8,38	48,17	86,62
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	5.697	11,44	45,11	126,30
HÁ (Hall)	14.357	28,84	92,54	155,1
EG (Espaço gourmet)	1.287	2,59	31,30	41,12
AD (Administração)	350,7	0,70	10,63	32,9
SF (Salão de festas)	2.368	4,76	86,87	27,26
FT (Fitness)	8.905	17,88	46,51	191,5
Total do Prédio	251.743	100	4.038,01	62,34

onde: % é relação do consumo energético anual referente ao sistema de ar condicionado de cada zona em relação ao consumo referente ao sistema de ar condicionado de todas as zonas do prédio.

#### 5.4 Caso 2 – Prédio *Baseline*

Para verificar se o prédio em estudo atende o pré-requisito 2 do item *Energy & Atmosphere* certificação *LEED*<sup>TM</sup> foi escolhida entre as opções de avaliações autorizadas pelo protocolo, a Opção 1 - Simulação Energética Total da Edificação. Esta opção tem como objetivo demonstrar um aumento na *performance* da edificação proposta comparada com a edificação *baseline* (caso 2) definida conforme a *ASHRAE* [2007], usando o *Building Performance Rating Method* no Apêndice G do *Standard*. Para atender o pré-requisito o prédio proposto deverá reduzir o consumo energético em relação ao prédio *baseline* (caso 2) em 10%.

Para a simulação do prédio *baseline* (caso 2) foi realizado adaptações do prédio proposto 01 (caso 1) para o mesmo atender o Apêndice G da norma *ASHRAE* [2007], para isso o prédio deve estar em conformidade com os requerimentos obrigatórios constantes das seções 5.4, 6.4, 7.4, 8.4, 9.4 e 10.4, e os requerimentos de *performance* da mesma *Standard*. A seguir são apresentadas as modificações realizadas no prédio proposto 01 apresentado no caso 1 para definição do prédio *baseline* (caso 2).

O Apêndice G exige que algumas características do prédio proposto 01 (caso 1) devam ser mantidas para a modulação do prédio *baseline* (caso 2), entre elas:

- Modulado com a mesma quantidade de pavimentos e metragem de área do prédio proposto, portanto as zonas térmicas moduladas para o prédio *baseline* (caso 2) permaneceram as mesmas do prédio proposto 01 (caso 1);
- A taxa metabólica, a resistência térmica das vestimentas, as características de ocupação dos ambientes, velocidade interna do ar, as programações de funcionamento do sistema de iluminação e equipamentos devem ser consideradas as mesmas para os dois prédios;

Para a simulação do prédio *baseline* (caso 2) alguns itens utilizados na simulação do prédio proposto 01 (caso 1), como sistema de iluminação, dimensionamento das janelas, características construtivas e sistema de *HVAC* foram adaptados conforme as exigências da norma *ASHRAE* [2007], conforme apresentado a seguir:

#### 5.4.1 Sistema de Iluminação do Caso 2

O sistema de iluminação do prédio *baseline* (caso 2) foi dimensionado com base na *ASHRAE* [2007]. Na norma a potência referente ao sistema de iluminação (W) que dever ser utilizada no prédio *baseline* é definida em relação à funcionalidade e área (m<sup>2</sup>) do ambiente. Os dados utilizados para o cálculo da potência instalada referente ao sistema de iluminação do prédio *baseline* estão apresentados na Tabela 5.18

A potência total instalada referente ao sistema de iluminação do prédio proposto 01 em relação ao prédio *baseline* aumentou de 8.539 W para 8.764 W, conforme apresentado na Tabela 5.19.

Tabela 5.18. Iluminação para o pavimento térreo, pavimento tipo e 15° pavimento para o prédio *baseline* (caso 2) e proposto 01 (caso 1)

Zona Térmica	m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	Prédio Baseline W	Prédio Proposto 01 W
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	54,63	17	929	656
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	17,22	11	189	164
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	14,56	11	160	240
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	54,63	17	929	656
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	17,22	11	189	164
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	14,56	11	160	240
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	49,2	17	836	814
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	24,94	11	274	210
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	48,17	17	819	1.180
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	45,11	17	767	930
HÁ ( <i>Hall</i> )	92,54	12	1.110	1.440
EG ( <i>Espaço gourmet</i> )	31,3	15	470	453
AD ( <i>Administração</i> )	10,63	11	117	112
SF ( <i>Salão de festas</i> )	86,87	15	1.303	1.020
FT ( <i>Fitness</i> )	46,51	11	512	260

Tabela 5.19. Iluminação para o pavimento térreo, pavimento tipo e 15° pavimento para o prédio *baseline* (caso 2) e proposto 01 (caso 1)

Pavimento	Baseline (caso 2) (W)	Proposto 01 (caso 1) (W)
Pavimento Tipo	5.252	5.254
Pavimento Térreo	1.697	2.005
15° Pavimento	1.815	1.280
<b>Total</b>	<b>8.764</b>	<b>8.539</b>

#### 5.4.2 Janelas do Caso 2

Para o item envoltória da edificação existem algumas exigências para a modulação do prédio *baseline*, sendo que uma delas, é que as áreas das janelas não podem ultrapassar 40% da área total de cada parede a qual estão instaladas, sendo assim foram realizadas adaptações nas dimensões das janelas do prédio proposto 01 (caso 01), conforme pode ser verificado na Tabela

5.20. As janelas destacadas em cinza na tabela foram as que sofreram modificações em relação às janelas previstas no prédio proposto 01 (caso 1).

Tabela 5.20. Dimensões das janelas do pavimento térreo, pavimento tipo e 15º pavimento (caso 2)

Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%	Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%			
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	ja1	90 x 114	31	L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	ja1	292 x 227	39			
	ja2	830 x 114	40		ja2	250 x 227	40			
	ja3	90 x 114	31		ja3a	296 x 115	40			
	ja4	145 x 139	23		ja3b	396 x 114	30			
	ja5	165 x 139	38		ja4	197,5 x 139	39			
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	ja1	220 x 159	23	L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	ja1	317 x 227	38			
					ja2	480 x 227	40			
					ja3a	343 x 115	40			
					ja3b	411 x 114	40			
					ja4	197,5 x 132	40			
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	ja1	150 x 249	36	EG (Espaço <i>gourmet</i> )	ja1	290 x 210	40			
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	ja1	90 x 114	31	AD (Administração)	ja1	140 x 159	34			
	ja2	830 x 114	40		ja2	140 x 159	28			
	ja3	90 x 114	31		HA (Hall)	ja1	166 x 249	40		
	ja4	145 x 139	23			ja2	39,8 x 249	40		
	ja5	165 x 139	38			ja3	2049 x 249	40		
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	ja1	220 x 159	23	ja4		618 x 249	40			
				ja5		379 x 249	40			
				A2C (Dormitório 02 do AP 02)	ja1	150 x 249	36	ja1	150 x 249	20
								ja2	220 x 159	19
								A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	ja1	135 x 139
ja2	460 x 114	39								
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	ja1	160 x 159	29							
				ja2	90 x 106	31				
				ja5	90 x 106	31				
				ja6	460 x 138	40				
				ja2	215 x 159	40	FT (Fitness)	ja1	1420 x 106	40
				ja2	177 x 106	40				

#### 5.4.3 Características Construtivas do Caso 2

As características construtivas do prédio *baseline* (caso 2) foram definidas com base nas características construtivas do prédio proposto 01 (caso 1) e as exigências da norma *ASHRAE* [2007]. Na norma existem três parâmetros, os fatores *U* (transmitância térmica), *R* (resistência térmica) e *SHGC* (coeficiente de ganho de calor solar), que devem ser levados em consideração para a definição da envoltória do prédio *baseline*. A composição dos elementos opacos que compõem a envoltória do prédio *baseline* deve ser selecionada de forma que o valor de *U* não

ultrapasse o valor exigido pela norma, ou o valor de R seja inferior. As composições das superfícies transparentes (janelas, coberturas, etc) do prédio *baseline* não podem ultrapassar os valores de *SHGC* e *U*. Na Tabela 5.21 estão apresentados os valores de *U*, *R* e *SHGC* referenciados na *ASHRAE* [2007] para o tipo e características da edificação em estudo e ao clima onde a mesma está situada.

Tabela 5.21. Valores de referência de *U*, *R* e *SHGC* da *ASHRAE* [2007]

Elementos	<i>U</i> (valor máximo) W/m <sup>2</sup> .K	<i>R</i> (valor mínimo) m <sup>2</sup> .K/W	<i>SHGC</i>
PAREDES EXTERNAS	0,8573	1	-
PAREDES INTERNAS	0,293	-	-
PISO/FORRO	1,825	-	-
COBERTURA	0,36	2,6	-
SUPERFÍCIES TRANSPARENTES	6,93	-	0,25

onde: *U* - transmitância térmica [W/m<sup>2</sup>.K];  
*R*- resistência térmica [m<sup>2</sup>.K/W];  
*SHGC* - coeficiente de ganho de calor solar.

Na Tabela 5.22 estão relacionadas à composição das janelas e as propriedades físicas e óticas dos vidros utilizadas no prédio *baseline* (caso 2). As janelas são formadas por vidros duplos com camada de ar entre eles

Tabela 5.22. Composição das janelas e as características físicas e óticas do vidro utilizado (caso 2)

Especificação do vidro	V2		Vidro reflexivo									
	V3		Vidro comum claro									
	<i>L</i> (cm)	$\tau_s$	$\rho_s$ exterior	$\rho_s$ interior	$\tau_v$	$\rho_v$ exterior	$\rho_v$ interior	$T_{iv}$	$\varepsilon$ exterior	$\varepsilon$ interior	$\lambda$ (W/m.K)	
JANELA	V2	0,6	0,159	0,22	0,37	0,2	0,25	0,32	0	0,84	0,57	0,9
	câmara de ar											
V3	0,6	0,85	0,08	0,08	0,9	0,08	0,08	0	0,84	0,84	1	

A partir das exigências *ASHRAE* [2007], a composição dos materiais utilizados na envoltória do prédio *baseline* (caso 2) foi realizado através de adaptações do prédio proposto 01 (caso 1). Na Tabela 5.23 estão descritas as camadas e os materiais utilizados no prédio *baseline* e suas características.

