

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

DETERMINAÇÃO COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS
NO COMPORTAMENTO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO

por

Fábyo Luiz Pereira

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2005

DETERMINAÇÃO COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS
NO COMPORTAMENTO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO

por

Fábyo Luiz Pereira
Engenheiro Mecânico

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 a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Aprovada por:

Prof. Dr. Arno Krenzinger – PROMEC/UFRGS

Prof. PhD. Flávio Horowitz – PPGFís/UFRGS

Prof. Dr. Nathan Mendes – PPGEM/PUCPR

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 28 de junho de 2005

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz Carlos e Elizabete, pelos anos dedicados à construção de meu caráter, e por ter colocado a educação escolar minha e de meus irmãos acima de tudo, mesmo tendo sacrificado alguns sonhos; e aos meus irmãos Carlos Eduardo e Luiz Fernando, pelos laços de afeto, amizade e respeito que nos unem.

*Agradeço ao meu professor orientador Paulo Otto Beyer, por me ensinar;
aos amigos do Lafrig, pelo convívio diário nos últimos três anos;
à minha tia Elizete, pela companhia ao longo destes sete anos;
aos amigos Kehl, Otto, Schimia e Fabi, por estarem sempre presentes;
à família Cavazzotto: Antônio, Lourdes, Alencar e Kari, pela acolhida;
aos membros da banca, demonstrando interesse na aceitação do convite;
e à CAPES e CNPq, por tornar possível este trabalho, financiando-o.*

*"No rancho sobre a coxilha
contemplando a várzea infinda
tenho a xirua mais linda
do que a flor da maçanilha
deixo que a Lua se estenda
e o mundo fica pequeno
enquanto bebo o sereno
nos lábios da minha prenda"*

Jayme Caetano Braun & Luiz Marengo

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência que alguns parâmetros físicos têm no desempenho termoenergético de uma edificação com um sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta, e visa auxiliar na busca por soluções que aumentem a eficiência energética das construções brasileiras.

Para tal foi utilizado o programa simulador *EnergyPlus*, onde são estudados casos em que se alteram os seguintes parâmetros físicos: localização geográfica, tipo de vidro utilizado nas fachadas, área envidraçada das fachadas, e a orientação da edificação em relação ao eixo norte verdadeiro. São usados dados de dias de projeto de verão e inverno segundo a *ASHRAE* (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) para obter cargas térmicas de refrigeração e aquecimento, e arquivos climáticos para obter os seguintes consumos elétricos anuais: do sistema de condicionamento de ar, das lâmpadas e total.

Visando reduzir o consumo elétrico das lâmpadas da edificação e assim promover um uso racional da energia elétrica, é modelado um sistema de controle automático da potência das lâmpadas, o qual é comparado com o tradicional sistema liga/desliga das lâmpadas. Também é feita uma análise econômica comparativa entre estes dois tipos de controle de potência das lâmpadas, onde se verifica se há vantagem econômica em aliar a utilização de películas nos vidros das fachadas da edificação.

O estresse térmico em vidros, caracterizado pelo surgimento de trincas ou até mesmo ruptura devido ao aparecimento de consideráveis diferenças de temperatura em seu interior, é avaliado observando a evolução da temperatura média das faces externa e interna dos vidros ao longo de um dia de projeto de verão.

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; o sistema de controle automático da potência das lâmpadas revela um grande potencial de redução do consumo elétrico anual das lâmpadas e um pequeno potencial de redução da potência requerida pelo sistema de condicionamento de ar; 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 mostra diferenças significativas.

Palavras-chave: *EnergyPlus*, simulação, potência do sistema de condicionamento de ar, consumo elétrico, vidro/película.

ABSTRACT

“Computational Determination of Physical Parameters Influence on Building Thermoenergetic Behavior”

This work presents a study on the influence that some physical parameters have on thermoenergetic performance of a building with a direct expansion conditioning air system, and aims at searching for solutions that increase Brazilian building energetic efficiency.

For such purpose the simulation software *EnergyPlus* was used, in which it is analyzed cases about the changes on the following physical parameters: geographical site, glazing type used in facades, facades glazing area, and the building orientation in relation to the true north axis. Summer and winter design days data according to *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)* are used to obtain cooling and heating thermal loads, and weather files to obtain the following annual electric consumptions: *HVAC*, lighting and total.

Aiming at decreasing the building lighting electricity consumption in order to promote an electrical energy rational use, it is modeled a daylight-linked lighting control system, which is compared to the traditional on/off lighting control system. It is also performed a comparative economic analysis between both lighting control systems, in which economic advantage occurrence is verified when window film is used on the building glazing facades.

Glazing thermal stress, characterized by fissure emergence or even break due to considerable internal temperature gradients appearance, is evaluated by observing back and front side glazing mean temperatures throughout a summer design day.

Results show that orientations and glazing types modify significantly the *HVAC* required power as much as the annual electric consumptions from *HVAC*, lighting and total; daylight-linked lighting control system reveals a great decreasing potential in lighting annual electric consumption and a little decreasing potential in the *HVAC* required power; economic analysis shows that glazing window film use is economically viable in many studied cases; and the comparison of back side glazing mean temperatures shows significant differences.

Keywords: *EnergyPlus*, simulation, *HVAC* power, electrical consumption, glass/windowfilm.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO	2
1.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	4
1.2.1. Importância da Política de Eficiência Energética	5
1.2.2. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica	6
1.2.3. Legislação Brasileira sobre Eficiência Energética	7
1.2.4. Potencial de Economia Brasileiro	8
1.3. MOTIVAÇÃO	9
1.4. JUSTIFICATIVA	10
1.5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.6. OBJETIVOS	11
1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. VALIDAÇÃO DE PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAIS	14
2.1.1. O método BESTEST	15
2.1.1.1. Objetivos do IEA SHC Task 12	16
2.1.1.2. Casos Disponíveis	16
2.1.1.3. Programas de Simulação Testados	17
2.1.2. O método HVAC BESTEST	17
2.1.2.1. Objetivos do IEA SHC Task 22	18
2.1.2.2. Casos Disponíveis	18
2.1.2.3. Programas de Simulação Testados	19
2.2. RESUMOS DE TRABALHOS	20
2.2.1. Trabalhos que Usam o EnergyPlus	20
2.2.1.1. Trabalhos que Validam o EnergyPlus	20
2.2.1.2. Outros Trabalhos que utilizam o EnergyPlus	24
2.2.2. Trabalhos que Utilizam as Metodologias de Validação Apresentadas	27
2.2.3. Trabalhos que Enfocam Vidros	29
2.2.4. Trabalhos que Adotam Conceitos de Eficiência Energética	31
2.2.5. Outros Trabalhos	32
3. CONCEITOS	34
3.1. CONFORTO TÉRMICO	34
3.2. VOTO MÉDIO ESTIMADO E PORCENTAGEM ESTIMADA DE INSATISFEITOS	35
3.3. RADIAÇÃO TÉRMICA	36
3.4. ESTRESSE TÉRMICO EM VIDROS	37
3.4.1. Definição	37
3.4.2. Fatores Causadores	37

3.4.3. Características e Tipos de Trincas.....	38
4. PROGRAMA SIMULADOR UTILIZADO	39
4.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	39
4.1.1. Características	40
4.1.2. Algoritmos de Solução	41
4.2. BALANÇO ENERGÉTICO NAS ZONAS TÉRMICAS.....	42
4.3. MODELAGEM DE PAREDES	43
4.3.1. Balanço Energético na Superfície Externa.....	44
4.3.2. Balanço Energético na Superfície Interna.....	45
4.4. MODELAGEM DE JANELAS	46
4.4.1. Hipóteses Assumidas.....	46
4.4.2. Propriedades Óticas dos Vidros	46
4.4.2.1. Cálculo das Médias Espectrais.....	47
4.4.2.2. Cálculo da Dependência Angular.....	50
4.4.2.3. Cálculo dos Valores Hemisféricos	52
4.4.3. Balanço Energético nos Vidros	53
4.4.4. Radiação Absorvida	54
4.5. MODELAGEM DA ILUMINAÇÃO NATURAL	55
4.5.1. Fluxo Transmitido do Céu e do Solo	55
4.5.2. Fluxo Transmitido Diretamente do Sol.....	56
4.5.3. Claridade de Desconforto da Iluminação Natural.....	57
5. SIMULAÇÕES	58
5.1. EDIFICAÇÃO SIMULADA	58
5.1.1. Zonas Térmicas	59
5.1.2. Geração de Calor.....	59
5.1.3. Sistema de Condicionamento de Ar.....	60
5.1.3.1. Refrigeração	61
5.1.3.2. Aquecimento	61
5.1.4. Elementos Construtivos.....	61
5.2. PARÂMETROS AVALIADOS	63
5.2.1. Tipos de Vidros	63
5.2.2. Área Envidraçada das Fachadas.....	65
5.2.3. Localizações Geográficas.....	66
5.2.4. Orientações da Edificação.....	68
5.3. TIPOS DE PERÍODOS SIMULADOS	68
5.3.1. Dias de Projeto	69
5.3.2. Arquivos Climáticos.....	71
5.4. TIPOS DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL SIMULADOS	72
5.4.1. Iluminação Contínua	72
5.4.2. Iluminação Programada.....	72

5.5. NÚMERO DE SIMULAÇÕES	74
6. RESULTADOS E ANÁLISES	75
6.1. ILUMINAÇÃO CONTÍNUA.....	76
6.1.1. Porto Alegre – RS	76
6.1.2. Belém – PA	82
6.1.3. Brasília – DF	84
6.1.4. Recife – PE.....	86
6.1.5. São Paulo – SP	88
6.2. ILUMINAÇÃO PROGRAMADA.....	90
6.3. ANÁLISE ECONÔMICA	97
6.3.1. Potencial de Redução de Custos.....	98
6.3.2. Análise do Caso com Maior Custo Inicial	100
6.3.3. Análise do Caso com Maior Custo Operacional Anual	102
6.4. CONFORTO TÉRMICO	105
6.5. TEMPERATURA SUPERFICIAL DOS VIDROS.....	110
6.6. CARGA TÉRMICA DA EDIFICAÇÃO X POTÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO	115
7. CONCLUSÕES	119
8. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS	132
APÊNDICES.....	135
APÊNDICE A – ROTEIRO PARA CÁLCULO DO PMV E DO PPD	135
A.1. Dados de Entrada e Conversões de Unidades	135
A.2. Roteiro de Cálculo.....	136
A.2.1. Pressões e Vestimenta	136
A.2.2. Geração e Dissipação de Calor no Corpo Humano.....	136
A.2.3. Cálculo do PMV e PPD.....	141
APÊNDICE B – RESPOSTA ÓTICA DO OLHO HUMANO À LUZ.....	143
APÊNDICE C – RESOLVENDO AS EQUAÇÕES DE BALANÇO ENERGÉTICO DOS VIDROS	145
APÊNDICE D – POTÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO DE PICO POR ZONA.....	146
D.1. Iluminação Contínua	146
D.1.1. Porto Alegre – RS.....	146
D.1.2. Belém – PA	148
D.1.3. Brasília – DF	150
D.1.4. Recife – PE.....	152
D.1.5. São Paulo – SP	154
D.2. Iluminação Programada.....	156
D.2.1. Porto Alegre – RS.....	156
APÊNDICE E – O MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO	158

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{si}	Área da superfície i	[m ²]
A_{jan}	Área envidraçada da janela	[m ²]
C	Taxa de dissipação de calor sensível convectiva na pele	[W/m ²]
C_0	Custo inicial	[R\$]
$C_{p,m}$	Calor específico do material	[J/kg.K]
$C_{p,z}$	Calor específico do ar da zona	[J/kg.K]
$C_{p,i}$	Calor específico do ar da zona i	[J/kg.K]
C_{resp}	Taxa de dissipação de calor sensível convectivo na respiração	[W/m ²]
C_t	Fluxo de caixa no período t	[R\$]
d	Espessura do vidro	[m] ou [mm]
d_m	Espessura do material	[mm]
D	Direção do vento	[°]
E_{dn}	Iluminância solar direta incidente em direção normal à vidraça	[lux]
E_{dif}	Taxa de dissipação de calor latente por difusão na pele	[W/m ²]
E_{resp}	Taxa de dissipação de calor latente evaporativo na respiração	[W/m ²]
E_{transp}	Taxa de dissipação de calor latente por transpiração na pele	[W/m ²]
f_{acr}	Fator de área corpórea radiante	[]
f_{sunlit}	Fração da vidraça que é iluminada pelo Sol	[]
f_{vest}	Fator de vestimenta	[]
G	Constante de claridade de desconforto	[]
G_I	Índice de claridade	[]
G_{lw}^{in}	Radiação de onda longa incidente na face interna do vidro	[W/m ²]
G_{lw}^{out}	Radiação de onda longa incidente na face externa do vidro	[W/m ²]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .K]
h_{cn}	Coefficiente de transferência de calor por convecção natural	[W/m ² .K]
h_{cf}	Coefficiente de transferência de calor por convecção forçada	[W/m ² .K]
$h_{c,in}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção na face interna do vidro	[W/m ² .K]
$h_{c,out}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção na face externa do vidro	[W/m ² .K]
$h_{c,si}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção na superfície i	[W/m ² .K]
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação	[W/m ² .K]
H	Taxa de geração interna de calor de uma pessoa	[W/m ²]
i	Taxa de desconto anual	[%]

$I_b(\lambda, T)$	Intensidade da radiação emitida por um corpo negro	[W/m ² .sr]
$I_{bm}(\lambda)$	Irradiância solar espectral direta	[W/m ² .μm]
I_{bm}^{out}	Intensidade de radiação solar direta normal à face externa do vidro	[W/m ²]
I_{dif}^{out}	Intensidade de radiação solar difusa incidente na face externa do vidro	[W/m ²]
I_{sw}^{in}	Intensidade de radiação de onda curta incidente na face interna do vidro	[W/m ²]
I_{vest}	Resistência térmica da vestimenta	[clo]
k	Condutividade térmica do vidro	[W/m.K]
k'	Condutividade térmica linearizada do vidro	[W/m ² .K]
L	Soma de todas as dissipações de calor pelo corpo humano	[W/m ²]
$L(\theta, \varphi)$	Luminosidade de um elemento do céu ou do solo em (θ, φ)	[cd/m ²]
L_b	Iluminação da área da vizinhança externa ao redor da janela	[cd/m ²]
L_w	Iluminação média da janela observada do ponto de referência	[cd/m ²]
\dot{m}_i	Vazão mássica de ar da zona i	[kg/s]
\dot{m}_{inf}	Vazão mássica de ar de infiltração	[kg/s]
\dot{m}_{sys}	Vazão mássica de ar pelo sistema de HVAC	[kg/s]
M	Taxa metabólica da pessoa	[met]
n	Índice de refração	[]
n_{jan}	Número de janelas	[]
P_{sk}	Pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da pele para conforto	[Torr]
p_w	Pressão parcial do vapor d'água	[Pa]
p_{ws}	Pressão de saturação do vapor d'água	[Pa]
P	Pressão atmosférica local	[kPa]
$P(\varphi)$	Propriedade função angular (transmitância ou refletância)	[]
$P(\lambda)$	Propriedade função espectral (transmitância ou refletância)	[]
P_{hem}	Propriedade hemisférica (transmitância ou refletância)	[]
P_s	Média espectral de uma propriedade solar	[]
P_v	Média espectral de uma propriedade visual	[]
PMV	Voto médio estimado	[]
PPD	Porcentagem estimada de insatisfeitos	[%]
q_{csol}''	Fluxo de radiação solar difusa e direta absorvida (onda curta)	[W/m ²]
q_c''	Fluxo de calor convectivo trocado pela superfície com o ar	[W/m ²]
q_{ki}''	Fluxo de calor condutivo para o interior através da parede	[W/m ²]
$q_{ki}''(t)$	Fluxo de calor condutivo para o interior, na face interna da parede	[W/m ²]
q_{ko}''	Fluxo de calor condutivo do exterior através da parede	[W/m ²]

$\dot{q}_{ko}''(t)$	Fluxo de calor condutivo do exterior, na face externa da parede	[W/m ²]
\dot{q}_{lwr}''	Fluxo de radiação de onda longa trocada entre a superfície e seu entorno (ar, céu, solo, vegetação, etc)	[W/m ²]
\dot{q}_{lws}''	Fluxo de radiação de onda longa dos equipamentos da zona para a superfície	[W/m ²]
\dot{q}_{lwx}''	Fluxo de radiação de onda longa entre as superfícies da zona	[W/m ²]
\dot{q}_{sol}''	Fluxo de radiação solar transmitida, absorvida pela superfície	[W/m ²]
\dot{q}_{sw}''	Fluxo de radiação de onda curta das luzes para a superfície	[W/m ²]
\dot{Q}_{si}	Carga térmica interna convectiva da superfície <i>i</i>	[W]
\dot{Q}_{load}	Carga térmica líquida da zona	[W]
\dot{Q}_{sys}	Potência do sistema de <i>HVAC</i>	[W]
<i>R</i>	Taxa de dissipação de calor sensível radiante na pele	[W/m ²]
<i>R</i> (0)	Refletância na incidência normal	[]
<i>R</i> (φ)	Refletância função angular	[]
<i>R</i> (λ)	Refletância espectral normal	[]
<i>R</i> _{ph} (λ)	Resposta ótica do olho humano à luz, ou resposta fotópica	[]
<i>R</i> _s	Refletância solar	[]
<i>R</i> _v	Refletância visível	[]
<i>S</i> _{<i>i</i>}	Radiação de onda curta e onda longa absorvida pela face <i>i</i>	[W/m ²]
<i>t</i>	Número de períodos (<i>de 1 até T</i>)	[anos]
<i>T</i> (0)	Transmitância na incidência normal	[]
<i>T</i> (φ)	Transmitância função angular	[]
<i>T</i> (λ)	Transmitância espectral normal	[]
<i>T</i> _{bs}	Temperatura de bulbo seco	[°C]
<i>T</i> _{bu}	Temperatura de bulbo úmido	[°C]
<i>T</i> _{<i>i</i>}	Temperatura da face interna da parede	[K]
<i>T</i> _{in}	Temperatura do ar interior	[K]
<i>T</i> _{ir}	Transmitância no infravermelho	[]
<i>T</i> _{<i>j</i>}	Temperatura da face <i>j</i>	[K]
<i>T</i> _{<i>o</i>}	Temperatura da face externa da parede	[K]
<i>T</i> _{out}	Temperatura do ar exterior	[K]
<i>T</i> _{p,conf}	Temperatura da pele para conforto	[°C]
<i>T</i> _r	Temperatura média radiante	[°C]
<i>T</i> _s	Transmitância solar	[]
<i>T</i> _{<i>si</i>}	Temperatura da superfície <i>i</i>	[K]

T_{sup}	Temperatura do ar de insuflamento	[K]
T_v	Transmitância visível	[]
T_{vest}	Temperatura da vestimenta da pessoa	[K]
$T_{vest,prov}$	Temperatura provisória da vestimenta da pessoa	[°C]
T_z	Temperatura média do ar da zona	[K]
T_{zi}	Temperatura média do ar da zona i	[K]
T_{∞}	Temperatura ambiente do ar exterior	[K]
u	Velocidade do ar	[m/s]
$u_{máx}$	Velocidade máxima do vento	[m/s]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
VPL	Valor presente líquido	[R\$]
W_{ext}	Taxa de trabalho externo realizado pela pessoa	[W/m ²]
X_j	Coefficiente de fator de resposta externo da CTF ($j = 0, 1, \dots, nz$)	[]
Y_j	Coefficiente de fator de resposta transversal da CTF ($j = 0, 1, \dots, nz$)	[]
Z_j	Coefficiente de fator de resposta interno da CTF ($j = 0, 1, \dots, nz$)	[]

SÍMBOLOS GREGOS

α	Coefficiente de absorção espectral	[m ⁻¹]
$\alpha^{f,dif}$	Absortividade solar difusa na face externa do vidro	[]
$\alpha^{b,dif}$	Absortividade solar difusa na face interna do vidro	[]
α_s	Absortividade solar	[]
α_t	Absortividade térmica	[]
α_v	Absortividade visível	[]
β	Ângulo de incidência da luz de um elemento do céu ou do solo no centro da janela	[rad]
ΔT	Amplitude da variação da temperatura de bulbo seco	[°C]
ε	Emissividade da pele	[]
$\varepsilon_{hem,ir}(T)$	Emissividade hemisférica no infravermelho	[]
ε_i	Emissividade de onda longa na face i	[]
$\varepsilon_{\lambda,ir}(\lambda, T)$	Emissividade espectral hemisférica no infravermelho	[]
$\varepsilon_{\lambda,ir}(\lambda, \theta, \varphi, T)$	Emissividade espectral direcional no infravermelho	[]
φ	Ângulo de altitude de um elemento do céu ou do solo ou ângulo de incidência da radiação no vidro	[rad]
φ'	Ângulo de refração da radiação no interior do vidro	[rad]

φ_{jan}	Ângulo que a normal da janela faz com o plano horizontal externo	[rad]
Φ	Fluxo transmitido vindo diretamente do Sol	[lm]
$\Phi_{CW,unshaded}$	Fluxo ascendente transmitido através de uma janela sem sombreamento	[lm]
$\Phi_{FW,unshaded}$	Fluxo descendente transmitido através de uma janela sem sombreamento	[lm]
Φ_{inc}	Fluxo incidente na vidraça vindo diretamente do Sol	[lm]
Φ_j	Coefficiente de fator de resposta de fluxo da <i>CTF</i> ($j = 0, 1, \dots, nz$)	[]
$d\Phi$	Fluxo luminoso de um elemento do céu ou do solo transmitido pela janela	[lm]
$d\Phi_{inc}$	Fluxo luminoso de um elemento do céu ou do solo incidente na janela	[lm]
κ	Condutividade térmica do material	[W/m.K]
λ	Comprimento de onda	[μm]
μ	Eficiência mecânica	[%]
θ	Ângulo de azimute de um elemento do céu ou do solo	[rad]
ρ	Densidade do material	[kg/m ³]
$\rho(\varphi)$	Refletividade função angular	[]
$\bar{\rho}_{bnz}$	Coefficiente polinomial de refletividade para vidro bronze	[]
$\bar{\rho}_{bnz}(\varphi)$	Refletividade angular do vidro bronze	[]
$\bar{\rho}_{clr}$	Coefficiente polinomial de refletividade para vidro claro	[]
$\bar{\rho}_{clr}(\varphi)$	Refletividade angular do vidro claro	[]
$\bar{\rho}_l$	Coefficientes polinomiais de refletividade ($l = 0 \text{ à } 4$)	[]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
$\tau(\beta)$	Transmissividade do vidro para a luz incidindo num ângulo β	[]
$\tau(\varphi)$	Transmissividade função angular	[]
$\bar{\tau}_{bnz}$	Coefficiente polinomial de transmissividade para vidro bronze	[]
$\bar{\tau}_{bnz}(\varphi)$	Transmissividade angular do vidro bronze	[]
$\bar{\tau}_{clr}$	Coefficiente polinomial de transmissividade para vidro claro	[]
$\bar{\tau}_{clr}(\varphi)$	Transmissividade angular do vidro claro	[]
$\bar{\tau}_l$	Coefficientes polinomiais de transmissividade	[]
$\tau_{net}(\beta)$	Transmissividade líquida do vidro	[]
ω	Ângulo sólido subentendido pela janela em relação ao ponto de referência, modificado para fazer com que a direção da vista do ocupante seja considerada	[sr]
Ω	Ângulo sólido subentendido pela janela em relação ao ponto de referência	[sr]

SUBÍNDICES

<i>0</i>	Inicial
∞	Ambiente do ar exterior
<i>asol</i>	Absorção de radiação solar difusa e direta
<i>a</i>	Amostra de vidro
<i>avr</i>	Área de vestimenta radiante
<i>b</i>	Vizinhança
<i>bm</i>	Direta
<i>bnz</i>	Bronze
<i>bs</i>	Bulbo seco
<i>bu</i>	Bulbo úmido
<i>c</i>	Convecção
<i>cf</i>	Convecção forçada
<i>clr</i>	Claro
<i>cn</i>	Convecção natural
<i>CW,unshaded</i>	Ascendente transmitido através da janela, sem sombreamento
<i>dif</i>	Difusão / Difusa
<i>dn</i>	Direta normal
<i>e</i>	Espelho
<i>ext</i>	Externo
<i>FW,unshaded</i>	Descendente transmitido através da janela, sem sombreamento
<i>hem</i>	Hemisférica
<i>hem,ir</i>	Hemisférica no infravermelho
<i>i</i>	Face ou zona <i>i</i> / Face interna
<i>inc</i>	Incidente
<i>I</i>	Índice
<i>in</i>	Interior
<i>inf</i>	Infiltração
<i>ir</i>	Infravermelho
<i>j</i>	Face ou zona <i>j</i>
<i>jan</i>	Janela
<i>ki</i>	Condutivo para o interior
<i>ko</i>	Condutivo do exterior
<i>l</i>	Subíndice do coeficiente polinomial
<i>load</i>	Carga líquida
<i>lw</i>	Onda longa
<i>lwr</i>	Radiação de onda longa trocada entre a superfície e seu entorno
<i>lws</i>	Radiação de onda longa dos equipamentos da zona para a superfície
<i>lwx</i>	Radiação de onda longa trocada entre superfícies
<i>m</i>	Material
<i>máx</i>	Máxima
<i>net</i>	Líquida

<i>o</i>	Face externa
<i>out</i>	Exterior
<i>p</i>	Específico
<i>p,conf</i>	Pele, conforto
<i>r</i>	Radiação
<i>resp</i>	Respiração
<i>s</i>	Solar
<i>si</i>	Superfície <i>i</i>
<i>sk</i>	Pele
<i>sol</i>	Radiação solar transmitida, absorvida pela superfície
<i>sunlit</i>	Iluminada pelo Sol
<i>sup</i>	Ar de insuflamento
<i>sw</i>	Onda curta
<i>sys</i>	Sistema de condicionamento de ar
<i>t</i>	Período <i>t</i> / Térmica
<i>transp</i>	Transpiração
<i>v</i>	Visível
<i>vest</i>	Vestimenta
<i>vest,prov</i>	Vestimenta, provisória
<i>w</i>	Vapor d'água
<i>ws</i>	Saturação do vapor d'água
<i>z</i>	Zona
<i>zi</i>	Zona <i>i</i>

SUPERÍNDICES

\cdot	Taxa
'	Linearizada / Refração
"	Fluxo
<i>b,dif</i>	Difusa na face interna
<i>f,dif</i>	Difusa na face externa
<i>in</i>	Interior
<i>out</i>	Exterior

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Divisão da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil em 2003.	2
Figura 1.2. Evolução da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil.	3
Figura 1.3. Comparativo entre estruturas da oferta de eletricidade no Brasil e no mundo.	3
Figura 2.1. Alguns dos casos da metodologia <i>BESTEST</i> testados no <i>EnergyPlus</i>	17
Figura 2.2. Caso base do <i>HVAC BESTEST</i>	19
Figura 2.3. <i>BESTEST</i> – Comparação do consumo anual de aquecimento de alguns casos.	20
Figura 2.4. <i>BESTEST</i> – Comparação do consumo anual de refrigeração de alguns casos.	21
Figura 2.5. <i>BESTEST</i> – Comparação da potência de aquecimento de pico de alguns casos.	21
Figura 2.6. <i>BESTEST</i> – Comparação da potência de refrigeração de pico de alguns casos.	21
Figura 2.7. <i>HVAC BESTEST</i> – Consumo anual de refrigeração da carga térmica sensível.	22
Figura 2.8. <i>HVAC BESTEST</i> – Consumo anual de refrigeração da carga térmica latente.	22
Figura 2.9. <i>HVAC BESTEST</i> – Consumo anual de refrigeração da carga térmica total.	23
Figura 3.1. Espectro da radiação eletromagnética.	36
Figura 3.2. Características das trincas em vidros.	38
Figura 4.1. Representação dos fluxos energéticos na superfície externa de uma parede.	44
Figura 4.2. Representação dos fluxos energéticos na superfície interna de uma parede.	45
Figura 4.3. Variáveis usadas nas equações de balanço de calor.	53
Figura 5.1. Vistas da edificação: superior (a), lateral (b), e isométrica (c).	58
Figura 5.2. Indicação das quatro zonas térmicas da edificação.	59
Figura 5.3. Configurações de áreas envidraçadas das fachadas simuladas no prédio.	65
Figura 5.4. Mapa das divisões climáticas brasileiras com a localização das cidades simuladas.	66
Figura 5.5. Vista superior representando a edificação e mostrando as orientações simuladas.	68
Figura 5.6. Evolução diária da temperatura de bulbo seco externa.	70
Figura 5.7. Vista superior mostrando a localização dos sensores de iluminância.	73
Figura 6.1. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 1/3.	77
Figura 6.2. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 2/3.	77
Figura 6.3. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.	77
Figura 6.4. Porto Alegre – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.	78
Figura 6.5. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de <i>HVAC</i> no prédio 1/3.	80
Figura 6.6. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de <i>HVAC</i> no prédio 2/3.	80
Figura 6.7. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de <i>HVAC</i> no prédio 3/3.	80
Figura 6.8. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 1/3.	81
Figura 6.9. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 2/3.	81
Figura 6.10. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.	81
Figura 6.11. Belém – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.	83
Figura 6.12. Belém – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.	83
Figura 6.13. Brasília – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.	84

Figura 6.14. Brasília – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.	85
Figura 6.15. Brasília – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.	86
Figura 6.16. Recife – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.	86
Figura 6.17. Recife – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.	87
Figura 6.18. São Paulo – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.	88
Figura 6.19. São Paulo – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.	89
Figura 6.20. São Paulo – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.	89
Figura 6.21. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 1/3.	90
Figura 6.22. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 2/3.	91
Figura 6.23. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.	91
Figura 6.24. Porto Alegre – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.	92
Figura 6.25. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de <i>HVAC</i> no prédio 1/3.	92
Figura 6.26. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de <i>HVAC</i> no prédio 2/3.	93
Figura 6.27. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de <i>HVAC</i> no prédio 3/3.	93
Figura 6.28. Porto Alegre – Consumo elétrico anual das lâmpadas no prédio 1/3.	94
Figura 6.29. Porto Alegre – Consumo elétrico anual das lâmpadas no prédio 2/3.	94
Figura 6.30. Porto Alegre – Consumo elétrico anual das lâmpadas no prédio 3/3.	95
Figura 6.31. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 1/3.	96
Figura 6.32. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 2/3.	96
Figura 6.33. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.	96
Figura 6.34. Prédio 3/3 na orientação 270° e indicação das zonas térmicas.	106
Figura 6.35. Prédio 1/3 – Evolução do <i>PMV</i> : V1 (esquerda), V7 (direita).	106
Figura 6.36. Prédio 2/3 – Evolução do <i>PMV</i> : V1 (esquerda), V7 (direita).	106
Figura 6.37. Prédio 3/3 – Evolução do <i>PMV</i> : V1 (esquerda), V7 (direita).	107
Figura 6.38. Prédio 3/3 – Temperatura média das superfícies internas das zonas Z1 e Z3.	108
Figura 6.39. Prédio 3/3 – Temperatura média das superfícies internas das zonas Z2 e Z4.	109
Figura 6.40. Prédio 3/3 – Comparação da temperatura média radiante das zonas térmicas.	110
Figura 6.41. Casos da edificação avaliados: sem marquise (a) e com marquise (b).	111
Figura 6.42. Temperatura média da janela J1: sem (esquerda) e com marquise (direita).	111
Figura 6.43. Temperatura média da janela J2: sem (esquerda) e com marquise (direita).	112
Figura 6.44. Temperatura média da janela J3: sem (esquerda) e com marquise (direita).	112
Figura 6.45. Divisão da janela J1 em quatro partes.	113
Figura 6.46. Comparação do vidro V4: sem marquise (esquerda) e com marquise (direita).	114
Figura 6.47. Comparação da edificação com marquise: V1 (esquerda) e V4 (direita).	114
Figura 6.48. Comparação da potência de refrigeração e da carga térmica da edificação.	116
Figura 6.49. Taxas de transferência de calor que compõem a carga térmica da edificação.	117
Figura A.1. Porcentagem estimada de insatisfeitos em função do voto médio estimado.	142
Figura B.1. Alteração da curva da resposta ótica do olho em função da iluminação.	143

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Consumo setorial final de eletricidade em 2003.	4
Tabela 1.2. Consumo de energia <i>per capita</i> aproximado de alguns países no ano de 2000.	8
Tabela 1.3. Uso final da eletricidade por tipo de utilização em 1993.	8
Tabela 1.4. Potencial de economia de energia final no Brasil por setores e por tipo de uso final. .	9
Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens das técnicas de avaliação de programas de simulação. ...	15
Tabela 4.1. Coeficientes polinomiais para determinar a dependência angular.	51
Tabela 5.1. Programação de ocupação no interior da edificação.	60
Tabela 5.2. Programação de funcionamento dos equipamentos elétricos na edificação.	60
Tabela 5.3. Descrição dos elementos construtivos da edificação.	62
Tabela 5.4. Características termofísicas dos materiais de construções.	62
Tabela 5.5. Descrição física e coloração dos vidros simulados.	64
Tabela 5.6. Propriedades físicas e óticas dos vidros utilizados.	64
Tabela 5.7. Dimensões e áreas das janelas em cada configuração do prédio.	65
Tabela 5.8. Climas das cidades simuladas de acordo com mapa climático brasileiro do IBGE. ...	67
Tabela 5.9. Dados de localização geográfica para as cidades simuladas.	67
Tabela 5.10. Temperaturas de bulbo seco médias ao longo do ano.	67
Tabela 5.11. Condições climáticas de dia de projeto de verão para as cidades simuladas.	69
Tabela 5.12. Condições climáticas de dia de projeto de inverno para as cidades simuladas.	69
Tabela 5.13. Informações horárias constantes em um arquivo climático.	71
Tabela 6.1. Iluminação contínua – Custos iniciais máximos e mínimos.	99
Tabela 6.2. Iluminação programada – Custos iniciais máximos e mínimos.	99
Tabela 6.3. Iluminação contínua – Custos operacionais anuais máximos e mínimos.	100
Tabela 6.4. Iluminação programada – Custos operacionais anuais máximos e mínimos.	100
Tabela 6.5. Comparação do custo inicial.	101
Tabela 6.6. Comparação do custo operacional anual.	101
Tabela 6.7. Potência ociosa – Comparação do custo inicial.	102
Tabela 6.8. Potência ociosa – Comparação do custo operacional anual.	102
Tabela 6.9. Comparação do custo inicial.	103
Tabela 6.10. Comparação do custo operacional anual.	103
Tabela 6.11. Potência ociosa – Comparação do custo inicial.	103
Tabela 6.12. Potência ociosa – Comparação do custo operacional anual.	104
Tabela 6.13. Análise econômica baseada no VPL.	104
Tabela 6.14. Porcentagem das taxas que compõem a carga térmica da edificação.	117
Tabela A.1. Dados de entrada necessários para o cálculo do <i>PMV</i>	135
Tabela A.2. Conversões necessárias e equações onde são utilizadas.	135
Tabela A.3. Formas de dissipação de calor pelo corpo humano.	137
Tabela A.4. Escala de sensação térmica de sete pontos.	141
Tabela B.1. Resposta ótica do olho humano à luz em condições normais de iluminação.	144

1. INTRODUÇÃO

Após a sociedade ocidental ter assinado um contrato social em nome da democracia e do progresso, ela se organizou de forma a demandar cada vez mais e maiores fontes de energia para sustentar seu desenvolvimento. Assim, o desenvolvimento da humanidade está intimamente ligado ao crescimento gradual do consumo de energia, e de um certo ponto de vista pode-se considerar que progresso e aumento do consumo energético são sinônimos. Isto fica evidente quando se constata que países “ricos” consomem quantidades muito maiores de energia que países “pobres”.

Após a Segunda Guerra Mundial, que teve seu desfecho causado, entre outros fatores, pela falta de suprimento de petróleo aos derrotados, a humanidade presenciou um desenvolvimento científico, tecnológico e industrial sem precedentes. A fórmula parecia perfeita nos países ditos “desenvolvidos”: taxas de crescimento da economia sempre positivas, aumento da renda *per capita*, da produção de bens de consumo e conseqüentemente do consumo. Eis então que surge uma ameaça ao modelo econômico capitalista: a crise do petróleo iniciada no ano de 1973. Todas as nações economicamente dependentes do “ouro negro” se vêem então obrigadas a tomar medidas de contenção do consumo de energia fóssil.

A crise não só teve conseqüências financeiras às nações, e fez-se refletir em muitos setores da sociedade, mostrando que também deveriam ser adotadas medidas de racionalização do uso das fontes de energias renováveis, na medida que em curto prazo evitariam a necessidade de implementação de grandes parques geradores a custos exorbitantes.

Na engenharia, um grande desafio é lançado, e a ordem passa a ser uma constante busca pelo uso racional da energia. Nas universidades, começam a surgir grupos de pesquisa com o objetivo de estudar medidas futuras a serem adotadas pelos governos. Dentre estes grupos, surgem os que pesquisam a eficiência energética de edificações, focados em criar inovações tecnológicas e alternativas energéticas capazes de manter os confortos da vida contemporânea, porém racionalizando o uso de energia.

No Brasil, tanto o surgimento destes grupos quanto a utilização de programas de simulação energética são relativamente recentes, iniciando no final da década de 1970, sendo que recentemente foi feita uma revisão geral sobre este tema, descrevendo o desenvolvimento dos principais grupos de estudo no Brasil, suas respectivas linhas de pesquisa, e os estímulos e dificuldades encontradas no desenvolvimento de ferramentas de simulação [Mendes et al., 2001].

Rapidamente os resultados das pesquisas feitas nos mais variados campos de atuação da engenharia começaram a aparecer e foram sendo entregues à sociedade, sendo que alguns

exemplos podem ser facilmente observados em nosso dia-a-dia: carros que percorrem até 20 km/ℓ de combustível fóssil, aparelhos de condicionamento de ar que consomem até 40% menos energia elétrica que seus similares de 15 anos atrás, lâmpadas cinco vezes mais eficientes, entre outros exemplos.

1.1. Panorama Energético Brasileiro

Há longa data, o governo federal brasileiro optou por expandir o parque gerador de energia elétrica através de investimentos maciços em novas usinas hidrelétricas, que se por um lado produzem energia renovável de forma limpa, por outro causam um grave impacto ambiental quando são instaladas. Tal afirmação pode ser verificada na Figura 1.1, adaptada de dados constantes na página virtual do Ministério de Minas e Energia e referentes ao Balanço Energético Nacional de 2004, o BEN, 2004a, que mostra a divisão da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil em 2003.

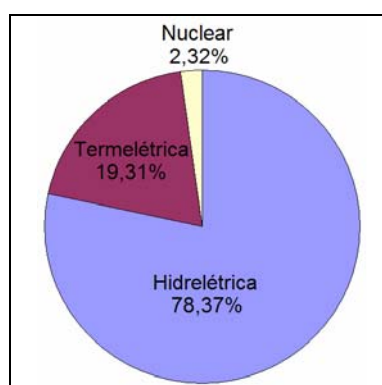


Figura 1.1. Divisão da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil em 2003.

Na Figura 1.2, também adaptada do BEN, 2004a, pode-se ver a evolução da capacidade instalada de geração elétrica no Brasil entre os anos de 1973 e 2003. Pode-se observar claramente que durante estes 30 anos a capacidade de geração de energia elétrica cresceu quase que linearmente nas hidrelétricas, enquanto que nas termelétricas a capacidade teve um incremento significativamente pequeno até o ano de 1999, quando investimentos maciços começaram a ser feitos e a capacidade instalada começou a acompanhar a taxa de crescimento das hidrelétricas. Já nas usinas nucleares, a capacidade se manteve constante de 1985, ano em que a usina Angra 1 entrou em operação, até 2000, quando a usina Angra 2 entrou em operação. Segundo a Eletronuclear, esta atual oferta provavelmente se manterá constante até 2009, ano previsto para que a usina Angra 3 entre em operação.