Tabela 5.23. Composição da envoltória e as características termofísicas dos materiais construtivos  
(caso 2)

Materiais		$L$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$C$ (J/kg.K)	$\alpha_s$ -	$\varepsilon$ -	
PAREDES EXTERNAS	pastilha porcelanizada	0,005	1922	1,79	1040	0,65	0,9	
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9	
	bloco cerâmico furado	0,19	1121	0,6	830	0,63	0,9	
	poliestireno expandido	0,015	28,83	0,03	1210	0,5	0,9	
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9	
PAREDES INTERNAS	azulejo na cor branca	0,007	1922	1,79	1040	0,65	0,9	
PAREDES INTERNAS	bloco de concreto	0,10	2002	1,33	920	0,60	0,9	
	PISO/FORRO	porcelanato ou cerâmica na cor creme	0,01	1922	1,79	1040	0,65	0,9
		argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
		laje nervurada de concreto	0,05	2243	1,72	830	0,32	0,9
		argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
forro de gesso na cor branca		0,01	480,6	0,06	830	0,32	0,9	
COBERTURA	telha cerâmica	0,03	1922	0,72	830	0,2	0,9	
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9	
	laje nervurada de concreto	0,05	2243	1,72	830	0,32	0,9	
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9	
	poliestireno expandido	0,06	28,83	0,03	1210	0,5	0,9	
JANELA	forro de gesso na cor branca	0,01	480,6	0,06	830	0,32	0,9	
	vidro reflexivo (V3)	0,006						
	câmara de ar	0,0064						
	vidro simples incolor (V4)	0,006						

#### 5.4.4 Sistema de HVAC do Caso 2

Para o dimensionamento das potências do sistema de HVAC do caso 2 foram utilizados os mesmos procedimentos utilizados para o prédio proposto 01 (caso 1) através do recurso do *EnergyPlus*, que dimensiona o sistema necessário para cada zona térmica simulada.

A norma *ASHRAE* [2007], exige que o sistema de ar condicionado para simulação do prédio *baseline* residencial seja utilizado o sistema *PTHP* (*packaged terminal heat pump*). Sendo assim, o sistema escolhido foi o mesmo utilizado no prédio proposto 01 (caso 1), um modelo mini-split de expansão direta e compressor rotativo. As 15 zonas térmicas possuem um sistema de HVAC independente com capacidade e potência nominal calculada primeiramente de modo automático pelo *EnergyPlus*. A temperatura do ar interna programada para as simulações do prédio *baseline* foram as mesmas programadas para o caso 1.

Para o dimensionamento do sistema de *HVAC* do prédio *baseline* a norma *ASHRAE* [2007] também exige que para cada zona simulada o número de horas não confortáveis (horas que as temperaturas operativas ficaram superiores a 27,4 °C ou inferiores a 20,4°C) não podem ultrapassar de 300 horas anuais, sendo que essas horas devem ser calculadas entre a média das horas não confortáveis para a simulação do prédio *baseline* orientado para o norte, sul, leste e oeste. Conforme pode ser observado na Figura 5.14 as zonas A1A, A2A, AD e HA ficaram com valores superiores do permitido pela norma.

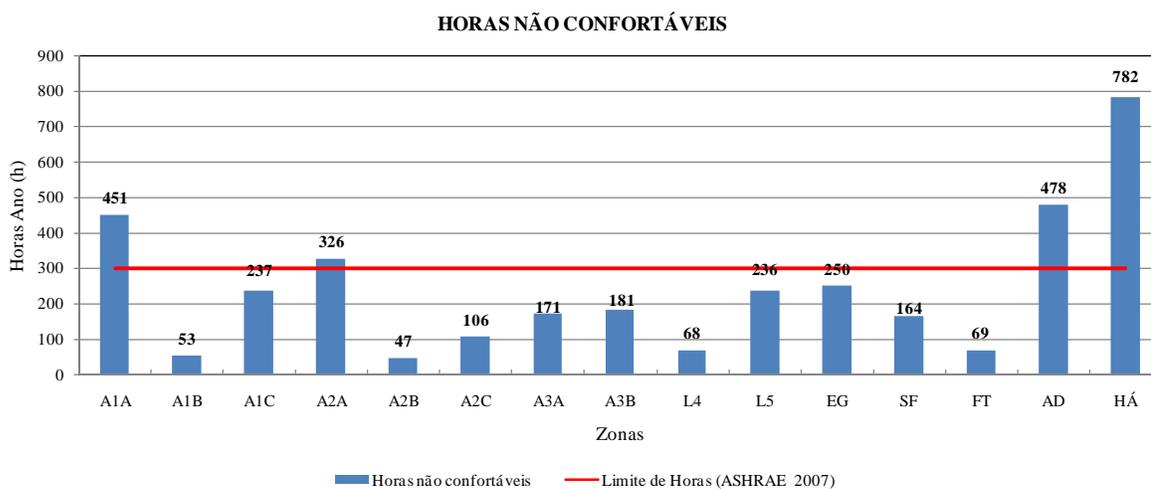


Figura 5.14. Horas anuais não confortáveis (caso 2)

Com base nos resultados apresentados em relação às horas não confortáveis foram realizadas algumas alterações nas zonas que apresentaram os resultados superiores 300 horas anuais, como, aplicação de cortinas internas e alterações nas características construtivas das paredes conforme descrito na Tabela 5.24:

Tabela 5.24. Modificações no prédio *baseline* para atender a *ASHRAE* [2007] (caso 2)

Zona Térmica	Alterações
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	- Cortinas internas nas janelas
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	- Cortinas internas nas janelas
HA (Hall)	- Cortinas internas nas janelas - Paredes internas com as características construtivas igual ao prédio proposto 01 (Tabela 5.12)
AD (Administração)	- Cortinas internas nas janelas - Paredes internas com as características construtivas igual ao prédio proposto 01 (Tabela 5.12) sendo que foi utilizado poliestireno expandido com 3 cm de espessura

Na Tabela 5.25 estão relacionadas as características da cortina para ser instalada na parte interna das janelas. As características da cortina utilizada foram obtidas junto ao fornecedor de cortinas brasileiro [Hunter Douglas, 2008].

Tabela 5.25. Características físicas e óticas das cortinas internas (caso 2)

Nome da cortina	$L$ (cm)	$\tau_s$	$\rho_s$	$\tau_v$	$\rho_{sv}$	$\varepsilon$	$L_{cv}$ (cm)
Cortina 01	0,03	0	0,56	0	0,56	0,9	5

#### 5.4.5 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 2

Com as alterações realizadas no caso 2 é possível verificar que todas as zonas estão atendendo a exigência da *ASHRAE* [2007] em relação às horas não confortáveis. Na Figura 5.15 é apresentada para cada zona simulada a quantidade de horas não confortáveis das 8.760 horas existentes no ano.

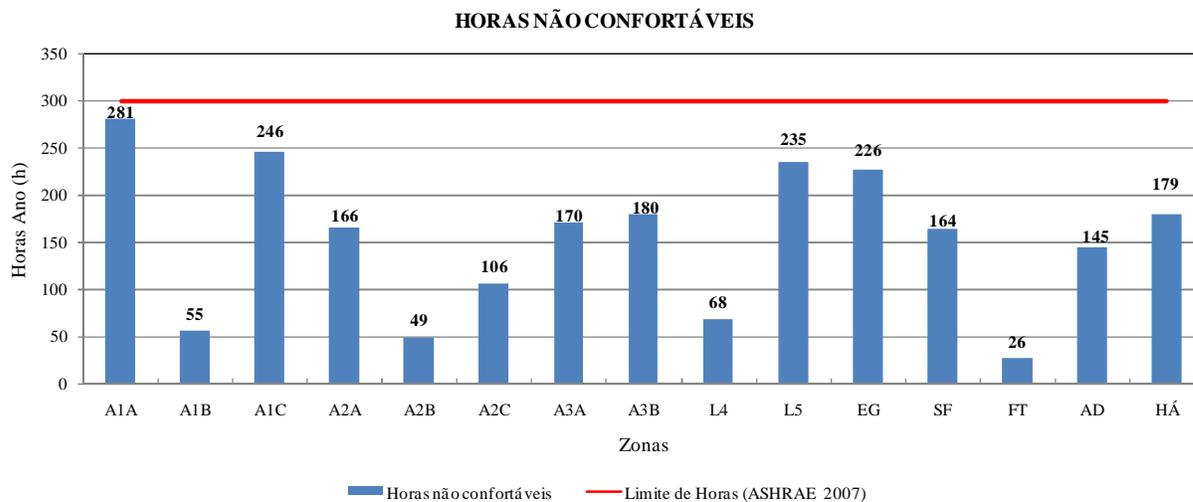


Figura 5.15. Horas anuais não confortáveis (caso 2)

O cálculo do consumo anual de energia elétrica (Figura 5.16 e Figura 5.17), foi realizado entre a média do consumo energético anual do prédio *baseline* orientado para o norte, sul, leste e oeste. Nesta análise o consumo relacionado ao sistema de ar condicionado é o de maior representatividade do consumo total da edificação (164.483 kWh/ano), sendo para aquecimento (89.747 kWh/ano), para refrigeração (60.274 kWh/ano) e para ventilação (14.462 kWh/ano). O consumo anual para atender os 15 pavimentos do prédio é de 327.122 kWh (sistema de condicionamento de ar, sistema de iluminação, e equipamentos em geral), sendo o mês de julho o de maior consumo, 38.263 kWh e o de abril o de menor consumo, 18.717 kWh.