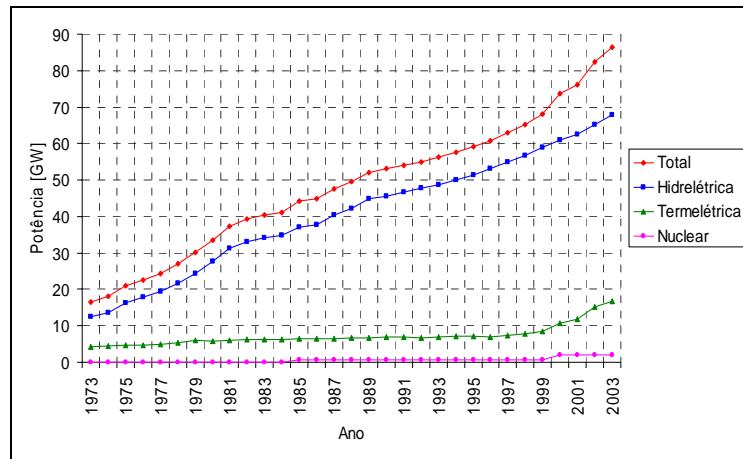


Figura 1.2. Evolução da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil.

Na Figura 1.3, adaptada de dados constantes no BEN, 2004b, é mostrada uma comparação entre as estruturas da oferta de eletricidade no Brasil e no mundo. Enquanto aqui os recursos hídricos são a principal fonte de geração elétrica, no mundo eles representam apenas a quarta maior fonte.

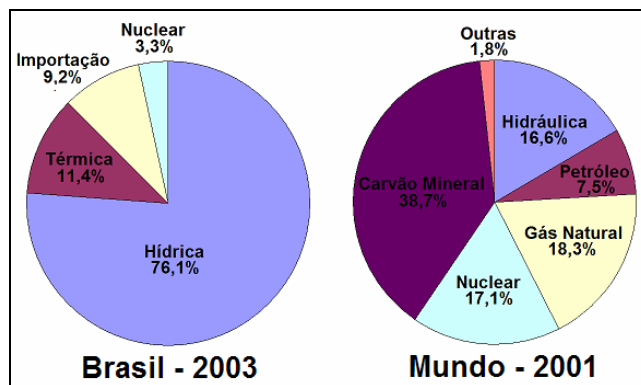


Figura 1.3. Comparativo entre estruturas da oferta de eletricidade no Brasil e no mundo.

No BEN, 2004b, constam também os seguintes dados de geração de energia elétrica em relação ao ano de 2003: a oferta total de energia foi de 402,1 TWh (5,2% maior que em 2002), sendo que a produção interna foi de 364,9 TWh (5,6% maior que em 2002) e as importações foram de 37,1 TWh (1,5% maior que em 2002). Estes indicativos fizeram com que o setor elétrico contribuísse com 14,6% da matriz energética brasileira.

O consumo setorial final de energia elétrica no Brasil em 2003 é mostrado na Tabela 1.1, em TWh e em porcentagem, respectivamente adaptados do BEN, 2004c e 2004d. Como a oferta total de energia elétrica em 2003 foi de 402,1 TWh e o consumo total, segundo a Tabela 1.1, foi de 341,86 TWh, provavelmente a diferença entre estes dois dados, ou seja, 60,24 TWh (14,98%) seja relativa às perdas nas linhas de transmissão.

Tabela 1.1. Consumo setorial final de eletricidade em 2003.

Setor	Consumo [TWh]	Consumo [%]
Industrial	160,37	46,91
Residencial	76,14	22,27
Comercial	48,38	14,15
Público	29,71	8,69
Agropecuário	14,28	4,18
Energético	12,00	3,51
Transportes	0,98	0,29
TOTAL	341,86	100

Em 2003, no Brasil, segundo dados adaptados do BEN, 2004e, juntos, os setores industrial, residencial e comercial consumiram 51,99% de toda a energia gerada no país, considerando todas as fontes de energia. Deste índice, respectivamente 72,41%, 22,23% e 5,36% foram consumidos pelos setores industrial, residencial e comercial.

Tem-se ainda, segundo dados adaptados do BEN, 2004f, que a energia elétrica respondeu por 82,6% de toda energia consumida pelo setor comercial. Já nos setores residencial e industrial, estes índices foram de 31,3% e 20,3%, respectivamente. Nos setores industrial e comercial, a energia elétrica é a fonte de energia mais utilizada, já no setor residencial, surpreendentemente, a lenha é a principal fonte, provendo 38,1% da demanda total de energia.

1.2. Eficiência Energética no Brasil

Para entender o conceito de eficiência energética, considere uma lâmpada incandescente de potência nominal de 100 W e uma lâmpada eletrônica de potência nominal de 20 W. Em termos de intensidade luminosa, as duas lâmpadas são equivalentes, pois emitem uma quantidade semelhante de radiação na região visível do espectro de ondas eletromagnéticas. A lâmpada incandescente, porém, ficando ligada durante uma hora consome 100 Wh, enquanto a lâmpada eletrônica consome 20 Wh, ou seja, 80% menos energia elétrica. Isto significa que a lâmpada eletrônica é cinco vezes mais eficiente, energeticamente, que a lâmpada incandescente.

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética, o INEE, 2001: “melhorar a eficiência energética significa reduzir o consumo de energia primária necessário para produzir um determinado serviço de energia”. Isto significa que as iniciativas de eficiência buscam reduzir o consumo energético sem reduzir o serviço energético prestado, com benefícios econômicos para o consumidor que devem ser permanentes, mas que geralmente exigem algum tempo de maturação.

1.2.1. Importância da Política de Eficiência Energética

Tão importante quanto ter uma política de eficiência energética é entender porque ela é tão necessária atualmente. O INEE, 2001, enumera algumas razões:

- O potencial economicamente viável é grande: há poucos estudos sobre o potencial para aumentar a eficiência energética no Brasil, porém análises internacionais renomadas reforçam a conclusão de que o potencial brasileiro é grande. No caso do uso final de eletricidade, a meta do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) é ganhar ~15% ao ano (~75 TWh/ano) até 2010, sendo que o potencial da geração pode ser da mesma ordem de grandeza.
 - A eficiência energética traz externalidades positivas: a produção e uso de energia muitas vezes têm graves impactos sobre a natureza: poluição do ar e da água, modificação de ecossistemas e aumento do efeito estufa. Promover a eficiência energética é uma tentativa de reduzir estes impactos. Além disso, investimentos na redução do consumo geram mais empregos que os investimentos na oferta da energia equivalente. Conseguir-se também modernizar o parque industrial e as instalações prediais, pois um projeto de otimização energética pode ser um ponto de partida para isto, o que no caso das indústrias acaba resultando numa maior competitividade.
 - Ainda existem barreiras no mercado: equipamentos mais eficientes são mais caros, o que provoca restrições financeiras tanto às indústrias quanto aos consumidores; falta de conscientização dos consumidores, pois há pouca difusão de conhecimento dos conceitos de conservação e economia de energia, inclusive na formação básica de profissionais em áreas relevantes; o mercado privado de bens e serviços de eficiência energética ainda está pouco desenvolvido; custos de transação muito ampliados no Brasil pela relativa falta de informações organizadas em todos os níveis, que são os custos indiretos ao se adquirir um produto ou serviço de eficiência energética; entre outros.
 - Facilitar a transição ao novo modelo do setor elétrico: a implementação de um novo modelo radicalmente diferente do anterior junto à privatização da maioria das empresas do setor energético nunca será fácil, especialmente quando se leva em conta a base predominantemente hidráulica do setor elétrico. As dificuldades na transição têm resultado na falta de novos investimentos para a expansão do sistema, especialmente para geração e transmissão. No entanto, acelerar a política de eficiência pode contribuir para diminuir os custos de crises de suprimento de energia. Apesar das crises de suprimento recentes, a política de eficiência energética pode contribuir para firmar o novo modelo.
-

1.2.2. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

A primeira medida adotada pelo governo brasileiro para tornar mais eficiente o consumo de energia no país foi a criação, em uma parceria entre os Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), em dezembro de 1985. Segundo o próprio PROCEL, 2005, este programa ficou subordinado à Eletrobrás até julho de 1991, quando foi transformado em programa de governo tendo sua abrangência e responsabilidades ampliadas.

O objetivo do PROCEL é o de “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 estabelece metas de redução de conservação de energia que são consideradas no planejamento do setor elétrico, dimensionando as necessidades de expansão da oferta de energia e da transmissão. Dentre elas, destacam-se: redução nas perdas técnicas das concessionárias, racionalização do uso da energia elétrica e aumento da eficiência energética dos aparelhos elétricos.

Dados do programa revelam que se for mantida a estrutura atual de uso da energia, projeta-se uma necessidade de suprimento, em 2015, em torno de 780 TWh/ano. Diminuindo-se os desperdícios, estima-se uma redução de até 130 TWh/ano (aproximadamente 1,4 vezes a produção anual da usina de Itaipu). Uma das metas do PROCEL tem sido a redução das perdas técnicas na transmissão e distribuição das concessionárias para um valor próximo aos 10%. Com a adoção do selo PROCEL de eficiência energética nos eletrodomésticos, espera-se um aumento médio de 10% no desempenho dos equipamentos que participam do programa.

Observa-se que ocorrem dados desencontrados entre o PROCEL e a INEE, pois as estimativas de redução do desperdício anual publicada por eles não conferem (130 TWh/ano segundo o PROCEL e 75 TWh/ano segundo o INEE), o que leva a crer que o PROCEL considera a diminuição tanto na geração e distribuição quanto no uso final, enquanto o INEE considera a diminuição apenas no uso final.

Ressalta-se ainda a implantação, por parte do governo federal, de um conjunto de reformas de regras setoriais, tendo constituído dois órgãos: a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é o órgão regulador e fiscalizador dos serviços públicos de energia elétrica; e o Operador Nacional do Sistema (ONS), que é responsável pela operação do sistema de transmissão. A implantação destes dois órgãos se fez necessária devido ao fato do setor elétrico brasileiro atravessar um contexto de intensas transformações nos últimos anos, com diversas concessionárias distribuidoras de energia elétrica sendo privatizadas e a previsão de venda das geradoras e de outras tantas concessionárias.

1.2.3. Legislação Brasileira sobre Eficiência Energética

Certamente se o Brasil já dispusesse de uma regulamentação da eficiência energética, a crise energética de 2001, o “apagão”, poderia ter sido evitado. Por falta de energia elétrica, naquela ocasião muitas indústrias foram forçadas a colocar em ociosidade parte de seu parque industrial, o que acarretou um sério comprometimento do crescimento da produção nos primeiros anos que se seguiram e contribuiu para que a economia do país crescesse modestamente.

Tal crise energética levou o governo federal, em 17 de outubro de 2001, a sancionar a Lei Nº 10.295, que “Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia” e foi a primeira iniciativa no sentido de promover a eficiência energética no Brasil. A lei foi regulamentada dois meses depois, quando da publicação do Decreto Nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, e trata de uma série de iniciativas que buscam implementar parâmetros de eficiência energética em edificações.

Lamberts e Carlo, 2004, estudaram a regulamentação de eficiência energética em novas edificações para o Ministério de Minas e Energia. Segundo eles, “A primeira providência para a determinação de indicadores referenciais de edificações é conhecer as tipologias atualmente construídas no país. Não é possível estabelecer índices mínimos de eficiência energética sem considerar a realidade construtiva nacional como parâmetro de referência, a partir da qual poderão ser estabelecidos índices que não extrapolem a realidade. ...uma regulamentação para edificações eficientes deve ser desenvolvida com foco nos custos e nos impactos de possíveis alterações do envelope no consumo de energia elétrica, associados principalmente aos sistemas de condicionamento de ar”. Eles ainda apresentaram dados interessantes a respeito da evolução do consumo de energia *per capita* em alguns países no decênio 1991-2000. Estes dados permitem aos autores afirmar que embora o Brasil ainda possua um consumo *per capita* bastante baixo em relação às nações desenvolvidas, o crescimento deste consumo ao longo da década de 90 foi de 24% no Brasil, enquanto nas nações mais prósperas o aumento ficou entre 14 e 18%. Nota-se que este crescimento é uma realidade tanto nos países desenvolvidos quanto nos em desenvolvimento, e é uma das principais questões a serem enfrentadas pela economia destes, visto as dificuldades na implantação de grandes parques geradores de energia, tais como: custos, escassez de recursos hídricos, impacto ambiental provocado por riscos radioativos, emissão de poluentes e inundações de grandes áreas, entre outros. Os dados de consumo de energia *per capita* no ano de 2000 apresentados pelos autores foram lidos e aproximados, e são mostrados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2. Consumo de energia *per capita* aproximado de alguns países no ano de 2000.

País	Consumo aproximado [kWh/hab/ano]
EUA	13.200
Austrália	9.900
Japão	7.500
Alemanha	6.100
Inglaterra	5.800
África do Sul	4.200
Brasil	2.100
Tailândia	1.500
China	1.000
Bangladesh	100

1.2.4. Potencial de Economia Brasileiro

Apesar do Brasil apresentar índices de consumo de energia pequenos em relação aos países desenvolvidos, há dúvidas quanto à capacidade que a nação terá de conseguir suprir a crescente demanda, pois sendo um dos mercados internacionais emergentes, o Brasil tem apresentado índices de crescimento bastante promissores. Dessa forma, estudos têm sido feitos para avaliar o potencial de economia de energia no Brasil.

Em um estudo denominado Balanço de Energia Útil, referente ao ano de 1993, feito pelo Ministério de Minas e Energia em 1995 e apresentado no BEN, 2004g, constam os dados que foram adaptados para a Tabela 1.3. Os dados se referem aos tipos de utilização final da energia elétrica mais comumente encontrados: força motriz (motores elétricos, compressores, etc), calor de processo (caldeiras, alto-fornos, etc), aquecimento direto (estufas, fornos, etc), e outros usos menos expressivos (como iluminação e eletroquímica).

Tabela 1.3. Uso final da eletricidade por tipo de utilização em 1993.

Tipo de utilização	Uso de eletricidade [%]
Força Motriz	45,94
Calor de Processo	7,11
Aquecimento Direto	7,71
Outras	8,95
Perdas	30,29
Total	100

No mesmo documento, são apresentados dados de potencial de economia de energia final por tipo de uso final, que foram utilizados para compor a Tabela 1.4. Deve-se observar que estes valores não se referem necessariamente à economia de energia elétrica. Os dados originalmente

apresentados tinham como unidade a tonelada equivalente de petróleo, a *tep*, usualmente adotada pelo governo federal para compor o BEN, e foram convertidos para a unidade usual de energia elétrica com o único propósito de tornar a leitura mais apropriada ao tema aqui tratado. Por exemplo, lendo a tabela, o setor de transportes têm potencial de economia de força motriz de 42,62 TWh, mas este valor claramente se refere a uma quantidade de combustível fóssil que pode ser economizada com o uso de motores mais eficientes, visto que quase toda a frota nacional utiliza este tipo de combustível como fonte energética.

Tabela 1.4. Potencial de economia de energia final no Brasil por setores e por tipo de uso final.

Setor	Força Motriz [TWh]	Calor de Processo [TWh]	Aquecimento Direto [TWh]	Iluminação [TWh]	Eletroquímica [TWh]	Total [TWh]
Energético	1,50	7,08	0	0,12	0	8,69
Residencial	1,27	0	28,68	7,17	0	37,12
Comercial	0,22	0	0	1,42	0	1,64
Público	0,18	0	0	3,83	0	4,01
Agropecuário	2,10	0	0	0,12	0	2,22
Transporte	42,62	0	0	0	0	42,62
Industrial	1,00	8,63	23,96	0,47	1,50	35,55
Total [TWh]	48,89	15,70	52,63	13,13	1,50	131,85

Para efeito de comparação, o potencial total de economia de energia final mostrado na Tabela 1.4, de 131,85 TWh, representa 36,13% de toda a oferta de energia elétrica produzida no Brasil no ano de 2003, que foi de 364,9 TWh, sendo que estes dados de potencial de economia são referentes à 1993. Devido ao crescimento econômico brasileiro nos últimos anos e à falta de adoção de medidas de contenção de consumo elétrico, o potencial de economia deve ter crescido consideravelmente.

1.3. Motivação

Em ambientes fechados, a transferência de calor através de superfícies semitransparentes pode ocorrer em taxas consideráveis, de modo que a determinação dos efeitos que estas interfaces provocam na demanda energética da edificação e no conforto térmico de seus ocupantes é imprescindível para minimizar o desperdício de energia. Winkelmann, 2001, estimou que a transferência de calor pelas janelas seja responsável, em média, por 31% da carga térmica de resfriamento e por 17% da carga térmica de aquecimento em edificações comerciais nos Estados Unidos da América (EUA). Já em construções residenciais esses índices são de 34% e 23%, respectivamente.

Atualmente, muito se fala a respeito da qualidade dos ambientes de trabalho. Muitas vezes, sua falta se deve a uma série de medidas simples que deixaram de ser tomadas ainda na etapa de projeto da edificação em que estes ambientes se encontram. São comuns queixas dos ocupantes em relação à temperatura interna desagradavelmente alta ou à alta intensidade solar proveniente das janelas. Geralmente, problemas como estes acabam refletindo na queda da produtividade dos funcionários, e as empresas optam por adaptar soluções às edificações, tais como a instalação de sistemas de ventilação ou condicionamento de ar, ou o uso de películas, marquises ou brises para o controle solar nas janelas. Referenciados no próximo capítulo, alguns estudos já feitos através de programas de simulação computacional termoenergética de edificações revelam a eficácia destas soluções [Neto, 2002; Pereira, 2002; Cótica, 2003; Schwieder, 2004].

Os dados apresentados até aqui seriam suficientes para justificar um estudo detalhado da influência dos vidros com e sem película no desempenho térmico de uma edificação. Ocorre que alguns parâmetros físicos podem maximizar ou minimizar esta influência, de modo que os levando em consideração podem-se obter melhores soluções em termos de desempenho térmico de uma edificação.

1.4. Justificativa

Quando se projeta uma edificação com um sistema de condicionamento de ar, muitas vezes é instalada uma potência nominal maior que aquela que seria necessária caso fossem utilizados alguns conceitos de eficiência energética, como o uso de películas de controle solar, comprovado por Pereira et al., 2004. Os autores também mostram que o mesmo ocorre em relação ao consumo elétrico diário médio do sistema de condicionamento de ar. A consequência acaba sendo o uso ineficiente da energia elétrica na edificação.

Geller, 1992, concluiu que no Brasil os aparelhos de condicionamento de ar são responsáveis por 48% do consumo de energia elétrica em prédios públicos e comerciais, subindo para 64% se considerarmos também os dispositivos de iluminação, e chegando a 86% em bancos e escritórios. Mascarenhas et al., 1988, fez levantamentos na cidade de Salvador e mostrou que o consumo de energia elétrica em escritórios de edifícios pode chegar a 70% nos aparelhos de condicionamento de ar e 15% nos dispositivos de iluminação. Observa-se então, especificamente em relação a estes tipos de edificações, a existência de um grande potencial de redução no consumo de energia devido à parcela utilizada pelos sistemas de iluminação e de condicionamento de ar.

1.5. Apresentação do Problema

A proposta apresentada é a de estudar uma edificação tipicamente comercial, lançando mão do programa de simulação computacional *EnergyPlus*, versão 1.1.1.012. Entenda-se por tipicamente comercial uma edificação que possua características de não conformidade com os conceitos de eficiência energética, ou seja, uma construção facilmente encontrada no Brasil. Assim, a idéia é tratar uma edificação que melhor retrate a realidade das construções brasileiras.

Os seguintes parâmetros físicos são avaliados na edificação: tipo de vidro utilizado nas fachadas, área envidraçada das fachadas, localização geográfica e orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro.

Tendo em vista que o foco deste estudo é centrado no comportamento termoenergético de vidros com e sem película de controle solar, sendo decorrentes os demais parâmetros acima citados, e com a proposta de trabalho posta, a primeira questão a ser resolvida foi a escolha da tipologia de edificação comercial a ser simulada. Ela recaiu sobre um modelo virtual de edificação comercial de escritório, pois este tipo de construção geralmente se caracteriza por utilizar fachadas com áreas envidraçadas maiores que as de edificações residenciais ou industriais, por exemplo.

As simulações são feitas utilizando dias de projeto (de verão e inverno) e arquivos climáticos anuais.

São estudados dois tipos distintos de controle de iluminação artificial, um tradicional controle liga/desliga e outro controle dependente da iluminância natural. Visando averiguar as condições do ambiente térmico da edificação, é verificado um índice de conforto térmico dos ocupantes. O estresse térmico nos vidros também é avaliado através da verificação da evolução da temperatura das vidraças.

1.6. Objetivos

Este trabalho possui como objetivos primários:

- Avaliar através de simulações computacionais, para uma edificação com sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta, a influência termoenergética nesta edificação de 5 localizações geográficas diferentes, 8 orientações da edificação em relação ao norte verdadeiro, 7 tipos de vidro utilizado nas fachadas e 3 diferentes áreas envidraçadas das fachadas.
- Obter para 5 capitais brasileiras (Belém, Brasília, Porto Alegre, Recife e São Paulo),

utilizando dias de projeto, respostas gráficas da potência de refrigeração de pico e de aquecimento de pico de uma edificação tipicamente comercial em que são alterados os parâmetros físicos já anteriormente descritos.

- Obter para estas capitais, utilizando arquivos climáticos, respostas gráficas do consumo de energia elétrica anual para esta edificação.
- Modelar e simular para Porto Alegre, na edificação estudada, um sistema de controle automático da potência das lâmpadas, dependente da iluminância natural, e confrontar os resultados de potência e consumo com o modelo tradicional de controle liga/desliga das lâmpadas.

São objetivos decorrentes:

- Observar e interpretar as diferenças existentes nas respostas de potência e consumo elétrico das cidades simuladas.
- Comparar, para a cidade de Porto Alegre, os resultados de potência e consumo elétrico dos dois tipos de controle de potência das lâmpadas, e realizar uma análise econômica de alguns casos.
- Verificar, para Porto Alegre, a satisfação ou não dos ocupantes da edificação em relação ao ambiente térmico através da determinação de um índice de conforto térmico.
- Abordar o tema de estresse térmico em vidros, verificando, também para a cidade de Porto Alegre, a temperatura superficial dos vidros.
- Fazer um estudo comparativo entre a carga térmica da edificação e a potência de refrigeração necessária nesta edificação.

1.7. Estrutura da Dissertação

Após a introdução do tema, é apresentada uma revisão bibliográfica no capítulo 2, onde constam metodologias de validação de programas de simulação computacionais e são apresentados resumos de alguns trabalhos relevantes ao tema estudado.

No capítulo 3 são descritos alguns conceitos importantes para o entendimento do trabalho, tais como os de conforto térmico e estresse térmico em vidros.

Uma descrição do programa simulador computacional utilizado é feita no capítulo 4, onde também são apresentados os equacionamentos de interesse, tais como a modelagem de janelas e de iluminação.

O capítulo 5 descreve como foram feitas as simulações computacionais. A edificação

estudada é caracterizada, os parâmetros e os casos avaliados são detalhadamente descritos, e os dados de entrada de maior interesse são comentados.

Os resultados obtidos para os casos descritos e suas respectivas análises compõem o conteúdo do capítulo 6.

As conclusões são apresentadas no capítulo 7 e, no capítulo 8, constam sugestões para o desenvolvimento futuro do tema.

Em seqüência tem-se a lista das referências bibliográficas, que tiveram algumas partes transcritas ou adaptadas no corpo da dissertação, e das bibliografias consultadas, que serviram como fonte de pesquisa, porém não são referenciadas no trabalho.

O trabalho é finalizado com apêndices devidamente referenciados nos capítulos, onde constam informações complementares que numa primeira leitura são dispensáveis no texto principal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo discorre-se sobre a validação de programas de simulação computacional, onde são apresentadas duas metodologias. Em seguida são apresentados resumos de trabalhos que usam o programa simulador utilizado (descrito em detalhes no capítulo 4), trabalhos que utilizam as metodologias de validação apresentadas, trabalhos que enfocam vidros, trabalhos que adotam alguns conceitos de eficiência energética e outros trabalhos relacionados ao tema estudado.

2.1. Validação de Programas de Simulação Computacionais

Programas de simulação computacional térmica de edificações são poderosas ferramentas que possibilitam uma série de análises de modo rápido e a baixo custo, tais como: dimensionamento de sistemas de climatização de ambientes; previsão do consumo elétrico associado à edificação, ao sistema de condicionamento de ar ou a outros sistemas elétricos; estimativas das condições ambientais internas das construções, entre outros.

Um dos maiores potenciais destas ferramentas é a possibilidade de prever, com boa aproximação, o comportamento termoenergético de uma edificação sem que ela sequer exista, além de permitir comparações entre análises, podendo-se sugerir uma série de alternativas que melhorem o comportamento térmico da edificação estudada. No entanto, é imperativo que estas ferramentas possuam condições de oferecer resultados com boa aproximação em relação ao que acontece em situações reais, caso contrário elas teriam utilidade limitada.

Validar um programa de simulação computacional nada mais é do que comparar seus resultados com resultados tidos como exatos, e através desse processo verificar seu grau de precisão. Neymark et al., 2002, explicam que há poucos meios de se avaliar a precisão de um programa de simulação energética de edificações:

- Validação empírica: os resultados calculados de um programa, sub-rotina ou algoritmo são comparados a dados monitorados de uma edificação real, célula de teste ou experimento de laboratório.
 - Verificação analítica: os resultados calculados de um programa, sub-rotina ou algoritmo são comparados a resultados de uma solução analítica conhecida ou de um método numérico geralmente aceito para mecanismos de transferência de calor isolados sob condições de contorno muito simples e altamente restritas.
-

- Testes comparativos: o programa é comparado com ele mesmo ou com outros programas que podem ser considerados mais bem validados ou mais detalhados e, presumivelmente, mais corretos fisicamente.

Na Tabela 2.1, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens destas três técnicas [Neymark et al., 2002].

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens das técnicas de avaliação de programas de simulação.

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Empírica	<ul style="list-style-type: none"> - Padrão aproximadamente fiel à precisão experimental. - Pouco nível de complexidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertezas experimentais. - Calibração de instrumentos, discretização espacial/temporal. - Conhecimento/especificação imperfeito do objeto experimental (edificação) sendo simulado. - Medições detalhadas de alta qualidade são caras e consomem muito tempo. - Apenas um número limitado de condições de teste são práticas.
Analítica	<ul style="list-style-type: none"> - Incertezas não são entradas. - Padrão matemático fiel e exato para o modelo dado. - Barato. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não há teste da validade do modelo. - Limitado a casos altamente restritos para os quais as soluções analíticas podem ser derivadas.
Comparativa	<ul style="list-style-type: none"> - Incertezas não são entradas. - Pouco nível de complexidade. - Muitas comparações de diagnóstico possíveis. - Barato e rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Padrão não fiel.

2.1.1. O método *BESTEST*

A *IEA* (*International Energy Agency*) foi estabelecida em 1974 como uma agência autônoma dentro da estrutura da *OECD* (*Organization for Economic Cooperation and Development*), com o objetivo de compor um programa abrangente de cooperação energética entre seus 20 países membros. O programa *SHC* (*Solar Heating and Cooling*) foi uma das primeiras implementações da agência. Estabelecido em 1977, este programa iniciou uma série de 20 tarefas (*tasks*) com o objetivo de conduzir projetos conjuntos para promover o avanço das tecnologias solares nas construções [Judkoff e Neymark, 1995].

A metodologia *BESTEST* (*Building Energy Simulation TEST*) foi criada dentro da *IEA SHC Task 12 – Building Energy Analysis and Design Tools for Solar Applications* (Análise Energética de Edificações e Projeto de Ferramentas para Aplicações Solares), e foi adotada pela

ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) como norma para teste e avaliação de programas computacionais de análise energética de edificações, que a adaptou sob o título de *ASHRAE Standard 140*.

Esta metodologia é um procedimento de verificação analítica e diagnóstico comparativo que foi criada para testar a habilidade de programas de simulação do envelope de edificações em modelar a performance de um equipamento de condicionamento de ar de um ambiente monozona, que é tipicamente modelado usando dados de projeto de fabricantes, apresentados como mapas de performance derivados empiricamente [Neymark et al., 2002].

2.1.1.1. Objetivos do IEA SHC Task 12

Os objetivos do *IEA SHC Task 12* são [Judkoff e Neymark, 1995]:

- Selecionar e desenvolver algoritmos apropriados para modelar a interação de materiais, componentes e sistemas (relacionados à energia solar) com a edificação em que estes elementos estão integrados.
- Selecionar tipos de análises e projetos de ferramentas computacionais, e avaliar a habilidade dos algoritmos em modelar a performance dinâmica de elementos solares em relação à precisão e facilidade de uso.
- Melhorar a estabilidade dos tipos de análises e projetos de ferramentas computacionais, através da preparação de procedimentos e formatos comuns e normalizando especificações para entrada/saída de dados, valores padrões, e outros fatores relacionados.

2.1.1.2. Casos Disponíveis

O *BESTEST* apresenta 40 casos monozona (de estado estacionário com sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta) para modelagem do envelope de edificações em programas de simulação computacional, assim divididos [Judkoff e Neymark, 1995]:

- 14 casos de teste de qualificação (não servem para diagnósticos), que compreendem os casos 195 à 320, todos com baixa massa. Representam uma tentativa de isolar os efeitos de algoritmos individuais variando um único parâmetro de caso para caso. Estes casos são relativamente primitivos, e alguns programas não serão capazes de modelar estes casos pela simples razão de que eles não são reais.
-

- 6 casos (395 à 440), todos com baixa massa, que são uma tentativa de resolver o problema dos casos 195 à 320, onde são apresentadas uma série de alternativas nos testes de diagnóstico que são levemente mais realistas que os casos primitivos.
- 14 casos (600 à 650, de baixa massa, e 900 à 990, de alta massa) que representam construções que são relativamente realistas com respeito à suas características térmicas. Estes casos testam a habilidade do programa em modelar algumas características como janelas com diferentes orientações, dispositivos de sombreamento e ventilação noturna.
- 2 casos (800 e 810), de alta massa, que testam a inércia térmica sem transmissão solar e a interação da massa com a absorção solar interna.
- 4 casos (600FF à 950FF) de teste de evolução livre da temperatura.

Em todos os casos desta metodologia as edificações possuem as mesmas dimensões (8 m de comprimento, 6 m de largura e 2,7 m de altura), porém algumas características construtivas são diferentes. Na Figura 2.1 são apresentadas as plantas em vista isométrica de alguns casos de baixa massa [Henninger e Witte, 2003a]: o caso 600 representa a edificação básica de teste com janelas na face sul, o caso 610 representa o teste de sombreamento com marquise na face sul, o caso 620 representa o teste de orientação das janelas nas faces leste e oeste, e o caso 630 representa o teste de sombreamento das janelas nas faces leste e oeste.

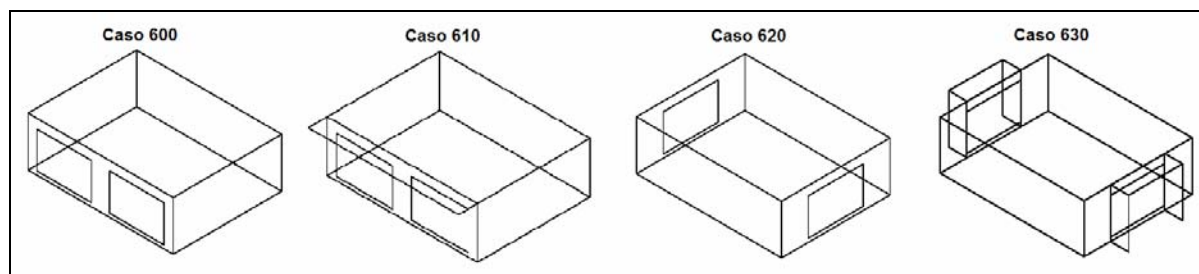


Figura 2.1. Alguns dos casos da metodologia *BESTEST* testados no *EnergyPlus*.

2.1.1.3. Programas de Simulação Testados

Os seguintes programas de simulação computacional foram testados pelo *BESTEST*: *BLAST 3.0 V.1*, *Clim2000*, *Derob-LTH*, *DOE-2.1D Level 14*, *ESP-RV8*, *SERIRES/SUNCODE*, *SERIRES 1.2*, *S3PAS*, *TASE*, e *TRNSYS 13.1* [Judkoff e Neymark, 1995].

2.1.2. O método *HVAC BESTEST*

Com os recentes avanços tecnológicos e aprimoramento dos programas de simulação, a

IEA sentiu a necessidade de expandir o programa *SHC*, e criou mais 10 tarefas (*tasks 21 to 30*) após revisar e fazer algumas modificações nas primeiras 20 tarefas estabelecidas.

Dentro de uma destas novas tarefas foi criada a metodologia *HVAC BESTEST* (*Heating, Ventilating and Air-Conditioning Building Energy Simulation TEST*), que faz parte da *IEA SHC Task 22 – Building Energy Analysis Tools* (Ferramentas de Análise Energética de Edificações), e nada mais é do que a expansão do *BESTEST*, incluindo avaliação de modelos de equipamentos de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar do tipo expansão direta em regime permanente [Neymark et al., 2001].

A diferença entre o *BESTEST* e o *HVAC BESTEST* é que o *BESTEST* testa apenas o envelope da edificação, enquanto o *HVAC BESTEST* adiciona ao *BESTEST* testes de equipamentos de condicionamento de ar.

2.1.2.1. Objetivos do *IEA SHC Task 22*

O objetivo principal do *IEA SHC Task 22* é estabelecer uma base técnica sólida para analisar edificações solares e de baixo consumo energético com ferramentas de análise energética novas, através da execução dos seguintes objetivos [Neymark e Judkoff, 2002]:

- Desenvolver métodos para estimar a precisão de ferramentas de análise energética de edificações disponíveis, através da predição de performance dos conceitos solares de baixo consumo energético mais usados.
- Coletar e documentar modelos de projetos em que se usam conceitos de baixo consumo energético para uso na próxima geração das ferramentas de análise energética de edificações.
- Estimar e documentar o impacto do aperfeiçoamento das ferramentas de análise energética de edificações nas análises solares e em edificações de baixo consumo energético.
- Disseminar amplamente os resultados de pesquisas e ferramentas de análise para os projetistas de softwares, associações industriais e agências governamentais.

2.1.2.2. Casos Disponíveis

O *HVAC BESTEST*, que é uma metodologia relativamente nova, por enquanto define os seguintes 14 casos para modelagem do envelope de edificações em programas de simulação computacional, todos sem presença de janelas [Neymark e Judkoff, 2002]:

- 1 caso base (E100) de zona seca, ou seja, considerando apenas geração de calor interno sensível, com alta temperatura de bulbo seco externa.
- 4 casos (E110 à E140) de zona seca, onde cada um é testado em relação ao caso base ou contra um desses casos de zona seca. Os testes se referem à diferentes temperaturas de bulbo seco do ar de insuflamento, diferentes temperaturas de bulbo seco externa ou diferentes cargas sensíveis.
- 8 casos (E150 à E195) de zona úmida, ou seja, considerando geração de calor interno sensível e latente, onde cada um é testado contra algum caso de zona seca ou contra um desses casos de zona úmida. Os testes se referem à diferentes temperaturas de bulbo seco do ar de insuflamento, diferentes temperaturas de bulbo seco externa ou diferentes cargas sensíveis ou latentes.
- 1 caso (E200) de teste de carga térmica total, que considera as condições *ARI* (*Air-Conditioning and Refrigeration Institute*), testando a temperatura de bulbo úmido interna determinada por este instituto.

Também aqui os casos possuem as mesmas dimensões (8 m x 6 m x 2,7 m). Na Figura 2.2 é mostrado o caso base [Neymark e Judkoff, 2002].

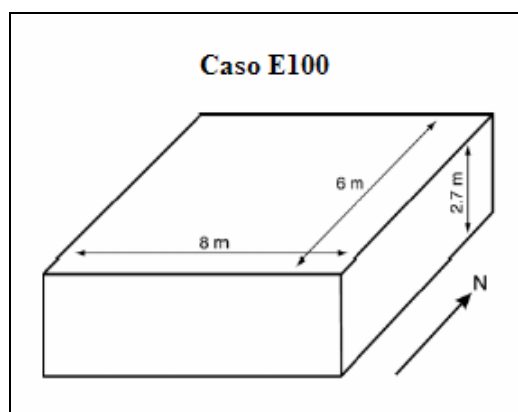


Figura 2.2. Caso base do *HVAC BESTEST*.

2.1.2.3. Programas de Simulação Testados

Os seguintes programas de simulação computacional foram testados pelo *HVAC BESTEST*: *HTAL* (Solução analítica), *TUD* (Solução analítica), *CA-SIS VI*, *Clim2000 V2.4*, *DOE-2.1E Version 088*, *DOE-2.1E Version 133*, *EnergyPlus 1.0.0.023*, *PROMETHEUS*, e *TRNSYS-TUD 14.2* [Neymark e Judkoff, 2002].

2.2. Resumos de Trabalhos

2.2.1. Trabalhos que Usam o *EnergyPlus*

Aqui são descritos resumos de trabalhos publicados que validam o programa de simulação computacional utilizado neste trabalho (*EnergyPlus*) utilizando tanto métodos analíticos ou comparativos (*BESTEST* ou *HVAC BESTEST*), quanto métodos empíricos; e também de alguns trabalhos publicados que utilizam o *EnergyPlus* para obter resultados relevantes em termos de resposta termoenergética de edificações.

2.2.1.1. Trabalhos que Validam o *EnergyPlus*

Henninger e Witte, 2003a, apresentaram resultados do teste da versão 1.1.0.020 do *EnergyPlus* utilizando a metodologia *BESTEST*, sendo analisados 18 de seus 40 casos. Foram obtidos os seguintes resultados: para 13 casos, o consumo elétrico anual de aquecimento e de resfriamento e o consumo elétrico anual de pico de aquecimento e resfriamento; e para 5 casos, temperatura máxima e mínima de evolução livre. Estes foram comparados com resultados de outros oito programas de simulação térmica do envelope de edificações. Baseado em 62 comparações separadas, o *EnergyPlus* estava dentro da faixa de resultados obtidos pelos outros oito programas em 56 comparações. Nas Figuras 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente são mostrados: o consumo elétrico anual de aquecimento e refrigeração, e a potência de aquecimento e de refrigeração de pico, obtidos pelos autores para alguns casos.

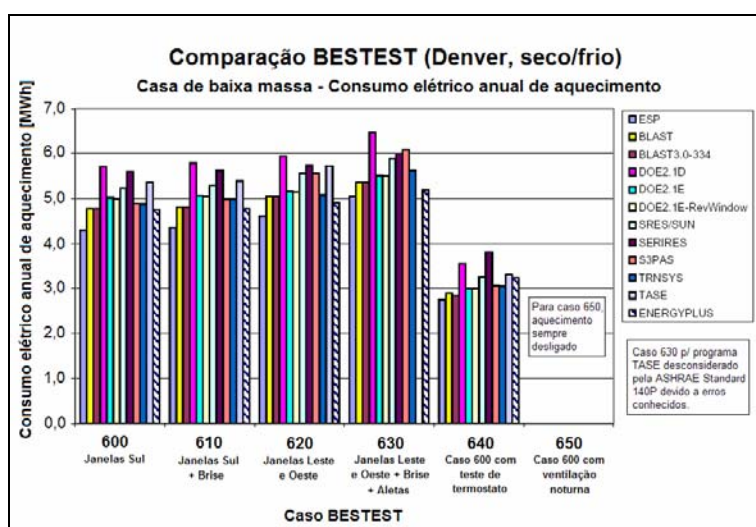


Figura 2.3. *BESTEST* – Comparação do consumo anual de aquecimento de alguns casos.