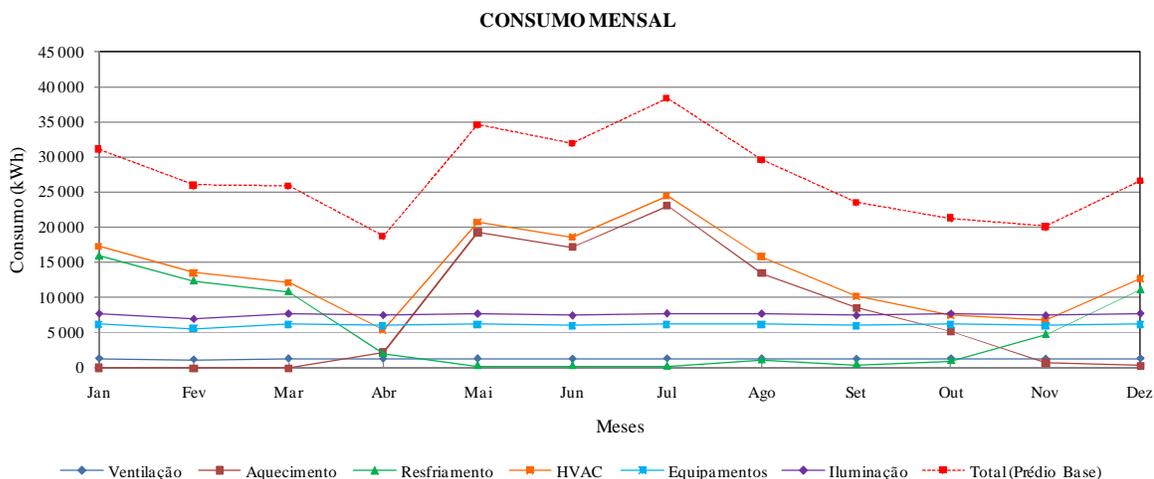


Figura 5.16. Consumo mensal de energia elétrica (caso 2)

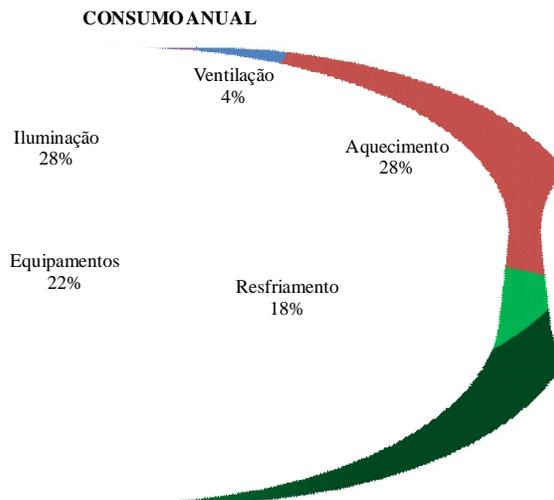


Figura 5.17. Consumo anual de energia elétrica para cada uso final (caso 2)

Com base nos dois primeiros casos simulados, o prédio proposto 01 e o prédio *baseline*, foi possível identificar que o consumo de energia elétrica anual do prédio proposto 01 (caso 1) é 26,55% maior do que o prédio *baseline* (caso 2). Desta forma, foram realizadas novas simulações que tiveram como base o edifício proposto 01 (caso1), sendo utilizadas sempre as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos (Tabela 5.12), e foram acrescentados alguns materiais aplicados na fachada externa da edificação, nas paredes internas, proteções externas e reduções das áreas envidraçadas. Os próximos casos realizados sempre serão comparados com os resultados obtidos referentes ao consumo de energia elétrica do prédio *baseline* (caso 2), com o objetivo de verificar se com as alternativas propostas em cada caso o prédio proposto atende o pré-requisito da categoria *Energy & Atmosphere* do *Core and Shell*, a

qual estabelece que o edifício proposto deva reduzir no mínimo 10% de energia elétrica em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

### 5.5 Caso 3 – Proposto 02 (Vidros)

Estas simulações tiveram como base o prédio proposto 01 (caso 1), sendo utilizadas sempre as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos (Tabela 5.12), com modificações nos vidros utilizados nas janelas. Todos os vidros apresentados na Tabela 5.26 são laminados de 8 mm (o laminado de 8 mm é composto de vidro de 4 mm com uma película PVB - película de *polivinil butiral* - mais outro vidro de 4 mm) tendo sido utilizados como vidros externos nas esquadrias compostas de vidros duplos e câmara de ar de 10 mm. O vidro interno utilizado em todas as simulações foi o incolor de 3 mm de espessura.

Tabela 5.26. Vidros externos utilizados nas simulações do caso 3

<b>Nome do laminado</b>	<b>Descrição</b>
L1	Eco Lite Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro verde 4 mm
L2	Eco Lite Verde 4 mm aplicado em face 3 laminado c/ PVB incolor e vidro verde 4 mm
L3	Eco Lite Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L4	Reflectafлот Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro verde 4 mm
L5	Reflectafлот Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L6	Cool lite Prata Neutro 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L7	Cool lite Azul Intenso 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L8	Cool lite Prata 4mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L9	Cool lite Cinza 4mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L10	Cool lite Verde Intenso 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm
L11	SKN 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4mm
L12	KNT 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4mm

As características físicas e óticas do vidro comum 3 mm (V1) utilizado na parte interna da esquadria foram apresentadas anteriormente na Tabela 5.14, sendo que os demais vidros utilizados nas simulações como vidro externos nas esquadrias estão descritas na Tabela 5.27. As

características dos vidros externos utilizados foram obtidas junto ao fornecedor de vidros brasileiro [Cebrace, 2008].

Tabela 5.27. Características físicas e óticas dos vidros externos utilizados (caso 3)

Nome do laminado	$\tau_s$	$\rho_s$		$\tau_v$	$\rho_{iv}$		$T_{iv}$	$\varepsilon$		$\lambda$ (W/m.K)
		exterior	interior		exterior	interior		exterior	interior	
L1	0,51	0,12	0,1	0,2	0,08	0,06	0	0,84	0,84	1
L2	0,51	0,1	0,12	0,2	0,06	0,08	0	0,84	0,84	1
L3	0,58	0,13	0,12	0,37	0,07	0,1	0	0,84	0,84	1
L4	0,26	0,4	0,43	0,17	0,22	0,24	0	0,84	0,84	1
L5	0,26	0,37	0,53	0,22	0,2	0,37	0	0,84	0,84	1
L6	0,13	0,28	0,38	0,11	0,24	0,31	0	0,84	0,84	1
L7	0,13	0,22	0,36	0,11	0,19	0,32	0	0,84	0,84	1
L8	0,18	0,26	0,34	0,13	0,25	0,32	0	0,84	0,84	1
L9	0,26	0,18	0,31	0,21	0,16	0,26	0	0,84	0,84	1
L10	0,3	0,32	0,22	0,27	0,2	0,21	0	0,84	0,84	1
L11	0,48	0,17	0,1	0,33	0,205	0,201	0	0,84	0,84	1
L12	0,42	0,14	0,1	0,23	0,11	0,2	0	0,84	0,84	1

### 5.5.1 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 3

Os resultados apresentados na coluna Consumo energético da Tabela 5.28 são os valores do consumo de energia elétrica total da edificação para cada tipo de vidro simulado, os valores da coluna Resultado R1 referem-se à diferença de consumo de energia elétrica (em porcentagem) em relação ao edifício proposto 01 (caso 1), e os da coluna Resultado R2 em relação ao edifício *baseline* (caso 2). Para cada simulação foram somente alteradas as características das esquadrias, isto é, os vidros incolores externos foram substituídos por vidros laminados.

Com base nos resultados obtidos entre os 12 laminados, quando aplicados em vidros externos nas esquadrias compostas de vidros duplos e câmara de ar de 10 mm e o vidro interno incolor de 3 mm de espessura foi o vidro laminado 6 que obteve maior redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

Tabela 5.28. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para cada vidro (caso 3)

Nome do laminado	Descrição	Consumo energético (kWh/ano)	Resultado R1 (%)	Resultado R2 (%)
L1	Eco Lite Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro verde 4 mm	348.974	15,70%	-6,68%
L2	Eco Lite Verde 4 mm aplicado em face 3 laminado c/ PVB incolor e vidro verde 4 mm	350.412	15,35%	-7,12%
L3	Eco Lite Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	366.245	11,53%	-11,96%
L4	Reflectafлот Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro verde 4 mm	338.225	18.30%	-3.39%
L5	Reflectafлот Verde 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	345.043	16.65%	-5.48%
L6	Cool lite Prata Neutro 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	331.853	19.84%	-1.45%
L7	Cool lite Azul Intenso 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	334.748	19.10%	-2.33%
L8	Cool lite Prata 4mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	332.994	19.56%	-1.79%
L9	Cool lite Cinza 4mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	345.421	16.56%	-5.59%
L10	Cool lite Verde Intenso 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4 mm	348.208	15.88%	-6.45%
L11	SKN 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4mm	353.563	14.59%	-8.08%
L12	KNT 4 mm laminado c/ PVB incolor e vidro incolor 4mm	350.121	15.42%	-7,03%

OBS: os valores negativos são gastos de energia a mais em relação ao prédio *baseline*

## 5.6 Caso 4 – Proposto 03 (Proteções Internas)

Estas simulações tiveram como base o prédio proposto 01 (caso 1), sendo utilizadas sempre as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos (Tabela 5.12) e composição das janelas (Tabela 5.14), sendo que para este caso em todas as janelas foram inseridas cortinas internas, exceto nas janelas dos quartos que permaneceram somente com venezianas externas (Tabela 5.15). As cortinas aplicadas no interior das janelas são as mesmas utilizadas no prédio *baseline* (caso 2), suas características foram apresentadas na Tabela 5.25.

### 5.6.1 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 4

Os resultados apresentados na coluna Consumo energético da Tabela 5.29 são os valores do consumo de energia elétrica total da edificação para a aplicação de cortina interna, o valor da coluna Resultado R1 refere-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício proposto 01 (caso 1), e o da coluna Resultado R2 refere-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

Tabela 5.29. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de cortina interna (caso 4)

Nome da cortina	Consumo energético (kWh/ano)	Resultado R1 (%)	Resultado R2 (%)
Cortina 01	414.059	-0,02%	-26,58%

OBS: os valores negativos são gastos de energia a mais em relação ao prédio proposto 01 e o prédio *baseline*

Com base nos resultados obtidos para o caso 4 foi possível verificar que o consumo de energia elétrica do prédio proposto 03 aumentou em 0,02% em relação ao prédio proposto 01 (caso 1) e 26,58% em relação ao edifício *baseline* (caso 2), sendo assim nas simulações posteriores não foram aplicados este tipo de material nas janelas.

### 5.7 Caso 5 – Proposto 04 (Proteções entre os Vidros)

Estas simulações tiveram como base o prédio proposto 01 (caso 1), sendo utilizadas sempre as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos (Tabela 5.12) e composição das janelas (Tabela 5.14), sendo que para este caso em todas as janelas foram aplicadas cortinas ou persianas horizontais entre os vidros, exceto nas janelas dos quartos que permaneceram somente com venezianas externas (Tabela 5.15). A cortina aplicada entre os vidros das janelas possuem as mesmas características da cortina utilizada no prédio *baseline* (caso 2), suas características foram apresentadas na Tabela 5.25. A Tabela 5.30 descreve as características das persianas para serem instaladas entre os vidros das janelas. As características das persianas utilizadas foram obtidas junto ao fornecedor de cortinas brasileiro [Hunter Douglas, 2008].

Tabela 5.30. Características físicas e óticas das persianas aplicadas entre os vidros (caso 5)

Nome da persiana	$L$ (cm)	$\tau_s$	$\rho_s$ exterior	$\rho_s$ interior	$\tau_v$	$\rho_{i_v}$ exterior	$\rho_{i_v}$ interior	$\varepsilon$ exterior	$\varepsilon$ interior	$\lambda$ (W/m.K)	$Lcv$ (cm)
Persiana 01	0,05	0,08	0,71	0,62	0,08	0,69	0,69	0,22	0,08	0,15	7,5
Persiana 02	0,05	0,08	0,62	0,71	0,08	0,69	0,69	0,08	0,22	0,15	7,5

### 5.7.1 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 5

Os resultados apresentados na coluna Consumo energético da Tabela 5.31 são os valores do consumo de energia elétrica total da edificação para cada material, os valores da coluna Resultado R1 referem-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício proposto 01 (caso 1), e os da coluna Resultado R2 referem-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

Tabela 5.31. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de cortina e persianas entre os vidros (caso 5)

Nome da cortina ou persiana	Consumo energético (kWh/ano)	Resultado R1 (%)	Resultado R2 (%)
Cortina 01	316.199	23,62%	3,34%
Persiana 01	343.185	17,10%	-4,91%
Persiana 02	343.212	17,09%	-4,92%

OBS: os valores negativos são gastos de energia a mais em relação ao prédio *baseline*

Com base nos resultados obtidos para o caso 5 é possível verificar que o material que teve melhor resultado entre os três simulados foi à cortina 01 que teve uma redução de 23,62% em relação ao prédio proposto 01 (caso 1) e 3,34% em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

## 5.8 Caso 6 – Proposto 05 (Proteções Externas)

Estas simulações tiveram como base o prédio proposto 01 (caso 1), sendo utilizadas sempre as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos (Tabela 5.12) e composição das janelas (Tabela 5.14), sendo que para este caso foram aplicadas proteções externas em todas as janelas, exceto nas dos quartos que permaneceram somente com as mesmas venezianas externas (Tabela 5.15). Foram simulados dois tipos de telas externas e um tipo de

brise aplicados no sentido vertical e horizontal. Na Tabela 5.32 e na Tabela 5.33 estão descritas as características das proteções externas aplicadas nas janelas. As características das proteções externas utilizadas foram obtidas junto ao fornecedor brasileiro [Hunter Douglas, 2008].

Tabela 5.32. Características físicas e óticas das telas aplicadas nas janelas (caso 6)

Nome da tela	$L$ (cm)	$\tau_s$	$\rho_s$	$\tau_v$	$\rho_v$	$\varepsilon$	$\lambda$ (W/m.K)	$L_{cv}$ (cm)
Tela 01	0,83	0,072	0,47	0,058	0,47	0,9	0,1	5
Tela 02	0,83	0,037	0,127	0,037	0,127	0,9	0,1	5

Tabela 5.33. Características físicas e óticas do brise aplicado nas janelas (caso 6)

Nome da persiana	$L$ (cm)	$\tau_s$	$\rho_s$ exterior	$\rho_s$ interior	$\tau_v$	$\rho_v$ exterior	$\rho_v$ interior	$\varepsilon$ exterior	$\varepsilon$ interior	$\lambda$ (W/m.K)	$L_{cv}$ (cm)
Brise 01	2	0	0,8	0,8	0	0,7	0,7	0,9	0,9	44,9	20

### 5.8.1 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 6

Os resultados apresentados na coluna Consumo energético da Tabela 5.34 são os valores do consumo de energia elétrica total da edificação para cada material, os valores da coluna Resultado R1 referem-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício proposto 01 (caso 1), e os da coluna Resultado R2 referem-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

Tabela 5.34. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de proteções externas (caso 6)

Nome da cortina ou persiana	Consumo energético (kWh/ano)	Resultado R1 (%)	Resultado R2 (%)
Tela 01	333.314	19,48%	-1,89%
Tela 02	333.392	19,46%	-1,92%
Brise 01 - Vertical	318.669	23,02%	2,58%
Brise 01 - Horizontal	314.971	23,91%	3,71%

OBS: os valores negativos são gastos de energia a mais em relação ao prédio *baseline*

Com base nos resultados obtidos para o caso 6 foi possível verificar que o material que teve melhor resultado entre os três tipos simulados foi o brise 01 aplicado no sentido horizontal,

que teve uma redução de 23,91% em relação ao prédio proposto 01 (caso 1) e 3,71% em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

Com base nos resultados obtidos do caso 3 ao caso 6, nas próximas simulações serão apresentadas combinações entre os materiais que obtiveram os melhores resultados em relação à redução do consumo de energia elétrica anual, com o objetivo de adaptar o prédio proposto 01 (caso 1), de forma que o mesmo atenda o pré-requisito 2 do item *Energy & Atmosphere* da certificação *LEED*<sup>TM</sup>.

### 5.9 Caso 7 – Proposto 06 (Vidro Laminado com Proteções)

Estas simulações tiveram como base o prédio proposto 02 (caso 3), que utiliza as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos do prédio proposto 01 (Tabela 5.12), e aplicou-se como vidros externos nas esquadrias compostas de vidros duplos e câmara de ar de 10 mm o laminado que obteve melhor resultado no caso 3, o laminado 6, de 8 mm (Tabela 5.26) e o vidro interno aplicado foi o incolor de 3 mm de espessura (Tabela 5.14).

Com o objetivo de verificar o comportamento do consumo energético do prédio proposto 03 (prédio proposto 01 + laminado 06) com os materiais que apresentaram o melhores resultados entre o caso 4 e o caso 6 foram realizadas algumas simulações as quais foram efetuadas combinações entre os materiais. Na Tabela 5.35 estão descritas as combinações que foram realizadas para as simulações do caso 07.

Tabela 5.35. Descrição das combinações realizadas para as simulações do caso 7

Nome das combinações	Descrição
Combinação 01	prédio proposto 03 + cortina 01 internas em todas as janelas exceto nas janelas dos quartos permaneceram somente com venezianas externas (caso 4)
Combinação 02	prédio proposto 03 + cortina 01 entre os vidros em todas as janelas exceto nas janelas dos quartos permaneceram somente com venezianas externas (caso 5)
Combinação 03	prédio proposto 03 + brises 01 - horizontal aplicados como proteções externas em todas as janelas exceto nas janelas dos quartos permaneceram somente com venezianas externas (caso 6)

#### 5.9.1 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 7

Os resultados apresentados na coluna Consumo energético da Tabela 5.36 são os valores do consumo de energia elétrica total da edificação para cada material, os valores da coluna Resultado R1 referem-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação

ao edifício proposto 01 (caso 1), e os da coluna Resultado R2 referem-se à porcentagem de redução do consumo de energia elétrica em relação ao edifício *baseline* (caso 2)

Tabela 5.36. Consumo energético anual e porcentagem de redução do consumo de energia elétrica para aplicação de proteções externas (caso 7)

Nome das combinações	Consumo energético (kWh/ano)	Resultado R1 (%)	Resultado R2 (%)
Combinação 01	358.421	13,42%	-9,57%
Combinação 02	310.293	25,04%	5,14%
Combinação 03	304.808	26,37%	6,82%

OBS: os valores negativos são gastos de energia a mais em relação ao prédio *baseline*

Com base nos resultados obtidos para o caso 7 é possível verificar que a combinação que obteve melhor resultado foi, a combinação 03 (prédio proposto 03 + brises 01 - Horizontal aplicados como proteções externas em todas as janelas exceto nas janelas dos quartos que permaneceram somente com venezianas externas), a qual teve uma redução de 26,37% em relação ao prédio proposto 01 (caso 1) e 6,82% em relação ao edifício *baseline* (caso 2).

Os resultados obtidos com redução de consumo de energia elétrica com as simulações realizadas no caso 7 não foram suficiente para atender o pré-requisito 2 do item *Energy & Atmosphere* da certificação *LEED™*, que exige diminuir o consumo energético do prédio proposto 01 (caso 01) em relação ao prédio *baseline* (caso 02) em 10%, desta forma foram sugeridas outras alterações no prédio proposto 01 e realizadas novas simulações, sendo elas apresentadas no caso 8 (caso ótimo).

### 5.10 Caso 8 – Proposto 07 (Caso Ótimo)

Estas simulações tiveram como base a combinação 03 do prédio proposto 06 (caso 7), o qual é configurado pelo melhor resultado do prédio proposto 03 (laminado 6) e aplicação de brises 01 (Tabela 5.33) horizontal aplicados como proteções externas em todas as janelas exceto nas janelas dos quartos que permaneceram somente com venezianas externas (Tabela 5.15). A seguir estão descritas as alterações e apresentados os materiais selecionados para serem utilizados na simulação do prédio proposto 07 (caso ótimo).

## 5.10.1 Janelas do Caso 8

Com o objetivo de reduzir a área envidraçada das janelas de algumas zonas térmicas, nas zonas A1A, A2A, A3A, SF, FT e HÁ foram inseridos peitoris de alvenaria com altura de 1,10m, e nas zonas L4 e L5 peitoris de alvenaria com altura de 0,90 m, além dos peitoris algumas janelas sofreram redução também nas suas alturas. Na Tabela 5.37 podem ser verificadas as adaptações realizadas nas dimensões das janelas do prédio proposto 01 (caso 01). As janelas destacadas em cinza na tabela foram as quais sofreram modificações em relação às janelas previstas no prédio proposto 01 (caso 1).