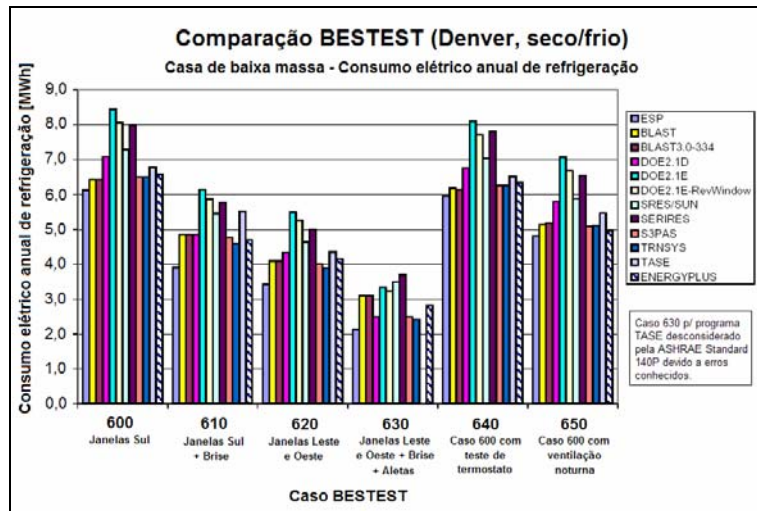


Figura 2.4. BESTEST – Comparação do consumo anual de refrigeração de alguns casos.

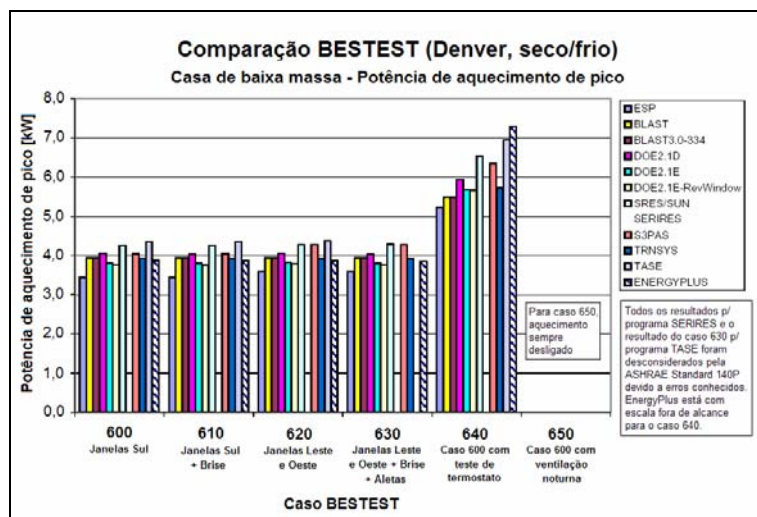


Figura 2.5. BESTEST – Comparação da potência de aquecimento de pico de alguns casos.

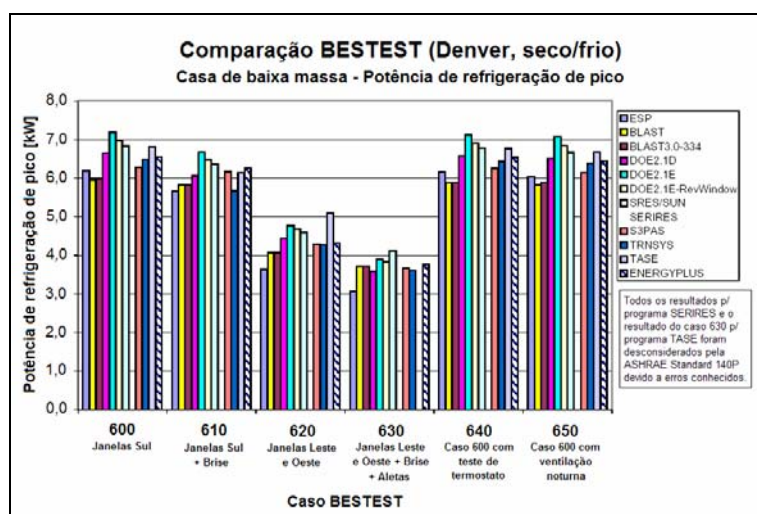


Figura 2.6. BESTEST – Comparação da potência de refrigeração de pico de alguns casos.

Henninger et al., 2004, testaram várias versões do programa *EnergyPlus* contra resultados analíticos utilizando a metodologia *HVAC BESTEST*. Este trabalho nada mais é do que um resumo do relatório técnico apresentado por dois dos autores [Henninger e Witte, 2003b]. Foram feitos testes analíticos e testes comparativos nos 14 casos desta metodologia, que serviram para eliminar erros e validar os algoritmos de resfriamento por expansão direta no *EnergyPlus*. Uma série de parâmetros foram comparados: o consumo elétrico de ventilação interna, a soma dos consumos elétricos de ventilação externa e do compressor, a carga térmica sensível de resfriamento, a carga térmica latente de resfriamento, a soma das cargas sensível e latente de resfriamento, a temperatura de bulbo seco interna e o conteúdo de umidade interna. Os autores chegaram à conclusão de que o *HVAC BESTEST* “é uma ferramenta bastante válida na determinação de excelentes marcas de desempenho em testes de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar e testes de algoritmos de equipamentos contra os resultados de outros programas internacionais de simulação de edificações”. Nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9, respectivamente são mostrados os consumos elétricos anuais de refrigeração causados pelas cargas latente, sensível e total (soma da sensível e latente) [Henninger e Witte, 2003b].

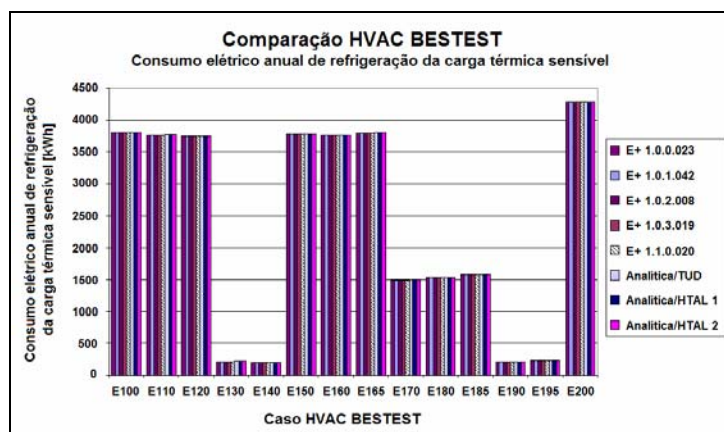


Figura 2.7. HVAC BESTEST – Consumo anual de refrigeração da carga térmica sensível.

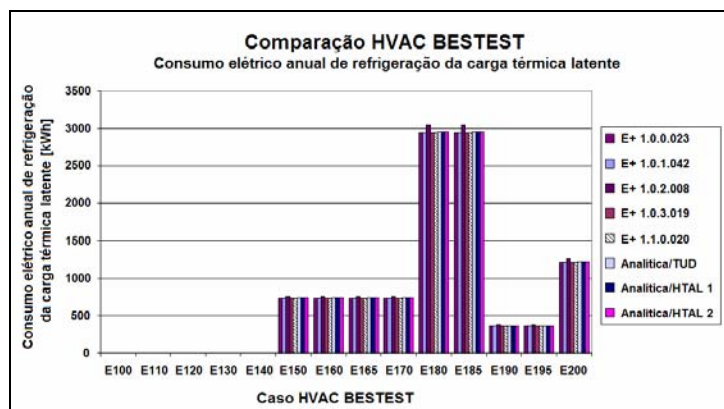


Figura 2.8. HVAC BESTEST – Consumo anual de refrigeração da carga térmica latente.

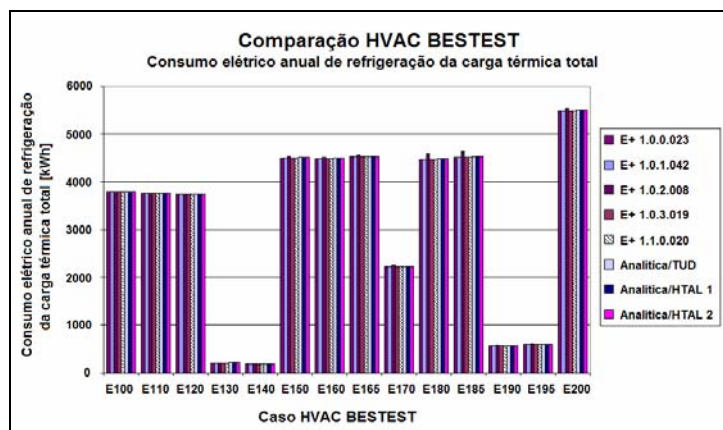


Figura 2.9. HVAC BESTEST – Consumo anual de refrigeração da carga térmica total.

Olsen e Chen, 2003, utilizando o *EnergyPlus*, fizeram uma análise de conforto térmico e de consumo de energia em diferentes sistemas de resfriamento de baixo consumo energético em um clima moderado do Reino Unido. Os sistemas avaliados foram: teto resfriado, ventilação por deslocamento, ventilação natural, resfriamento noturno, um sistema tradicional de vazão variável de ar e um sistema híbrido (divide-se o ano em três situações de uso de equipamentos: ventilação natural, resfriamento e aquecimento). A edificação avaliada consistia em um prédio de três pisos com fachadas quase 100% envidraçadas, contendo um sistema de condicionamento de ar bastante sofisticado (o que sugere que tenha baixo consumo de energia), e foi instrumentada para uma simples validação do programa (no trabalho também é descrita a validação empírica do programa, feita pela *IEA*). Considerando o sistema de condicionamento de ar já existente no prédio, para um típico dia útil e para cada zona definida foram obtidos os gráficos de carga térmica dos equipamentos elétricos e de carga térmica de iluminação artificial. Como resultados, primeiro foram comparados os resultados de simulação com os dados experimentais obtidos (como uma validação adicional do programa). Em seguida foram feitas comparações de consumo de energia, dimensionamento de equipamentos e conforto térmico para os vários sistemas de resfriamento avaliados. No caso do sistema de condicionamento existente no prédio, foi identificada uma vazão de ar de renovação muito acima do necessário (cerca de quatro vezes), o que determina um consumo energético quase cinco vezes maior que os sistemas de baixa energia. Dentre as conclusões, os autores afirmam que “a precisão de suas predições são similares ou melhores que aquelas apresentadas por um estudo de validação empírica da *IEA*; o uso de diferentes vazões de ar de renovação é essencial para minimizar o consumo energético; o resfriamento por ventilação natural de ar exterior é bastante eficaz no clima moderado avaliado; a ventilação natural sozinha não consegue manter as condições de conforto de verão; e o sistema híbrido é a melhor escolha em termos energéticos”.

Silva, 2003, comparou resultados computacionais obtidos com o *EnergyPlus* com resultados medidos de consumo de energia elétrica para o mês de fevereiro em uma edificação bancária real em Porto Alegre. O autor concluiu que o consumo elétrico simulado ficou próximo do consumo elétrico medido, sendo que na terceira semana de fevereiro há uma considerável diferença, a qual, entre outros fatores, o autor atribui à um período em que o sistema de condicionamento de ar da edificação esteve em manutenção. Outra ressalva feita é em relação ao consumo elétrico simulado para os finais de semana, que foram ligeiramente menores que os medidos porque, segundo o autor, “não foi considerado na simulação o funcionamento do sistema de condicionamento de ar da área de auto-atendimento neste período”.

Grings, 2003, comparou resultados computacionais e experimentais do comportamento térmico de um ambiente. Foram obtidos dados através da instrumentação da sala (que coletou dados durante duas semanas ininterruptas), sendo posteriormente comparados com resultados obtidos através de simulações computacionais no *EnergyPlus*. Para realizar esta validação empírica, foi montada uma estação meteorológica que coletou dados (simultaneamente à instrumentação do ambiente), usados posteriormente como arquivo climático no formato *EPW* (*EnergyPlus Weather*), padrão do simulador. Como resultados obtiveram-se gráficos comparativos dos seguintes dados medidos e simulados: temperatura da sala e da carga térmica. A autora ainda analisou estes mesmos gráficos comparativos para diferentes modelos de convecção disponíveis na versão do *EnergyPlus* utilizada: convecção detalhada e céu anisotrópico, convecção simples e céu anisotrópico, e convecção detalhada e céu isotrópico. Finalmente, para avaliar a precisão do arquivo climático medido, a autora comparou seus resultados com resultados obtidos utilizando um arquivo climático no formato *TRY* (*Test Reference Year*). Entre outras conclusões, a autora afirma: “todos os resultados encontrados para as diferenças de temperatura (da sala) apresentaram resultados melhores do que nas simulações implementadas com o *BLAST* (simulações referentes a uma referência bibliográfica utilizada pela autora); para o modelo de convecção detalhado e céu anisotrópico, os resultados de carga térmica sensível em cada dia analisado estão dentro da margem de incerteza prevista ou apresentam uma diferença diária igual ou inferior a 10% entre os resultados medidos e simulados; para o modelo de convecção simples e céu anisotrópico, a carga térmica medida e simulada não apresentam uma boa concordância, ficando o resultado da simulação nestas condições muito além da margem de incerteza”.

2.2.1.2. Outros Trabalhos que utilizam o *EnergyPlus*

Neto, 2002, dimensionou um sistema de ventilação com o propósito de melhorar as

condições térmicas em um pavilhão industrial real em que não havia qualquer sistema no sentido de amenizar as condições de desconforto térmico. O autor fez simulações do pavilhão com e sem ventilação e avaliou o voto médio estimado (*PMV*). Para o inverno, os resultados mostraram que o conforto térmico era atingido mesmo sem ventilação. Já para o verão, com ou sem ventilação o *PMV* não atingiu região de conforto, porém com ventilação há uma significativa melhora nas condições térmicas do ambiente.

Pereira, 2002, analisou a influência termoenergética de seis diferentes tipos de vidros com e sem película aplicados às fachadas de dois tipos de edificações com condicionamento de ar: uma de teste geométrico com 12,5% de sua área das fachadas coberta por janelas, e outra de teste de sombreamento nas janelas com 25% de sua área das fachadas coberta por janelas. Os resultados demonstraram que na edificação de teste geométrico, 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, este índice foi de 70%. Em relação à carga térmica, o uso de um tipo de película reduziu em cerca de 8% a potência sensível instantânea de resfriamento na edificação de teste geométrico e em cerca de 24% na edificação de teste de sombreamento.

Cótica, 2003, analisou o impacto que a retirada de uma proteção externa teria na carga térmica e no consumo elétrico de uma edificação real. O autor simulou três concepções: a existente no prédio, que consistia numa proteção externa de concreto paralela às janelas que impedia totalmente a entrada de radiação solar direta pelos vidros, uma concepção sem proteção alguma e também uma concepção alternativa através do uso de brises tipo colméia fixadas no lugar das proteções de concreto. Os resultados mostraram necessidade de aumento da potência instalada em 21% no caso de uso de brises e de 32% no caso sem proteção. Já no consumo elétrico anual também foi verificada necessidade de aumento considerável nos dois casos.

Driemeier, 2003, utilizando cinco dias de projeto de acordo com a *ASHRAE*, fez o cálculo da carga térmica de resfriamento de um pavilhão industrial localizado na região metropolitana de Porto Alegre e dimensionou um sistema de condicionamento de ar. Também foi simulado o consumo elétrico anual do sistema de condicionamento de ar utilizando um arquivo climático. Com área de 7000 m² e pé direito médio de 8 m, a carga térmica de resfriamento calculada para o pavilhão foi de cerca de 1.885 kW (526 TR). Foram obtidos gráficos: do *PMV* e de consumos elétricos (do prédio, do condicionador de ar, e total). Foi apresentado ainda um estudo estimado da eficiência da produtividade por estação do ano, baseado numa metodologia da própria empresa, que demonstrou que no verão a empresa deixa de vender cerca de meio milhão de reais em produtos devido à queda na produtividade. O autor conclui que o custo de instalação do

sistema de condicionamento de ar, de R\$ 2.144.000,00, seria pago após transcorrerem pouco mais de quatro meses de verão.

Foresti, 2003, dimensionou um sistema de condicionamento de ar do tipo *Fan Coil* para três salas cirúrgicas classe I. As cargas térmicas de verão e inverno são calculadas para a cidade de Bento Gonçalves e os resultados mostram que a potência necessária do sistema é superior a 9.000 W (2,56 TR). Também são obtidos resultados gráficos da evolução da umidade relativa e da temperatura interna das salas ao longo dos dois dias de projeto (um de verão e um de inverno), e são verificadas que as condições internas do ar por normalização brasileira são atendidas

Verdi, 2003, realizou uma análise termoenergética de uma edificação comercial em Porto Alegre, com o objetivo de substituir o sistema de condicionamento de ar existente por um sistema de climatização com aquecimento a gás, visando um menor consumo energético. Foram determinados e analisados a potência do sistema de *HVAC*, umidade, temperaturas, indicador de conforto térmico, dimensionamento e consumo dos equipamentos de climatização. A fim de avaliar possibilidades de reduzir a potência necessária de equipamentos de climatização e, conseqüentemente, o consumo energético e os custos relacionados, também foram simuladas e analisadas algumas alternativas factíveis para reduzir a carga térmica da edificação, tais como: aplicação de película refletiva nas janelas, a utilização de diferentes isolamentos térmicos sobre a laje, a colocação de folha polida de alumínio sobre o telhado e combinações desses. Segundo o autor, “os resultados demonstraram que é possível reduzir significativamente a carga térmica da edificação e que, para baixos consumos, não é viável utilizar o gás natural”.

Wallauer, 2003, obteve resultados em termos de conforto térmico em uma casa popular padrão, sem sistema de condicionamento de ar, para quatro capitais brasileiras: Belém, Brasília, Recife e São Paulo. Utilizando a metodologia do *PMV*, o conforto térmico dos ocupantes foi simulado e analisado para uma semana representativa da época do ano mais quente, e outra semana representativa da época do ano mais fria, o que necessitou a utilização de arquivos climáticos das cidades. Levou-se em conta diversos aspectos relativos a uma casa comum, tais como: rotinas de ocupação, nível de atividades, fator de vestimenta e número de moradores, ganhos de calor internos e renovação do ar. A modelagem da infiltração de ar e ventilação da residência foi feita utilizando-se a sub-rotina de fluxo de ar multizona *COMIS (Conjunction of Multi-zone Infiltration Specialists)*, presente no *EnergyPlus*. O autor cita algumas limitações do programa simulador: “a principal limitação do simulador foi a ausência do cálculo da velocidade do ar que entra ou sai das zonas em estudo”, e “uma outra limitação deste programa é quanto à leitura da temperatura de solo dada através dos arquivos climáticos das cidades, pois foi

constatado que o programa não utiliza as temperaturas do solo disponíveis nos arquivos climáticos e deve-se, portanto, informá-las através do editor do programa”. Dentre as conclusões, o autor diz: “durante as noites e principalmente durante as madrugadas de alguns dias estudados, os valores de *PMV* indicaram a sensação de frio para os moradores. Essa situação pode ser facilmente melhorada mudando as vestimentas das pessoas, adequando de uma melhor forma a resistência térmica das roupas ao clima da cidade”. Numa comparação entre as cidades, em relação aos dias de verão simulados, observa-se de um modo geral que em Brasília e em São Paulo há os melhores índices *PMV* (os mais próximos de condições de conforto), enquanto em Belém e Recife há consideráveis índices *PMV* de desconforto indicando calor excessivo; já em relação aos dias de inverno simulados, observam-se índices *PMV* geralmente dentro da faixa de conforto térmico para todas as cidades, exceto quando são comparados dias de pouco vento, em que Belém e Recife apresentam resultados que saem ligeiramente desta zona.

Schwieder, 2004, comparou resultados de consumo elétrico anual e de potência de refrigeração de uma edificação com dois tipos de vidro: um simples com transmitância visível nominal de 90% e um vidro simples com película de transmitância visível nominal de 10%. Após fazer uma análise econômica comparativa, considerando no caso dos vidros com película o custo de instalação da película mais o custo de instalação do sistema de condicionamento de ar dimensionado para estes vidros com película, e considerando no caso dos vidros sem película o custo do sistema de condicionamento de ar dimensionado para estes vidros sem película, a economia do primeiro caso sobre o segundo seria de 31%. Já considerando o caso em que os vidros com película fossem instalados na edificação com sistema de condicionamento de ar para atender o caso de vidros sem película (ou seja, tendo potência ociosa), a economia no consumo elétrico pagaria o custo da película após decorrerem oito anos.

2.2.2. Trabalhos que Utilizam as Metodologias de Validação Apresentadas

Neymark et al., 2002, aplicando a metodologia *BESTEST*, fizeram uma verificação da modelagem de equipamentos de condicionamento de ar presentes nos seguintes programas computacionais: *CA-SIS*, *Clim2000*, *EnergyPlus*, *Prometheus*, *TRNSYS-TUD* e *DOE-2.1E*. Foram obtidos resultados gráficos do *COP* (*Coefficient of Performance*) e faixas de diferenças de resultados (do *COP*, do consumo elétrico total, do conteúdo de umidade e da temperatura da zona térmica), devidamente comparados com resultados analíticos. Numa primeira fase, ainda sem a utilização do *BESTEST*, foram obtidos resultados gráficos de *COP* para todos os programas, sendo verificadas diferenças consideráveis, da ordem de 20 a 45%. Em seguida, aplicando a metodologia *BESTEST*, foram identificados, listados e corrigidos a maioria dos erros

dos programas, e novamente obtiveram-se os resultados gráficos de *COP*, nos quais foram observadas boas convergências entre os resultados dos programas e os resultados analíticos, com diferenças menores que 1%. Os autores concluem o trabalho fazendo algumas ressalvas muito importantes: ainda restam casos isolados de não-convergência do *COP*; os casos avaliados checam a performance dos equipamentos sobre uma faixa de operação limitada; e afirmam que “dentro do alcance dos projetistas, a simulação é a única maneira prática de executar um problema de integração de sistemas desta magnitude”.

Hayez et al., 2001, utilizando o *HVAC BESTEST*, testaram dois programas de simulação dinâmica: *Clim2000* (dedicado a estudos de pesquisa e desenvolvimento) e *CA-SIS* (desenvolvido para estudos de escritórios de engenharia). Para o consumo total de energia de resfriamento, a diferença entre o *CA-SIS* e os resultados analíticos foi menor que 1% e para o *Clim2000* menor que 1,2%; Para a carga total de resfriamento no condensador, estas diferenças foram menores que 0,6% e 1,1%, respectivamente; e para o *COP* médio, estas diferenças foram menores que 0,5% e 1,2%, respectivamente. Como conclusões, os autores afirmam que “ambos os programas obtiveram bons resultados em comparação com outros programas de simulação e com os resultados analíticos, e o procedimento *HVAC BESTEST* é proveitoso na avaliação de programas de simulação”.

Westphal e Lamberts, 2003, apresentaram uma metodologia para análise de carga térmica de edificações não-residenciais baseada em dados climáticos simplificados, disponível para 206 localidades brasileiras. Esses dados incluem as médias das temperaturas máxima e mínima mensais, pressão atmosférica, cobertura de nuvens e umidade relativa. Para cada mês, dois dias típicos foram usados para estimar as cargas de aquecimento e resfriamento (de pico e anual), que foram calculadas utilizando o Método da Função de Transferência (*Transfer Function Method*). A validação foi feita de acordo com a norma *ASHRAE Standard 140*. Como resultado, a metodologia mostrou bons resultados para casos com envelope de baixa massa, mas se mostrou limitado para representar a influência da inércia térmica nas cargas térmicas anuais de aquecimento e resfriamento. Os autores ainda fazem uma ressalva, informando que os arquivos climáticos utilizados na metodologia *BESTEST* representam climas muito severos, bastante diferentes da maioria dos climas brasileiros. Para a continuação do estudo, os autores sugerem uma comparação desta metodologia com *softwares* de simulação horária já validados, como o *DOE-2.1E* ou o *EnergyPlus*, que pode ajudar na análise das habilidades do método por eles apresentado.

2.2.3. Trabalhos que Enfocam Vidros

Ross et al., 2001, fizeram uma comparação entre resultados experimentais e computacionais de propriedades óticas com dependência angular de vidros de controle solar e vidros com baixa emissividade (*Low-E*). O objetivo foi de identificar maneiras confiáveis de prever a dependência angular sem a necessidade de realizar medições ou cálculos detalhados, e resultou no desenvolvimento e validação de dois novos algoritmos preditivos: um modelo híbrido equivalente, baseado em um modelo de aproximação em massa apresentado por Rubin et al., 1999, e que necessita de um arquivo de dados espectrais do vidro a ser avaliado; e um modelo empírico, que considera que os perfis angulares das propriedades óticas dos vidros podem ser simulados através de um polinômio simples. Para os revestimentos estudados a precisão destes algoritmos ficou dentro do intervalo de 1% dos valores obtidos por medições ou por aproximação de Fresnel.

Rubin et al., 1999, procurando determinar a dependência angular das propriedades óticas de vidros (transmitâncias e refletâncias solar e visível), apresentaram resultados de um modelo monolítico (apenas vidro) e um modelo de película fina (considerando vidro mais uma, duas ou três camadas de películas), comparados com os resultados de um modelo estrutural detalhado. Para o desenvolvimento destes modelos computacionais detalhados, levaram em consideração uma série de métodos e modelos já anteriormente apresentados na comunidade científica. Foram gerados dados precisos de dependência angular para uma ampla seleção de vidros revestidos, podendo ser usados para confirmar a validade de qualquer modelo de dependência angular que venha a ser proposto. Após uma avaliação dos resultados, considerando um ângulo de incidência solar de 60°, os autores afirmam que, entre os modelos físicos simplificados que podem ser utilizados com dados padrão, apenas o modelo monolítico tem uma solução exata. Concluiu-se que, “como representação real de uma estrutura de vidro não revestido, o modelo monolítico é bastante preciso, porém, para uma estrutura de vidro revestido este modelo também está próximo”. Dos modelos de película fina, obteve-se que: o modelo com uma camada não acrescenta uma grande melhora na precisão quando comparado com o modelo monolítico; o modelo com duas camadas apenas converge para tipos de revestimentos de estrutura e composição similares; e o modelo com três camadas converge para dois revestimentos similares ao modelo detalhado, além de convergir para casos de revestimentos de estruturas simples.

Fernandes, 1998, avaliou a influência do vidro no consumo de energia em edificações através da medição experimental dos coeficientes de transmissão de luz dos principais tipos de vidro utilizados na construção civil e verificação da influência destes no consumo de energia de uma edificação com condicionamento de ar e iluminação artificial através de simulações

computacionais. Segundo a autora: “o consumo de energia despendido através de aparelhos de ar condicionado é muitas vezes maior do que o consumo com iluminação artificial quando ambos estão presentes na edificação. Isto não significa que não deva haver cuidados com a iluminação artificial e muito menos menosprezo com a iluminação artificial. Significa que na especificação do tipo de vidro utilizado deve ser dada maior atenção às suas características térmicas do que luminosas”.

Chaiyapinunt et al., 2004, estudaram, para a cidade de Bangkok, o impacto de diferentes tipos de vidros e películas no conforto térmico e na transmissão de calor. Foi utilizado como índice de conforto térmico a porcentagem estimada de insatisfeitos (*PPD*) e como índice de transmissão de calor o ganho relativo de calor (*RHG*). As análises indicaram para a maioria dos vidros, exceto os reflexivos, o efeito dos valores do *PPD* devido aos efeitos da radiação solar foram muito maiores que os valores do *PPD* devido aos efeitos da temperatura superficial dos vidros. A condição em que houve maior desconforto ocorreu quando se utilizou o vidro simples transparente nas janelas. As películas aderidas aos vidros causaram um aumento do *PPD* devido aos efeitos da temperatura superficial dos vidros, porém causaram uma diminuição do *PPD* devido aos efeitos da radiação solar. Foi determinado que os valores do *PPD* devido aos efeitos da radiação solar nos vidros variam linearmente com a transmitância total dos vidros, enquanto que os valores do *PPD* devido aos efeitos da temperatura superficial dos vidros variam quase que linearmente com a absorptância total dos vidros. Já na análise de transmissão de calor, concluiu-se que os valores do *RHG* devido aos efeitos da radiação solar foram muito maiores que os valores do *RHG* devido aos efeitos condutivos para quase todos os tipos de vidros estudados. As películas causam uma diminuição do ganho relativo de calor devido à radiação solar, mas possuem pouco efeito no ganho relativo de calor devido à condução. O *RHG* variou linearmente com a transmitância total dos vidros, porém variou inversamente com a absorptância dos vidros.

Duer et al., 2002, tendo em mente a influência das janelas no consumo de energia nas edificações e visando encorajar o desenvolvimento e o uso apropriado de vidros e janelas de alta performance, estão desenvolvendo uma avaliação dos sistemas para janelas e vidros e calculando propriedades termoenergéticas destes sistemas. Foram estudados diferentes tipos de vidros e diferentes tipos de molduras, e foram calculados uma série de propriedades (valor-U, transmitância solar e visível, e a transmitância térmica linear) usando vários programas computacionais. Estas propriedades também foram medidas experimentalmente e uma comparação entre resultados medidos e calculados foi feita. Algumas discrepâncias entre os valores medidos e calculados ocorreram em janelas com camadas de vidros bastante espaçados. Para a moldura de alumínio, a comparação mostrou que devem ser tomados cuidados ao modelar

perfis com resistências térmicas críticas como as causadas por lacunas de ar entre partes altamente condutivas. Os autores concluem que “uma boa consistência foi achada entre os resultados calculados, independentemente de qual programa de cálculo foi usado, e disso pode-se concluir que todos os programas avaliados podem ser usados para cálculo de propriedades termoenergéticas de vidros e janelas”.

Rosa e Lomardo, 2004, considerando a crise ocorrida no setor energético brasileiro no ano de 2001, fizeram um estudo do consumo elétrico de uma edificação com vistas na criação de uma legislação brasileira de eficiência energética. Primeiramente os autores discorrem sobre a falta de planejamento que causou a crise, e em seguida são apresentados alguns resultados de padrões de consumo energético de algumas edificações. Foi feito um estudo de caso paramétrico através da simulação de uma edificação real, onde foram avaliadas variações da razão de área janela-parede, o uso de sombreamento interno, o uso da luz natural como alternativa para diminuir o uso de energia através de iluminação artificial, e dois tipos de vidros, aspectos estes que devem ser considerados como de maior importância para uma futura legislação brasileira de eficiência energética. Foram obtidos resultados gráficos comparativos do consumo energético anual e mensal. Os autores afirmam que, aliando a proporção ideal de janelas nas fachadas ao uso de iluminação natural em uma edificação de escritório, o consumo de energia pode ser reduzido em até 13,4%, e mais ainda se for usado um vidro de baixa emissividade (13,6%) ou cortina interna (14,4%). A conclusão a que chegam é de que apenas otimizar a proporção da área das janelas oferece um significativo potencial de economia no consumo energético e o uso de cortinas interiores pode aumentar consideravelmente a economia.

2.2.4. Trabalhos que Adotam Conceitos de Eficiência Energética

Lee et al., 2002, adotando conceitos de eficiência energética, acompanharam uma edificação real desde a etapa de projeto e fizeram uma calibração de um modelo da mesma utilizando o software de simulação termoenergética *VisualDOE*, que é uma interface gráfica do *DOE-2.1E*. A calibração foi feita utilizando medições de consumo por uso final em circuitos elétricos. Comparando resultados do prédio real com o prédio simulado, os autores obtiveram, para o consumo elétrico ao longo dos 12 meses do ano, diferença mensal máxima de: 7,5% considerando o consumo da central de água gelada, e 1,59% desconsiderando o consumo da central de água gelada.

Carlo et al., 2004, aplicando alguns conceitos de eficiência energética, fizeram simulações do consumo de energia de uma proposta para um Código de Obras municipal que indicaram o potencial de economia no consumo de energia elétrica de edificações de escritório

na cidade do Recife. Os conceitos simulados limitavam-se a tipos de vidros e proteções solares para as janelas e uso de controles do tipo liga-desliga no sistema de iluminação artificial quando houvesse luz natural suficiente no plano de trabalho. Comparados a 4 modelos utilizados como referência, a economia variou de 7% a 21% para 8 modelos de edificações simulados.

Bülow-Hübe, 1998, utilizando dois programas simuladores (*ADELIN 2.0* e *DEROBLTH*), estudou os efeitos do tipo de vidro e tamanho das janelas na demanda anual de aquecimento e refrigeração de uma edificação de escritório modular na Suécia. O escritório, para uma pessoa, possui volume de 32,9 m³ (4,2 m de comprimento, 2,9 m de largura e 2,7 m de altura), e seu caso base possui duas janelas na fachada sul com vidro triplo transparente, carga térmica total de 330 W no horário comercial (240 W no horário de almoço), e um tradicional sistema de controle liga/desliga da potência das lâmpadas. A autora estudou 4 tipos de configurações de vidros (vidro duplo transparente, vidro triplo transparente, vidro triplo com película prata de baixa emissividade, e vidro triplo “super isolado”, com duas faces com película de baixa emissividade e com as duas lacunas preenchidas com gás criptônio), 6 diferentes configurações de área envidraçada de uma das fachadas do escritório (razão da área da janela e parede de 0, 10, 20, 30, 40 e 50%), 8 orientações da edificação, 3 localizações geográficas (Estocolmo, Luleå e Lund), utilização de um sistema de controle automático da potência das lâmpadas baseado na iluminância natural, e variação da carga térmica, da taxa de ventilação e do isolamento das paredes. Dentre os casos simulados para a cidade de Lund, os resultados mostram que a demanda elétrica de aquecimento variou em até 219%, enquanto a demanda elétrica de refrigeração variou em até 275%. Dentre as conclusões, a autora cita que: “Para a demanda de refrigeração, os seguintes parâmetros mostram uma grande influência (em ordem decrescente): tamanho das janelas, orientação das janelas, taxa de ventilação, carga térmica, e utilização de iluminação natural. A demanda de aquecimento é afetada principalmente por: taxa de ventilação, clima, orientação e tipo de vidro”.

2.2.5. Outros Trabalhos

Flesch, 2003, avaliou a lavanderia hospitalar do Hospital Universitário de Porto Alegre em termos de conforto térmico e estresse térmico, identificando pontos falhos e propondo melhorias no ambiente, segundo normas vigentes. O autor fez uma boa revisão bibliográfica sobre normas de conforto térmico (*ISO 7730*, *ISO 8996*, *ISO 9920*, *ISO/DIS 7726*, e *ASHRAE Standard 55*) e de estresse térmico (*NR-15*, *ISO 7243*, e *ISO 7933*), e utilizou os seguintes índices de avaliação de conforto térmico: o *PMV*; o *PPD* (*Predicted Percent Dissatisfied*), conhecido como método de percentual previsto de insatisfeitos; e dois métodos de dois nós, um

de sensação térmica (*TSEN*) e outro de desconforto térmico (*DISC*). Já para avaliação do estresse térmico foram utilizados dois índices: o *IBUTG*, sigla para Índice de Bulbo Úmido e Temperatura de Globo; e o *HSI* (*Hot Stress Index*), conhecido como índice de stress por calor. Em medições experimentais, o autor chegou a verificar temperaturas no ambiente cerca de 25% maiores que o limite de tolerância normalizado pela NR-15, que é de 30%. Após analisar as medições, o autor sugeriu propostas para melhorar as condições térmicas da lavanderia: instalação de coifas de exaustão nas calandras, transformar o duto de ventilação em um sistema de exaustão, colocação de blindagem opacas à radiação infravermelha nas máquinas, e isolar os dutos de entrada de vapor. Destas propostas, foi feita uma reforma na lavanderia onde foram implementados o sistema de exaustão e a blindagem, sendo novamente feitas medições para verificar se as condições de conforto térmico foram atingidas. Segundo o autor: “os indicadores de conforto térmico demonstram que as condições térmicas em janeiro de 2003 (após a reforma) são muito semelhantes às verificadas em junho de 2001 (antes da reforma)”, porém “o índice *IBUTG*, que avalia se um ambiente é insalubre termicamente, apresentou um resultado muito satisfatório com as modificações ocorridas na lavanderia”.

Maciel e Lamberts, 2002, fizeram uma análise das características arquitetônicas de uma edificação em Brasília, através da avaliação bioclimática desta cidade. A edificação apresentava características de acordo com estratégias indicadas pelas cartas bioclimáticas mais apropriadas à região. Medições da temperatura de bulbo seco e umidade relativa foram realizadas e foram coletadas, através de questionários, as respostas dos usuários em relação à sensação térmica. Foi constatado que a pouca ventilação era, segundo os usuários, a maior causa de desconforto térmico. As características do edifício configuraram um ambiente de baixa carga térmica, possibilitando que o conforto térmico pudesse ser resolvido através dos seguintes sistemas de climatização de baixo consumo energético, que foram implementados: isolamento térmico da cobertura, resfriamento evaporativo por microaspersão, e vedação do sistema de renovação de ar existente. Os autores concluem que nos meses mais quentes o sistema de resfriamento evaporativo demonstrou ser bastante eficiente mantendo o pico de temperatura diurno abaixo de 26,5°C. Devido ao isolamento térmico na cobertura e à cor clara da pintura os ganhos de calor pela cobertura foram reduzidos. Foi testado também um sistema de ventilação noturna, o qual se mostrou inapropriado ao clima da cidade e às características térmicas do prédio. No inverno, com temperaturas externas inferiores à 27°C, o uso de sistemas de resfriamento é dispensável, sendo mais adequado o aproveitamento da radiação solar direta nos ambientes. Os autores ainda destacam o aumento da aceitação, por parte dos usuários, de sistemas alternativos de climatização a partir do momento em que usufruem seus efeitos.

3. CONCEITOS

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre conforto térmico, voto médio estimado, radiação térmica e estresse térmico em vidros, que contribuem para o entendimento do trabalho.

3.1. Conforto Térmico

Do ponto de vista da engenharia térmica, o corpo humano pode ser considerado uma fonte de calor tanto sensível quanto latente. Beyer, 2001, enumera os seguintes meios de dissipação de calor do corpo humano (e diz que a soma destas taxas de calor enumeradas abaixo com a taxa de trabalho realizado pela pessoa é igual à taxa de produção de energia metabólica):

- Dissipação pela pele: ocorrem perdas de calor por convecção e radiação (calores sensíveis), e perdas de calor por evaporação da transpiração e por difusão de água (calores latentes).
- Dissipação pela respiração: ocorrem perdas de calor por convecção (calor sensível) e perda de calor evaporativo (calor latente).

Já Guyton, 1988, diz que o corpo humano perde calor pelos seguintes meios: radiação pela pele, por evaporação da água pelos pulmões e pela pele, por convecção pelo ar, e por condução para objetos em contato com o corpo. O autor ainda diz que “o metabolismo corporal é a expressão da intensidade (ou da velocidade) com que a energia está sendo liberada pelo metabolismo dos nutrientes em todo o corpo. Sob condições de repouso, seu valor é de 60 a 70 cal/h... ...a temperatura corporal é controlada, de modo muito preciso, por equilíbrio entre a intensidade da perda de calor e a intensidade da produção de calor”. Guyton considera os seguintes índices de perda de calor para uma pessoa despida: 60% por radiação, 22% por evaporação, 15% por convecção, e 3% por condução para objetos.

Este calor gerado necessita ser dissipado continuamente, caso contrário a temperatura corporal subiria indefinidamente. É a partir daí que se pode deduzir o conceito de conforto térmico: atinge-se o conforto térmico quando o corpo humano dissipa exatamente a quantidade de calor que está produzindo, sendo capaz de manter sua temperatura interna do tórax em torno de 37°C. Este conceito, embora apresentado de maneira objetiva, na prática é muito difícil de ser atingido, pois as pessoas estão constantemente realizando movimentos, os quais alteram a taxa de dissipação de calor e conseqüentemente alteram o equilíbrio térmico com o ambiente.