Tabela 5.37. Dimensões das janelas do pavimento térreo, pavimento tipo e 15º pavimento (caso 8)

Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%	Zona Térmica	Nome da janela	Lj x Hj (cm)	%		
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	ja1	90 x 142	39	L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	ja1_térreo	292 x 195	67		
	ja2	830 x 142	50		ja1_pav sup	292 x 160	55		
	ja3	90 x 142	39		ja2_térreo	250 x 195	70		
	ja4	145 x 139	23		ja2_pav sup	250 x 160	57		
	ja5	165 x 139	38		ja3a	296 x 180	63		
Continuação da Tabela 5.37					ja3b	396 x 160	56		
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	ja1	220 x 159	23		ja4	197,5 x 139	39		
				L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	ja1_térreo	317 x 195	66		
ja1_pav sup	317 x 160	54							
ja2_térreo	480 x 195	69							
ja2_pav sup	480 x 160	57							
ja3a	343 x 180	63							
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	ja1	150 x 249	36		ja3b	411 x 160	56		
					ja4	197 x 139	42		
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	ja1	90 x 142	39	EG (Espaço <i>gourmet</i> )	ja1	290 x 210	57		
	ja2	830 x 142	50	AD (Administração)	ja1	140 x 159	34		
	ja3	90 x 142	39		ja2	140 x 159	28		
	ja4	145 x 139	23		HA (Hall)	ja1	166 x 190	30	
	ja5	165 x 139	38			ja2	39,8 x 190	30	
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	ja1	220 x 159	23			ja3	2049 x 190	30	
				ja4		618 x 190	30		
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	ja1	150 x 249	36	ja5	379 x 190	30			
				A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	ja1	135 x 139	38	ja1	150 x 249
ja2	460 x 139	47	ja2					220 x 159	19
SF (Salão de festas)	ja3	90 x 155	46						
	ja4	830 x 155	58						
	ja5	90 x 155	46						
	ja6	460 x 159	46						
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	ja1	160 x 159	29	FT (Fitness)	ja1	1420 x 139	52		
					ja2	220 x 159	41	ja2	177 x 139

### 5.10.2 Características Construtivas do Caso 8

Para a simulação do prédio proposto 07 (caso 8) foram utilizadas as mesmas características construtivas do prédio proposto 01 (caso 1) Tabela 5.12, sendo que tiveram duas alterações, uma foi que em todas as zonas térmicas foram utilizadas nas paredes externas poliestireno expandido de espessura de 2 cm e a outra alteração foi a aplicação de poliestireno expandido com 3 cm de espessura nas paredes internas da zona AD, pois a mesma estava em desconforto pelo frio.

Todas as janelas foram compostas de vidros duplos e câmara de ar de 10 mm, sendo que para o vidro externo foi utilizado o laminado de 8 mm L6 (Tabela 5.27) e vidro interno foi aplicado o incolor de 3 mm de espessura (Tabela 5.14). Na Tabela 5.38 estão citadas as características construtivas que foram alteradas para o prédio proposto 07 em relação ao prédio proposto 01.

Tabela 5.38. Características termofísicas dos materiais construtivos alterados para o caso 8

Materiais		$L$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$C$ (J/kg.K)	$\alpha_s$ -	$\varepsilon$ -
PAREDES EXTERNAS	pastilha porcelanizada	0,005	1922	1,79	1040	0,65	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	bloco cerâmico furado	0,19	1121	0,6	830	0,63	0,9
	poliestireno expandido	0,02	28,83	0,03	1210	0,5	0,9
	argamassa	0,01	800,9	0,82	830	0,92	0,9
	azulejo na cor branca	0,007	1922	1,79	1040	0,65	0,9
PAREDES INTERNAS da zona AD - administração	reboco na cor branca	0,02	1858	0,69	830	0,2	0,9
	bloco cerâmico furado	0,14	1121	0,57	830	0,63	0,9
	poliestireno expandido	0,03	28,83	0,03	1210	0,5	0,9
	reboco na cor branca	0,02	1858	0,69	830	0,2	0,9
JANELA	Laminado 6 (L6)	0,008					
	câmara de ar	0,01					
	vidro simples incolor (V3)	0,003					

Nas janelas além da utilização de vidro de alta *performance* foram realizadas as configurações a seguir:

- Nas zonas A1A, A2A e A3A, HA, EG, SF, FT, L4 e L5 foram utilizados o brise 01 horizontal (Tabela 5.33);
- Nas janelas da zona AD foi utilizada a cortina interna 01 (Tabela 5.25);
- Nas janelas dos quartos A1B, A1C, A2B, A2C e A3B foram mantidas as venezianas externas (Tabela 5.15) utilizadas no prédio proposto 01 (caso 01).

5.10.3 Sistema de *HVAC* do Caso 8

O sistema de *HVAC* foi simulado da mesma maneira que para o prédio proposto 01 (caso 1), utilizando um modelo de condicionador de ar do tipo mini-split, de expansão direta e compressor rotativo em cada zona térmica.

Na Tabela 5.39 estão citadas as capacidades máximas dos equipamentos de ar condicionado para o dia de projeto de inverno e verão por área (m<sup>2</sup>) de cada zona para o prédio proposto 07 (caso 8), sendo que nas colunas % estão listadas as porcentagens de redução da capacidade para aquecimento e refrigeração por área do prédio proposto 07 em relação ao prédio proposto 01.

Tabela 5.39. Capacidades dos sistemas de *HVAC* por área (caso 8)

Zona Térmica	Área (m <sup>2</sup> )	Aquecimento Capacidade (W/m <sup>2</sup> )	% Aquecimento	Refrigeração Capacidade (W/m <sup>2</sup> )	% Refrigeração
<b>A1A</b> (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	54,63	16,68	59,87	24,15	76,05
<b>A1B</b> (Dormitório 01 do AP 01)	17,22	13,61	38,82	21,53	37,20
<b>A1C</b> (Dormitório 02 do AP 01)	14,56	13,91	30,44	21,59	27,46
<b>A2A</b> (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	54,63	15,16	59,61	21,97	77,55
<b>A2B</b> (Dormitório 01 do AP 02)	17,22	12,67	41,42	21,96	37,59
<b>A2C</b> (Dormitório 02 do AP 02)	14,56	34,65	33,98	51,10	37,62
<b>A3A</b> (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	49,20	13,02	32,78	21,26	30,57
<b>A3B</b> (Dormitório 01 do AP 03)	24,94	24,34	36,63	36,98	35,75
<b>L4</b> (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	48,17	28,06	47,24	41,32	78,00
<b>L5</b> (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	45,11	34,12	50,67	47,18	82,92
<b>HA</b> (Hall)	46,51	34,00	56,78	48,54	85,42
<b>EG</b> (Espaço gourmet)	92,54	43,51	-6,03	23,21	73,36
<b>AD</b> (Administração)	86,87	46,33	22,14	76,64	21,61
<b>SF</b> (Salão de festas)	31,30	25,60	26,81	22,22	73,15
<b>FT</b> (Fitness)	10,63	4,00	78,60	126,07	58,06

#### 5.10.4 Análise dos Resultados da Simulação do Caso 8

Para a avaliação em relação ao conforto térmico para o prédio proposto 07 (caso 8) foi realizada da mesma maneira que no caso 1, analisado a quantidade de horas, das 8.760 horas existentes em um ano que os ocupantes ficam fora da área de conforto em relação à temperatura operativa. As temperaturas operativas foram avaliadas dentro dos valores médio das fronteiras das zonas de conforto térmico de verão e inverno segundo *ASHRAE* [2004a].

Com as alterações realizadas no caso 8 foi possível verificar que todas as zonas estão atendendo a exigência da *ASHRAE* [2007], no máximo 300 horas anuais não confortáveis. Nota-se também que todas as zonas reduziram as horas não confortáveis em no mínimo 8,5% (HA) e no máximo 100% (FT), exceto o salão de festas (SF) que no prédio proposto 07 (caso 8) aumentou as horas não confortáveis em 9,5% em relação prédio *baseline* (caso 2). Na Figura 5.18 é apresentada para cada zona simulada a quantidade de horas não confortáveis das 8.760 horas existentes no ano para o prédio *baseline* (caso 2) e prédio proposto 07 (caso 8).

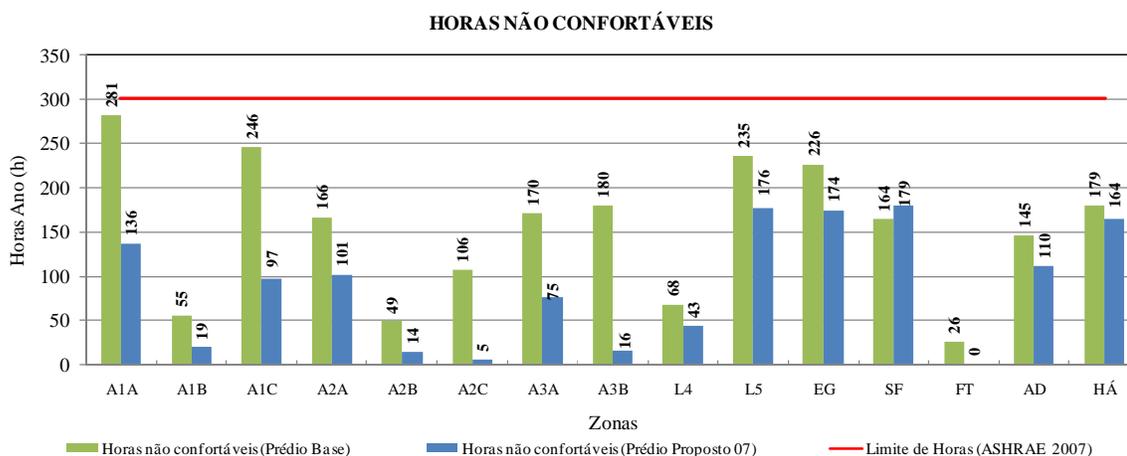


Figura 5.18. Horas anuais não confortáveis (caso 2 e caso 8)

Na Tabela 5.40 estão apresentados as horas anuais não confortáveis em relação à temperatura operativa para o prédio *baseline* (caso 2) e o prédio proposto 07 (caso 8) e a diferença entre eles. Com as soluções propostas para o caso 7 as zonas A1B, A1C, A2B, A2C, A3B e o FT foram as que obtiveram melhores resultados na redução das horas não confortáveis quando comparadas com as horas não confortáveis do prédio *baseline*.

A norma *ASHRAE* [2007] exige que para o dimensionamento do sistema de *HVAC* do prédio proposto a diferença entre as horas não confortáveis entre o prédio proposto e o prédio *baseline* não pode ultrapassar de 50 horas anuais, com base nos dados demonstrados na tabela a

seguir foi possível verificar que o prédio proposto 07 está atendendo esta exigência da norma, uma vez que a zona EG é o único ambiente que aumentou suas horas não confortáveis em relação ao prédio *baseline*, sendo que o aumento foi de 15,5 horas anuais, as demais zonas diminuíram suas horas não confortáveis em relação ao prédio *baseline*.