As pessoas percebem e relatam sensações de calor e de frio de maneira bastante distinta,

sendo impossível atingir uma condição ambiental em que todas as pessoas estejam satisfeitas termicamente em um ambiente, podendo-se enumerar uma série de fatores responsáveis por isto: aspectos biológicos, físicos e emocionais, efeito de medicamentos, febre corpórea, vestimentas inadequadas, etc.

Assim, um outro conceito, usualmente usado na engenharia, é o de que “conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” [ASHRAE, 1992]. Apesar de sua subjetividade, e levando em consideração que “o principal objetivo de sistemas de ventilação, aquecimento e condicionamento de ar é prover condições para o conforto térmico humano” [ASHRAE, 2001], é através dele que se pode usar “equações empíricas para relatar as percepções de conforto e as trocas térmicas existentes entre o corpo e o ambiente” [Beyer, 2001].

3.2. Voto Médio Estimado e Porcentagem Estimada de Insatisfeitos

Para expressar a satisfação ou não de um grupo de pessoas em um ambiente térmico, foram desenvolvidos métodos de predição do conforto térmico, tais como o modelo de voto médio estimado de Fanger, ou *PMV* (*Predicted Mean Vote*), o modelo de dois nós de Pierce, e o modelo de dois nós da *KSU* (*Kansas State University*).

Através de numerosos experimentos sujeitando pessoas a vários tipos de ambientes térmicos, Fanger correlacionou as respostas das pessoas em relação às variáveis que influenciam a condição de conforto térmico, o que deu origem ao *PMV* [EnergyPlus Manual, 2003a]. Publicado em 1967, o *PMV* “está relacionado ao desbalanço entre o fluxo de calor do corpo humano em um dado ambiente e o fluxo de calor requerido para otimizar o conforto em uma atividade específica” [ASHRAE, 2001].

Assim, o *PMV* é um índice em função da taxa metabólica e do balanço de calor do corpo humano, e para calculá-lo é necessário obter dados relativos ao ambiente térmico em estudo. Uma vez calculado, utiliza-se uma escala de sensação térmica de sete pontos para “predizer a resposta média de um grande grupo de pessoas sobre esta sensação” [ASHRAE, 2001].

Devido a fatores como aspectos biológicos, físicos e emocionais, citados anteriormente, ainda que o *PMV* indique uma classificação neutra de um ambiente, é praticamente impossível que este seja considerado satisfatório termicamente por todas as pessoas presentes, mesmo que elas estejam vestidas com roupas idênticas e realizando a mesma atividade. Para considerar esta insatisfação de algumas pessoas, foi criada a metodologia da porcentagem estimada de insatisfeitos, ou *PPD* (*Predicted Percent Dissatisfied*), que é um índice em função do *PMV* e indica a porcentagem das pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico.

No apêndice A é apresentado um roteiro para o cálculo do *PMV* e do *PPD*.

3.3. Radiação Térmica

Radiação é a emissão de energia por meio de ondas ou partículas. Diferentemente dos processos de transferência de calor por condução e convecção, a transferência de calor por radiação não exige a presença de um meio material entre os corpos que trocam calor, dependendo apenas que eles se “enxerguem” e que haja uma diferença de temperatura entre eles.

A radiação eletromagnética é a transmissão da energia em forma de ondas, com um componente elétrico e outro magnético. Ela “é continuamente emitida por toda substância por causa da agitação molecular e atômica associada com sua energia interna” [Siegel e Howell, 2002]. O espectro da radiação eletromagnética qualifica a radiação eletromagnética com relação ao seu comprimento de onda λ , definindo regiões para os raios gama, os raios X, os raios ultravioletas (UV), a luz visível, os raios infravermelhos (IV), as microondas e as ondas de rádio.

A radiação térmica é toda “radiação detectada como calor ou luz” [Siegel e Howell, 2002]. Ela é definida como sendo a “energia eletromagnética emitida pela matéria a uma temperatura não-nula e concentrada na região espectral de aproximadamente 0,1 μm até 100 μm ” [Incropera e DeWitt, 1998], ou seja, a radiação térmica é emitida em uma faixa de comprimento de onda específica. Esta faixa inclui parte da região de raios ultravioletas além de toda a região de luz visível e de toda a região de raios infravermelhos.

Na Figura 3.1 é mostrado o espectro da radiação eletromagnética, onde se pode observar a região da radiação térmica, que é de interesse do estudo da transferência de calor. Podem-se observar também as faixas de comprimento de onda de cada cor do espectro visível. Nota-se que a faixa do IV é dividida em duas: a de onda curta ou IV próximo (0,780 à 15 μm) e a de onda longa ou IV longínquo (15 à 100 μm).

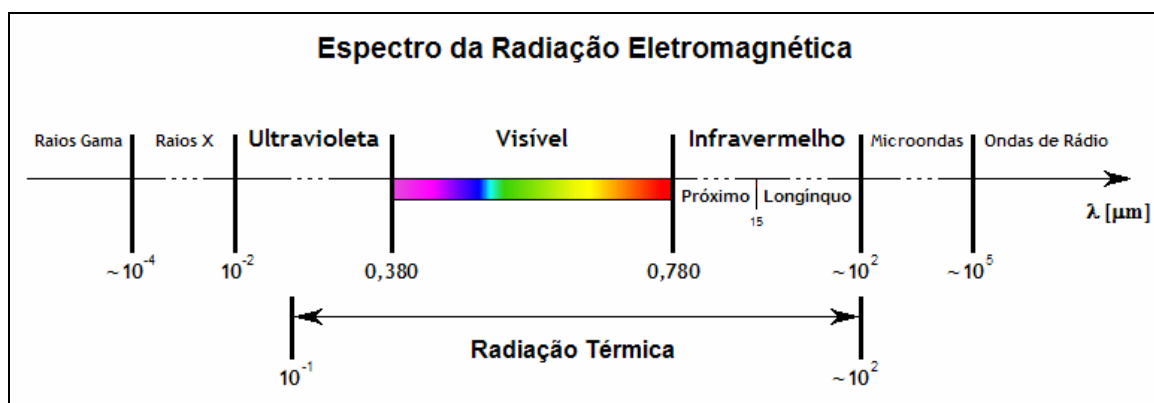


Figura 3.1. Espectro da radiação eletromagnética.

3.4. Estresse Térmico em Vidros

O vidro, como todos os materiais, pode ser quebrado se sobre ele forem aplicadas forças de magnitude suficiente para tal. Muitas são as causas de quebra não-acidental de vidros, tais como: movimentação estrutural da edificação ou da estrutura da janela, fatores climáticos como vento e chuva de granizo, e estresse térmico.

3.4.1. Definição

O estresse térmico em vidros “é causado quando a área central é aquecida enquanto a periferia permanece fria. Isto cria tensões na periferia que, se excessivas, podem causar a quebra do vidro temperado” [Pilkington, 2002a], ou seja, este fenômeno “surge de diferenças entre a temperatura do miolo do vidro com as partes mais periféricas do vidro” [Newton et al., 2005].

Ele é causado principalmente pela magnitude da diferença de temperatura dentro do vidro e é independente de seu tamanho. É a condição da periferia do vidro que determina a dureza do vidro e sua resistência à quebra.

Este fenômeno é observado principalmente em vidros temperados que receberam aplicação de películas de controle térmico, e é caracterizado pelo aparecimento de trincas ou até mesmo ruptura dos vidros.

3.4.2. Fatores Causadores

Alguns tipos de vidros ou de películas tendem a ser mais propícios à falha por estresse térmico. Segundo a Viracon, 2001, “certos tipos de vidros coloridos e películas estão inerentemente ligados ao risco de ruptura por estresse térmico, tais como os vidros com películas reflexivas e com películas de baixa emissividade”; já segundo a Pilkington, 2002b, “o uso de películas de baixa emissividade restringe o fluxo de calor na direção da face onde a película está aplicada, aumentando a temperatura do vidro e as tensões”.

Também é sabido que sistemas de condicionamento de ar, ou *HVAC (Heating, Ventilating and Air-Conditioning)* potencializam o problema de estresse térmico, visto que o gradiente de temperatura entre o ambiente interno e o externo aumenta.

Outros fatores podem causar as grandes diferenças de temperaturas que resultam em excessivas tensões em vidros [Pilkington, 2002a]:

- Vidros com alta absorção de radiação solar nas áreas expostas à luz solar enquanto as partes sombreadas permanecem frias.
-

- Altos níveis de radiação solar a grandes altitudes em atmosfera limpa ou múltiplas fontes de radiação refletida de janelas adjacentes, neve, água, etc.
- Grande área sombreada causada pelos divisores de esquadria, marquises, brises, etc.
- Localização incorreta dos difusores do sistema de *HVAC*, que insuflam ar quente ou frio diretamente contra os vidros.
- “Armadilha de calor”, tais como as causadas por cortinas isolantes, persianas opacas bastante próximas dos vidros, adesivos e decorações nos vidros, etc.
- Moldura com grande inércia térmica, como o concreto, que evita que a periferia do vidro seja aquecida quando exposta à luz solar.

3.4.3. Características e Tipos de Trincas

Algumas características das fraturas causadas por estresse térmico podem ser enumeradas e referenciadas na Figura 3.2 apresentada na seqüência [Alpena, 2004]:

- São iniciadas sempre nas bordas dos vidros (A), nunca no meio (B). Elas têm sempre ângulo de 90° em relação à borda e à superfície do vidro.
- As fraturas sempre seguem retas, por 2cm, ou no máximo 5cm, e só depois começam a fazerem curvas (C).
- O estresse térmico sempre se origina na parte central das bordas do vidro, ou seja, a fratura nunca se iniciará no canto (D, E, F). Vidros de baixa qualidade apresentam trincas que vão até o meio (D). Em vidros de qualidade média as trincas vão de borda à borda (E). Já em vidros de boa qualidade as trincas se desenvolvem em formato Y de borda à borda (F).

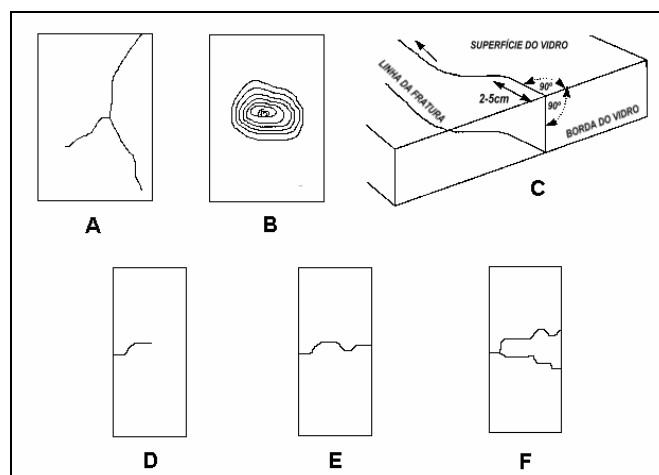


Figura 3.2. Características das trincas em vidros.

4. PROGRAMA SIMULADOR UTILIZADO

Muitos dos populares programas de simulação energética de edificações estão alcançando a maturidade, pois a maioria de seus métodos de simulação foram desenvolvidos a partir da década de 1960. O *EnergyPlus* é um programa que não foge à esta regra, pois apesar de ter seu desenvolvimento iniciado a partir de 1996, tem suas raízes em dois outros programas: *BLAST* (*Building Loads Analysis and Thermodynamics*) e *DOE-2* (*Department of Energy*), que foram desenvolvidos a partir do final da década de 1970 através de investimentos feitos em universidades pelo Departamento de Defesa dos EUA, no caso do *BLAST*, e pelo Departamento de Energia dos EUA, no caso do *DOE-2* [Crawley et al., 2001].

Como o *BLAST* e o *DOE-2* foram desenvolvidos para computadores centrais, promover a expansão de suas capacidades se tornou difícil, cara e consumidora de bastante tempo. Ao mesmo tempo, nos últimos 30 anos apareceram significantes avanços nos métodos computacionais e na potência dos computadores pessoais, possibilitando aperfeiçoar estas ferramentas à baixo custo e rapidamente [Crawley et al., 2001].

Isso fica claro quando se verifica que “a velocidade com que as novas tecnologias no campo de *HVAC* são desenvolvidas há muito tempo ultrapassou a habilidade dos grupos de suporte e desenvolvimento dos dois programas (*BLAST* e *DOE-2*) em mantê-los atuais e viáveis. Assim, a real razão da existência do *EnergyPlus* é que simplesmente não existe um número suficiente de pesquisadores ao redor do mundo que têm experiência suficiente em relação ao complexo código desses programas para manter o passo com as novas tecnologias” [EnergyPlus Manual, 2003b].

4.1. Descrição do Programa

Como seus progenitores, o *EnergyPlus* é um programa computacional capaz de fazer análise energética e simulação de carga térmica de construções. Baseando-se na descrição da edificação feita pelo usuário a partir da perspectiva da constituição física da edificação e seus sistemas mecânicos associados, o *EnergyPlus* calcula as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter um adequado controle térmico, as condições por todo o sistema secundário de *HVAC* e nas cargas da serpentina, e o consumo energético dos equipamentos da planta primária, bem como muitos outros detalhes que a simulação está executando e que são necessários verificar, como seria feito em uma edificação real [EnergyPlus Manual, 2003b].

Escrito em linguagem Fortran 90, o *EnergyPlus* reúne as melhores características e capacidades do *BLAST* e do *DOE-2*, possuindo 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 1.1.1.012, que foi lançada no dia 17 de setembro de 2003.

A descrição total da edificação a ser simulada se encontra em arquivos de extensão *IDF* (*Input Data File*), própria do *EnergyPlus*. São arquivos que podem ser modificados usando um editor de textos qualquer ou o próprio editor de *IDF* que há no programa. Nestes arquivos podem-se fazer todas as alterações que se deseje (geométricas, físicas, de equipamentos, da programação de ocupação, entre outras). A execução da simulação ocorre através de uma interface “lançadora” (*launcher*), que contém as instruções para execução das rotinas de cálculo do programa.

4.1.1. Características

Segue abaixo uma seqüência de algumas das principais características do *EnergyPlus*, que dão uma idéia da aplicabilidade do programa [EnergyPlus Manual, 2003b]:

- Solução simultânea e integrada, onde a resposta da edificação e os sistemas primário e secundário estão fortemente acoplados.
 - Intervalos de tempos definíveis pelo usuário, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente, e intervalos de tempo variáveis para interações entre as zonas térmicas e os sistemas de *HVAC* (automaticamente variados para assegurar a estabilidade da solução).
 - Arquivo climático e arquivos de entrada e saída baseados no formato ASCII, que inclui condições ambientais horárias ou sub-horárias e relatórios definíveis pelo usuário.
 - Técnica de solução baseada no balanço de energia para cargas térmicas prediais, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo nas superfícies interior e exterior, durante cada intervalo de tempo.
 - Condução de calor transiente através dos elementos da edificação (paredes, tetos, piso, etc) usando as funções de transferência por condução.
 - Modelagem aperfeiçoada da transferência de calor do solo, através de modelos de diferenças finitas tridimensionais e técnicas analíticas simplificadas.
 - Modelo combinado de transferência de calor e massa que considera, para a absorção e eliminação de umidade: uma integração camada por camada dentro das funções de
-

transferência por condução, ou um modelo *EMPD* (*Effective Moisture Penetration Depth*).

- Modelos de conforto térmico (Fanger, Pierce e KSU) baseados na atividade das pessoas, na temperatura de bulbo seco interna, na umidade, etc.
- Cálculos avançados de interfaces transparentes ou translúcidas, como janelas, incluindo controle de cortinas, balanços de calor camada por camada nos vidros das janelas, e uma biblioteca de performance para muitos tipos de vidros disponíveis comercialmente.
- Controle da luz do dia, incluindo cálculos da iluminância interior, simulação e controle do brilho, das lâmpadas e do efeito da redução da iluminação artificial nas cargas térmicas de aquecimento e resfriamento.
- Sistemas de *HVAC* configuráveis, que permitem aos usuários modelar sistemas típicos e sistemas pouco modificados, sem necessidade de recompilar o código fonte do programa;
- Cálculo da poluição atmosférica que predizem os níveis de CO, CO₂, SO_x e NO_x.
- Possibilidade de comunicação com outros ambientes de simulação que permitem análises mais detalhadas de alguns componentes da edificação, tais como *WINDOW 5*, *COMIS* (modelo de fluxo de ar), *TRNSYS* e *SPARK*.

4.1.2. Algoritmos de Solução

A escolha do algoritmo de solução proporciona um meio de selecionar qual tipo de transferência de calor e massa (umidade) será usado nos elementos construtivos da edificação. O *EnergyPlus* possui três algoritmos de solução distintos [EnergyPlus Manual, 2003c]:

- *CTF* (*Conduction Transfer Function*), ou Função de Transferência por Condução: usado neste trabalho, é um algoritmo de solução que considera apenas calor sensível e não leva em conta o armazenamento ou difusão de umidade nos elementos de construção.
 - *MTF* (*Moisture Transfer Function*), ou Função de Transferência de Umidade: é um algoritmo de solução simultânea de transferência de calor e massa, considerando também a absorção de vapor na edificação.
 - *EMPD* (*Effective Moisture Penetration Depth*), ou Profundidade Efetiva de Penetração da Umidade: é um algoritmo de solução 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.
-

4.2. Balanço Energético nas Zonas Térmicas

O *EnergyPlus* utiliza um balanço energético para cada elemento da edificação (paredes, piso, forro e janelas), e seu algoritmo de solução integra o sistema de *HVAC* e a zona térmica. Para garantir a estabilidade da solução, é introduzido no balanço de calor das zonas um termo de capacitância do ar da zona. O balanço de calor na zona térmica é dado pela equação 4.1 abaixo [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$C_{p,z} \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_{si} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} \cdot A_{si} \cdot (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (4.1)$$

onde: $C_{p,z}$ é o calor específico do ar da zona [J/kg.K];

T_z é a temperatura média do ar da zona [K];

\dot{Q}_{si} é a carga térmica interna convectiva da superfície i [W];

$h_{c,si}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície i [W/m².K];

A_{si} é a área da superfície i [m²];

T_{si} é a temperatura da superfície i [K];

\dot{m}_i é a vazão mássica de ar da zona i [kg/s];

$C_{p,zi}$ é o calor específico do ar na zona i [J/kg.K];

T_{zi} é a temperatura média do ar da zona i [K];

\dot{m}_{inf} é a vazão mássica de ar de infiltração [kg/s];

T_{∞} é a temperatura ambiente do ar exterior [K];

$C_{p,z} \frac{dT_z}{dt}$ é a energia armazenada no volume de ar da zona [W];

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_{si}$ é a soma das cargas internas convectivas [W];

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} \cdot A_{si} \cdot (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor convectiva das superfícies das zonas [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido à mistura de ar da interzona [W];

$\dot{m}_{inf} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior [W];

\dot{Q}_{sys} é a potência do sistema de *HVAC* [W].

Caso a capacitância do ar seja negligenciada, a potência do sistema de *HVAC* em regime

permanente, em módulo, que é igual à carga térmica líquida da zona, é dada pela equação 4.2 [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$\left| \dot{Q}_{\text{sys}} \right| = \dot{Q}_{\text{load}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sl}}} \dot{Q}_{\text{si}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{surfaces}}} h_{c,si} \cdot A_{\text{si}} \cdot (T_{\text{si}} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{\text{zones}}} \dot{m}_i \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{\text{inf}} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\infty} - T_z) \quad (4.2)$$

onde: \dot{Q}_{load} é a carga térmica líquida da zona [W].

O sistema de *HVAC* provê ar frio ou quente às zonas para anular as cargas de resfriamento e aquecimento, respectivamente. A energia que o sistema entrega à zona pode ser formulada a partir da diferença entre a temperatura do ar insuflado e a temperatura do ar exaurido da zona, conforme a equação 4.3 [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$\dot{Q}_{\text{sys}} = \dot{m}_{\text{sys}} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\text{sup}} - T_z) \quad (4.3)$$

onde: \dot{m}_{sys} é a vazão mássica de ar pelo sistema de *HVAC* [kg/s];

T_{sup} é a temperatura do ar de insuflamento [K].

A equação acima supõe que a vazão mássica de ar de insuflamento na zona é exatamente igual à vazão mássica de ar de exaustão através do sistema de retorno do ar, sendo esta última exaurida diretamente da zona. Ambas as correntes de ar saem da zona na temperatura média do ar da zona. Substituindo a equação 4.3 na equação 4.1 resulta a equação 4.4, onde a soma das cargas das zonas e a potência do sistema de *HVAC* igualam a modificação da energia armazenada na zona [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$C_{p,z} \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sl}}} \dot{Q}_{\text{si}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{surfaces}}} h_{c,si} \cdot A_{\text{si}} \cdot (T_{\text{si}} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{\text{zones}}} \dot{m}_i \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{\text{inf}} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{\text{sys}} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\text{sup}} - T_z) \quad (4.4)$$

4.3. Modelagem de Paredes

As funções de transferência por condução, *CTFs*, são um método eficiente de computar os fluxos de calor nas superfícies porque eliminam a necessidade de conhecer as temperaturas e os fluxos dentro da superfície. Entretanto, as *CTFs* se tornam progressivamente mais instáveis conforme o passo de tempo diminui.

A mais básica solução temporal são as equações de fator de resposta, que relacionam o fluxo de calor em uma superfície de um elemento com uma série infinita de temperaturas em

ambos os lados de uma parede. A forma básica de uma solução baseada em *CTF* é mostrada nas seguintes equações, onde o sub-índice “t” indica o passo de tempo [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o \cdot T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j \cdot T_{i,t-j\delta} + Y_o \cdot T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j \cdot T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j \cdot q''_{ki,t-j\delta} \quad (4.5)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o \cdot T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j \cdot T_{i,t-j\delta} + X_o \cdot T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j \cdot T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j \cdot q''_{ko,t-j\delta} \quad (4.6)$$

onde: $q''_{ki}(t)$ é o fluxo de calor condutivo para o interior, na face interna da parede [W/m²];

$q''_{ko}(t)$ é o fluxo de calor condutivo do exterior, na face externa da parede [W/m²];

X_j é o coeficiente de fator de resposta externo da *CTF* ($j = 0, 1, \dots, nz$) [];

Y_j é o coeficiente de fator de resposta transversal da *CTF* ($j = 0, 1, \dots, nz$) [];

Z_j é o coeficiente de fator de resposta interno da *CTF* ($j = 0, 1, \dots, nz$) [];

Φ_j é o coeficiente de fator de resposta de fluxo da *CTF* ($j = 0, 1, \dots, nz$) [];

T_i é a temperatura da face interna da parede [K];

T_o é a temperatura da face externa da parede [K].

4.3.1. Balanço Energético na Superfície Externa

Os fluxos energéticos nas superfícies externas das paredes incluem duas parcelas radiativas, uma convectiva e uma condutiva, que são esquematicamente mostrados na Figura 4.1.

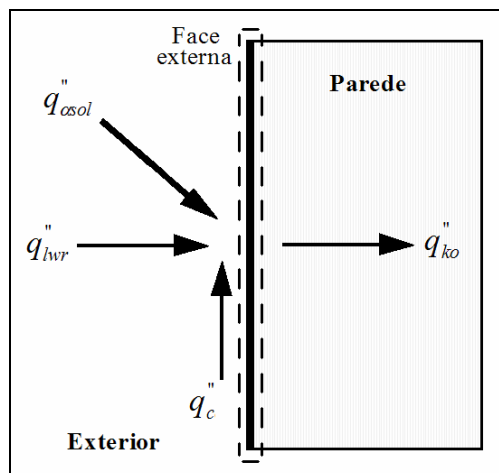


Figura 4.1. Representação dos fluxos energéticos na superfície externa de uma parede.

O balanço energético destes fluxos é dado pela equação 4.7:

$$q_{\text{asol}}'' + q_{\text{lwr}}'' + q_c'' - q_{\text{ko}}'' = 0 \quad (4.7)$$

onde: q_{asol}'' é o fluxo de radiação solar difusa e direta absorvida (onda curta) [W/m²];

q_{lwr}'' é o fluxo de radiação de onda longa trocada entre a superfície e seu entorno (ar, céu, solo, vegetação, etc) [W/m²];

q_c'' é o fluxo de calor convectivo trocado pela superfície com o ar [W/m²];

q_{ko}'' é o fluxo de calor condutivo do exterior através da parede [W/m²].

4.3.2. Balanço Energético na Superfície Interna

Os fluxos energéticos nas superfícies internas das paredes incluem quatro parcelas radiativas, uma convectiva e uma condutiva, que são esquematicamente mostrados na Figura 4.2.

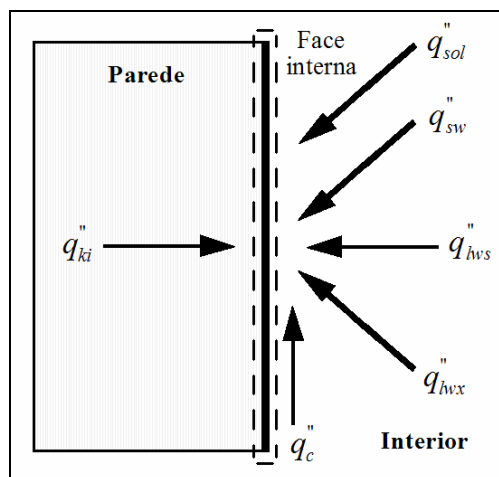


Figura 4.2. Representação dos fluxos energéticos na superfície interna de uma parede.

O balanço energético destes fluxos é dado pela equação 4.8:

$$q_{\text{lwx}}'' + q_{\text{sw}}'' + q_{\text{lws}}'' + q_{\text{ki}}'' + q_{\text{sol}}'' + q_c'' = 0 \quad (4.8)$$

onde: q_{lwx}'' é o fluxo de radiação de onda longa trocada entre as superfícies da zona [W/m²];

q_{sw}'' é o fluxo de radiação de onda curta das luzes para a superfície [W/m²];

q_{lws}'' é o fluxo de radiação de onda longa dos equipamentos da zona para a superfície [W/m²];

q_{ki}'' é o fluxo de calor condutivo para o interior através da parede [W/m²];

q_{sol}'' é o fluxo de radiação solar transmitida, absorvida pela superfície [W/m²].

4.4. Modelagem de Janelas

O *EnergyPlus* considera que as janelas são compostas pelos seguintes componentes, dos quais apenas o primeiro é obrigatoriamente necessário [EnergyPlus Manual, 2003a]:

- Vidraça, que consiste em uma ou mais camadas de vidro planas e paralelas. Se existem duas ou mais camadas de vidro, elas são separadas por lacunas cheias de ar ou outro gás.
- Moldura, que cerca inteiramente a vidraça.
- Divisor da esquadria, que consiste em elementos verticais e/ou horizontais que dividem a vidraça em partes individuais.
- Dispositivo de sombreamento, que é uma camada separada, como uma cortina ou persiana translúcida ou opaca, colocado no interior ou exterior das camadas de vidro, cujo propósito é reduzir o ganho de calor solar, reduzir as perdas de calor para o exterior ou controlar a claridade da luz natural.

4.4.1. Hipóteses Assumidas

O programa supõe as seguintes hipóteses em relação aos vidros [Winkelmann, 2001]:

- As camadas de vidro são finas o bastante para que o armazenamento de calor no vidro possa ser desprezado. Dessa forma, não há termos capacitivos nas equações de balanço energético.
- O fluxo de calor é perpendicular às faces dos vidros e é unidimensional. Entretanto, ajustes para a lacuna condutiva em vidraças multicamadas são feitas para considerar os efeitos da condução 2-D através dos separadores de camada no contorno da vidraça.
- Os vidros são opacos para radiação de onda longa.
- As faces dos vidros são isotérmicas. Isto é uma boa suposição visto que a condutividade térmica dos vidros é relativamente alta.
- A radiação de onda curta absorvida por uma camada de vidro é igualmente distribuída nas duas faces do vidro.

4.4.2. Propriedades Óticas dos Vidros

Há dois meios de se entrar os dados de propriedades óticas dos vidros no *EnergyPlus*: usando dados como função do comprimento de onda (medição experimental em toda a faixa do espectro solar) ou usando médias espectrais.

4.4.2.1. Cálculo das Médias Espectrais

Se a transmitância e a refletância são entradas como uma função do comprimento de onda, o programa calcula médias espectrais dessas propriedades, integrando-as sobre os comprimentos de onda [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$P_s = \frac{\int P(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda}{\int I_{bm}(\lambda) d\lambda} \quad (4.9)$$

$$P_v = \frac{\int P(\lambda) I_{bm}(\lambda) R_{ph}(\lambda) d\lambda}{\int I_{bm}(\lambda) R_{ph}(\lambda) d\lambda} \quad (4.10)$$

onde: P_s é a média espectral de uma propriedade solar (transmitância ou refletância) [];

P_v é a média espectral de uma propriedade visual (transmitância ou refletância) [];

$P(\lambda)$ é uma propriedade função espectral (transmitância ou refletância) [];

$I_{bm}(\lambda)$ é a irradiância solar espectral direta [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$];

$R_{ph}(\lambda)$ é a resposta ótica do olho humano à luz, ou resposta fotópica [].

A resposta ótica do olho humano à luz é detalhadamente explicada no apêndice B.

Assim, é possível deduzir as equações para cálculo da média espectral de cada uma das propriedades óticas que precisam ser entradas no programa simulador:

Transmitância solar na incidência normal (T_s): função da transmitância espectral normal e da irradiância espectral direta em toda a faixa do espectro solar, de acordo com a equação 4.11:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} T(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{bm}(\lambda) d\lambda} \quad (4.11)$$

onde: T_s é a transmitância solar [];

$T(\lambda)$ é a transmitância espectral normal [];

$I_{bm}(\lambda)$ é a irradiância solar espectral direta [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$].

Refletância solar na incidência normal, na face externa e na face interna do vidro

(R_{fs} e R_{bs}): função da refletância espectral normal e da irradiância espectral direta em toda a faixa do espectro, de acordo com a equação 4.12:

$$R_s = \frac{\int_0^{\infty} R(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{bm}(\lambda) d\lambda} \quad (4.12)$$

onde: R_s é a refletância solar [];

$R(\lambda)$ é a refletância espectral normal [].

Transmitância visível na incidência normal (T_v): função da resposta fotópica (ou resposta ótica em função do olho humano), da transmitância espectral normal e da irradiância espectral direta na faixa visível do espectro, de acordo com a equação 4.13:

$$T_v = \frac{\int_{0,38\mu m}^{0,78\mu m} R_{ph}(\lambda) T(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda}{\int_{0,38\mu m}^{0,78\mu m} R_{ph}(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda} \quad (4.13)$$

onde: T_v é a transmitância visível [];

$R_{ph}(\lambda)$ é a resposta fotópica [].

Refletância visível na incidência normal, na face externa e na face interna do vidro (R_{fv} e R_{bv}): função da resposta fotópica, da refletância espectral normal do vidro e da irradiância espectral direta na faixa visível do espectro, de acordo com a equação 4.14:

$$R_v = \frac{\int_{0,38\mu m}^{0,78\mu m} R_{ph}(\lambda) R(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda}{\int_{0,38\mu m}^{0,78\mu m} R_{ph}(\lambda) I_{bm}(\lambda) d\lambda} \quad (4.14)$$

onde: R_v é a refletância visível [].

Transmitância no infravermelho na incidência normal (T_{ir}): função da transmitância espectral normal e da irradiância espectral direta na faixa infravermelha do espectro, de acordo com a equação 4.15:

$$T_{ir} = \frac{\int_{0,78\mu m}^{\infty} T(\lambda) \cdot I_{bm}(\lambda) d\lambda}{\int_{0,78\mu m}^{\infty} I_{bm}(\lambda) d\lambda} \quad (4.15)$$

onde: T_{ir} é a transmitância no infravermelho [].

Emissividade hemisférica no infravermelho, na face externa e na face interna do vidro (ϵ_{f-ir} e ϵ_{b-ir}): Primeiramente, deve-se determinar a emissividade espectral hemisférica no infravermelho, que é calculada integrando a emissividade espectral direcional em todo o hemisfério, a partir de uma formulação adaptada de Siegel e Howell, 2002, de acordo com a equação 4.16:

$$\epsilon_{\lambda,ir}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \epsilon_{\lambda,ir}(\lambda, \theta, \varphi, T) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi d\varphi d\theta \quad (4.16)$$

onde: $\epsilon_{\lambda,ir}(\lambda, T)$ é a emissividade espectral hemisférica no infravermelho [];

$\epsilon_{\lambda,ir}(\lambda, \theta, \varphi, T)$ é a emissividade espectral direcional no infravermelho [];

θ é o ângulo de azimute de um elemento do céu ou do solo [rad];

φ é o ângulo de altitude de um elemento do céu ou do solo [rad].

A emissividade hemisférica no infravermelho é dependente da emissividade espectral hemisférica no infravermelho, de acordo com a equação 4.17:

$$\epsilon_{hem,ir}(T) = \frac{\int_{0,78\mu m}^{\infty} \epsilon_{\lambda,ir}(\lambda, T) \cdot I_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_{0,78\mu m}^{\infty} I_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (4.17)$$

onde: $\epsilon_{hem,ir}(T)$ é a emissividade hemisférica no infravermelho [];

$I_b(\lambda, T)$ é a intensidade da radiação emitida por um corpo negro [W/m².sr].

Considerando a dificuldade de se medir toda a faixa do espectro, a faixa de comprimento de onda utilizada pelo *EnergyPlus* para medir as transmitância e refletância solares é de 0,3 à 2,5 μm . Já para a transmitância no infravermelho esta faixa é de 5 à 25 μm .

4.4.2.2. Cálculo da Dependência Angular

Se não existem dados espectrais, a dependência angular das propriedades óticas dos vidros é calculada baseada em um valor da transmitância e um valor da refletância tanto na faixa visível quanto na faixa solar do espectro. Para a faixa visível um comprimento de onda médio de 0,575 μm é usado nos cálculos; já para a faixa solar um comprimento de onda médio de 0,898 μm é usado.

Para vidros não revestidos (sem película), a refletância é a mesma tanto na superfície interna quanto na externa. Para um ângulo de incidência φ , a transmitância e a refletância são relacionadas à transmissividade e à refletividade, através das equações 4.18 e 4.19:

$$T(\varphi) = \frac{\tau(\varphi)^2 \cdot e^{-\alpha \cdot d / \cos \varphi'}}{1 - \rho(\varphi)^2 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot d / \cos \varphi'}} \quad (4.18)$$

$$R(\varphi) = \rho(\varphi) \cdot (1 + T(\varphi) \cdot e^{-\alpha \cdot d / \cos \varphi'}) \quad (4.19)$$

onde: $T(\varphi)$ é a transmitância função angular [];

$\tau(\varphi)$ é a transmissividade função angular [];

$R(\varphi)$ é a refletância função angular [];

$\rho(\varphi)$ é a refletividade função angular [];

α é o coeficiente de absorção espectral [m^{-1}];

d é a espessura do vidro [m];

φ é o ângulo de incidência da radiação no vidro [rad];

φ' é o ângulo de refração da radiação no interior do vidro [rad].

A refletividade espectral é calculada das equações de Fresnel, assumindo radiação incidente não-polarizada, de acordo com a equação 4.20:

$$\rho(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{n \cdot \cos \varphi - \cos \varphi'}{n \cdot \cos \varphi + \cos \varphi'} \right)^2 + \left(\frac{n \cdot \cos \varphi' - \cos \varphi}{n \cdot \cos \varphi' + \cos \varphi} \right)^2 \right) \quad (4.20)$$

onde: n é o índice de refração [].

A transmissividade espectral é dada pela equação 4.21:

$$\tau(\varphi) = 1 - \rho(\varphi) \quad (4.21)$$

São necessárias algumas interpretações, para o *EnergyPlus*, das equações acima:

- As propriedades que terminam com o sufixo *-ividade* (transmissividade e refletividade) são referidas como propriedades das interfaces do material, não importando suas características físicas. Já propriedades que terminam com o sufixo *-ância* (transmitância e refletância) se referem a amostras, pois pelas equações 4.18 e 4.19 elas são dadas em função da espessura.
- Como os termos com o sufixo *-ividade* são referidos como propriedades das interfaces do material, e considerando que em uma interface há reflexão, porém não há absorção (a absorção ocorre no interior do material), é justificado o fato de não constar o termo de absortividade espectral na equação 4.21.
- Não há espalhamento da radiação, ou seja, a reflexão e a transmissão são especulares.

Para vidros revestidos, ou seja, com película, um ajuste por regressão é usado para calcular a dependência angular das propriedades óticas dos vidros. Se a transmitância na incidência normal do vidro revestido é maior que 0,645, é usada a dependência angular do vidro claro não revestido; caso seja menor ou igual a 0,645, é usada a dependência angular do vidro bronze não revestido. Os valores das funções angulares para a transmitância e refletância do vidro claro e do vidro bronze são determinados através de uma regressão polinomial de quarta ordem, dados pelas equações 4.22 e 4.23:

$$\bar{\tau}(\varphi) = \bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1 \cdot \cos \varphi + \bar{\tau}_2 \cdot \cos^2 \varphi + \bar{\tau}_3 \cdot \cos^3 \varphi + \bar{\tau}_4 \cdot \cos^4 \varphi \quad (4.22)$$

$$\bar{\rho}(\varphi) = \bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_1 \cdot \cos \varphi + \bar{\rho}_2 \cdot \cos^2 \varphi + \bar{\rho}_3 \cdot \cos^3 \varphi + \bar{\rho}_4 \cdot \cos^4 \varphi - \bar{\tau}(\varphi) \quad (4.23)$$

onde: $\bar{\tau}_l$ são coeficientes polinomiais de transmissividade (vidro claro ou bronze) ($l = 0 \text{ à } 4$) [];

$\bar{\rho}_l$ são coeficientes polinomiais de refletividade (vidro claro ou bronze) ($l = 0 \text{ à } 4$) [].

Os coeficientes polinomiais para vidro claro e bronze são dados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1. Coeficientes polinomiais para determinar a dependência angular.

	0	1	2	3	4
$\bar{\tau}_{clr}$	-0,0015	3,355	-3,840	1,460	0,0288
$\bar{\rho}_{clr}$	0,999	-0,563	2,043	-2,532	1,054
$\bar{\tau}_{bnz}$	-0,002	2,813	-2,341	-0,05725	0,599
$\bar{\rho}_{bnz}$	0,997	-1,868	6,513	-7,862	3,225

onde: $\bar{\tau}_{clr}$ é o coeficiente polinomial de transmissividade para vidro claro [];

$\bar{\rho}_{clr}$ é o coeficiente polinomial de refletividade para vidro claro [];

$\bar{\tau}_{bnz}$ é o coeficiente polinomial de transmissividade para vidro bronze [];

$\bar{\rho}_{bnz}$ é o coeficiente polinomial de refletividade para vidro bronze [].

Para calcular a refletância e a refletância angular, caso $T(0) > 0,645$, são usadas as equações 4.24 e 4.25:

$$T(\varphi) = T(0) \cdot \bar{\tau}_{clr}(\varphi) \quad (4.24)$$

$$R(\varphi) = R(0) \cdot (1 - \bar{\rho}_{clr}(\varphi)) + \bar{\rho}_{clr}(\varphi) \quad (4.25)$$

onde: $T(0)$ é a transmitância na incidência normal [];

$\bar{\tau}_{clr}(\varphi)$ é a transmissividade angular do vidro claro [];

$R(0)$ é a refletância na incidência normal [];

$\bar{\rho}_{clr}(\varphi)$ é a refletividade angular do vidro claro [].

Caso $T(0) \leq 0,645$, são usadas as equações 4.26 e 4.27:

$$T(\varphi) = T(0) \cdot \bar{\tau}_{bnz}(\varphi) \quad (4.26)$$

$$R(\varphi) = R(0) \cdot (1 - \bar{\rho}_{bnz}(\varphi)) + \bar{\rho}_{bnz}(\varphi) \quad (4.27)$$

onde: $\bar{\tau}_{bnz}(\varphi)$ é a transmissividade angular do vidro bronze [];

$\bar{\rho}_{bnz}(\varphi)$ é a refletividade angular do vidro bronze [].

4.4.2.3. Cálculo dos Valores Hemisféricos

O valor hemisférico de uma propriedade ótica é determinado integrando a propriedade angular em todo o hemisfério. Esta integração é feita usando a regra de Simpson para uma faixa de ângulo de incidência de 0 a 90 graus (com incrementos de 10 graus). A integral é dada pela equação 4.28:

$$P_{hem} = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} P(\varphi) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi d\varphi \quad (4.28)$$

onde: P_{hem} é uma propriedade hemisférica (transmitância ou refletância) [];

$P(\varphi)$ é uma propriedade função angular (transmitância ou refletância) [].

4.4.3. Balanço Energético nos Vidros

Os cálculos óticos e térmicos nas vidraças feitos no *EnergyPlus* são baseados em algoritmos dos programas *WINDOW 4* e *WINDOW 5*.

Winkelmann, 2001, diz que “as parcelas da radiação solar transmitida e absorvida pelas camadas de vidros dependem da transmitância, refletância e absortância solares individuais de cada camada. A radiação solar absorvida entra no cálculo do balanço energético da vidraça que determina a temperatura da superfície interna do vidro, e então o calor transmitido pela vidraça à zona. A radiação solar transmitida é absorvida pelas superfícies internas da zona e então contribuem para o balanço energético da zona. Além disso, a transmitância visível do vidro é um importante fator no cálculo da iluminação natural no interior do ambiente”.

O cálculo do balanço de calor nas janelas é essencial porque permite determinar as temperaturas das faces externa e interna dos vidros. As temperaturas das faces externa e interna são determinadas resolvendo equações de balanço de calor em cada face durante cada passo de tempo (*time step*). Para uma janela com “n” camadas de vidro existem “2n” faces e, portanto, “2n” equações para resolver. A Figura 4.3 mostra as variáveis usadas para um vidro simples, adaptado de Winkelmann, 2001.

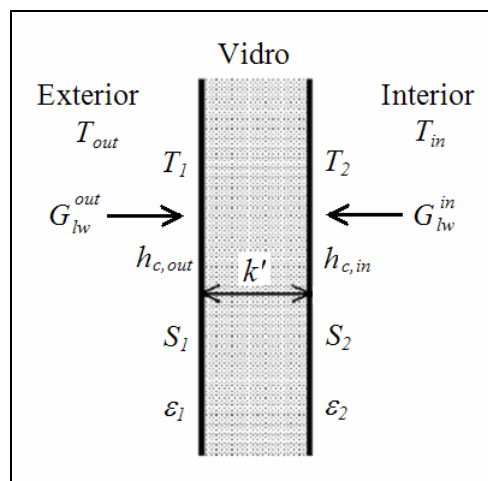


Figura 4.3. Variáveis usadas nas equações de balanço de calor.

As equações 4.29 e 4.30 que seguem definem um balanço de calor para o caso de uma camada de vidro, como mostrado na Figura 4.3 [Winkelmann, 2001]. No apêndice C é mostrada

a metodologia de solução destas equações.

$$G_{lw}^{out} \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + k'(T_2 - T_1) + h_{c,out}(T_{out} - T_1) + S_1 = 0 \quad (4.29)$$

$$G_{lw}^{in} \cdot \varepsilon_2 - \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 + k'(T_1 - T_2) + h_{c,in}(T_{in} - T_2) + S_2 = 0 \quad (4.30)$$

onde: G_{lw}^{out} e G_{lw}^{in} respectivamente são as radiações de onda longa incidentes nas faces externa e interna do vidro [W/m^2];

$h_{c,out}$ e $h_{c,in}$ respectivamente são os coeficientes de transferência de calor por convecção nas faces externa e interna do vidro [$W/m^2.K$];

S_i é a radiação (onda curta e onda longa) absorvida pela face i ($i = 1$ a 2) [W/m^2];

T_{out} e T_{in} respectivamente são as temperaturas do ar exterior e interior [K];

T_j é a temperatura da face j ($j = 1$ a 2) [K];

ε_i é a emissividade de onda longa na face i ($i = 1$ a 2) [];

k' é a condutividade térmica linearizada do vidro [$W/m^2.K$];

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2.K^4$).

4.4.4. Radiação Absorvida

A radiação de onda curta (solar e da luz) é assumida como sendo absorvida uniformemente ao longo de uma camada de vidro. As camadas de vidro são opacas para radiações de onda longa, de modo que a radiação de onda longa proveniente das lâmpadas, das pessoas e dos equipamentos são confinadas no interior do ambiente. Com base ainda na Figura 4.3, para uma camada de vidro tem-se a equação 4.31, adaptada de Winkelmann, 2001:

$$S_1 = S_2 = \frac{1}{2} \cdot (I_{bm}^{out} \cdot \cos \varphi \cdot \alpha_1^f(\varphi) + I_{dif}^{out} \cdot \alpha^{f,dif} + I_{sw}^{in} \cdot \alpha^{b,dif}) \quad (4.31)$$

onde: I_{bm}^{out} é a intensidade solar direta normal à face externa do vidro [W/m^2];

I_{dif}^{out} é a intensidade solar difusa incidente na face externa do vidro [W/m^2];

I_{sw}^{in} é a intensidade de radiação de onda curta (de lâmpadas e da reflexão solar difusa) incidente na face interna do vidro [W/m^2];

$\alpha^{f,dif}$ é a absorvidade solar difusa na face externa do vidro [];

$\alpha^{b,dif}$ é a absorvidade solar difusa na face interna do vidro [].

4.5. Modelagem da Iluminação Natural

A modelagem da iluminação natural (*daylight*), em conjunto com a análise térmica, determina o impacto energético das estratégias de iluminação artificial. Esta modelagem tem três passos principais:

- Cálculo dos fatores de iluminação natural, que são razões da intensidade luminosa ou luminosidade interna com a intensidade luminosa horizontal externa.
- Cálculo da iluminação artificial, que é feita a cada passo de tempo do balanço energético, quando o Sol está presente.
- Simulação do sistema de controle elétrico da iluminação artificial, para determinar o consumo energético necessário para completar a diferença entre a iluminação natural na zona e a iluminação requerida pelo projeto na zona.

A distribuição da luminosidade do céu é representada por quatro condições diferentes: céu limpo, céu parcialmente nublado, céu intermediário e céu nublado; e são consideradas as seguintes intensidades luminosas: solar direta normal, horizontal exterior, componente direta da luz natural interior, e componente internamente refletida da luz natural interior.

4.5.1. Fluxo Transmitido do Céu e do Solo

O fluxo transmitido de um elemento do céu ou do solo, considerando um ângulo sólido $\cos\theta d\theta d\phi$, é dado pela equação 4.32:

$$d\Phi_{inc} = A_{jan} \cdot L(\theta, \varphi) \cdot \cos\beta \cdot \cos\theta d\theta d\phi \quad (4.32)$$

onde: $d\Phi_{inc}$ é o fluxo luminoso de um elemento do céu ou do solo incidente na janela [lm];

A_{jan} é a área envidraçada da janela [m²];

$L(\theta, \varphi)$ é a luminosidade de um elemento do céu ou do solo em (θ, φ) [cd/m²];

β é o ângulo de incidência da luz de um elemento do céu ou do solo no centro da janela [rad].

O fluxo transmitido é dado pela equação 4.33:

$$d\Phi = d\Phi_{inc} \cdot \tau(\beta) \quad (4.33)$$

onde: $d\Phi$ é o fluxo luminoso de um elemento do céu ou do solo transmitido pela janela [lm];

$\tau(\beta)$ é a transmissividade do vidro para a luz incidindo num ângulo β [].

Para uma janela sem dispositivo de sombreamento, os fluxos transmitidos descendente e ascendente são obtidos através da integração sobre a parte do hemisfério exterior visto pela janela, respectivamente, que se encontram acima e abaixo do plano médio da janela, e são dados pelas equações 4.34 e 4.35:

$$\Phi_{FW,unshaded} = A_{jan} \cdot \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \varphi) \cdot \tau(\beta) \cdot \cos \beta \cdot \cos \varphi d\theta d\varphi \quad (4.34)$$

$$\Phi_{CW,unshaded} = A_{jan} \cdot \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{\pi/2 - \varphi_{jan}}^0 L(\theta, \varphi) \cdot \tau(\beta) \cdot \cos \beta \cdot \cos \varphi d\theta d\varphi \quad (4.35)$$

onde: $\Phi_{FW,unshaded}$ é o fluxo descendente transmitido através de uma janela sem sombreamento [lm];

$\Phi_{CW,unshaded}$ é o fluxo ascendente transmitido através de uma janela sem sombreamento [lm];

φ_{jan} é o ângulo que a normal da janela faz com o plano horizontal externo [rad].

4.5.2. Fluxo Transmitido Diretamente do Sol

O fluxo incidente na janela vindo diretamente do Sol é dado pela equação 4.36:

$$\Phi_{inc} = A_{jan} \cdot E_{dn} \cdot \cos \beta \cdot f_{sunlit} \quad (4.36)$$

onde: Φ_{inc} é o fluxo incidente na vidraça vindo diretamente do Sol [lm];

E_{dn} é a iluminância solar direta incidente em direção normal à vidraça [lux];

f_{sunlit} é a fração da vidraça que é iluminada pelo Sol [].

O fluxo transmitido é dado pela equação 4.37:

$$\Phi = \tau_{net}(\beta) \cdot \Phi_{inc} \quad (4.37)$$

onde: Φ é o fluxo transmitido vindo diretamente do Sol [lm];

$\tau_{net}(\beta)$ é a transmissividade líquida do vidro [].

4.5.3. Claridade de Desconforto da Iluminação Natural

A constante de claridade de desconforto em um ponto de referência, devido ao contraste entre a iluminação da janela e as superfícies internas ao redor da janela, é calculada através da equação 4.38 apresentada:

$$G = \frac{L_w^{1,6} \cdot \Omega^{0,8}}{L_b + 0,07 \cdot \omega^{0,5} \cdot L_w} \quad (4.38)$$

onde: G é a constante de claridade de desconforto [];

L_w é a iluminação média da janela observada do ponto de referência [cd/m^2];

L_b é a iluminação da área da vizinhança externa ao redor da janela [cd/m^2];

Ω é o ângulo sólido subtendido pela janela em relação ao ponto de referência [sr];

ω é o ângulo sólido subtendido pela janela em relação ao ponto de referência, modificado para fazer com que a direção da vista do ocupante seja considerada [sr].

Em um ponto de referência qualquer, a claridade da iluminação natural devido a todas as janelas de um ambiente é expressa em termos do índice de claridade, dado pela equação 4.39:

$$G_I = 10 \cdot \log_{10} \sum_{i=1}^{n_{jan}} G_i \quad (4.39)$$

onde: G_I é o índice de claridade [];

G_i é a constante de claridade no ponto de referência devido à i -ésima janela [];

n_{jan} é o número de janelas [].

5. SIMULAÇÕES

Neste capítulo são descritas como foram feitas as simulações computacionais. Primeiro se faz uma caracterização detalhada da edificação estudada. Em seguida os parâmetros avaliados são detalhadamente descritos e são definidos os casos a serem simulados. O capítulo é finalizado com a explanação dos dados de entrada de maior interesse.

5.1. Edificação Simulada

Como dito no capítulo 1, escolheu-se estudar uma edificação tipicamente comercial. Ela possui dois andares e tem comprimento e largura de 17,6 m, e altura de 6,7 m, resultando em uma área de planta baixa de 310 m² por andar e volume de 1.038 m³ por andar.

Na Figura 5.1 são mostradas as vistas superior, lateral e isométrica da edificação, onde também se observam as dimensões do prédio.

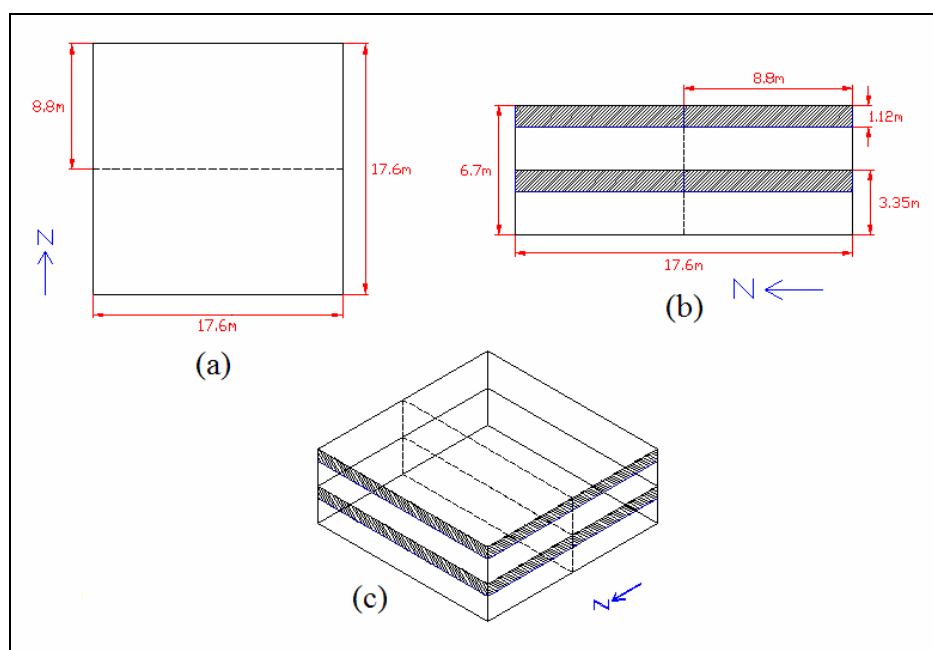


Figura 5.1. Vistas da edificação: superior (a), lateral (b), e isométrica (c).

Na Figura 5.1, as janelas estão representadas pelas hachuras pretas e são presentes em apenas duas das quatro fachadas. Já as linhas tracejadas representam a divisão virtual das zonas térmicas. As setas indicam a orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro (neste caso a orientação é 0°). Detalhes das janelas, das zonas térmicas e das orientações da edificação são descritos ao longo deste capítulo.

5.1.1. Zonas Térmicas

Zonas térmicas são definidas no *EnergyPlus* como “um volume de ar à uma temperatura uniforme” [EnergyPlus Manual, 2003b]. Desta forma, cada zona térmica acaba definindo 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.

Foram estudadas quatro zonas térmicas na edificação, duas por andar, o que define quatro sistemas de condicionamento de ar independentes do tipo expansão direta. Como já descrito, elas são definidas por uma divisão virtual da edificação, visto que não há divisão física entre as zonas que ocupam o mesmo andar. Possuem formato paralelepípedo e são geometricamente iguais, cada uma ocupando metade de um pavimento (a área de planta baixa e volume de cada zona térmica equivalem, respectivamente, à metade da área de planta baixa e à metade do volume de cada pavimento).

Na Figura 5.2 são mostradas as quatro zonas térmicas definidas na edificação, para a orientação 0°. As zonas térmicas são representadas pelos volumes hachurados e as janelas pelos retângulos azuis. Zonas térmicas no mesmo pavimento possuem áreas de janelas diferentes.

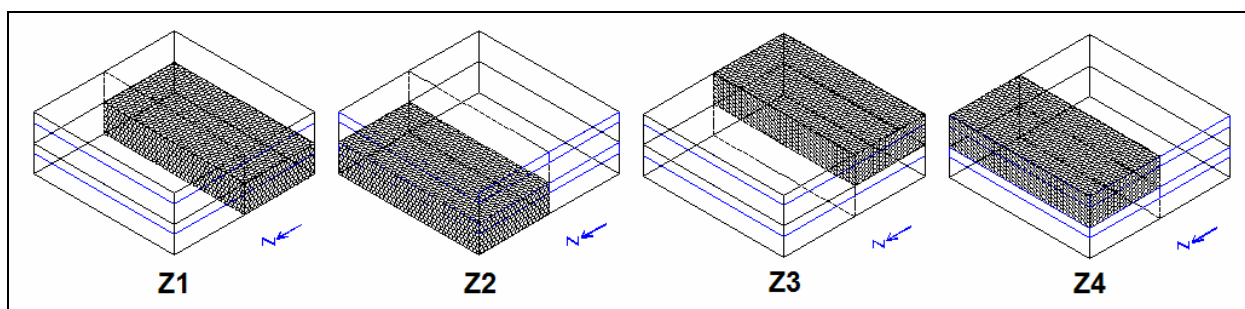


Figura 5.2. Indicação das quatro zonas térmicas da edificação.

5.1.2. Geração de Calor

A edificação possui ocupação total de 60 pessoas (15 por zona). Esta ocupação ocorre conforme a Tabela 5.1. Nos domingos e feriados não há expediente.

Tabela 5.1. Programação de ocupação no interior da edificação.

Período	Pessoas nos dias úteis	Pessoas nos sábados
0:00 às 8:00	0	0
8:00 às 12:00	60	60
12:00 às 18:00	60	0
18:00 às 24:00	0	0

Considera-se que cada ocupante desempenha atividades variadas de escritório, dissipando 150 W. Assim, os 60 ocupantes dissipam, juntos, um total de 9.000 W. A resistência térmica da vestimenta dos ocupantes é de 0,6 clo no verão e 1,0 clo no inverno (1 clo = 0,155 m².°C/W).

Os equipamentos elétricos constantes no interior da edificação, exceto lâmpadas e sistema de *HVAC*, têm uma potência nominal total de 6.000 W (1.500 W em cada zona), com fração radiante de 30%. A programação do funcionamento destes equipamentos é mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Programação de funcionamento dos equipamentos elétricos na edificação.

Período	Potência nos dias úteis [%]	Potência nos sábados [%]
0:00 às 8:00	0	0
8:00 às 12:00	100	100
12:00 às 18:00	100	0
18:00 às 24:00	0	0

Como a programação do funcionamento dos equipamentos elétricos é a mesma em todas as simulações, o consumo elétrico deles é o mesmo para todas as simulações.

As lâmpadas das luminárias têm uma potência nominal total de 12.100 W, 3.025 W em cada zona (o que resulta em uma densidade de potência de 19,5 W/m²), com fração radiante de 35% e visível de também 35%. Em relação às lâmpadas, são feitos dois tipos de simulações, descritos ainda neste capítulo, na seção 5.4, onde também constam as programações de funcionamento das lâmpadas.

5.1.3. Sistema de Condicionamento de Ar

O sistema de refrigeração é um modelo de condicionamento de ar por expansão direta, já o sistema de aquecimento é um modelo de condicionamento de ar por resistência elétrica. Segue abaixo a descrição destes sistemas.

5.1.3.1. Refrigeração

Os quatro sistemas de condicionamento de ar são independentes e programados para serem ligados às 8 hs nos dias úteis e sábados, e desligado às 18 hs nos dias úteis e às 12 hs nos sábados. Este sistema possui vazão de insuflamento de ar de 5.400 m³/h por zona. A temperatura do ar interno programada para verão é de 24°C.

Cada um dos quatro evaporadores possui potência nominal de 35.170 W (10 TR), pois o software exige uma potência estimada para a simulação. Esta potência é usada no dimensionamento do sistema, e caso seja ultrapassada significa que o sistema de condicionamento de ar está demandando uma potência maior do que a disponível, sendo necessário aumentá-la.

A renovação de ar, normalizada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), 2003, é de 27 m³/h por pessoa, o que resulta em 405 m³/h por zona. A vazão de ar de infiltração de projeto é de 154,8 m³/h por zona, porém ela só ocorre quando o sistema de condicionamento de ar está desligado, pois este sistema provê um gradiente de pressão positivo entre o interior e o exterior.

5.1.3.2. Aquecimento

O sistema de aquecimento utilizado é por serpentina elétrica (resistência). A temperatura do ar interno programada para inverno é de 21°C.

Cada zona térmica possui um sistema de aquecimento independente de 17.585 W (5 TR), com eficiência de 100%. Novamente esta potência é usada no dimensionamento do sistema, e caso seja ultrapassada significa que o sistema de aquecimento está demandando uma potência maior do que a disponível, sendo necessário aumentá-la.

A programação de liga/desliga, da vazão de insuflamento de ar, da renovação de ar e da vazão de ar de infiltração de ar são as mesmas utilizadas para o sistema de refrigeração.

5.1.4. Elementos Construtivos

É necessário fazer a descrição dos elementos construtivos da edificação e fornecer ao *EnergyPlus* as propriedades termofísicas dos materiais de construção que compõem estes elementos.

A edificação possui, conforme a Figura 5.1, quatro paredes, dois pisos e seis janelas, além do teto. A Tabela 5.3 descreve as camadas dos principais elementos construtivos, do

sentido exterior para o interior do prédio, além de indicar a espessura de cada elemento.

Tabela 5.3. Descrição dos elementos construtivos da edificação.

Elemento	Camadas de materiais de construção	Espessura
Paredes	Argamassa (20 mm)	140 mm
	Tijolo maciço comum, (100 mm)	
	Argamassa (20 mm)	
Pisos	Madeira dura (30 mm)	130 mm
	Concreto de areia e cascalho (100 mm)	
Teto	Argamassa (20 mm)	140 mm
	Isolamento (20 mm)	
	Concreto de areia e cascalho (100 mm)	
Janelas	Vidro (3 mm)	3 mm
Mobília	Madeira (100 mm)	100 mm

Conforme se pode observar na Tabela 5.3, o programa permite que sejam inseridos na simulação os elementos construtivos da mobília interna do prédio. Este dado é importante porque permite que também seja levada em conta a inércia térmica dos móveis. Assim, a simulação leva em conta que em cada zona térmica há 77 m² de madeira de baixa densidade, com 100 mm de espessura.

A Tabela 5.4 mostra as características termofísicas dos materiais de construção descritos na Tabela 5.3.

Tabela 5.4. Características termofísicas dos materiais de construções.

Característica	Argamassa	Tijolo maciço comum	Madeira dura	Concreto de areia e cascalho	Isolamento	Madeira
Aspereza	Baixa	Alta	Média	Média	Muito alta	Média
d_m [mm]	20	100	30	100	20	100
κ [W/m.K]	0,72	0,72	0,15	1,29	0,04	0,12
ρ [kg/m ³]	1858,14	1922,21	720,83	2242,58	32,03	592,68
$C_{p,m}$ [J/kg.K]	830	830	1250	830	830	2510
α_t	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
α_s	0,6	0,7	0,78	0,6	0,5	0,78
α_v	0,6	0,7	0,78	0,6	0,5	0,78

onde: d_m é a espessura do material [mm];

κ é a condutividade térmica do material [W/m.K];

ρ é a densidade do material [kg/m³];

$C_{p,m}$ é o calor específico do material [J/kg.K];

α_t é a absorptividade térmica [];

α_s é a absorptividade solar [];

α_v é a absorptividade visível [].

Observa-se que os pisos da edificação possuem absorptância solar e visível igual a 0,78, o que indica uma cor média-escura (marrom, por exemplo). As demais superfícies, que são as paredes (faces internas e externas), o teto (face interna e externa) e o teto do primeiro andar (que é a face inferior do piso do segundo andar), possuem absorptância solar e visível igual a 0,6, o que indica que possuem cor média (creme, por exemplo). Isto é importante para o *EnergyPlus* calcular a absorção de energia solar nas superfícies externas da edificação e também para calcular a intensidade luminosa no interior da edificação.








5.2. Parâmetros Avaliados

Já anteriormente citados no capítulo 1, nesta seção os parâmetros avaliados (tipos de vidros, área envidraçada das fachadas, localização geográfica e orientação da edificação) são descritos quanto à sua relevância e são apresentados os casos simulados.

5.2.1. Tipos de Vidros

Diferentes tipos de vidros possuem propriedades óticas distintas. Muitas são as causas destas diferenças, tais como a composição e a espessura dos vidros, e a composição das camadas de deposição metálica das películas. Em algumas comparações entre vidros estas diferenças são consideráveis, de modo que o uso de um ou de outro tipo de vidro nas fachadas de uma edificação determina diferentes fluxos de transmissão, reflexão e absorção da radiação térmica, o que acaba refletindo no comportamento termoenergético da edificação. Assim, é de grande importância estudar tipos de vidros diferentes. Na Tabela 5.5 são descritos os tipos de vidros simulados.

Tabela 5.5. Descrição física e coloração dos vidros simulados.

Código	Configuração da vidraça	Cor	Descrição da cor
V1	Vidro simples		Transparente
V2	Vidro simples + película 1		Cinza claro
V3	Vidro simples + película 2		Cinza claro azulado
V4	Vidro simples + película 3		Cinza claro-médio
V5	Vidro simples + película 4		Cinza médio
V6	Vidro simples + película 5		Cinza médio-escuro
V7	Vidro simples + película 6		Cinza escuro

Buscou-se trabalhar com amostras de vidros e películas tipicamente encontrados no Brasil, escolhendo-se um tipo de vidro comum e seis tipos de vidros com película, conforme Tabela 5.5, todos com 3 mm de espessura nominal.

Como dito no capítulo 4, o *EnergyPlus* faz os cálculos óticos e térmicos em vidros baseado em algoritmos dos programas de simulação de janelas *WINDOW 4* e *WINDOW 5*. Assim, as propriedades óticas utilizadas foram obtidas das bibliotecas destes programas. Estas propriedades são inseridas no programa de modo a considerar que as películas estão colocadas na face interior dos vidros. Na Tabela 5.6 são mostradas as propriedades óticas dos vidros, além da espessura e da condutividade térmica de cada um deles.

Tabela 5.6. Propriedades físicas e óticas dos vidros utilizados.

Vidro	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
d [mm]	2,972	3,010	3,010	3,035	3,023	3,023	3,035
T_s	0,843	0,645	0,424	0,244	0,154	0,123	0,0855
R_{fs}	0,0745	0,116	0,281	0,361	0,547	0,630	0,588
R_{bs}	0,0748	0,100	0,268	0,193	0,619	0,630	0,283
T_v	0,903	0,704	0,530	0,302	0,221	0,166	0,119
R_{fv}	0,0807	0,114	0,237	0,249	0,424	0,607	0,462
R_{bv}	0,0807	0,0974	0,219	0,146	0,489	0,582	0,208
T_{ir}	0	0	0	0	0	0	0
ε_f	0,838	0,840	0,840	0,840	0,840	0,840	0,840
ε_b	0,838	0,830	0,770	0,840	0,330	0,700	0,820
k [W/m.K]	0,900	0,955	0,955	0,928	0,942	0,942	0,928

onde: d é a espessura do vidro [mm];

k é a condutividade térmica do vidro [W/m.K].

5.2.2. Área Envidraçada das Fachadas

Devido à semitransparência dos vidros, quanto maior a área envidraçada, maior será o fluxo de radiação térmica transmitido através dos vidros para o ambiente interno da edificação. Isto determina um aumento na potência de condicionamento de ar necessária para anular esta carga térmica, além de se verificar um aumento do índice de claridade no interior da edificação.

Para avaliar estes efeitos, são utilizadas três configurações diferentes de área envidraçada das fachadas: janelas cobrindo 1/3, 2/3 ou 3/3 da área das paredes que possuem janelas, mostradas na Figura 5.3.

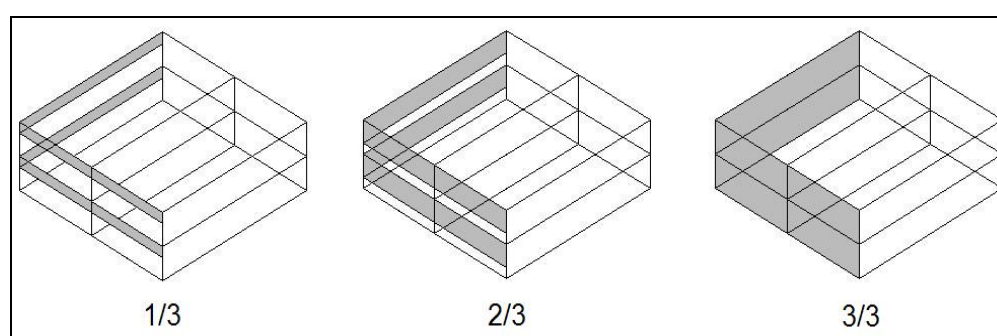


Figura 5.3. Configurações de áreas envidraçadas das fachadas simuladas no prédio.

Como já citado, o prédio possui seis janelas de vidro colocadas em duas das quatro paredes que compõem as fachadas (a divisão virtual das zonas térmicas determina seis janelas em uma das paredes). Na Tabela 5.7 são mostradas as dimensões e as áreas unitária e total das janelas. A área total representa a soma das áreas das seis janelas constantes em cada configuração de área envidraçada.

Tabela 5.7. Dimensões e áreas das janelas em cada configuração do prédio.

Prédio	Tipo	Quantidade	Comprimento [m]	Altura [m]	Área unitária [m ²]	Área total [m ²]
Comercial 1/3	Grande	2	17,6	1,12	19,71	78,85
	Pequena	4	8,8	1,12	9,86	
Comercial 2/3	Grande	2	17,6	2,23	39,25	157,00
	Pequena	4	8,8	2,23	19,62	
Comercial 3/3	Grande	2	17,6	3,35	58,96	235,84
	Pequena	4	8,8	3,35	29,48	

5.2.3. Localizações Geográficas

Diferentes localizações geográficas determinam diferentes insolações a que a edificação estará sujeita ao longo do ano, além de caracterizar o clima a que a mesma estará suscetível. Devido ao solstício de verão (21/12), por exemplo, fachadas de edificações orientadas para o sul em cidades situadas abaixo do trópico de capricórnio praticamente não recebem insolação.

São simuladas cinco capitais brasileiras: Belém – PA, Brasília – DF, Porto Alegre – RS, Recife – PE, e São Paulo – SP, mostradas na Figura 5.4.

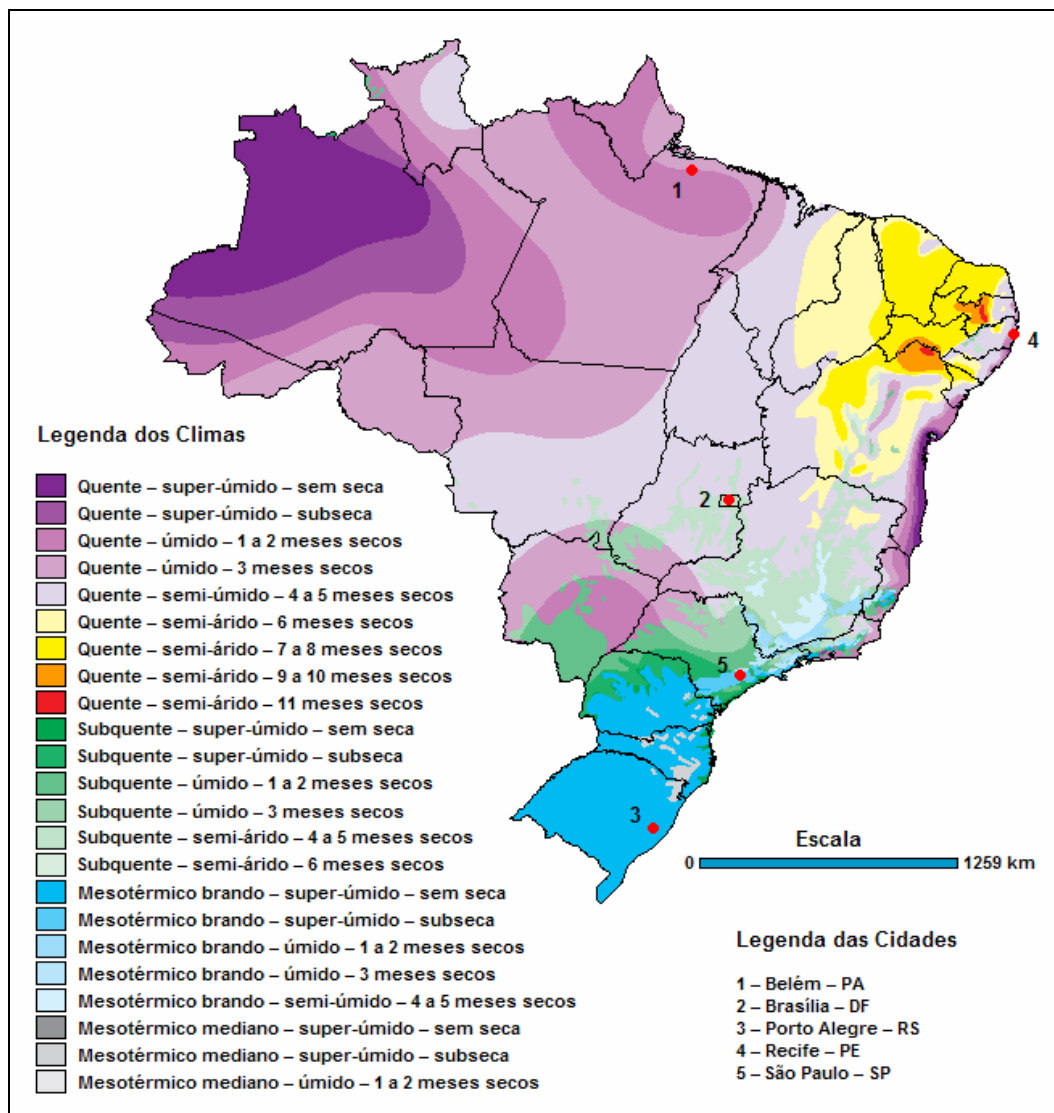


Figura 5.4. Mapa das divisões climáticas brasileiras com a localização das cidades simuladas.

A Figura 5.4, adaptada da página virtual do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2004, apresenta as divisões climáticas do Brasil de acordo com a temperatura média e a quantidade de meses secos, foram inseridas as localizações das cidades simuladas.

Das 23 divisões climáticas definidas pelo IBGE e mostradas na Figura 5.4, 7 caracterizam o clima das 5 cidades simuladas. Isto é mostrado na Tabela 5.8, onde se pode observar que em algumas cidades há a ocorrência de mais de um clima.

Tabela 5.8. Climas das cidades simuladas de acordo com mapa climático brasileiro do IBGE.

Cidade	Clima
Belém – PA	Quente – úmido – 1 a 2 meses secos
	Quente – úmido – 3 meses secos
Brasília – DF	Quente – semi-úmido – 4 a 5 meses secos
	Subquente – semi-árido – 6 meses secos
Porto Alegre – RS	Mesotérmico brando – super-úmido – sem seca
Recife – PE	Quente – úmido – 3 meses secos
São Paulo – SP	Mesotérmico brando – super-úmido – subseca
	Mesotérmico brando – úmido – 1 a 2 meses secos

Os dados de localização geográfica utilizados são, segundo a ASHRAE, 2001: latitude, longitude; zona horária relativa ao GMT e altitude. Estes dados são importantes, particularmente a latitude e a longitude, pois o *EnergyPlus* simula a posição solar em função destes dados. A Tabela 5.9 mostra estes dados para as cinco capitais simuladas.

Tabela 5.9. Dados de localização geográfica para as cidades simuladas.

Cidade	Latitude	Longitude	Altitude [m]	GMT [hs]
Belém – PA	1,38° S	48,48° O	16	-3
Brasília – DF	15,87° S	47,93° O	1061	-3
Porto Alegre – RS	30,00° S	51,18° O	3	-3
Recife – PE	8,07° S	34,85° O	19	-2
São Paulo – SP	23,62° S	46,65° O	803	-3

São ainda inseridas as temperaturas de solo médias ao longo do ano a uma profundidade de 0,5 m. Visto a inexistência destes dados, foram aproximadas como sendo as temperaturas de bulbo seco médias constantes em Goulart et al., 1997, mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Temperaturas de bulbo seco médias ao longo do ano.

Cidade	Mês e Temperatura [°C]											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Belém – PA	25,8	25,6	25,6	25,8	26,1	26,4	26,5	26,5	26,2	26,5	26,5	26,4
Brasília – DF	21,7	21,7	22,0	21,2	19,3	18,0	17,9	20,0	22,2	22,2	21,9	21,4
Porto Alegre – RS	24,7	24,2	23,1	19,5	16,5	14,4	14,3	15,2	16,9	19,1	21,4	23,3
Recife – PE	27,1	27,3	26,9	26,5	25,7	24,8	24,1	24,3	25,2	26,1	26,6	26,9
São Paulo – SP	21,6	21,6	21,0	18,9	17,0	15,9	15,5	16,8	17,8	18,4	19,3	20,5

5.2.4. Orientações da Edificação

A orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro determina uma maior ou menor exposição diária das janelas à radiação térmica. Isso fica claro, por exemplo, levando em consideração que fachadas orientadas para o leste recebem insolação apenas de manhã, enquanto as orientadas para o oeste recebem insolação apenas à tarde. Assim, alterando a orientação da edificação, as paredes das fachadas que possuem janelas estarão sujeitas a variações consideráveis na insolação diária, o que influi diretamente na potência de condicionamento de ar requerida pelas zonas térmicas.

São simuladas oito orientações distintas para cada edificação, rotacionando-as com um incremento de 45° no sentido horário. Dessa forma, têm-se as seguintes orientações da edificação em relação ao norte verdadeiro: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°. Elas são mostradas na Figura 5.5. As linhas em negrito representam as paredes que possuem janelas, a seta maior “N” representa o norte verdadeiro e a seta menor a direção referencial da orientação da edificação, selecionada aleatoriamente. A referência da orientação da edificação reside na disposição das janelas, pois para a configuração em que esta orientação é paralela ao norte verdadeiro há janelas apenas nas fachadas norte e oeste.

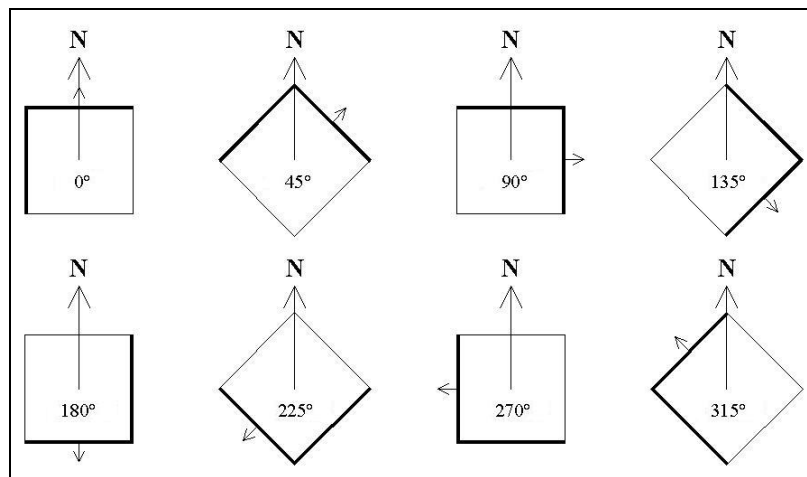


Figura 5.5. Vista superior representando a edificação e mostrando as orientações simuladas.

5.3. Tipos de Períodos Simulados

São simulados dois tipos períodos: utilizando dias de projeto de verão e inverno, que dimensionam o sistema de condicionamento de ar; e utilizando arquivos climáticos anuais, que possibilitam estimar o consumo elétrico da edificação. Nesta seção estes tipos de períodos simulados são descritos.

5.3.1. Dias de Projeto

Uma simulação feita com o uso de um dia de projeto de uma determinada cidade é utilizada para dimensionar o sistema de *HVAC* de uma edificação. Geralmente se utilizam dois dias de projeto, um para verão e outro para inverno, respectivamente para calcular carga térmica de resfriamento e aquecimento. Um dia de projeto pode ser definido, para o verão, como o dia do ano em que o sistema de *HVAC* mais solicita potência de resfriamento, e para o inverno, como o dia do ano em que o sistema de *HVAC* mais solicita potência de aquecimento.

São simulados dias de projeto estatísticos definidos pela ASHRAE, 2001. Para garantir que o condicionamento de ar tenha rendimento satisfatório, trabalha-se com 1% de frequência de ocorrência cumulativa anual para o verão e 99% 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 1% 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% destas horas.