Tabela 5.40. Horas anuais não confortáveis (caso 2 x caso 8)

Zona Térmica	Horas anuais não confortáveis Prédio <i>baseline</i> (caso 2)	Horas anuais não confortáveis Prédio proposto 07 (caso 8)	Diferença de horas anuais não confortáveis entre caso 2 e caso 8
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	280,8	136,0	144,8
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	55,25	19,0	36,3
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	245,5	97,0	148,5
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	165,5	101,0	64,5
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	48,5	14,0	34,5
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	106	5,0	101,0
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	170,3	75,0	95,3
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	179,5	16,0	163,5
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	67,5	43,0	24,5
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	234,8	176,0	58,8
HA (Hall)	226,0	174,0	52,0
EG (Espaço <i>gourmet</i> )	163,5	179,0	-15,5
AD (Administração)	25,75	0,0	25,8
SF (Salão de festas)	145	110,0	35,0
FT (Fitness)	179,3	164,0	15,3

Na Figura 5.19 apresenta o consumo anual de energia elétrica para o prédio proposto 07 (caso 8), o consumo relacionado ao sistema de ar condicionado é o de maior representatividade do consumo total da edificação (127.010 kWh/ano), sendo para aquecimento (74.404 kWh/ano), para refrigeração (42.958 kWh/ano) e para ventilação (9.648 kWh/ano). O consumo anual para atender os 15 pavimentos do prédio foi de 289.232 kWh (sistema de

condicionamento de ar, sistema de iluminação, e equipamentos em geral), sendo o mês de julho o de maior consumo, 33.718 kWh e o de abril o de menor consumo, 16.942 kWh.

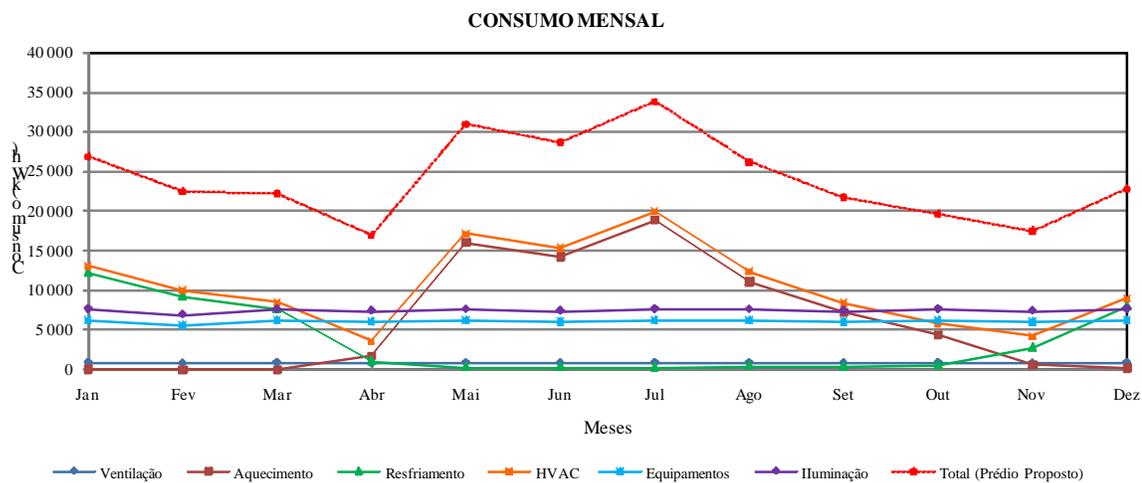


Figura 5.19. Consumo mensal de energia elétrica (caso 8)

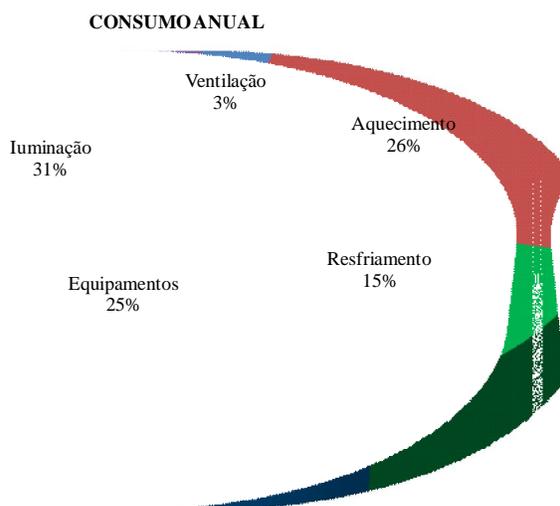


Figura 5.20. Consumo anual de energia elétrica para cada uso final (caso 8)

Na Tabela 5.41 está apresentado o consumo energético anual referente ao sistema de ar condicionado para cada zona simulada, com o objetivo de demonstrar o impacto de cada uma delas em relação ao consumo energético total da edificação. Nesta tabela também está citada o consumo anual por área (m<sup>2</sup>) de cada zona levando-se em conta o tamanho do ambiente, o que leva a uma avaliação mais equilibrada.

Tabela 5.41. Consumo energético anual por zona (caso 8 – prédio proposto 07)

Zona Térmica	Consumo referente ao sistema de ar condicionado (kWh/ano)	%	Área (m <sup>2</sup> )	kWh/ano/m <sup>2</sup>	% de redução referente ao sistema de ar condicionado entre o caso 1 e caso 8
A1A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 01)	1.647	7,24	54,63	30,14	55,67
A1B (Dormitório 01 do AP 01)	494,5	2,18	17,22	28,72	25,18
A1C (Dormitório 02 do AP 01)	412,7	1,82	14,56	28,34	21,98
A2A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 02)	1.542	6,78	54,63	28,23	57,62
A2B (Dormitório 01 do AP 02)	504,9	2,22	17,22	29,32	26,32
A2C (Dormitório 02 do AP 02)	537,4	2,36	14,56	36,91	27,50
A3A (Área de serviço, cozinha e sala do AP 03)	1.273	5,60	49,20	25,87	21,02
A3B (Dormitório 01 do AP 03)	810,4	3,56	24,94	32,49	24,26
L4 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L4)	1.563	6,87	48,17	32,44	62,55
L5 (Área de serviço, cozinha, sala e dormitório 01 do L5)	1.845	8,12	45,11	40,90	67,61
HA (Hall)	3.757	16,53	92,54	40,59	19,30
EG (Espaço gourmet)	1.039	4,57	31,30	33,18	27,90
AD (Administração)	261,2	1,15	10,63	24,58	40,03
SF (Salão de festas)	1.708	7,51	86,87	19,66	25,51
FT (Fitness)	5.340	23,49	46,51	114,81	73,83
Total do Prédio	127.010	100	4.038	31,45	49,55

onde: % é relação do consumo energético anual referente ao sistema de ar condicionado de cada zona em relação ao consumo referente ao sistema de ar condicionado de todas as zonas.

## 6. CERTIFICAÇÃO LEED™

### 6.1 Introdução

O capítulo anterior apresentou as simulações realizadas e as análises de cada uma delas, em relação às horas anuais não confortáveis para cada zona e o consumo energético anual da edificação para o sistema de condicionamento de ar, sistema de iluminação, e equipamentos em geral. Com base nos resultados obtidos com as simulações computacionais realizadas no *EnergyPlus* apresentados no capítulo 5. Neste capítulo foram verificados se o prédio proposto atende as exigências do pré-requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia do item *Energy & Atmosphere* e do crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality* da certificação LEED™ do tipo *Core and Shell*.

### 6.2 Avaliação do Desempenho Mínimo no Uso da Energia e de Conforto Térmico

Um dos objetivos do trabalho foi avaliar se o prédio escolhido para ser objeto deste estudo atende o pré-requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, do item *Energy & Atmosphere* e o crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality* da certificação LEED™ do tipo *Core and Shell*, sendo assim, neste capítulo serão descritos todos os itens exigidos neste pré-requisito e crédito e comparados com os resultados obtidos com as simulações realizadas.

A verificação se a edificação em estudo está atendendo o pré-requisito da certificação citados anteriormente foi escolhida das três possíveis opções de análises fornecidas pela certificação a opção 1 - Simulação Energética Total da Edificação. Esta opção tem como objetivo demonstrar um aumento no desempenho da edificação proposta comparada com a edificação *baseline* definida conforme a ASHRAE [2007], usando o *Building Performance Rating Method* no Apêndice G do *Standard*. Para a realização desta análise foram simulados o prédio *baseline* (caso 2), que atende a norma ASHRAE [2007] e os prédios propostos que foram simulados conforme o projeto arquitetônico e especificações do arquiteto (prédio proposto 01 – caso 1). Nas demais simulações (caso 3 ao caso 8) foram realizadas alterações nas características construtivas e nas dimensões das janelas do prédio proposto 01 para que a desempenho energético do mesmo atendesse as exigências do LEED™.

Para que a edificação proposta possa atender o pré-requisito do aspecto *Energy & Atmosphere* é exigido no protocolo que o prédio proposto reduza o consumo energético em relação à edificação *baseline* em 10%. Para verificação destes do pré-requisito o primeiro desafio

foi adaptar o prédio proposto 01 (caso 1) para o prédio *baseline* (caso 2). As alterações realizadas no prédio proposto 01 para o mesmo atender o prédio *baseline* da norma *ASHRAE* [2007] estão apresentados no item 5.4 Caso 2 – Prédio *Baseline*.

Com a finalização do prédio *baseline* (caso 2), foram realizadas diversas simulações, conforme apresentadas nos item 5.5 Caso 3 – prédio proposto 02 ao item 5.10 - Caso 8 – prédio proposto 07 (Caso Ótimo), e com os resultados obtidos em cada uma delas foram realizadas comparações no consumo energético anual de cada prédio simulado em relação ao prédio *baseline*. Na Figura 6.1 estão apresentadas as curvas do consumo energético anual das simulações que obtiveram melhores resultados em cada caso, sendo possível verificar que a única simulação que atende o pré-requisito avaliado neste trabalho do aspecto *Energy & Atmosphere* é o prédio proposto 8 (caso 9) que teve uma redução do consumo energético anual em 11,58% em relação ao consumo energético anual do prédio *baseline*.