As Tabelas 5.11 e 5.12 mostram, respectivamente, os dados de condições climáticas de dia de projeto de verão (resfriamento) e inverno (aquecimento) para as cidades simuladas.

Tabela 5.11. Condições climáticas de dia de projeto de verão para as cidades simuladas.

Cidade	T_{bs} [°C]	ΔT [°C]	T_{bu} [°C]	P [kPa]	$u_{m\acute{a}x}$ [m/s]	D
Belém – PA	32,5	8,2	25,3	101,13	2,9	90°
Brasília – DF	30,9	13,0	18,2	89,21	3,2	90°
Porto Alegre – RS	33,5	9,5	24,0	101,29	3,0	290°
Recife – PE	32,7	6,3	25,6	101,10	5,2	120°
São Paulo – SP	30,9	8,3	20,3	92,04	2,6	330°

Tabela 5.12. Condições climáticas de dia de projeto de inverno para as cidades simuladas.

Cidade	T_{bs} [°C]	ΔT [°C]	T_{bu} [°C]	P [kPa]	$u_{m\acute{a}x}$ [m/s]	D
Belém – PA	22,8	0	22,8	101,13	0,7	90°
Brasília – DF	10,8	0	10,8	89,21	0,2	90°
Porto Alegre – RS	6,1	0	6,1	101,29	0,7	240°
Recife – PE	21,8	0	21,8	101,10	2,3	240°
São Paulo – SP	9,9	0	9,9	92,04	2,0	160°

onde: T_{bs} é a temperatura de bulbo seco [°C];

ΔT é a amplitude da variação da temperatura de bulbo seco [°C];

T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido [°C];

P é a pressão atmosférica local [kPa];

$u_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima do vento [m/s];

D é a direção do vento ($N = 0^\circ$; $L = 90^\circ$; $S = 180^\circ$; $O = 270^\circ$) [$^\circ$]

Para o inverno, foi escolhido o dia 21 de julho. É importante salientar que a *ASHRAE* considera a temperatura de bulbo seco constante ao longo do dia de projeto (como pode ser observado na Tabela 5.12), além de considerar céu completamente nublado em todas as cidades.

Já para o verão decidiu-se trabalhar com quatro dias de verão: 21 de dezembro, 21 de janeiro, 21 de fevereiro e 21 de março. Os dados de dias de projeto de verão são rigorosamente iguais, porém as datas determinam posições solares diferentes, de modo que, por exemplo, em Porto Alegre, no mês de março, no qual ocorre o equinócio de outono, há uma maior insolação diária nas fachadas norte do que em dezembro, quando ocorre o solstício de verão. Dessa forma, optou-se por quatro dias de verão como critério para tratar a grande heterogeneidade climática entre as cidades avaliadas.

A Figura 5.6 mostra, para os dias de projeto de verão, a evolução diária da temperatura de bulbo seco externa das cinco capitais simuladas, de acordo com a temperatura de bulbo seco máxima e a amplitude da variação da temperatura de bulbo seco, dados estes mostrados na Tabela 5.11.

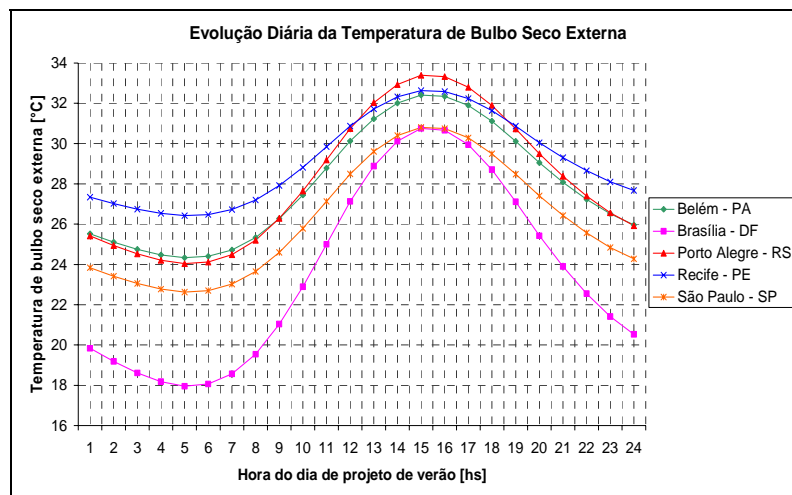


Figura 5.6. Evolução diária da temperatura de bulbo seco externa.

Na Figura 5.6, se destaca a maior amplitude térmica de Brasília. Isto ocorre porque Brasília é a única cidade que possui um clima continental, sendo que as demais cidades possuem climas oceânicos (São Paulo e Porto Alegre são fortemente influenciadas pela proximidade do litoral). Devido aos mares e oceanos, um clima oceânico é caracterizado por possuir uma inércia

térmica maior que a de um clima continental. Assim, para os dias de projeto de verão, as perdas térmicas de uma edificação em Brasília são maiores que nas demais cidades.

5.3.2. Arquivos Climáticos

Uma simulação feita com o uso de um arquivo climático de uma determinada cidade é utilizada para prever o consumo elétrico de uma edificação, seja o consumo do sistema de HVAC, o consumo do restante dos equipamentos elétricos ou o consumo total da edificação (soma dos dois anteriores). Arquivos climáticos são necessários quando se deseja simular um período do ano pré-definida pelo usuário, os *run periods*.

A composição de um arquivo climático começa com a medição, em uma localidade, de uma série de dados meteorológicos horários por um longo período de tempo (10 anos ou mais). No caso de se medir durante 10 anos, por exemplo, haverá 120 meses medidos, ou seja, 10 janeiros, 10 fevereiros, e assim sucessivamente até dezembro. A partir de um tratamento estatístico dos dados, escolhem-se um a um os meses anuais que melhor representam o clima da localidade medida. A compilação destes doze meses mais representativos é o arquivo climático.

Além dos dados de localização geográfica mostrados na Tabela 5.9, um arquivo climático contém as informações climáticas horárias para as 8.760 horas do ano mostradas na Tabela 5.13.

Tabela 5.13. Informações horárias constantes em um arquivo climático.

Informação climática	Unidade	Informação climática	Unidade
Data e hora	-	Iluminação horizontal difusa	lux
Temperatura de bulbo seco	°C	Iluminação normal direta	lux
Temperatura de orvalho	°C	Claridade zenital	Cd/m ²
Umidade relativa	%	Direção do vento	°
Pressão atmosférica	Pa	Velocidade do vento	m/s
Radiação extraterrestre horizontal	Wh/m ²	Índice de cobertura do céu (0 à 1)	-
Radiação extraterrestre direta	Wh/m ²	Índice de opacidade do céu (0 à 1)	-
Radiação IV horizontal do céu	Wh/m ²	Visibilidade	Km
Radiação horizontal global	Wh/m ²	Altura das nuvens	m
Radiação horizontal difusa	Wh/m ²	Precipitação de água	mm
Radiação normal direta	Wh/m ²	Profundidade da neve	cm
Iluminação horizontal global	lux	Número de dias sem cair neve	-

Foram utilizados cinco arquivos climáticos, um para cada cidade, no formato EPW (EnergyPlus Weather), próprio do *EnergyPlus*. Com exceção do arquivo climático para Porto Alegre, que foi feito pelo Laboratório de Vapor e Refrigeração, os demais foram obtidos da página virtual oficial do *EnergyPlus* [Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003].

É importante salientar que “o EnergyPlus não requer arquivos climáticos com 8.760 horas no caso de simulação de períodos curtos e permite gerar arquivos com partes da hora (por exemplo quinze minutos)” [Grings, 2003]. 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.

5.4. Tipos de Controle de Iluminação Artificial Simulados

Em relação à iluminação artificial, são feitos dois tipos de simulações: um considerando potência de iluminação contínua e outro considerando controle automático da potência das lâmpadas, ambos apresentados abaixo. Estes dois tipos de simulações não podem ser rodados simultaneamente, pois cada um requer um arquivo *IDF* distinto.

5.4.1. Iluminação Contínua

Este tipo de simulação, feito para as cinco capitais descritas, considera que as lâmpadas permanecem ligadas com 100% da potência das 8 às 18 horas e depois ficam desligadas até as 8 horas da manhã do próximo dia.

Neste tipo de simulação o consumo diário das lâmpadas será o mesmo (constante) para todas as simulações, pois não há controle de potência de acordo com a necessidade de iluminação artificial. Aqui a idéia é simular um controle de iluminação freqüentemente utilizado em escritórios.

5.4.2. Iluminação Programada

O EnergyPlus oferece três tipos de controle de potência das lâmpadas:

- Contínuo: os sensores diminuem a potência das lâmpadas continuamente conforme a iluminação natural aumenta.
- Discreta: os sensores diminuem a potência das lâmpadas em frações igualmente espaçadas conforme a iluminação natural aumenta (por exemplo, com 4 passos: 100%, 67%, 33%, 0%).
- Contínuo/desligar: igual ao controle contínuo, porém pode-se programar uma potência mínima que se for atingida desliga as lâmpadas.

Neste tipo de simulação é avaliado, apenas para Porto Alegre, um modelo contínuo/desligar de controle automático da potência das lâmpadas. Na simulação, são inseridos

dois sensores de luminosidade (luxímetros) em cada uma das quatro zonas térmicas, em uma altura de 0,8 m do piso (altura de uma mesa de escritório), programados para manter uma iluminância (que é a relação entre o fluxo luminoso que incide na direção perpendicular a uma superfície e sua área) de acordo com a atividade desenvolvida no interior da edificação. Estes sensores são capazes de medir apenas a luminosidade natural, ou seja, luz do dia proveniente dos raios solares, não sendo capazes de medir a iluminação artificial.

Na Figura 5.7, para a orientação 0° (janelas em negrito), são mostradas as localizações dos sensores, em cor verde-claro, para as zonas 3 e 4 (a localização para as zonas 1 e 2 é exatamente a mesma, porém a altura é diferente). Cada zona é definida pela linha contínua, que divide a planta baixa em duas metades. Cada sensor “enxerga” uma área quadrada de cada zona, e cada uma destas áreas tem sua geometria traçada pelas linhas tracejada e contínua que se cruzam. Assim, cada sensor “enxerga” uma área de 77,44 m² (8,8m x 8,8 m).

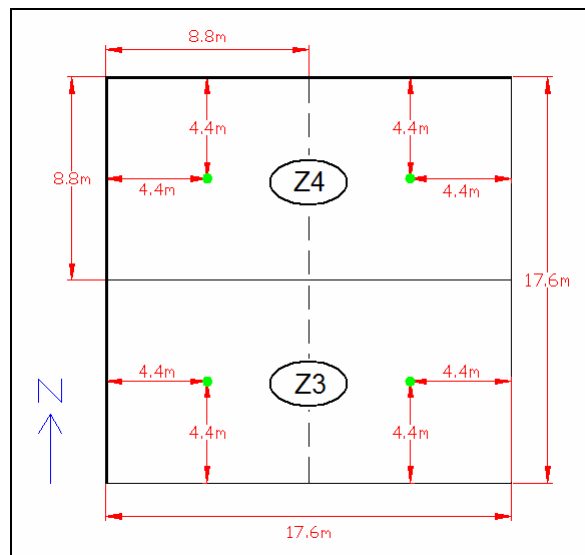


Figura 5.7. Vista superior mostrando a localização dos sensores de iluminância.

A iluminância de projeto utilizada, recomendada para atividades de um escritório, é de 500 lux [Provenza, 1976]. O controle de potência utiliza no máximo 100% da potência das lâmpadas, e no mínimo 20%, e depois de atingida esta potência mínima as luzes são automaticamente desligadas. Este tipo de controle utiliza reatores incomuns nas luminárias, capazes de variar continuamente a potência das lâmpadas, de 20 a 100% da potência nominal.

Isto significa que se o sensor de uma área medir uma iluminância igual ou maior que 500 lux, o sistema de controle reduz a potência de alimentação das lâmpadas para 20% naquela área “vista” pelo sensor, e em seguida desliga as lâmpadas. No caso de o sensor medir uma iluminância menor que 500 lux, as lâmpadas permanecerão ligadas com uma fração de potência,

entre 20 e 100%, que complemente a iluminância necessária para o sensor tornar a medir os 500 lux de projeto.

Isto influi no consumo elétrico das lâmpadas, que agora não mais é constante, pois depende da insolação nas janelas e da transmitância das películas nos vidros. Assim, neste tipo de simulação a idéia é verificar em quanto se pode diminuir o consumo elétrico das lâmpadas sem comprometer a luminosidade necessária às atividades desenvolvidas no ambiente.

Em relação à iluminação programada, há dois custos extras que não ocorrem para iluminação contínua: o custo dos sensores de iluminância e o custo dos reatores para cada luminária.

Os sensores são 8, sendo 2 em cada zona térmica. Para determinar a quantidade de reatores, deve-se primeiro definir a quantidade de luminárias. Como a potência das lâmpadas é de 3.025 W em cada zona térmica e considera-se que cada lâmpada é do tipo fluorescente tubular e possui 40 W, há 76 lâmpadas em cada zona térmica. As luminárias são do tipo embutida no forro e cada uma comporta 4 lâmpadas. Assim, há 19 luminárias em cada zona, dando um total de 76 luminárias na edificação. Logo, são necessários 76 reatores.

Tanto para iluminação contínua quanto para iluminação programada são feitas simulações utilizando os parâmetros descritos na seção 5.2 e utilizando dias de projeto e arquivos climáticos.

5.5. Número de Simulações

A alteração de qualquer um dos parâmetros avaliados determina um arquivo *IDF* distinto. Como os dias de projeto e os arquivos climáticos podem ser simulados a partir de um único arquivo *IDF*, e considerando a análise dos 7 tipos de vidro, das 3 diferentes áreas envidraçadas das fachadas, das 5 localizações geográficas e das 8 orientações da edificação, têm-se 840 casos (ou 840 arquivos *IDF*) a serem simulados, ou seja, 168 casos para cada cidade. Porém, como cada tipo de controle de iluminação artificial requer um arquivo *IDF* distinto, foram simulados os 840 casos considerando controle contínuo da potência das lâmpadas e mais os 168 casos (para Porto Alegre) considerando controle automático da potência das lâmpadas. Assim, tem-se um total de 1.008 simulações realizadas.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo apresenta-se uma análise dos resultados obtidos pelas simulações, os quais foram divididos em dois grupos: um considerando controle de iluminação contínua e outro considerando controle de iluminação programada.

Aqui serão apresentados resultados gráficos em função da orientação, sendo que cada gráfico contém resultados para as 8 orientações já descritas e para a orientação 360° (que é uma cópia dos resultados para a orientação 0°). Assim, cada gráfico contém resultados discretos, em relação à orientação, de 56 simulações, cada uma representada por um ponto. Apesar de serem apresentados resultados para somente 8 orientações, as curvas traçadas dão uma idéia do comportamento dos resultados para todas as orientações possíveis, de 0 à 360°.

Todos os resultados obtidos com o uso do *EnergyPlus* são sob forma de planilha em extensão *CSV (Comma Separated Values)*, ou valores separados por vírgula, formato este que pode ser lido pela maioria dos editores eletrônicos de planilhas.

Em relação à potência do sistema de *HVAC* (refrigeração ou aquecimento), potência esta que define o custo de compra e instalação do mesmo, as planilhas contém resultados horários para as quatro zonas, cada uma em uma coluna, considerando os cinco dias de projeto (quatro de verão e um de inverno). Os resultados gráficos de potência do sistema de *HVAC* são obtidos da seguinte forma:

- Verão: Soma-se a potência máxima que é solicitada em cada zona ao longo das 96 horas simuladas (quatro dias de projeto), ou seja, somam-se quatro potências máximas, uma de cada zona, não necessariamente concomitantes.
- Inverno: Soma-se a potência máxima que é solicitada em cada zona ao longo das 24 horas simuladas (um dia de projeto), ou seja, somam-se quatro potências máximas, uma de cada zona, não necessariamente concomitantes.

A metodologia para verão utilizada garante que os resultados de potência de refrigeração dimensionam bem o sistema de refrigeração, que é um dos objetivos deste trabalho. Porém, a análise destes resultados é incapaz de revelar algumas informações a respeito do comportamento termoenergético da edificação em cada um dos quatro dias de projeto.

Já para obter resultados de consumos elétricos, que determinam os custos operacionais anuais da edificação, são usados arquivos climáticos e obtidas as seguintes planilhas com resultados anuais:

- Consumo elétrico do sistema de *HVAC* (inclui refrigeração e aquecimento).
- Consumo elétrico das lâmpadas.
- Consumo elétrico dos equipamentos elétricos (excluindo lâmpadas).
- Consumo elétrico total da edificação (soma dos três anteriores).

Como dito no capítulo 5, os equipamentos elétricos possuem consumo elétrico anual constante para qualquer caso simulado, seja para iluminação contínua ou programada. O valor deste consumo anual é igual a 18.120 kWh.

Todos os resultados gráficos obtidos se referem à edificação inteira, ou seja, à soma de resultados das quatro zonas. Para fins práticos, as três áreas envidraçadas das fachadas, 1/3, 2/3 e 3/3, são referidas neste capítulo, respectivamente, como prédio 1/3, prédio 2/3 e prédio 3/3.

6.1. Iluminação Contínua

Visto a constância dos consumos elétricos anuais das lâmpadas e dos equipamentos elétricos, os resultados gráficos de interesse são os da potência de refrigeração de pico, da potência de aquecimento de pico, do consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* e do consumo elétrico anual total da edificação.

Para iluminação contínua, as lâmpadas possuem consumo elétrico anual constante de 36.542 kWh para todos os casos simulados. Considerando que tanto o consumo dos equipamentos quanto o consumo das lâmpadas são constantes para iluminação contínua, tem-se que o consumo elétrico anual total da edificação varia conforme o consumo elétrico anual do sistema de *HVAC*.

O apêndice D.1 mostra, para iluminação contínua, tabelas das potências de refrigeração de pico por zona para as cinco cidades simuladas. Consultando estas tabelas, pode-se determinar qual a potência comercial (em TR) deve ser instalada em cada uma das quatro zonas térmicas da edificação.

6.1.1. Porto Alegre – RS

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostram para Porto Alegre, respectivamente, as potências de refrigeração de pico para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3.

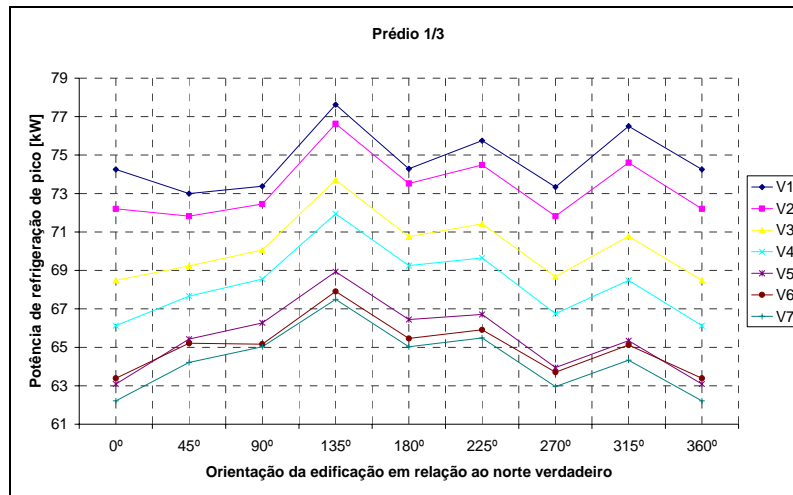


Figura 6.1. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 1/3.

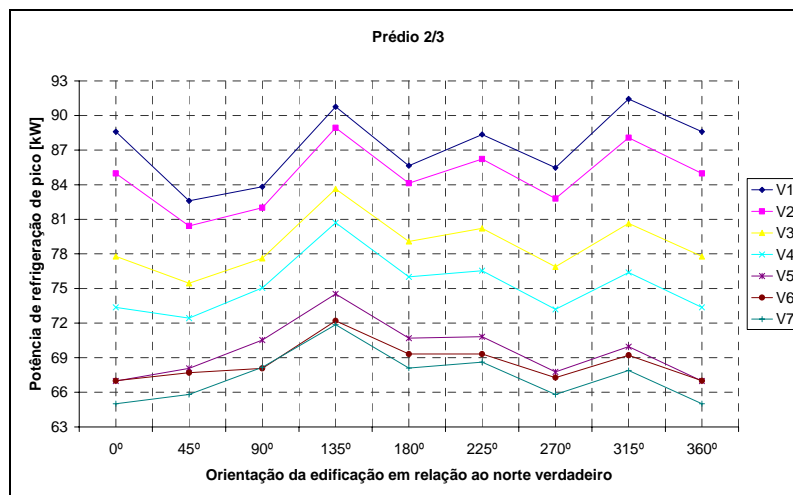


Figura 6.2. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 2/3.

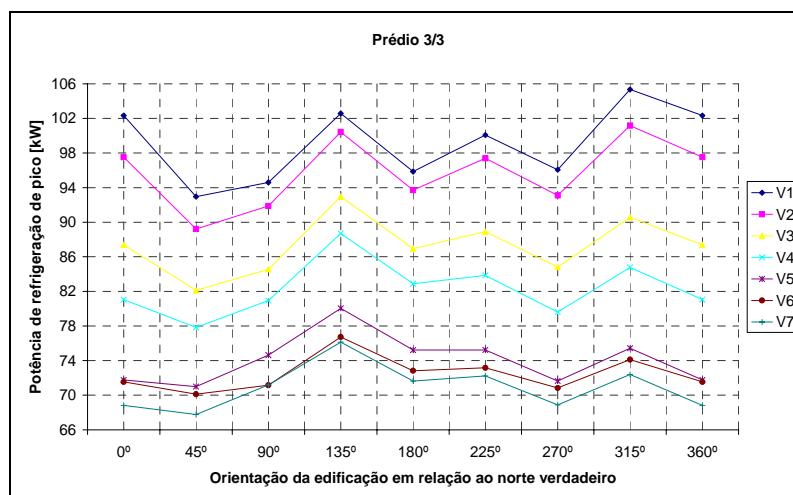


Figura 6.3. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

Nos gráficos 6.1, 6.2 e 6.3 se observa que nas orientações 135° (janelas nas fachadas

nordeste e sudeste) e 315° (janelas nas fachadas noroeste e sudoeste) ocorrem as maiores cargas térmicas de refrigeração quando se analisam separadamente os sete tipos de vidros. Isto é um indicativo de que para esta cidade, janelas colocadas nas fachadas leste ou oeste influenciam mais na carga térmica que janelas norte ou sul.

Porto alegre possui a segunda maior amplitude de temperatura de bulbo seco externa ao longo do dia de projeto, igual a $9,5^\circ\text{C}$. Entretanto, esta variação da temperatura possui influência pouco significativa na potência de refrigeração de pico para as orientações 45° e 90° . Esta influência é pequena porque o clima de Porto Alegre é influenciado pelo grande inércia térmica litorânea.

Também se observam diferenças significativas quando diferentes tipos de vidros são comparados, pois para todas as três áreas envidraçadas das fachadas, as maiores reduções percentuais na potência de refrigeração de pico são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 0° : 16,2% no prédio 1/3, 26,6% no prédio 2/3 e 32,7% no prédio 3/3. Isso demonstra que quanto maior a área envidraçada das fachadas, maior é o potencial de redução da carga térmica. Além disso, conforme a área envidraçada das fachadas aumenta, há uma tendência de que os vidros com menor transmissividade diminuam consideravelmente os efeitos das diferentes orientações na carga térmica.

A Figura 6.4, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra a potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

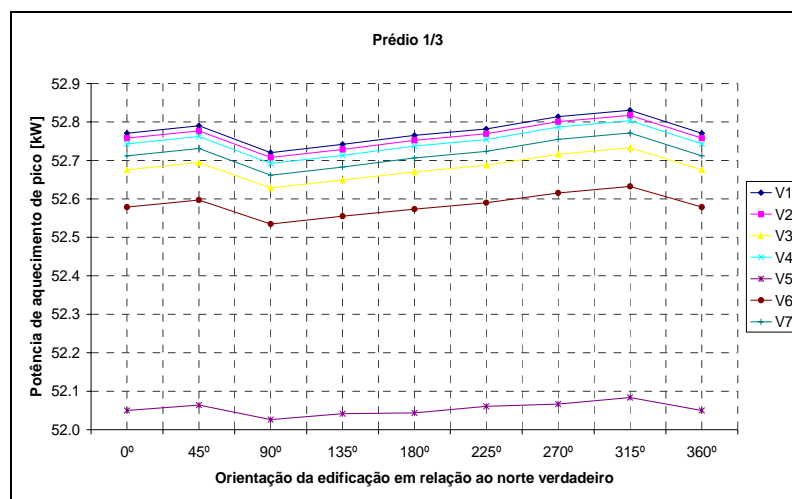


Figura 6.4. Porto Alegre – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

Observa-se na Figura 6.4 que, quando diferentes tipos de vidros são comparados, a amplitude das diferenças das potências de aquecimento é bastante pequena. O fato que mais contribui para isto é a inexistência de insolação de radiação direta nas janelas, pois o dia de

projeto de inverno definido pela *ASHRAE* considera céu completamente nublado (equivalente à noite), ou seja, não há radiação direta ou difusa incidindo sobre a edificação. Assim, estas pequenas diferenças se devem à emissão de radiação de onda longa das janelas para o exterior.

Também se nota que houve uma modificação na seqüência das curvas dos tipos de vidros, e consultando a Tabela 5.6 observa-se que exceto para o vidro V5, esta seqüência é determinada pela refletância visível na face interna do vidro. Quanto maior esta refletância, maior é a reflexão da radiação para o interior da edificação.

Chama a atenção o comportamento do vidro V5 (o qual possui baixa emissividade na face interna do vidro), pois este tipo de vidro demandou a menor potência de aquecimento para todas as orientações. Isto se deve exatamente à sua face com baixa emissividade, pois como se tem que a temperatura interna da edificação é maior que a temperatura externa, a edificação passa a ser emissora de radiação para o exterior.

Levando em consideração a lei de Kirchhoff, o vidro absorve menos calor do ambiente interno e conseqüentemente fica mais frio, o que faz com que ele emita menos radiação de onda longa para o exterior. Isto foi confirmado obtendo a evolução da temperatura da superfície interna dos vidros no dia de projeto de inverno, onde se verifica que o vidro V5 é o que apresenta a menor temperatura entre todos os sete vidros, cerca de 0,5°C menor que os demais vidros.

Para as demais configurações de fachadas envidraçadas, 2/3 e 3/3, os gráficos de potência de aquecimento são semelhantes, de modo que é desnecessário plotá-los porque as diferenças são pouco expressivas. A amplitude das potências de aquecimento para o prédio 1/3 vai de 52,0 à 52,8 kW, para o prédio 2/3 vai de 53,0 à 54,5 kW, e para o prédio 3/3 vai de 53,9 à 55,8 kW.

Como se tem que os consumos elétricos anuais das lâmpadas e dos equipamentos elétricos são respectivamente iguais a 35.542 kWh e 18.120 kWh, não é necessário que os mesmos sejam plotados.

Assim, para Porto Alegre, os consumos elétricos anuais do sistema de *HVAC* para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3, e os consumos elétricos anuais totais para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3 (soma dos consumos das lâmpadas, dos equipamentos elétricos e do sistema de *HVAC*), são mostrados respectivamente nas Figuras 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados.

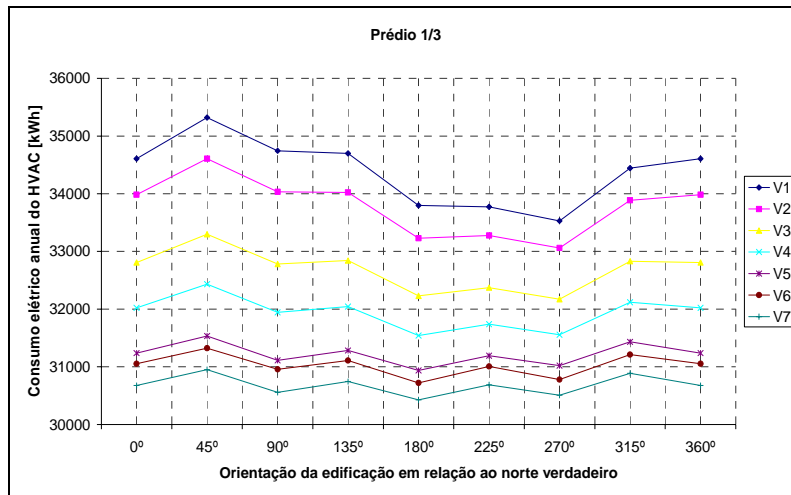


Figura 6.5. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de HVAC no prédio 1/3.

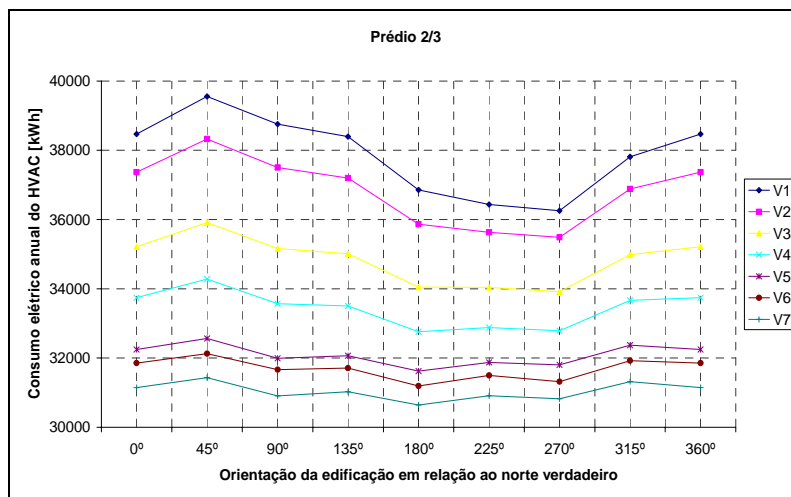


Figura 6.6. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de HVAC no prédio 2/3.

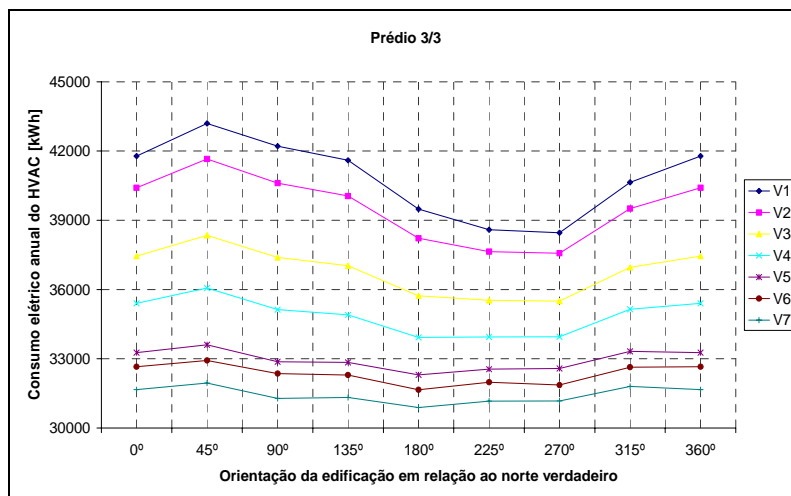


Figura 6.7. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de HVAC no prédio 3/3.

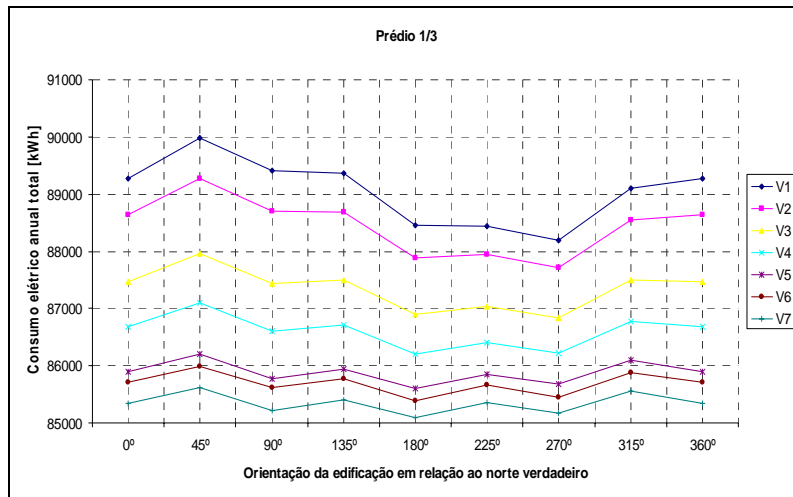


Figura 6.8. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 1/3.

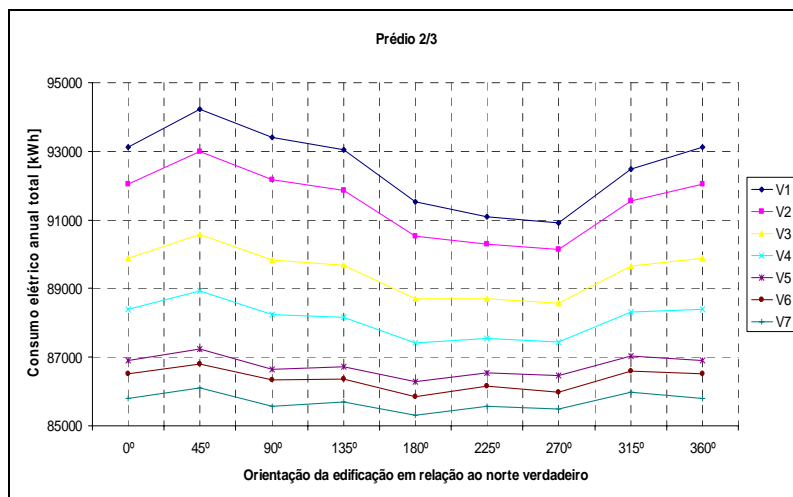


Figura 6.9. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 2/3.

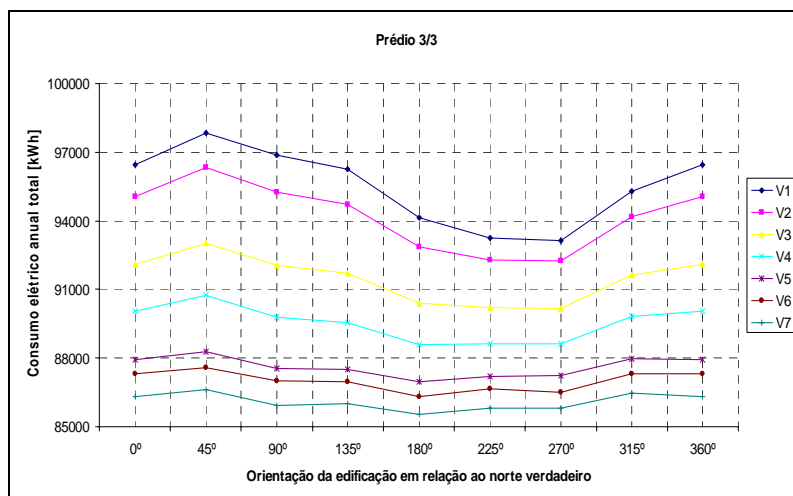


Figura 6.10. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.

Em relação ao consumo do sistema de HVAC, para todas as três áreas envidraçadas das

fachadas, as maiores reduções percentuais são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 45°: 12,4% no prédio 1/3, 20,5% no prédio 2/3 e 26,0% no prédio 3/3.

Como neste caso o consumo do sistema de *HVAC* é o único que varia (visto a invariabilidade dos consumos elétricos das lâmpadas e dos equipamentos elétricos), esta variação é transferida integralmente para o consumo elétrico total, sendo que isto ocorre para todas as cidades quando se simula o sistema de iluminação contínuo. Disto resulta que as curvas de consumo do sistema de *HVAC* e de consumo total para uma mesma área envidraçada das fachadas são exatamente iguais, diferindo apenas quanto à escala de valores.

Assim, para todas as três áreas envidraçadas das fachadas, as maiores reduções percentuais no consumo elétrico total também são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 45°: 4,9% no prédio 1/3, 8,6% no prédio 2/3 e 11,5% no prédio 3/3.

É interessante notar que em relação aos consumos, as janelas orientadas para o sul (orientações 180°, 225° e 270°) têm influência acentuada, pois nestas orientações os consumos são significativamente menores que nas demais orientações. Isto ocorre porque nestas orientações a insolação diária nas fachadas com janelas é menor que nas demais fachadas (devido à latitude da cidade), o que resulta em um consumo elétrico menor ao longo do ano.

Também se observa que conforme a área envidraçada das fachadas aumenta, há uma tendência de que os vidros com menor transmissividade se tornem independentes das orientações, pois acabam determinando valores semelhantes de consumos elétricos para todas as três configurações de áreas envidraçadas das fachadas.

6.1.2. Belém – PA

A Figura 6.11, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para Belém, a potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

Para todas as três configurações de área envidraçada das fachadas o formato das curvas é semelhante às da Figura 6.11, pois a dependência da potência de refrigeração de pico em relação à orientação é semelhante em todas as três configurações. As faixas de potência de refrigeração de pico são de 70,5 à 86,3 kW no prédio 1/3, de 70,0 à 99,4 kW no prédio 2/3 e de 71,2 à 112,5 kW no prédio 3/3.

As maiores reduções percentuais na potência de refrigeração de pico são observadas comparando os vidros V1 e V7: 13,5% no prédio 1/3 (225°), 24,3% no prédio 2/3 (270°) e 29,4% no prédio 3/3 (270°).

Este comportamento das curvas indica que para Belém, janelas norte (orientações 0°, 45° e 90°) são menos influentes na carga térmica de verão do que janelas sul (orientações 180°, 225°

e 270°). Aqui é possível realizar esta análise pelo fato de nos dias de verão simulados praticamente não haver insolação nas janelas norte da edificação, pois Belém possui latitude muito próxima da linha do Equador.

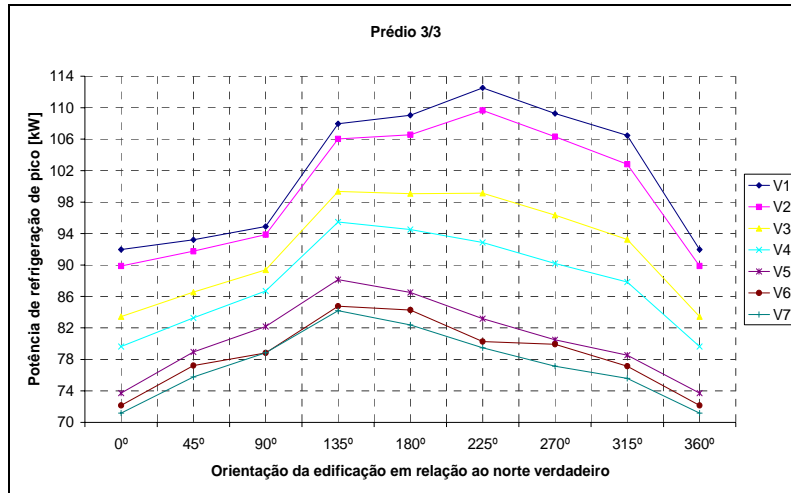


Figura 6.11. Belém – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

Aliás, esta proximidade do Equador determina um clima que faz com que em Belém não seja necessário um sistema de aquecimento na edificação, pois para todas as simulações feitas no dia de projeto de inverno nunca foi solicitada potência de aquecimento. Curiosamente, estas simulações sempre solicitam potência de refrigeração, evidentemente bastante menores que a potência de refrigeração de pico. Isto é uma influência da alta temperatura de bulbo seco de inverno, que é de 22,8°C para Belém.

A Figura 6.12, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para Belém, o consumo elétrico anual total para o prédio 3/3.