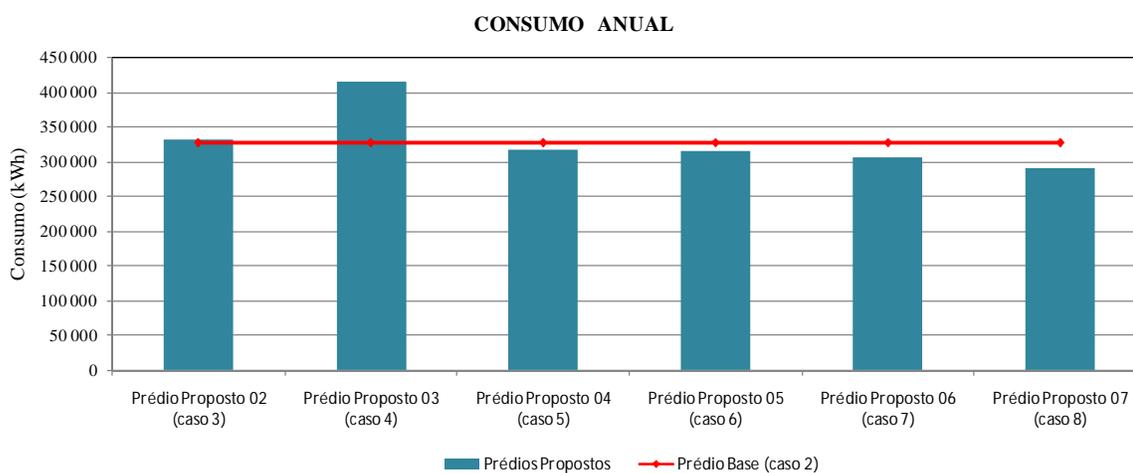


Figura 6.1. Consumo total anual de energia elétrica para o prédio *baseline* e das melhores simulações para cada caso simulado

A certificação *LEED*<sup>TM</sup> exige que os dados referentes à redução do consumo de energia elétrica entre o prédio proposto e prédio *baseline* seja apresentado como redução do custo (R\$) de energia elétrica. Foi verificado junto à concessionária de energia elétrica (CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica) responsável em fornecer energia à área a qual o prédio em estudo está sendo construído o valor da tarifa do consumo mensal (R\$/kWh). Na Tabela 6.1 estão apresentados os dados obtidos em relação ao custo de energia anual (R\$/kWh) para o prédio *baseline* e o prédio proposto e a porcentagem em relação à redução do custo de energia entre os dois prédios.

Tabela 6.1. Custo anual de energia (R\$) para o prédio *baseline* (caso 2) e o prédio proposto 07 (caso 8)

Tarifa (R\$/kWh)	Consumo prédio <i>baseline</i> (kWh/ano)	Consumo prédio <i>baseline</i> (R\$/ano)	Consumo prédio proposto (kWh/ano)	Consumo prédio proposto (R\$/ano)	%
0,4054	327.122,15	132.637,13	289.231,74	117.273,83	11,58

A tarifa (R\$/kWh) foi retirada da *home-page* da CEEE <http://www.ceee.com.br> está baseada na Resolução Homologatória da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) nº 895, de 20 de outubro de 2009, grupo B1 – classe residencial, que define os valores de tarifação para uso dos sistemas de distribuição (TUSD) e a tarifa de energia elétrica, entre outros fatores. Ressalta-se que o valor da tarifa utilizado não considera a taxa de PIS e COFINS, somente de ICMS (25%).

O valor obtido em relação à redução do custo de energia elétrica anual do prédio proposto em relação ao prédio *baseline* foi de R\$ 14.512, 97, sendo este valor 11,58% menor do custo de energia elétrica anual do prédio *baseline*. Com esta porcentagem em relação a redução do custo de energia elétrica anual o prédio proposto 07 (caso 8) continua atendendo a exigência do pré-requisito avaliado neste trabalho do aspecto *Energy & Atmosphere* da certificação *LEED*<sup>TM</sup>.

Além de verificar que o prédio proposto atende o pré-requisito do aspecto *Energy & Atmosphere* da certificação foi verificado se o mesmo também atende o crédito 7, Conforto Térmico do aspecto *Indoor Environmental Quality* da certificação *LEED*<sup>TM</sup>. Para atender este crédito o protocolo exige que o envelope e o sistema de condicionamento ambiental sugerido para prédio proposto tenham capacidade de satisfazer os critérios de conforto térmico estabelecidos na *ASHRAE* [2004a]. Para avaliar se cada ambiente do prédio proposto está de acordo com as exigências da *ASHRAE* [2004a] as horas não confortáveis anuais não podem ultrapassar de 300 horas. Para esta análise também foram utilizadas as simulações apresentadas nos item 5.5 Caso 3 – prédio proposto 02 ao item 5.10 - Caso 8 – prédio proposto 07 (Caso Ótimo)

Na Figura 6.2 é apresentada para cada zona simulada a quantidade de horas não confortáveis das 8.760 horas existentes no ano, isto é, que as temperaturas operativas ficaram superiores a 27,4 °C ou inferiores a 20,4°C. Com as alterações realizadas no caso 8 é possível verificar que todas as zonas estão atendendo a exigência da *ASHRAE* [2004a], no máximo 300 horas anuais não confortáveis.

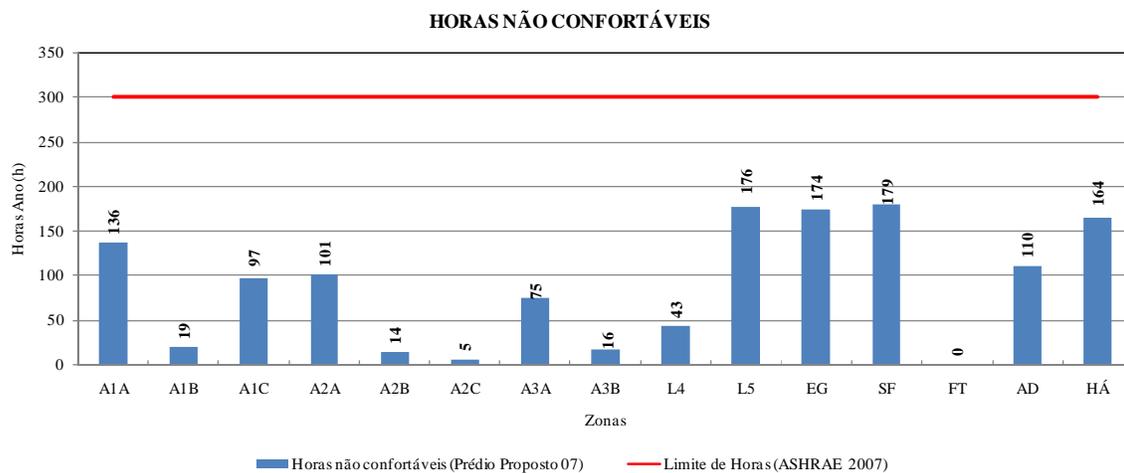


Figura 6.2. Horas anuais não confortáveis (caso 8)

Com base nos resultados obtidos em relação à redução do custo de energia comparado com o prédio *baseline* e as horas não confortáveis anuais com o prédio proposto 07 (caso 8) é possível verificar que os mesmos atendem as exigências do pré-requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, do item *Energy & Atmosphere* e do crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality* da certificação *LEED™* do tipo *Core and Shell*.

## 7. CONCLUSÃO

Devido às alterações na estrutura do setor elétrico e o aumento do valor das tarifas nos últimos anos, a construção civil iniciou o desenvolvimento de programas e projetos visando estabelecer uma conscientização para o uso eficiente da energia elétrica, como é o caso das construções verdes e sustentáveis (*green building*). Com intuito de avaliar se as construções verdes e sustentáveis funcionam de modo ambientalmente correto, o Conselho Norte-Americano de Construção Verde criou o selo *LEED*<sup>TM</sup> (*Leadership in Energy and Environmental Design*).

O foco de estudo deste trabalho foi de avaliar energeticamente uma edificação residencial, verificando se a mesma atende o pré - requisito 2, Desempenho Mínimo no Uso da Energia, do item *Energy & Atmosphere*, da certificação *LEED*<sup>TM</sup> do tipo *Core and Shell*, sendo escolhida das três possíveis opções de análises fornecidas pela certificação a opção 1 - Simulação Energética Total da Edificação. Devido ao fato do pré-requisito da certificação exigir que o prédio proposto reduza o custo com a energia elétrica anual em 10% em relação ao custo da energia elétrica anual do prédio *baseline*, foram realizadas simulações com o programa *EnergyPlus*, sendo uma simulação do prédio *baseline*, o qual atende a norma *ASHRAE* [2007] e 6 simulações de prédios propostos, onde um dos prédio foi simulado conforme o projeto inicial, isto é, com o projeto arquitetônico e especificações do arquiteto e os demais prédios propostos foram realizadas alterações nas características construtivas e nas dimensões das janelas do mesmo para que o seu desempenho energético atenda as exigências do *LEED*<sup>TM</sup>.

Para todos os casos simulados foram realizadas análises da redução do consumo de energia elétrica dos prédios propostos em relação ao prédio *baseline*. Estas análises foram baseadas nos resultados obtidos com as simulações realizadas no programa *EnergyPlus* e com a utilização dos arquivos climáticos de Porto Alegre.

Devido ao fato do elevado consumo energético da edificação em estudo estar diretamente relacionado ao uso do sistema de ar condicionado para proporcionar conforto térmico aos usuários, foram realizadas alterações construtivas e aplicações de materiais eficientes termicamente no prédio, com o objetivo de reduzir o consumo energético em relação ao sistema de ar condicionado.

Os parâmetros construtivos aplicados no prédio proposto que obteve o melhor resultado em relação à redução do consumo de energia elétrica estão descritos a seguir:

- Aplicação de poliestireno expandido de espessura de 2 cm nas paredes externas em todas as zonas térmicas;
- Aplicação de poliestireno expandido com 3 cm de espessura nas paredes internas da na zona térmica que apresentava desconforto pelo frio;

- Em todas as janelas foram utilizados vidros duplos e câmara de ar de 10 mm, sendo que para o vidro externo foi utilizado vidro laminado de 8 mm de alta *performance* e vidro interno foi aplicado o incolor de 3 mm de espessura;
- Nas janelas além da utilização de vidro de alta *performance* nos ambientes que apresentavam desconforto devido ao calor foram utilizados brises horizontais externos e nos ambientes que apresentaram desconforto pelo frio foram utilizadas cortinas internas. Nas janelas dos quartos foram mantidas as venezianas externas existentes no projeto arquitetônico, pois esta é uma exigência da Secretaria de Obras e Viação (SMOV) da Prefeitura de Porto Alegre.
- Aplicação de peitoris com altura de 1,10 m e 0,90 m em alvenaria nas janelas que possuíam maior área envidraçada, com o objetivo de reduzir a área de transmissão de carga térmica para o interior dos ambientes.

Além do atendimento do pré-requisito do item *Energy & Atmosphere*, com as alterações propostas ao prédio foi possível verificar que o mesmo também atende o crédito 7, Conforto Térmico, do item *Indoor Environmental Quality* da certificação *LEED™* do tipo *Core and Shell*. Esta análise foi realizada com base nos resultados obtidos com as simulações e com os parâmetros de conforto térmico descritos para a zona de conforto da *ASHRAE* [2004a]. Todas as zonas térmicas simuladas tiveram as horas não confortáveis em relação à temperatura operativa inferior a 300 horas anuais.

Para que o prédio proposto atendesse o pré-requisito e o crédito da certificação *LEED™* do tipo *Core and Shell* abordados neste trabalho, foram necessárias diversas alterações construtivas. Este fato se deve a que no projeto arquitetônico inicial da edificação em estudo estava previsto a aplicação de grandes áreas envidraçadas nas fachadas com utilização de vidros de baixa *performance*, permitindo assim, uma grande incidência de radiação solar no interior dos ambientes. Esta característica de projeto eleva o consumo de energia elétrica com o sistema de ar condicionado, uma vez que para proporcionar ao ambiente a temperatura do ar conforme programada no *set point* o sistema de *HVAC* dimensionado, necessita de aparelhos que supram uma elevada carga térmica, além de permanecerem ligados em boa parte das horas existentes durante o ano.

Outro fato relevante para a necessidade de realização de diversas alterações construtivas no prédio proposto é o fato de que para atender pré-requisito e o crédito da certificação *LEED™*, o mesmo necessita ser comparado com o prédio *baseline*, o qual é modulado conforme as exigências da norma *ASHRAE* [2007]. Para este prédio a norma exige a utilização de materiais com alta *performance*, limita a porcentagem de áreas envidraçadas voltadas para as fachadas, além

de que o os valores de consumo energético anual e as horas não confortáveis são calculados entre a média do prédio *baseline* orientado para o norte, sul, leste e oeste, tornando o prédio de alto desempenho energético.

Com base neste estudo foi possível verificar que a utilização de parâmetros construtivos eficientes termicamente permite construir empreendimentos que visam obter a certificação *LEED*<sup>TM</sup>. Contudo, vale ressaltar que a utilização desses parâmetros devem ser objetos de preocupação desde a fase de concepção do projeto, pois se solucionado na fase final pode aumentar os custos para a adaptação às exigências podendo inviabilizar a obtenção da certificação.

## **8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Estudo da viabilidade econômica para cada alteração construtiva sugerida;
- Utilização e avaliação de outros materiais construtivos;
- Realização das mesmas simulações com a aplicação de equipamentos de ar condicionado existentes no mercado;
- Comparação do conforto térmico no interior dos ambientes entre duas edificações de mesma função e localização, porém uma que obteve a certificação de prédios verdes e a outra não.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 2003 “Associação Brasileira de Normas Técnicas”. Projeto 02: 135.07-001 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro.

Afalo & Gasperi Arquitetos, 2007. “Edifícios de Escritórios em São Paulo e Rio de Janeiro” Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/aflalo-amp-gasperini-arquitetos-edificios-de-22-11-2007.html>>. Acesso em: 03/05/2009.

ASHRAE, 1989. “Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings” ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1989. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2001. “Chapter 27 - Climatic Design Information”. ASHRAE Fundamentals Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2003 - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Green Guide. Atlanta.

ASHRAE, 2004a. “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy” ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2005a. “Chapter 28 - Climatic Design Information”. ASHRAE Fundamentals Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2005b. “Chapter 8 – Termal Confort”. ASHRAE Fundamentals Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2007. “Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings” ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

Balestiere, J. A. P., 2002. “Cogeração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor”, Florianópolis.

Baltar, M. G., 2006. “Redução da Demanda de Energia Elétrica Utilizando Parâmetros Construtivos Visando ao Conforto Térmico”. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Beyer, P. O., 2005. “Apostila de Conforto Térmico”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRASIL, 2001. “DECRETO Nº 4.059, DE 19 DE DEZEMBRO DE 2001”. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/decreto4059.pdf>>. Acesso em 01/05/2009.

Canazio, A., 2007. “Edifícios comerciais vão ganhar etiqueta de eficiência energética”, Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/pci/main.asp?>>. Acesso em: 02/05/2009.

Cebrace, 2008. Fabricante de Vidros Companhia Brasileira de Cristal, *Dados Fornecidos pelo Fabricante*. São Paulo.

Correia, P., 2007a. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: “Pesquisa na Classe Residencial – AT. Ecoluz”. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/pci/main.asp>>. Acesso em: 01/05/2009.

Correia, P., 2007b. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: “Pesquisa na Classe Comercial – AT. Ecoluz”. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/pci/main.asp>>. Acesso em: 01/05/2009.

Correia, P., 2007c. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: “Pesquisa na Classe de Prédios Públicos – AT. Ecoluz”. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/pci/main.asp>>. Acesso em: 01/05/2009.

Correia, P., 2007d. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: “Pesquisa na Classe Industrial – AT. Ecoluz”. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>>. Acesso em: 01/05/2009.

Costa, E. C., 1974. “Física aplicada à Construção: Conforto Térmico”. Edgard Blücher, São Paulo.

EnergyPlus, 2009. “EnergyPlus Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, Version 3.1.0.027. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

Fernandes, A. E. P., 2001. “As Torres Envidraçadas e o Consumo Energético. II”. Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Gramado.

Frank, R., 2009. “Tecnologias sustentáveis podem reduzir em 60% o uso de energia nos edifícios até 2050”. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/sustentabilidade/tecnologias-sustentaveis-podem-reduzir-em-60-o-uso-de-energia-132666-.asp>>. Acesso em: 01/05/2009.

Frota, A. B., Schiffer, S. R., 2003. “Manual do Conforto Térmico. Stúdio Nobel”, São Paulo.

Goulart, S. V. G., 1993. “Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações em Florianópolis”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Grade, M., Lima, L., 2001 “Ambientes de Conforto e Consumo Energético. Departamento de Engenharia Mecânica, Seção de Ambiente e Energia”. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

Grings, E. T. O., 2003. “Comparação entre Resultados Computacionais e Experimentais do Comportamento Térmico de um Ambiente”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Henninger, R. H., Witte, M. J., Crawley, D. B., 2004. “Analytical and Comparative Testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test Suite, Energy and Buildings”.

Hunter Douglas, 2008. Fabricante de Cortinas e Persianas. Dados Fornecidos pelo Fabricante. São Paulo.

Lamberts, R., Ghisi, E., Abreu, A., Carlo, J., Batista, J., Marinoski, D., 2007. “Apostila de Desempenho Térmico de Edificações”. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Lamberts, R., Xavier, A. A. P., 2002. “Apostila de Conforto Térmico e Stress Térmico”. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. O. R., 1997. “Eficiência Energética na Arquitetura”. PW Editores, São Paulo.

Meier, A.; Olofsson, T.; Lamberts, R., 2002. “What Is an Energy-Efficiency Building?”. In: IX ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais.Foz do Iguaçu: ENTAC.

Melo, A. P., 2008. “Análise da iluminação natural calculada por meio do programa EnergyPlus”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Nakamura, J., 2007. “Soluções para Prover Conforto Térmico às Edificações Precisam se Conciliar com o Entorno e com a Demanda por Redução do Consumo de Energia”. Disponível em: <<http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/162/artigo60713-1.asp>>. Acesso em 01/05/2009.

Papst, A. L., 1999. “Uso de Inércia térmica no clima subtropical”. Estudo de caso em Florianópolis – SC. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Pereira, F. L., 2002. “Avaliação da Influência Termoenergética do Tipo de Vidro Utilizado na Envoltória de Edificações”. Monografia de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Pereira, F. L., 2005. “Determinação Computacional da Influência de Parâmetros Físicos no Comportamento Termoenergético de uma Edificação”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

“Plano Nacional de Energia 2030”. Ministério de Minas e Energia e Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2006/2007. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item.do?channelId=8213](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=8213)>. Acesso em 14/02/2006.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia, 1994. Manual de Conservação de Energia Elétrica – Prédios Públicos e Comerciais”. Eletrobrás.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia, 2007. “Pesquisa de Posse de equipamentos e Hábitos de Uso - Classe Residencial Relatório Brasil”. Eletrobrás.

Procel, 2009. Disponível em: [http://www.procel.gov.br/procel170406/preview/oprograma/apresentacao\\_introducao.asp](http://www.procel.gov.br/procel170406/preview/oprograma/apresentacao_introducao.asp). Acesso em: 01/05/2009.

Ramos, G., 2007. “Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais”, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

“Resenha Energética Brasileira – Resultados Finais de 2007”. Ministério de Minas Energia, 2008. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 14/04/2009.

Rivero, R., 1986. “Acondicionamento Térmico Natural: Arquitetura e Clima. D. C”. Luzzatto Editores, Porto Alegre.

Santos, R. F., 2002. “A Arquitetura e a Eficiência nos Usos Finais da Energia para o Conforto Ambiental”. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (IEE/EP/IF/FEA) da Universidade de São Paulo. Área de Concentração: Energia. São Paulo.

Sattler, M. A., 2005. “Apostila de Conforto Ambiental”. Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Silva, F. D. L., 2008. “Análise de uma simulação computacional de um ambiente climatizado alimentado pela rede elétrica convencional e por painéis solares fotovoltaicos”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Silva, V. G., Silva, M. G., Vahan, A., 2003. “Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade”. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 7-18.

USGBC, 1996. “LEED (Leadership in Energy and Environmental Design): Environmental building rating system criteria”. U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. San Francisco: USGBC,.(Third Ballot Draft, Appendix 1: Scoring Statements & Related Information for Sub-Criterion).

USGBC, 2009. “LEED for Core and Shell (LEED-NC)” Version 3.0. U.S. Green Building Council. Washington. Acesso em 03/08/2009.

Veloso, M. D., Elali, G. A., 2004. “Uma Avaliação da Eficiência Energética em Edificações Hoteleiras”. Natal.

Verdi, R. E., 2003. “Análise Termo-Energética de um Prédio Comercial”. Monografia de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Wallauer, M., 2003. “Utilização do Programa EnergyPlus para a Simulação do Conforto Térmico em Edificações Populares em Quatro Capitais Brasileiras”. Dissertação de Mestrado –

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.