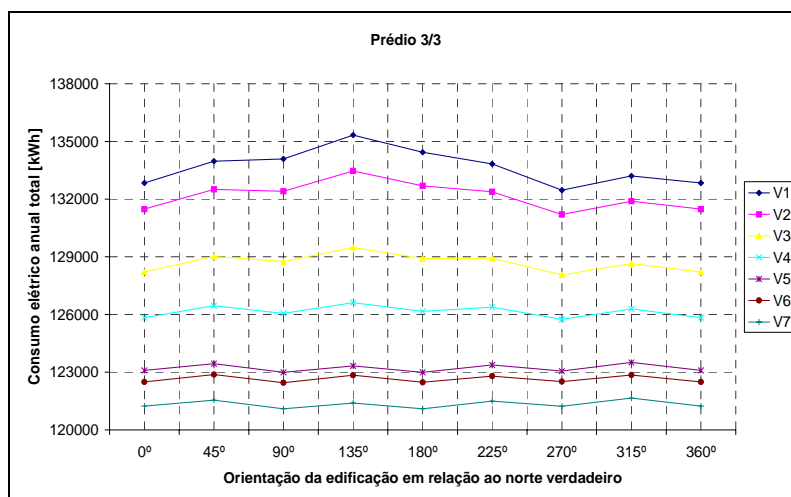


Figura 6.12. Belém – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.

Na Figura 6.12, a visível constância do consumo para quase todos os tipos de vidros se deve à localização geográfica de Belém. Como a cidade está localizada praticamente na linha do Equador, a distinção entre verão e inverno é tênue.

As faixas de consumo anual do sistema de *HVAC* são de 64,9 à 70,9 kWh no prédio 1/3, de 65,7 à 76,3 kWh no prédio 2/3 e de 66,4 à 80,7 kWh no prédio 3/3. Já as faixas de consumo anual total são de 119,5 à 125,6 kWh no prédio 1/3, de 120,3 à 130,9 kWh no prédio 2/3, e de 121,1 à 135,3 kWh no prédio 3/3.

Em relação ao consumo do sistema de *HVAC*, para todas as três áreas envidraçadas das fachadas, as maiores reduções percentuais são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 135°: 8,1% no prédio 1/3, 13,5% no prédio 2/3 e 17,3% no prédio 3/3. Já em relação ao consumo elétrico total anual, estas reduções são de 4,6% no prédio 1/3, 7,9% no prédio 2/3 e 10,3% no prédio 3/3.

6.1.3. Brasília – DF

A Figura 6.13, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para Brasília, a potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

Para as outras duas configurações de área envidraçada das fachadas, 1/3 e 2/3, os gráficos são semelhantes ao da Figura 6.13. Pode-se observar o efeito do clima continental de Brasília nas orientações em que se têm janelas oeste (90°, 135° e 180°), onde são solicitadas potências de refrigeração de pico menores que para as demais orientações. As faixas de potência de refrigeração de pico são de 39,6 à 55,8 kW no prédio 1/3, de 39,7 à 69,9 kW no prédio 2/3 e de 39,9 à 83,1 kW no prédio 3/3.

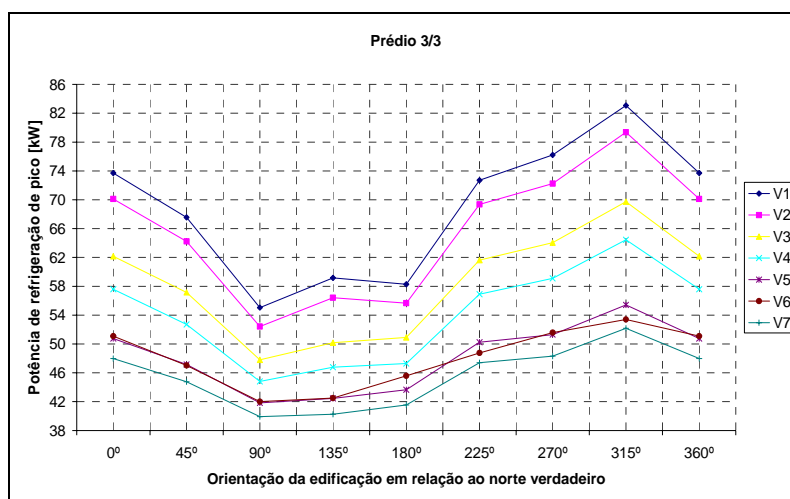


Figura 6.13. Brasília – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

As maiores reduções percentuais na potência de refrigeração de pico são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 315°: 21,3% no prédio 1/3, 31,5% no prédio 2/3 e 37,2% no prédio 3/3.

Para Brasília, as maiores cargas térmicas de refrigeração ocorreram na orientação 315° usando o vidro V1, para todas as três configurações de fachadas envidraçadas, o que indica que fachadas leste envidraçadas são mais influentes na carga térmica que as demais fachadas envidraçadas.

A Figura 6.14, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra a potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

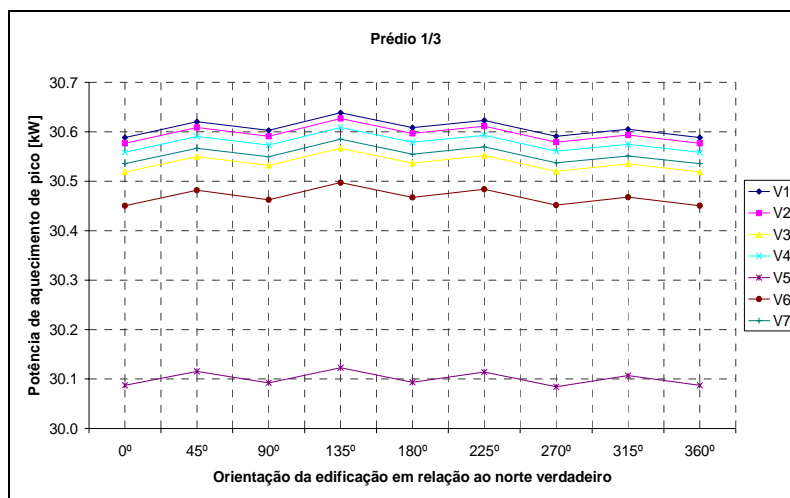


Figura 6.14. Brasília – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

Para a Figura 6.14, valem as mesmas análises, em relação aos tipos de vidros, feitas para Porto Alegre. A amplitude das potências de aquecimento para o prédio 1/3 vai de 30,1 à 30,6 kW, para o prédio 2/3 vai de 30,8 à 31,8 kW, e para o prédio 3/3 vai de 31,5 à 32,9 kW.

A Figura 6.15, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para Brasília, o consumo elétrico anual total para o prédio 3/3.

Como acontece para Porto Alegre, em Brasília as orientações que possuem janelas sul (180°, 225° e 270°) também determinam menores consumos que nas demais orientações, porém este efeito é menos acentuado porque as edificações de Brasília recebem insolação nas fachadas sul ao longo de praticamente um mês do verão.

As faixas de consumo anual do sistema de HVAC são de 35,3 à 41,2 kWh no prédio 1/3, de 35,6 à 46,2 kWh no prédio 2/3 e de 35,9 à 50,3 kWh no prédio 3/3. Já as faixas de consumo anual total são de 90,0 à 95,9 kWh no prédio 1/3, de 90,2 à 100,8 kWh no prédio 2/3, e de 90,5 à 104,9 kWh no prédio 3/3.

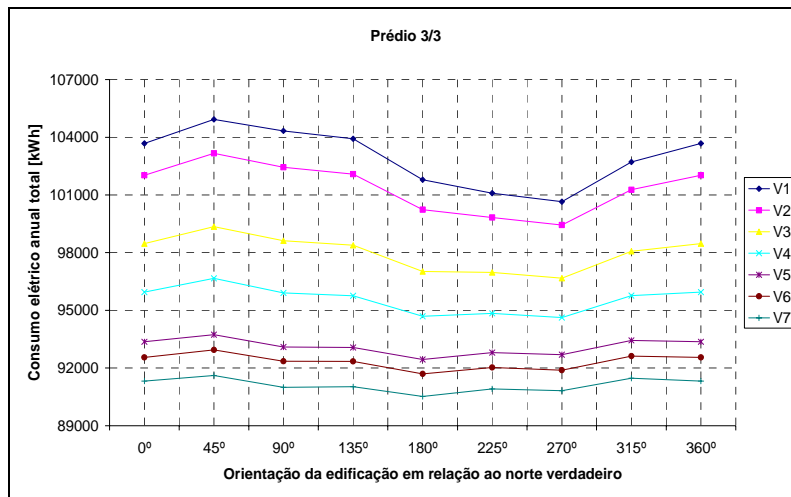


Figura 6.15. Brasília – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.

Em relação ao consumo do sistema de HVAC, para todas as três áreas envidraçadas das fachadas, as maiores reduções percentuais são observadas comparando os vidros V1 e V7: 13,0% no prédio 1/3 (45°), 21,3% no prédio 2/3 (90°) e 26,8% no prédio 3/3 (90°). Já em relação ao consumo elétrico total anual, estas reduções são de 5,6% no prédio 1/3 (45°), 9,7% no prédio 2/3 (90°) e 12,8% no prédio 3/3 (90°).

6.1.4. Recife – PE

A Figura 6.16, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para Recife, a potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

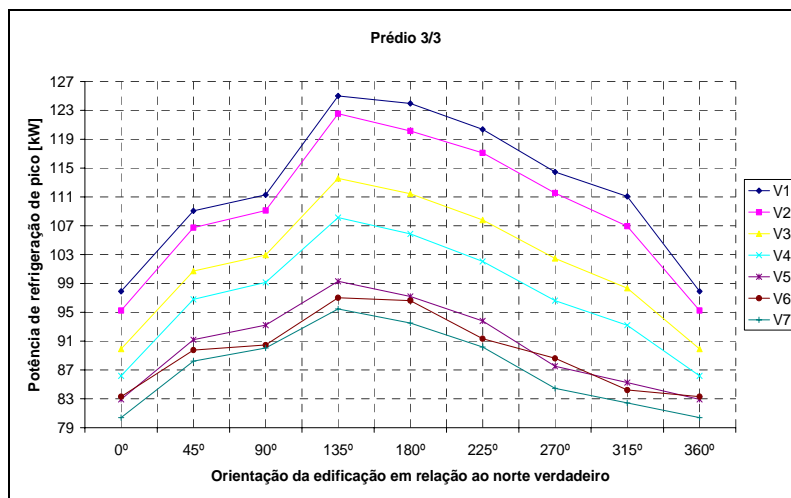


Figura 6.16. Recife – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

A Figura 6.16 revela uma semelhança entre a potência de refrigeração de pico para Recife e Belém, devido ao fato destas duas cidades estarem localizadas próximas à linha do Equador. Como para Belém, também para Recife o formato das curvas de potência de refrigeração de pico todas as três configurações de área envidraçada das fachadas são semelhantes às da Figura 6.16. As faixas de potência de refrigeração de pico são de 80,8 à 98,6 kW no prédio 1/3, de 80,6 à 113,2 kW no prédio 2/3 e de 80,4 à 125,0 kW no prédio 3/3.

As maiores reduções percentuais na potência de refrigeração de pico são observadas comparando os vidros V1 e V7: 12,9% no prédio 1/3 (225°), 20,4% no prédio 2/3 (225°) e 26,2% no prédio 3/3 (270°).

Também para Recife não é necessário um sistema de aquecimento na edificação, pois para todas as simulações feitas no dia de projeto de inverno nunca é solicitada uma potência de aquecimento maior que 0,5 kW.

A Figura 6.17, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para Recife, o consumo elétrico anual total para o prédio 3/3.

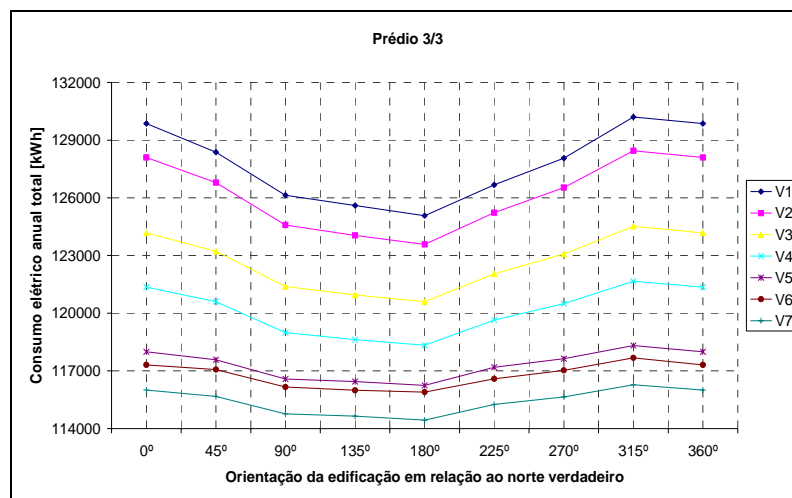


Figura 6.17. Recife – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.

Na Figura 6.17, por se tratar de uma cidade próxima ao Equador, seria natural esperar um comportamento do consumo total semelhante ao de Belém. Porém, em Recife tem-se no arquivo climático uma média da velocidade do vento de 4,00 m/s ao longo das 8.760 horas do ano. Já para Belém, este valor é de 1,59 m/s. Some-se a isso o fato de que em Recife predominam ventos de direção leste e sudeste. Dessa forma, não só o vento contribui para a perda de calor por convecção como atinge predominantemente a fachada leste da edificação. Assim, nas orientações em que há fachadas leste envidraçada (90°, 135° e 180°) há uma maior dissipação de calor para o exterior, motivo pelo qual na Figura 6.17 há um consumo elétrico menor para estas orientações.

As faixas de consumo anual do sistema de *HVAC* são de 59,0 à 65,7 kWh no prédio 1/3, de 59,4 à 71,1 kWh no prédio 2/3 e de 59,8 à 75,5 kWh no prédio 3/3. Já as faixas de consumo anual total são de 113,7 à 120,3 kWh no prédio 1/3, de 114,1 à 125,8 kWh no prédio 2/3, e de 114,4 à 130,2 kWh no prédio 3/3.

Em relação ao consumo do sistema de *HVAC*, para todas as três áreas envidraçadas das fachadas, as maiores reduções percentuais são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 315°: 8,9% no prédio 1/3, 14,6% no prédio 2/3 e 18,4% no prédio 3/3. Já em relação ao consumo elétrico total anual, estas reduções são de 4,9% no prédio 1/3, 8,3% no prédio 2/3 e 10,7% no prédio 3/3.

6.1.5. São Paulo – SP

A Figura 6.18, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para São Paulo, a potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

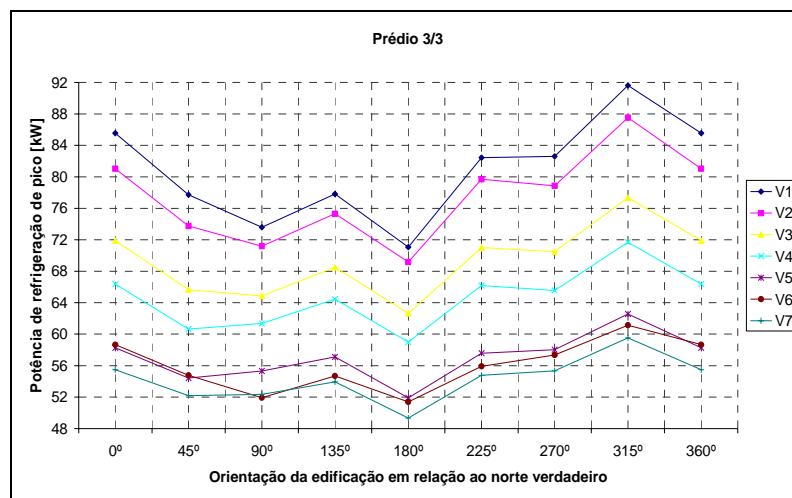


Figura 6.18. São Paulo – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

A Figura 6.18 revela, para São Paulo, que há uma influência da amplitude da temperatura de bulbo seco externa ao longo do dia de projeto na potência de refrigeração de pico para as orientações 90°, 135° e 180°. A influência é menor que para o caso de Brasília, pois nesta a amplitude é de 13°C, enquanto em São Paulo é de 8,3°C. As faixas de potência de refrigeração de pico são de 46,6 à 63,5 kW no prédio 1/3, de 48,2 à 77,8 kW no prédio 2/3 e de 49,3 à 91,6 kW no prédio 3/3.

As maiores reduções percentuais na potência de refrigeração de pico são observadas comparando os vidros V1 e V7: 18,9% no prédio 1/3 (315°), 28,9% no prédio 2/3 (0°) e 35,2%

no prédio 3/3 (0°).

A Figura 6.19, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra a potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

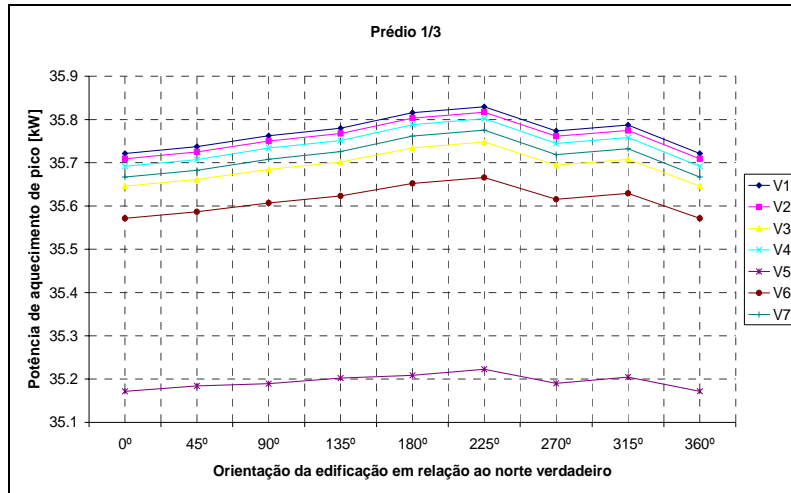


Figura 6.19. São Paulo – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

Para a Figura 6.19, valem as mesmas análises, em relação aos tipos de vidros, feitas para Porto Alegre. A amplitude das potências de aquecimento para o prédio 1/3 vai de 35,2 à 35,8 kW, para o prédio 2/3 vai de 35,9 à 37,2 kW, e para o prédio 3/3 vai de 36,6 à 38,2 kW.

A Figura 6.20, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra para São Paulo, o consumo elétrico anual total para o prédio 3/3.

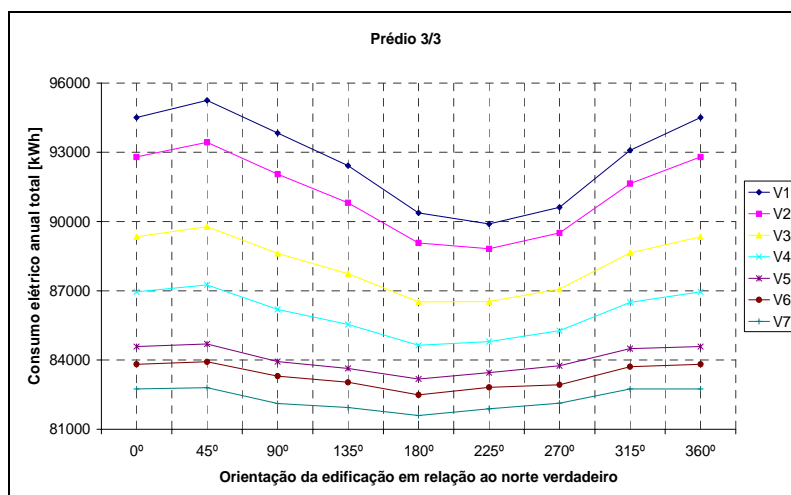


Figura 6.20. São Paulo – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.

Em relação ao consumo elétrico total da edificação, para São Paulo ocorre algo semelhante à Recife. No arquivo climático de São Paulo a média da velocidade do vento é de

3,98 m/s ao longo das 8.760 horas do ano, e predominam ventos de direção sudeste e sul. Assim, nas orientações em que há fachadas sul envidraçada (180° , 225° e 270°) há um consumo elétrico menor que para as demais orientações.

As faixas de consumo anual do sistema de *HVAC* são de 26,7 à 32,0 kWh no prédio 1/3, de 26,8 à 36,6 kWh no prédio 2/3 e de 26,9 à 40,6 kWh no prédio 3/3. Já as faixas de consumo anual total são de 81,3 à 86,7 kWh no prédio 1/3, de 81,4 à 91,3 kWh no prédio 2/3, e de 81,6 à 95,3 kWh no prédio 3/3.

Em relação ao consumo do sistema de *HVAC*, para todas as três áreas envidraçadas das fachadas, as maiores reduções percentuais são observadas comparando os vidros V1 e V7 na orientação 45° : 15,1% no prédio 1/3, 24,5% no prédio 2/3 e 30,7% no prédio 3/3. Já em relação ao consumo elétrico total anual, estas reduções são de 5,6% no prédio 1/3, 9,8% no prédio 2/3 e 13,1% no prédio 3/3.

6.2. Iluminação Programada

Como neste caso as lâmpadas possuem consumo elétrico variável, tem-se interesse nos resultados gráficos da potência de refrigeração de pico, da potência de aquecimento de pico, do consumo elétrico anual do sistema de *HVAC*, do consumo elétrico das lâmpadas e do consumo elétrico anual total da edificação. A análise de iluminação programada é feita apenas para a cidade de Porto Alegre. O apêndice D.2.1 mostra, para iluminação programada, tabelas das potências de refrigeração de pico por zona para cidade de Porto Alegre.

As Figuras 6.21, 6.22 e 6.23, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostram para Porto Alegre, respectivamente, as potências de refrigeração de pico para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3.

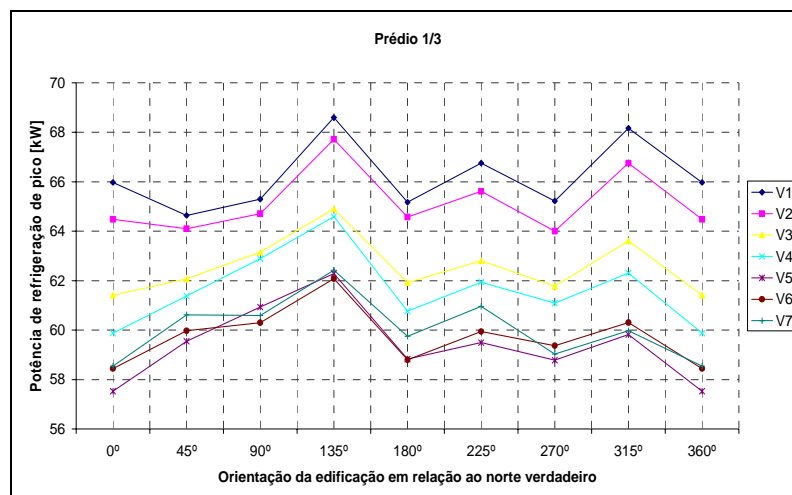


Figura 6.21. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 1/3.

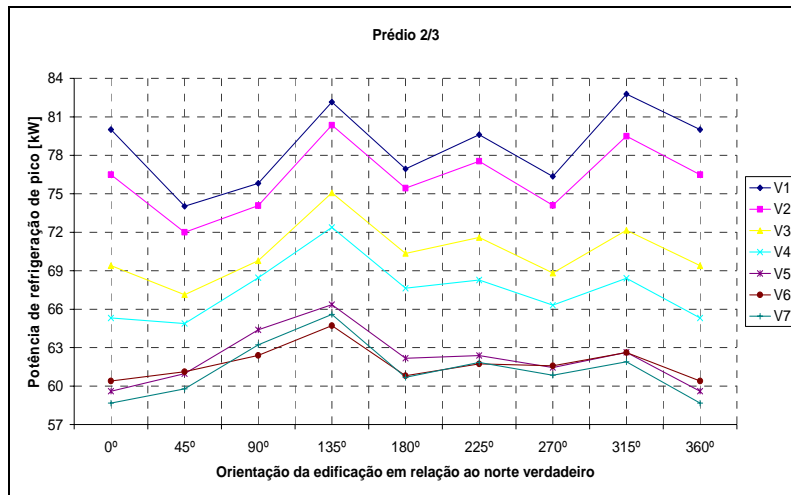


Figura 6.22. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 2/3.

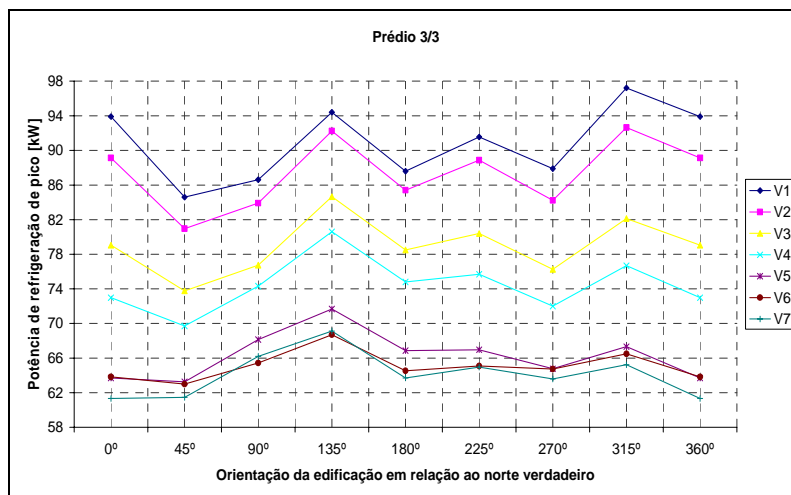


Figura 6.23. Porto Alegre – Potência de refrigeração de pico para o prédio 3/3.

Para as Figuras 6.21, 6.22 e 6.23, as maiores reduções percentuais na potência de refrigeração de pico observadas são: 12,8% no prédio 1/3 (comparando os vidros V1 e V5 na orientação 0°), 26,7% no prédio 2/3 (comparando os vidros V1 e V7 na orientação 0°) e 34,7% no prédio 3/3 (comparando os vidros V1 e V7 na orientação 0°). As curvas destas figuras são semelhantes, respectivamente, às Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, que mostram as potências de refrigeração de pico para o caso de iluminação contínua, porém as escalas são menores. Esta diferença de escalas é justamente o quanto se pode economizar no custo inicial, ou seja, no custo de compra e instalação da potência de refrigeração necessária.

Comparando as simulações da Figura 6.1 com suas respectivas simulações na Figura 6.21, ocorre nesta última uma redução na potência de refrigeração na faixa de 5,6 à 12,5%. Quando se compara a Figura 6.2 com a 6.22, esta redução é de 7,3 à 12,3%, e comparando a Figura 6.3 com a 6.23 é de 7,0 à 11,4%.

A Figura 6.24, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostra a potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

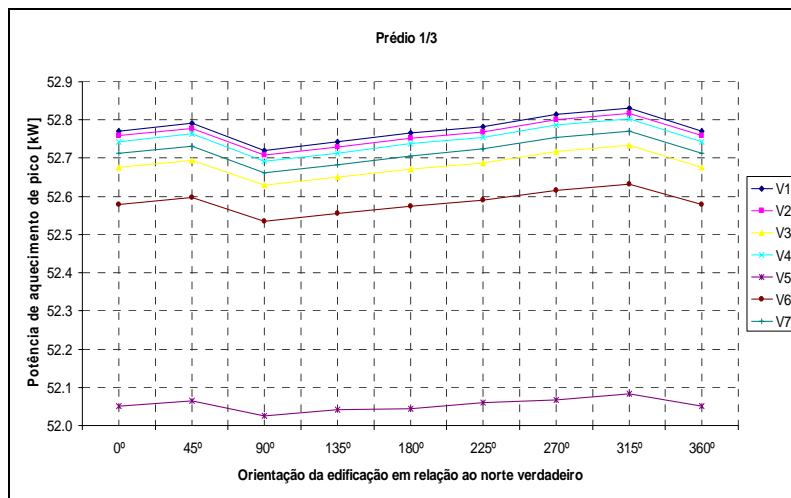


Figura 6.24. Porto Alegre – Potência de aquecimento de pico para o prédio 1/3.

Curiosamente, para iluminação programada, os gráficos de potência de aquecimento de pico para todas as três configurações de fachadas são exatamente iguais aos gráficos para iluminação contínua, o que significa que mesmo para iluminação programada, as lâmpadas permanecem ligadas com 100% de potência no inverno. A obtenção de gráficos iguais aos de iluminação contínua são um indicativo de que em nenhum momento os sensores de iluminância captam radiação direta ou difusa.

As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostram para Porto Alegre, respectivamente, os consumos elétricos anuais dos sistemas de HVAC para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3.

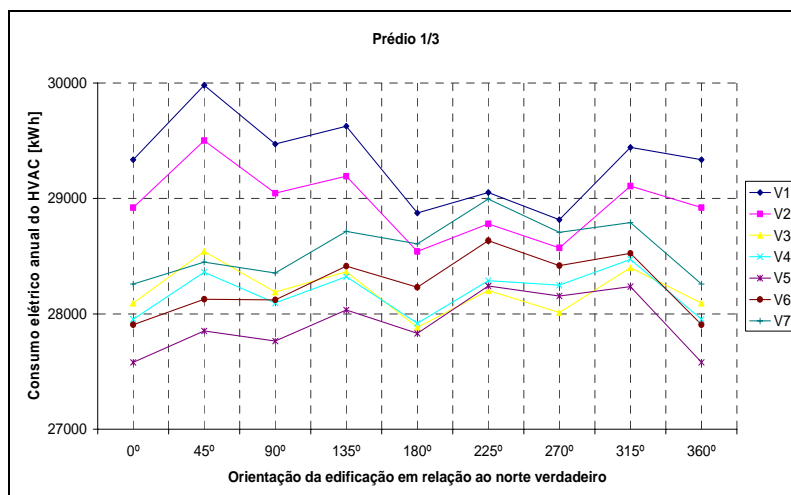


Figura 6.25. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de HVAC no prédio 1/3.

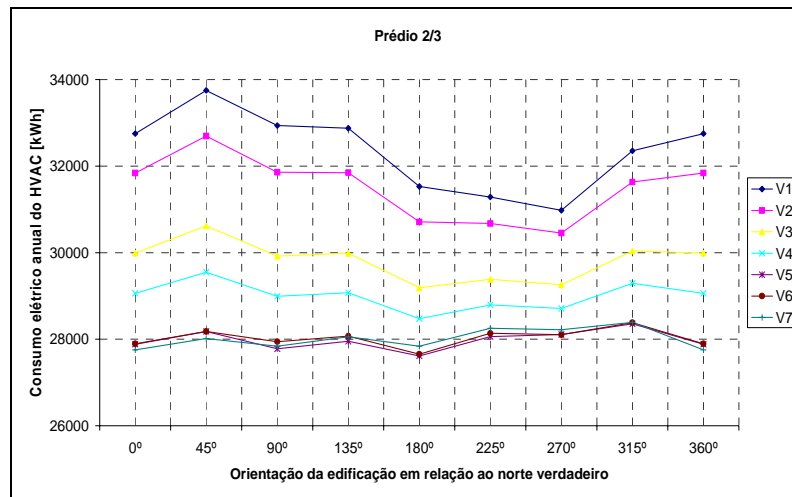


Figura 6.26. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* no prédio 2/3.

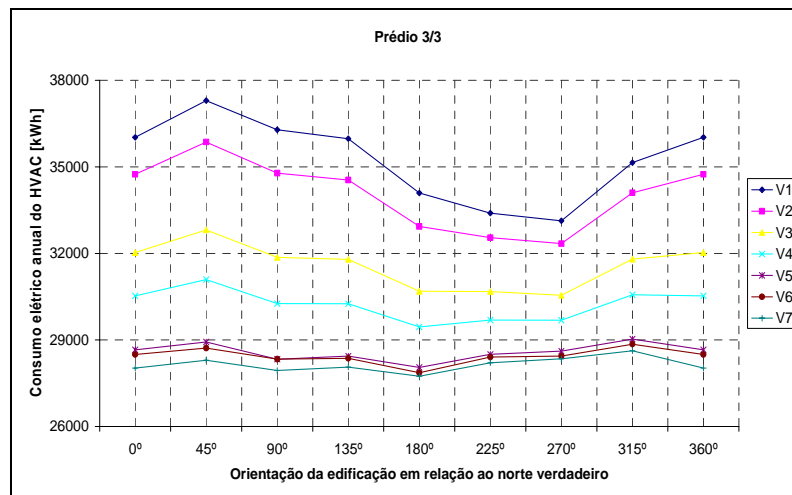


Figura 6.27. Porto Alegre – Consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* no prédio 3/3.

No caso de iluminação programada, há dois meios de reduzir o consumo elétrico anual total da edificação, ou seja, o custo operacional: reduzindo o consumo do sistema de *HVAC* ou reduzindo o consumo das lâmpadas.

Para as Figuras 6.25, 6.26 e 6.27, as maiores reduções percentuais no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* observadas são: 7,1% no prédio 1/3 (comparando os vidros V1 e V5 na orientação 45°), 17,0% no prédio 2/3 (comparando os vidros V1 e V7 na orientação 45°) e 24,1% no prédio 3/3 (comparando os vidros V1 e V5 na orientação 45°). O comportamento das curvas destas figuras são semelhantes, respectivamente, às das Figuras 6.5, 6.6 e 6.7, que mostram os consumos elétricos anuais do sistema de *HVAC* para o caso de iluminação contínua, porém possuem escalas de consumo menores.

Comparando as simulações da Figura 6.5 com suas respectivas simulações na Figura

6.25, ocorre nesta última uma redução no consumo elétrico anual do sistema de HVAC na faixa de 5,5 à 15,2%. Quando se compara a Figura 6.6 com a 6.26, esta redução é de 8,4 à 15,0%, e comparando a Figura 6.7 com a 6.27 é de 9,1 à 14,8%.

As Figuras 6.28, 6.29 e 6.30, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostram para Porto Alegre, respectivamente, os consumos elétricos anuais das lâmpadas para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3.

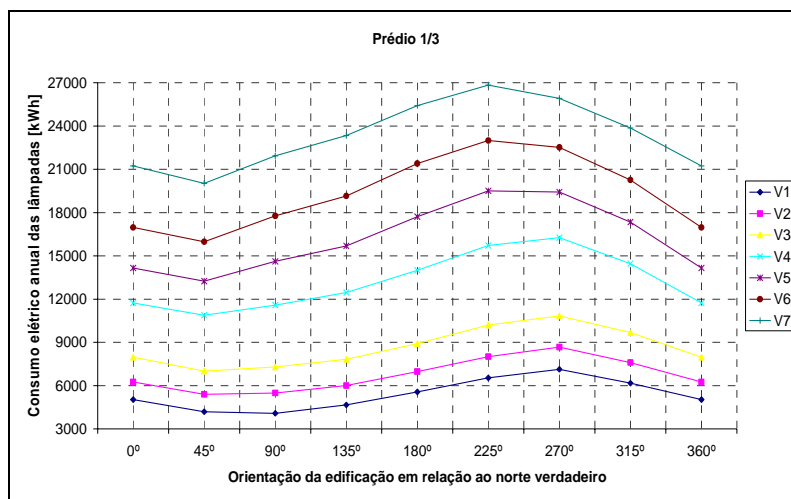


Figura 6.28. Porto Alegre – Consumo elétrico anual das lâmpadas no prédio 1/3.

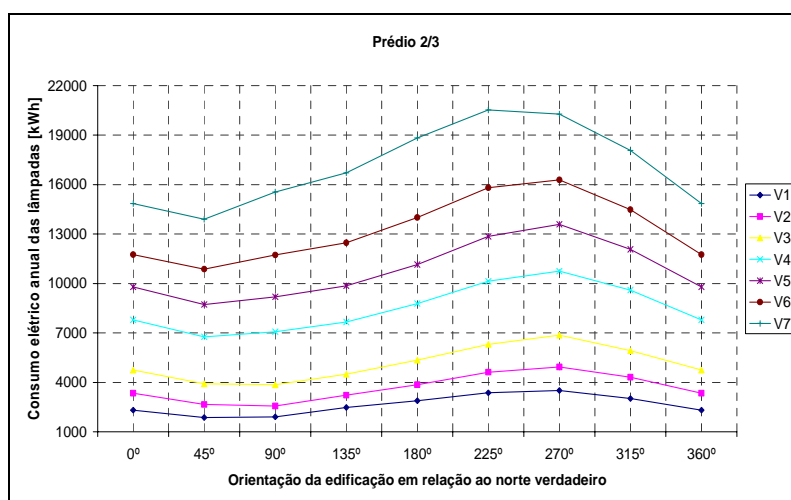


Figura 6.29. Porto Alegre – Consumo elétrico anual das lâmpadas no prédio 2/3.

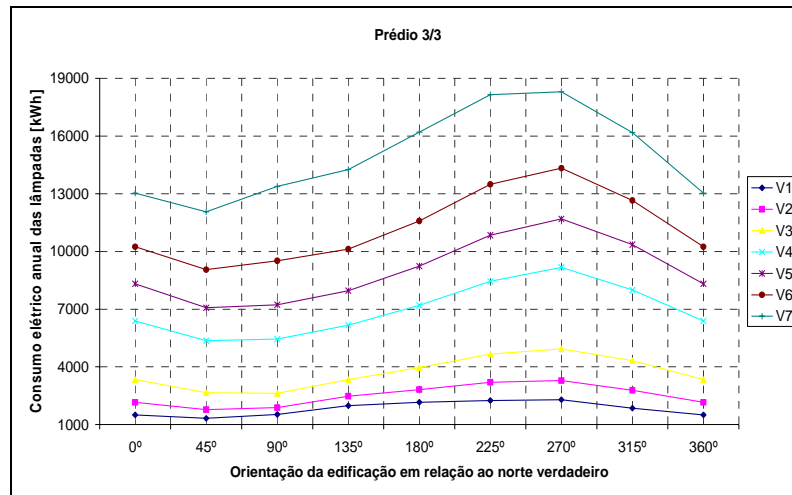


Figura 6.30. Porto Alegre – Consumo elétrico anual das lâmpadas no prédio 3/3.

O comportamento do consumo das lâmpadas para iluminação programada mostra que para vidros menos transmissivos, tem-se um consumo elétrico anual maior. Este comportamento já era esperado, pois vidros menos transmissivos são mais escuros e conseqüentemente exigem uma maior intensidade de iluminação artificial. Os consumos são maiores para as orientações onde se têm janelas na fachada sul (180°, 225°, 270° e 315°), visto que em Porto Alegre a insolação nas fachadas sul é bastante pequena ao longo do ano.

Nas Figuras 6.28, 6.29 e 6.30, as maiores reduções percentuais no consumo elétrico anual das lâmpadas observadas são: 84,8% no prédio 1/3 (comparando o vidro V7 na orientação 225° e o vidro V1 na orientação 90°), 90,9% no prédio 2/3 (comparando o vidro V7 na orientação 225° e o vidro V1 na orientação 45°) e 92,8% no prédio 3/3 (comparando o vidro V7 na orientação 270° e o vidro V1 na orientação 45°).

Tem-se ainda que o consumo das lâmpadas, em qualquer caso, é significativamente menor que no caso de iluminação contínua, onde o consumo anual, constante, é de 36.542 kWh para todos os casos simulados. Comparando este consumo constante com os resultados de cada caso da Figura 6.28, a redução no consumo elétrico anual das lâmpadas vai de 26,5 à 88,8%. Já na Figura 6.29 esta redução é de 43,8 à 94,9%, e na Figura 6.30 é de 49,9 à 96,4%.

As Figuras 6.31, 6.32 e 6.33, em função da orientação e para os sete tipos de vidros simulados, mostram para Porto Alegre, respectivamente, os consumos elétricos anuais totais nos prédios 1/3, 2/3 e 3/3.

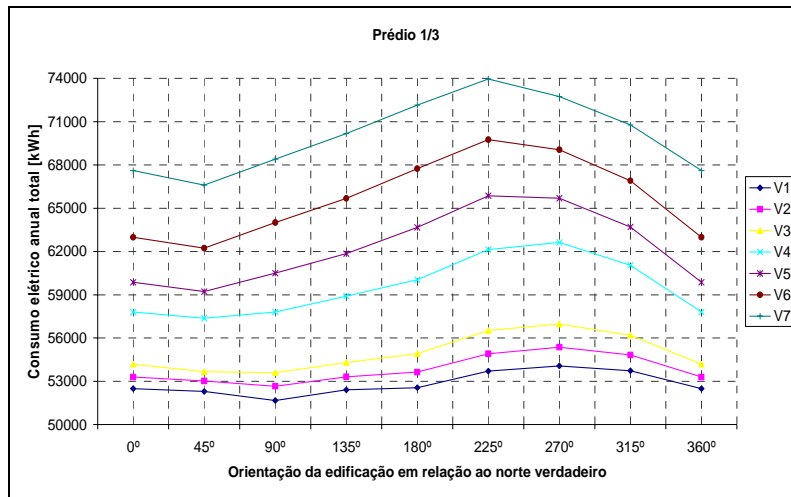


Figura 6.31. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 1/3.

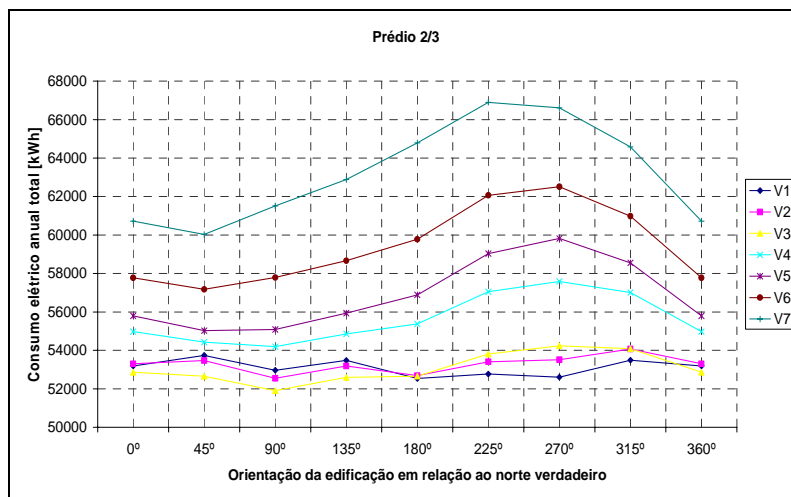


Figura 6.32. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 2/3.

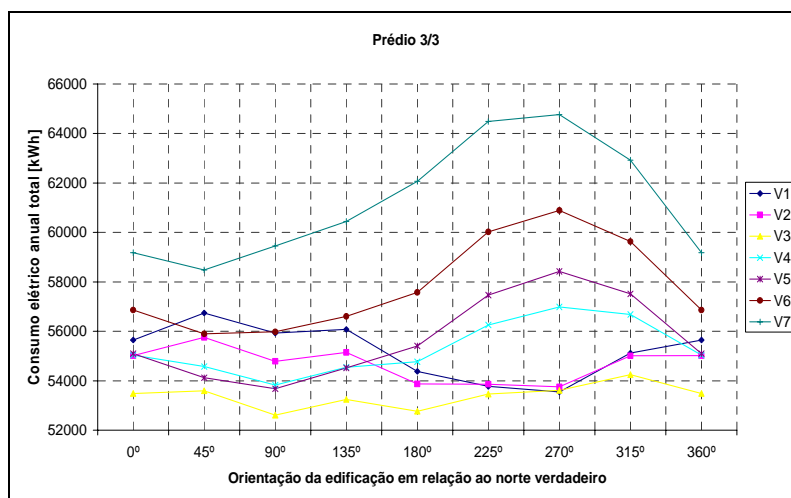


Figura 6.33. Porto Alegre – Consumo elétrico anual total no prédio 3/3.

Em relação ao consumo elétrico anual total, aliando o efeito de um tipo de vidro com

baixa transmissividade em uma edificação com pouca área envidraçada nas fachadas, como é o caso do vidro V7 para o prédio 1/3 na Figura 6.31, nitidamente se verifica que o consumo das lâmpadas é significativamente influente. Conforme a área envidraçada das fachadas aumenta (caso das Figuras 6.32 e 6.33), o consumo do sistema de *HVAC* para os vidros mais transmissivos ganha maior importância na composição do consumo total. Assim se verifica que se por um lado um aumento da área de janelas diminui o consumo elétrico das lâmpadas, por outro aumenta a transmissão de calor para o interior da edificação e conseqüentemente aumenta o consumo do sistema de *HVAC*.

É interessante observar que, no caso de iluminação programada, o consumo anual total da edificação diminui conforme a área envidraçada das fachadas aumenta, o que demonstra o grande potencial de redução do consumo elétrico quando se utiliza um sistema de controle automático da potência das lâmpadas.

Nas Figuras 6.31, 6.32 e 6.33, as maiores reduções percentuais no consumo elétrico anual das lâmpadas observadas são: 30,1% no prédio 1/3 (comparando o vidro V7 na orientação 225° e o vidro V1 na orientação 90°), 22,4% no prédio 2/3 (comparando o vidro V7 na orientação 225° e o vidro V3 na orientação 90°) e 18,8% no prédio 3/3 (comparando o vidro V7 na orientação 270° e o vidro V3 na orientação 90°).

Comparando as simulações da Figura 6.8 com suas respectivas simulações na Figura 6.31, ocorre nesta última uma redução no consumo elétrico anual total na faixa de 13,3 à 42,2%. Quando se compara a Figura 6.9 com a 6.32, esta redução é de 21,8 à 43,3%, e comparando a Figura 6.10 com a 6.33 é de 24,5 à 42,9%.

6.3. Análise Econômica

Até aqui os resultados mostram que, para todas as configurações de áreas envidraçadas das fachadas na edificação estudada, a utilização de um sistema de controle automático da potência das lâmpadas reduz, em relação a um sistema de iluminação contínua, tanto a potência de refrigeração necessária quanto o consumo elétrico anual total.

Entretanto, é preciso avaliar a viabilidade econômica não só deste sistema de controle de potência das lâmpadas como também da utilização de diferentes tipos de películas nos vidros, pois ambos compõem o custo inicial do sistema de condicionamento de ar. A análise econômica é feita apenas para a cidade de Porto Alegre.

Devem ser feitas algumas considerações sobre a determinação dos preços unitários mostrados nas tabelas mostradas nesta seção:

- O custo de um sistema de condicionamento de ar é usualmente dito em R\$/TR, onde TR é a Tonelada de Refrigeração, uma unidade de potência utilizada comercialmente, sendo que 1 TR equivale a 3,517 kW. O custo da compra e instalação de 1 TR é de R\$ 3.000,00, e foi obtido consultando uma empresa do ramo, sendo que a mesma garante uma vida útil de 20 anos para o sistema de condicionamento de ar. Para determinar a potência de *HVAC* necessária em cada caso, é consultado o Apêndice D.1.1, sendo que os valores de potência de cada zona são convertidos para TR e somados. No mercado existem sistemas de condicionamento de ar por expansão direta com as seguintes potências nominais: 1 TR; 1,5 TR; 2 TR; 2,5 TR; 3 TR; 4 TR; 5 TR; 7,5 TR; 10 TR; 12,5 TR; 15 TR; 20 TR; 25 TR e 30 TR. Assim, por exemplo, se uma zona solicitar uma potência de 5,5 TR, a máquina a ser instalada nesta zona é a de 7,5 TR.
- O preço do metro quadrado aplicado de cada película foi obtido consultando uma empresa do ramo, que garante uma vida útil de pelo menos 20 anos de seus produtos da linha arquitetônica. Os preços são: V2, V4 ou V7 – R\$ 85,00/m²; V3 ou V6 – R\$ 56,25/m²; V5 – R\$ 62,50/m².
- O valor da tarifa de energia elétrica foi obtido consultando a página virtual da Companhia Estadual de Energia Elétrica, CEEE, 2005. Utilizou-se a tarifa praticada para classe comercial, subgrupo B3, de R\$ 0,434157/kWh, sendo que 30% deste valor corresponde ao Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS). Assim, a tarifa sem ICMS é de R\$ 0,303910/kWh, que é o valor usualmente divulgado.
- O custo unitário da manutenção anual do sistema de condicionamento de ar, de R\$ 100,00/TR, foi obtido consultando uma empresa do ramo.
- Para iluminação programada, há dois custos extras em relação à iluminação contínua: o dos sensores de iluminância, que é de R\$ 1.000,00/unidade e o dos reatores das lâmpadas, que é de R\$ 80,00/unidade. Considerando os 8 sensores e os 76 reatores necessários, todos os casos de iluminação programada têm um custo extra de R\$ 14.080,00.

6.3.1. Potencial de Redução de Custos

É feita uma análise do potencial de redução da potência de refrigeração de pico e do consumo elétrico anual total.

As Tabelas 6.1 e 6.2 mostram, independentemente da orientação e do tipo de vidro, os custos iniciais máximos e mínimos para cada configuração de área envidraçada das fachadas,

respectivamente para iluminação contínua e iluminação programada.

Tabela 6.1. Iluminação contínua – Custos iniciais máximos e mínimos.

	Prédio	Caso	Custos		Custo Inicial Total [R\$]
			HVAC [R\$]	Película [R\$]	
Menor custo	1/3	0° - V7	54.000,00	6.715,00	60.715,00
	2/3	270° - V6	64.500,00	8.887,50	73.387,50
	3/3	270° - V7	64.500,00	20.060,00	84.560,00
Maior custo	1/3	135° - V2	82.500,00	6.715,00	89.215,00
	2/3	315° - V2	90.000,00	13.430,00	103.430,00
	3/3	315° - V2	105.000,00	20.060,00	125.060,00

Tabela 6.2. Iluminação programada – Custos iniciais máximos e mínimos.

	Prédio	Caso	Custos			Custo Inicial Total [R\$]
			HVAC [R\$]	Película [R\$]	Sensores e Reatores [R\$]	
Menor custo	1/3	0° - V6	54.000,00	4.443,75	14.080,00	72.523,75
	2/3	0° - V6	54.000,00	8.887,50	14.080,00	76.967,50
	3/3	0° - V7	57.000,00	20.060,00	14.080,00	91.140,00
Maior custo	1/3	135° - V2	64.500,00	6.715,00	14.080,00	85.295,00
	2/3	135° - V2	82.500,00	13.430,00	14.080,00	110.010,00
	3/3	135° - V2	90.000,00	20.060,00	14.080,00	124.140,00

Na Tabela 6.1, tem-se para iluminação contínua um potencial de redução do custo inicial de 51,45%, comparando o caso de maior custo (R\$ 125.060,00) com o caso de menor custo (R\$ 60.715,00). Já na Tabela 6.2, para iluminação programada este potencial é de 41,58%, comparando o caso de maior custo (R\$ 124.140,00) com o caso de menor custo (R\$ 72.523,75). Analisando em conjunto as duas tabelas, o potencial de redução do custo inicial considerando os dois tipos de controle de iluminação é de 51,45%. Destas duas tabelas, resulta que tanto o caso de maior quanto o caso de menor custo inicial ocorrem para iluminação contínua.

As Tabelas 6.3 e 6.4 mostram, independentemente da orientação e do tipo de vidro, os custos operacionais anuais máximos e mínimos para cada configuração de área envidraçada das fachadas, respectivamente para iluminação contínua e iluminação programada.

Tabela 6.3. Iluminação contínua – Custos operacionais anuais máximos e mínimos.

	Prédio	Caso	Custos		Custo Operacional Anual Total [R\$]
			Consumo elétrico [R\$]	Manutenção HVAC [R\$]	
Menor custo	1/3	0° - V7	37.049,14	1.800,00	38.849,14
	2/3	270° - V7	37.112,21	2.150,00	39.262,21
	3/3	270° - V7	37.263,19	2.150,00	39.413,19
Maior custo	1/3	45° - V1	42.930,15	2.750,00	45.680,15
	2/3	45° - V1	40.905,63	2.750,00	43.655,63
	3/3	45° - V1	42.485,25	3.250,00	45.735,25

Tabela 6.4. Iluminação programada – Custos operacionais anuais máximos e mínimos.

	Prédio	Caso	Custos		Custo Operacional Anual Total [R\$]
			Consumo elétrico [R\$]	Manutenção HVAC [R\$]	
Menor custo	1/3	90° - V1	22.432,93	2.150,00	24.582,93
	2/3	90° - V3	22.532,88	2.400,00	24.932,88
	3/3	90° - V3	22.840,78	2.400,00	25.240,78
Maior custo	1/3	225° - V7	32.109,45	1.800,00	33.909,45
	2/3	270° - V7	28.921,81	2.150,00	31.071,81
	3/3	270° - V7	28.121,16	2.150,00	30.271,16

Na Tabela 6.3, tem-se para iluminação contínua um potencial de redução do custo operacional anual de 15,06%, comparando o caso de maior custo (R\$ 45.735,25) com o caso de menor custo (R\$ 38.849,14). Já na Tabela 6.4, para iluminação programada este potencial é de 27,50%, comparando o caso de maior custo (R\$ 33.909,45) com o caso de menor custo (R\$ 24.582,93). Analisando em conjunto as duas tabelas, resulta que o caso de maior custo operacional anual ocorre para iluminação contínua (R\$ 45.735,25), e o caso de menor custo operacional anual ocorre para iluminação programada (R\$ 24.582,93), sendo que o potencial de redução é de 46,25%.

6.3.2. Análise do Caso com Maior Custo Inicial

Com o intuito de verificar a possibilidade de um retorno do investimento, é feita uma análise econômica do caso que possui o maior custo inicial (Iluminação contínua - Prédio 3/3 - 315° - V2). Como a análise deve ser feita comparativamente, optou-se por alterar apenas o tipo de vidro, para avaliar o potencial de economia que esta configuração da edificação apresenta.

Para isto, considerando o mesmo tipo de controle de iluminação, a mesma área envidraçada das fachadas e a mesma orientação, foi escolhido o caso que possui o menor custo inicial (Iluminação contínua - Prédio 3/3 - 315° - V6).

É usual se considerar apenas o custo inicial como critério de seleção de equipamentos, o que acaba gerando uma decisão superficial, pois dessa forma não se sabe quanto será gasto anualmente na operação dos mesmos. Com o objetivo de levar em conta estes dois custos, esta análise compara tanto o custo inicial quanto o custo operacional anual dos dois casos, pois se por um lado o custo inicial representa um investimento em equipamentos, por outro o custo operacional representa quanto terá de ser pago por ano para manter estes equipamentos em funcionamento.

Nas Tabelas 6.5 e 6.6, respectivamente, são comparados os custos inicial e operacional anual dos dois casos.

Tabela 6.5. Comparação do custo inicial.

Custo Inicial		V2 – 315° – Prédio 3/3		V6 – 315° – Prédio 3/3		V2-V6
Unitário [R\$]		Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
HVAC [TR]	3.000,00	35 TR	105.000,00	27,5 TR	82.500,00	22.500,00
Película [m ²]	85,00	236 m ²	20.060,00	236 m ²	13.275,00	6.785,00
Custo Inicial Total [R\$]		125.060,00		95.775,00		29.285,00

Tabela 6.6. Comparação do custo operacional anual.

Custo Operacional Anual		V2 – 315° – Prédio 3/3		V6 – 315° – Prédio 3/3		V2-V6
Unitário [R\$]		Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
Energia elétrica [kWh]	0,434157	94.170,47	40.884,77	87.296,45	37.900,36	2.984,41
Manutenção HVAC [R\$]	100,00	35 TR	3.500,00	27,5 TR	2.750,00	750,00
Custo Operacional Total [R\$]		44.384,77		40.650,36		3.734,41

As Tabelas 6.5 e 6.6 mostram que no caso onde ocorre o maior custo inicial, pode-se obter, apenas trocando o tipo de película nos vidros, uma economia de R\$ 29.285,00 no custo inicial e de R\$ 3.734,41 no custo operacional anual, que representam, respectivamente, uma economia de 23,42% e de 8,41%.

Nas Tabelas 6.5 e 6.6, o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar e a aplicação de película nos vidros das fachadas foram previstos ainda no projeto da edificação, e isto determina, para os dois casos, diferentes potências do sistema de condicionamento de ar.

Porém, pode ocorrer que apenas o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar seja previsto no projeto da edificação, e algum tempo depois de concluída a obra se decida aplicar película nos vidros. Neste caso, a edificação contará com uma potência de condicionamento de ar considerando o vidro V1, e após a aplicação da película nos vidros parte da potência do sistema de condicionamento de ar se tornará ociosa, pois a película causa uma redução na carga térmica da edificação.

Nas Tabelas 6.7 e 6.8 são comparados os custos iniciais e os custos operacionais anuais dos mesmos casos das Tabelas 6.5 e 6.6, porém considerando “potência ociosa” no caso do vidro V6 (o custo da película é considerado como custo inicial para simplificar a análise).

Tabela 6.7. Potência ociosa – Comparação do custo inicial.

Custo Inicial	V2 – 315° – Prédio 3/3		V6 – 315° – Prédio 3/3		V2-V6	
	Unitário [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
HVAC [TR]	3.000,00	35 TR	105.000,00	35 TR	105.000,00	0,00
Película [m ²]	85,00	236 m ²	20.060,00	236 m ²	13.275,00	6.785,00
Custo Inicial Total [R\$]			125.060,00		118.275,00	6.785,00

Tabela 6.8. Potência ociosa – Comparação do custo operacional anual.

Custo Operacional Anual	V2 – 315° – Prédio 3/3		V6 – 315° – Prédio 3/3		V2-V6	
	Unitário [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
Energia elétrica [kWh]	0,434157	94.170,47	40.884,77	87.296,45	37.900,36	2.984,41
Manutenção HVAC [R\$]	100,00	35 TR	3.500,00	35 TR	3.500,00	0,00
Custo Operacional Total [R\$]			44.384,77		41.400,36	2.984,41

Mesmo considerando potência ociosa, as Tabelas 6.7 e 6.8 mostram que o caso do vidro V6 gera uma economia de R\$ 6.785,00 no custo inicial e de R\$ 2.984,41 no custo operacional anual, que representam, respectivamente, uma economia de 5,43% e de 6,72%.

6.3.3. Análise do Caso com Maior Custo Operacional Anual

Com o intuito de verificar a possibilidade de um retorno do investimento, é feita uma análise econômica do caso que possui o maior custo inicial (Iluminação contínua - Prédio 3/3 - 315° - V2). Como a análise deve ser feita comparativamente, optou-se por alterar apenas o tipo de vidro, para avaliar o potencial de economia que esta configuração da edificação apresenta.

Para isto, considerando o mesmo tipo de controle de iluminação, a mesma área envidraçada das fachadas e a mesma orientação, foi escolhido o caso que possui o menor custo inicial (Iluminação contínua - Prédio 3/3 - 315° - V6).

Nas Tabelas 6.9 e 6.10, respectivamente, são comparados os custos inicial e operacional anual dos dois casos.

Tabela 6.9. Comparação do custo inicial.

Custo Inicial	V1 – 45° – Prédio 3/3		V7 – 45° – Prédio 3/3		V1-V7	
	Unitário [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
HVAC [TR]	3.000,00	32,5 TR	97.500,00	24 TR	72.000,00	25.500,00
Película [m ²]	85,00	0 m ²	0,00	236 m ²	20.060,00	-20.060,00
Custo Inicial Total [R\$]			97.500,00		92.060,00	5.440,00

Tabela 6.10. Comparação do custo operacional anual.

Custo Operacional Anual	V1 – 45° – Prédio 3/3		V7 – 45° – Prédio 3/3		V1-V7	
	Unitário [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
Energia elétrica [kWh]	0,434157	97.856,87	42.485,25	86.609,46	37.602,10	4.883,15
Manutenção HVAC [R\$]	100,00	32,5 TR	3.250,00	24 TR	2.400,00	850,00
Custo Operacional Total [R\$]			45.735,25		40.002,10	5.733,15

As Tabelas 6.9 e 6.10 mostram que no caso onde ocorre o maior custo inicial, pode-se obter, apenas trocando o tipo de película nos vidros, uma economia de R\$ 5.440,00 no custo inicial e de R\$ 5.733,15 no custo operacional anual, que representam, respectivamente, uma economia de 5,58% e de 12,54%.

Nas Tabelas 6.11 e 6.12 são comparados os custos iniciais e os custos operacionais anuais dos mesmos casos das Tabelas 6.9 e 6.10, porém considerando “potência ociosa” no caso do vidro V7 (o custo da película é considerado como custo inicial para simplificar a análise).

Tabela 6.11. Potência ociosa – Comparação do custo inicial.

Custo Inicial	V1 – 45° – Prédio 3/3		V7 – 45° – Prédio 3/3		V1-V7	
	Unitário [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
HVAC [TR]	3.000,00	32,5 TR	97.500,00	32,5 TR	97.500,00	0,00
Película [m ²]	85,00	0 m ²	0,00	236 m ²	20.060,00	-20.060,00
Custo Inicial Total [R\$]			97.500,00		117.560,00	-20.060,00

Tabela 6.12. Potência ociosa – Comparação do custo operacional anual.

Custo Operacional Anual		V1 – 45° – Prédio 3/3		V7 – 45° – Prédio 3/3		V1-V7
	Unitário [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Quantidade	Custo [R\$]	Economia [R\$]
Energia elétrica [kWh]	0,434157	97.856,87	42.485,25	86.609,46	37.602,10	4.883,15
Manutenção HVAC [R\$]	100,00	32,5 TR	3.250,00	32,5 TR	3.250,00	0,00
Custo Operacional Total [R\$]		45.735,25		40.852,10		4.883,15

Considerando potência ociosa, a Tabela 6.11 mostra que o custo inicial do uso do vidro V7 é R\$ 20.060,00 maior que o custo inicial do uso do vidro V1, o que representa um acréscimo de 20,57%. Já a Tabela 6.11 mostra que o custo operacional anual do uso do vidro V7 é R\$ 4.883,15 menor que o custo operacional anual do uso do vidro V1, o que representa uma economia de 10,68%.

Isto significa que o custo de aplicação da película, no caso do vidro V7, deve ter sua viabilidade econômica avaliada em termos de redução no consumo energético ao longo dos anos.

A Tabela 6.13 mostra, através do método do Valor Presente Líquido, ou VPL (no apêndice E consta uma definição do método utilizado, onde se podem entender os conceitos do VPL e da TMA), uma avaliação da viabilidade econômica da aplicação da película (vidro V7) ao longo da vida útil da mesma. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) tomada é de 8,71% ao ano, e a inflação é de 6,30% ao ano. As saídas representam o custo inicial da película, as entradas representam a economia no consumo elétrico anual total da edificação (corrigidas ano a ano pela inflação), o fluxo de caixa é a soma das saídas e entradas, o VPL representa o valor presente líquido ao final de cada ano, e a projeção do fluxo de caixa representa a economia acumulada no consumo de energia elétrica ao longo dos anos, corrigida para um valor presente.

Tabela 6.13. Análise econômica baseada no VPL.

TMA = 8,71% e Inflação = 6,30%					
Ano	Saídas [R\$]	Entradas [R\$]	Fluxo de caixa [R\$]	VPL [R\$]	Projeção do fluxo de caixa [R\$]
0	-20.060,00	0,00	-20.060,00	-20.060,00	0,00
1	0,00	4.883,15	4.883,15	-15.568,09	4.491,91
2	0,00	5.190,79	5.190,79	-11.175,77	8.884,23
3	0,00	5.517,81	5.517,81	-6.880,82	13.179,18
4	0,00	5.865,43	5.865,43	-2.681,09	17.378,91
5	0,00	6.234,95	6.234,95	1.425,54	21.485,54
6	0,00	6.627,75	6.627,75	5.441,13	25.501,13
7	0,00	7.045,30	7.045,30	9.367,70	29.427,70
8	0,00	7.489,16	7.489,16	13.207,22	33.267,22

9	0,00	7.960,97	7.960,97	16.961,62	37.021,62
10	0,00	8.462,51	8.462,51	20.632,79	40.692,79
11	0,00	8.995,65	8.995,65	24.222,58	44.282,58
12	0,00	9.562,38	9.562,38	27.732,78	47.792,78
13	0,00	10.164,81	10.164,81	31.165,16	51.225,16
14	0,00	10.805,19	10.805,19	34.521,45	54.581,45
15	0,00	11.485,92	11.485,92	37.803,34	57.863,34
16	0,00	12.209,53	12.209,53	41.012,47	61.072,47
17	0,00	12.978,73	12.978,73	44.150,45	64.210,45
18	0,00	13.796,39	13.796,39	47.218,87	67.278,87
19	0,00	14.665,57	14.665,57	50.219,27	70.279,27
20	0,00	15.589,50	15.589,50	53.153,14	73.213,14

Da Tabela 6.13, resulta que o custo inicial da película é pago no quinto ano após sua aplicação, pois é neste ano que o VPL se torna positivo. Isto significa que a economia no consumo de energia elétrica que a instalação da película provoca paga o custo da mesma em cinco anos. Além disso, ao decorrerem vinte anos, que é a vida útil das películas e do sistema de condicionamento de ar, o potencial de economia total no consumo de energia elétrica corresponde a um valor presente de R\$ 73.213,14, que hoje pagaria um consumo elétrico de 168.632,87 kWh.

6.4. Conforto Térmico

Visando verificar a influência dos parâmetros avaliados no conforto térmico dos ocupantes da edificação, é feita uma análise de conforto térmico baseado no *PMV*.

Considerando iluminação contínua e para a cidade de Porto Alegre, é avaliado o caso, para cada configuração de área envidraçada das fachadas, em que se verifica o maior valor do *PMV* ao longo do horário comercial de um dia de projeto de verão (21 de dezembro).

Assim, são avaliados três casos: um para o prédio 1/3, um para o prédio 2/3 e um para o prédio 3/3. O caso em que se verifica o maior valor do *PMV*, para todas as três configurações de fachadas envidraçadas, é para o vidro V1 na orientação 270°. Com o intuito de verificar se realmente a aplicação de película nos vidros pode controlar termicamente um ambiente, estes casos são comparados com os casos em que se usa o vidro V7, para a mesma orientação. A Figura 6.34 mostra o modelo do prédio 3/3 na orientação 270° e as suas zonas térmicas (janelas em cor ciano).

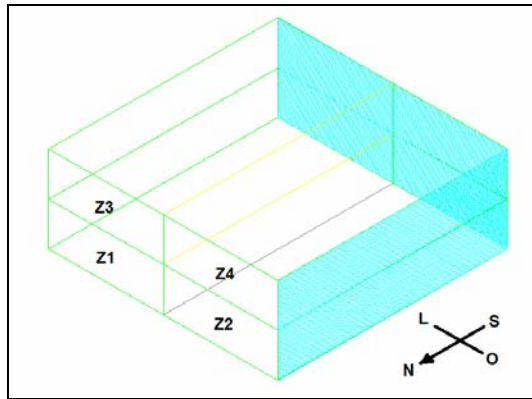


Figura 6.34. Prédio 3/3 na orientação 270° e indicação das zonas térmicas.

As Figuras 6.35, 6.36 e 6.37 mostram, para a orientação 270°, respectivamente a evolução do *PMV* em cada zona ao longo de um dia de projeto de verão para o prédio 1/3, para o prédio 2/3 e para o prédio 3/3. À esquerda são mostrados os resultados para o vidro V1 e à direita são mostrados os resultados para o vidro V7.

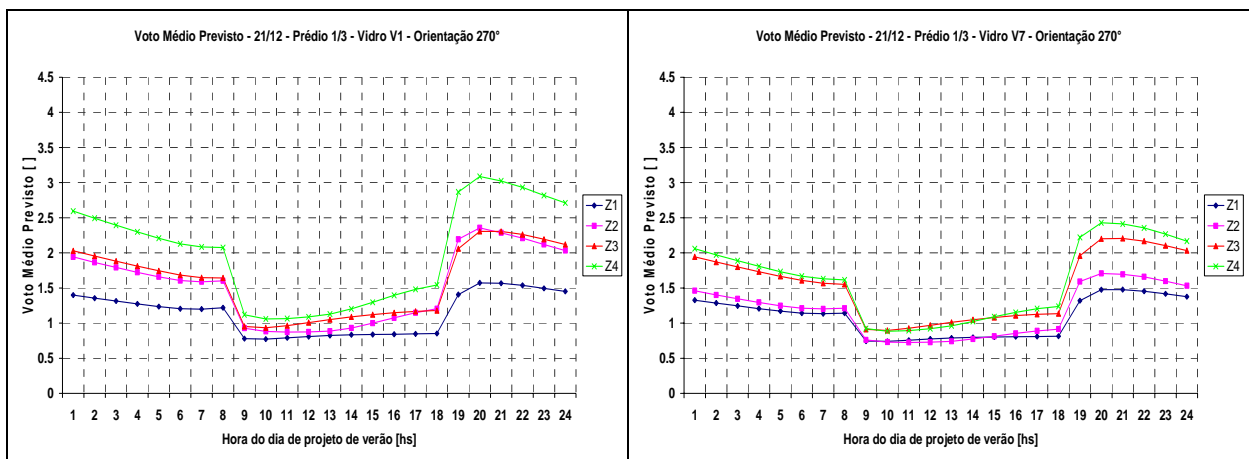


Figura 6.35. Prédio 1/3 – Evolução do *PMV*: V1 (esquerda), V7 (direita).

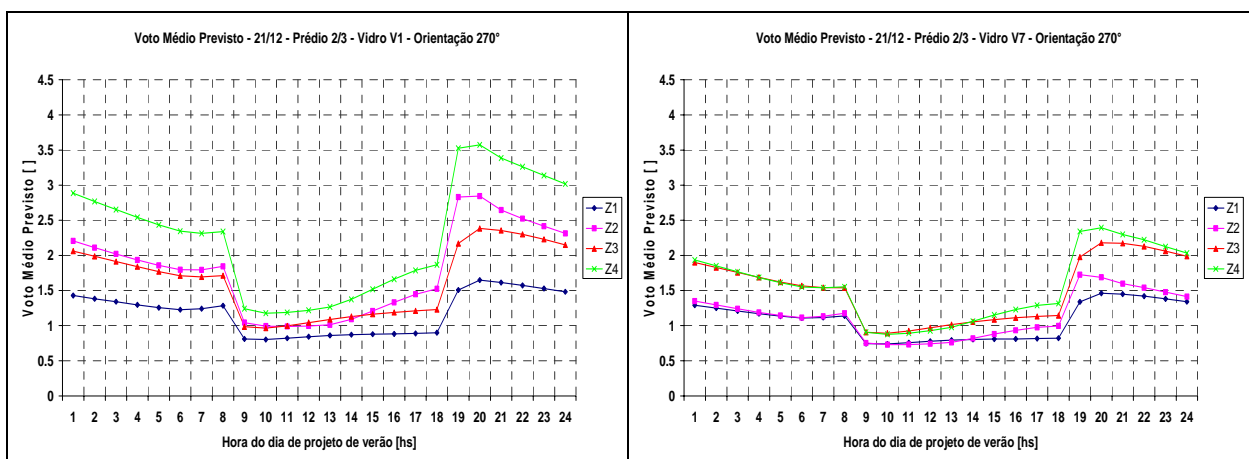


Figura 6.36. Prédio 2/3 – Evolução do *PMV*: V1 (esquerda), V7 (direita).

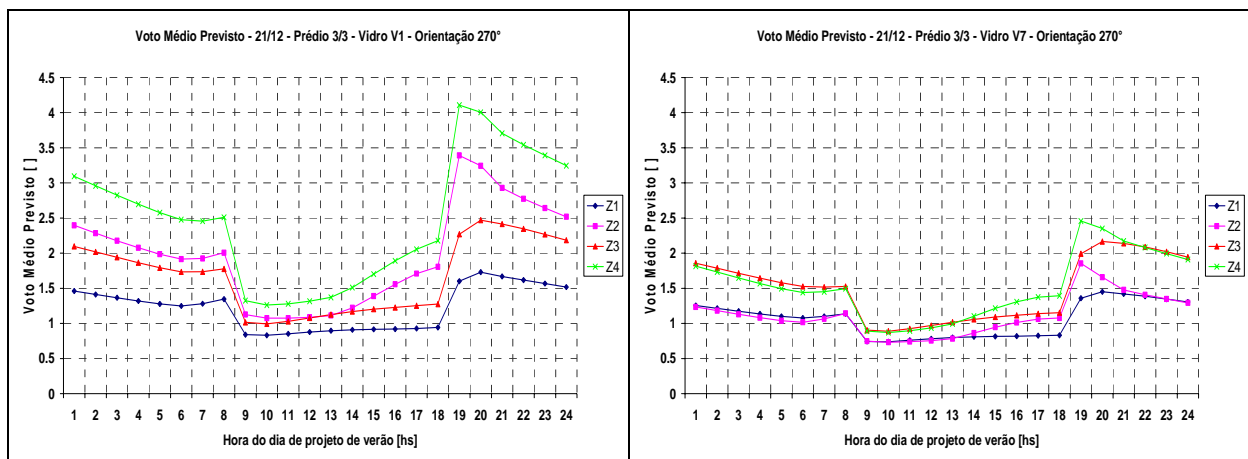


Figura 6.37. Prédio 3/3 – Evolução do *PMV*: V1 (esquerda), V7 (direita).

Analisando as Figuras 6.35, 6.36 e 6.37, fica evidenciada, no conforto térmico dos ocupantes de uma edificação, a influência da área envidraçada das fachadas e do tipo de vidro utilizado nestas fachadas.

Analisando o comportamento do *PMV* para o caso do vidro V1, e tendo em vista que a faixa do *PMV* para conforto térmico é de -1 a +1, para todas as áreas envidraçadas das fachadas, apenas na zona térmica Z1 o conforto térmico é atingido ao longo de todo o horário comercial. Observa-se que nas zonas Z2 e Z4, que possuem uma maior área envidraçada que as zonas Z1 e Z3, conforme a área envidraçada cresce o *PMV* aumenta consideravelmente no fim da tarde do dia de projeto. Já para o caso do vidro V7, apenas na zona térmica Z1 o conforto térmico é atingido ao longo de todo o horário comercial, sendo que na zona Z2 isto ocorre no prédio 1/3 e 2/3. Observa-se, para o prédio 1/3, 2/3 e 3/3, que a evolução do *PMV* é consideravelmente diferente quando o tipo de vidro das fachadas é alterado.

Sendo o *PMV* uma função da temperatura de bulbo seco da zona, da temperatura média radiante da zona, da atividade das pessoas, da velocidade do ar no interior da zona, da umidade relativa da zona e da resistência térmica da vestimenta das pessoas, a alteração de qualquer um destes parâmetros provoca a alteração do *PMV*. À exceção da temperatura média radiante, os resultados das simulações mostram que o sistema de condicionamento de ar consegue manter todos estes parâmetros constantes. Assim, nos casos estudados o *PMV* é alterado pela evolução da temperatura média radiante das zonas térmicas da edificação.

A Figura 6.38 mostra a evolução da temperatura média das superfícies internas das zonas Z1 e Z3 para o prédio 3/3 na orientação 270°, considerando os vidros V1 (esquerda) e V7 (direita).

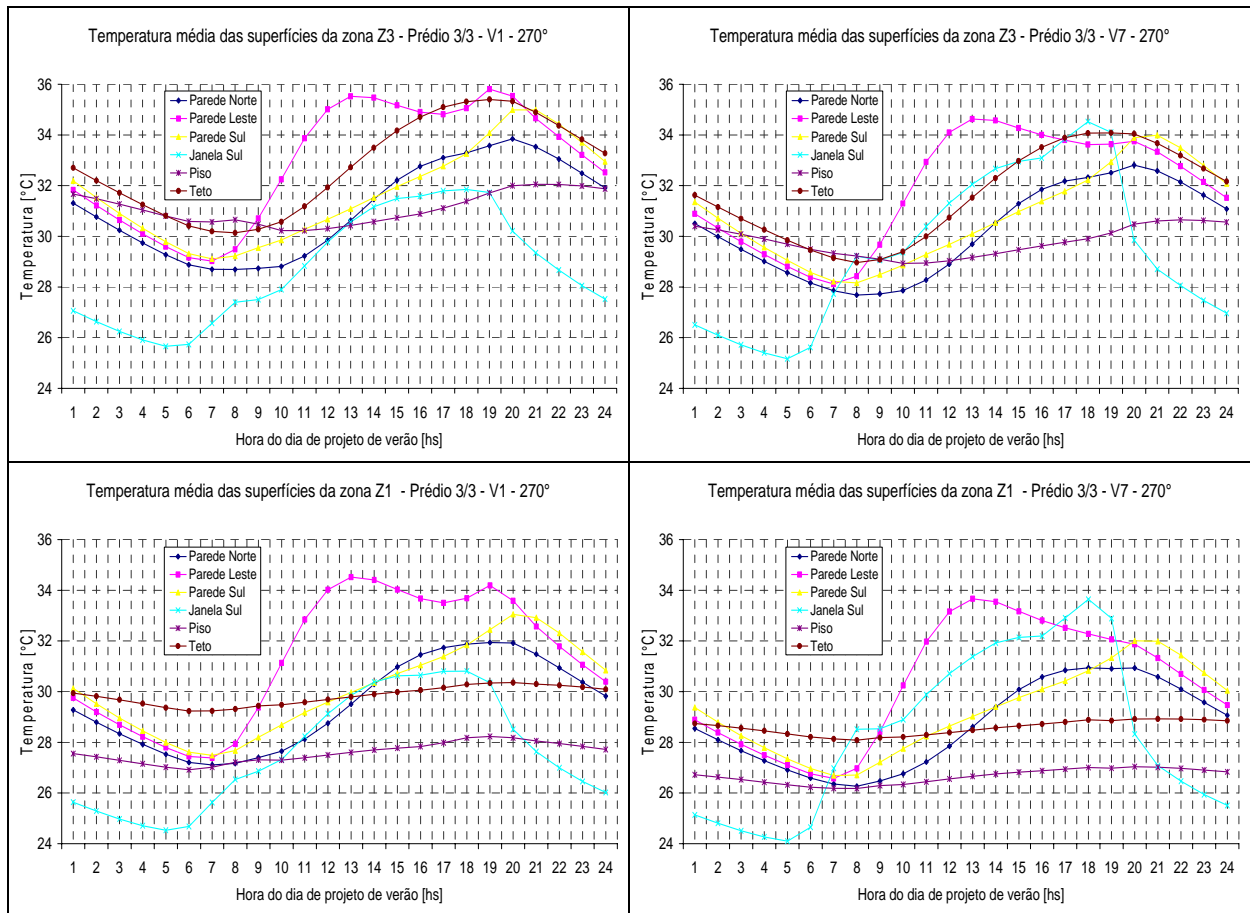


Figura 6.38. Prédio 3/3 – Temperatura média das superfícies internas das zonas Z1 e Z3.

Na Figura 6.38, comparando os vidros V1 e V7, verifica-se que a maior diferença ocorre na evolução da temperatura da face interna da janela sul. Para as demais superfícies a diferença não é tão significativa, pois para as zonas Z1 e Z3 as janelas estão localizadas na fachada sul, que recebem radiação solar direta apenas nas primeiras horas da manhã e no fim da tarde do dia de projeto de verão simulado.

A Figura 6.39 mostra a evolução da temperatura média das superfícies internas das zonas Z2 e Z4 para o prédio 3/3 na orientação 270°, considerando os vidros V1 (esquerda) e V7 (direita).

Na Figura 6.39, comparando os vidros V1 e V7, verifica-se que a evolução da temperatura da face interna da janela oeste é bastante diferente. Nas demais superfícies internas ocorre uma considerável diminuição da temperatura média ao longo do dia. Isto é um indicativo de que a película do vidro V7, que é menos transmissivo que o vidro V1, provoca uma considerável redução no fluxo de radiação solar diretamente transmitido para as zonas térmicas através do vidro (ver equação 4.8), o que reduz consideravelmente a temperatura das superfícies internas das zonas, especialmente do piso das zonas Z2 e Z4.

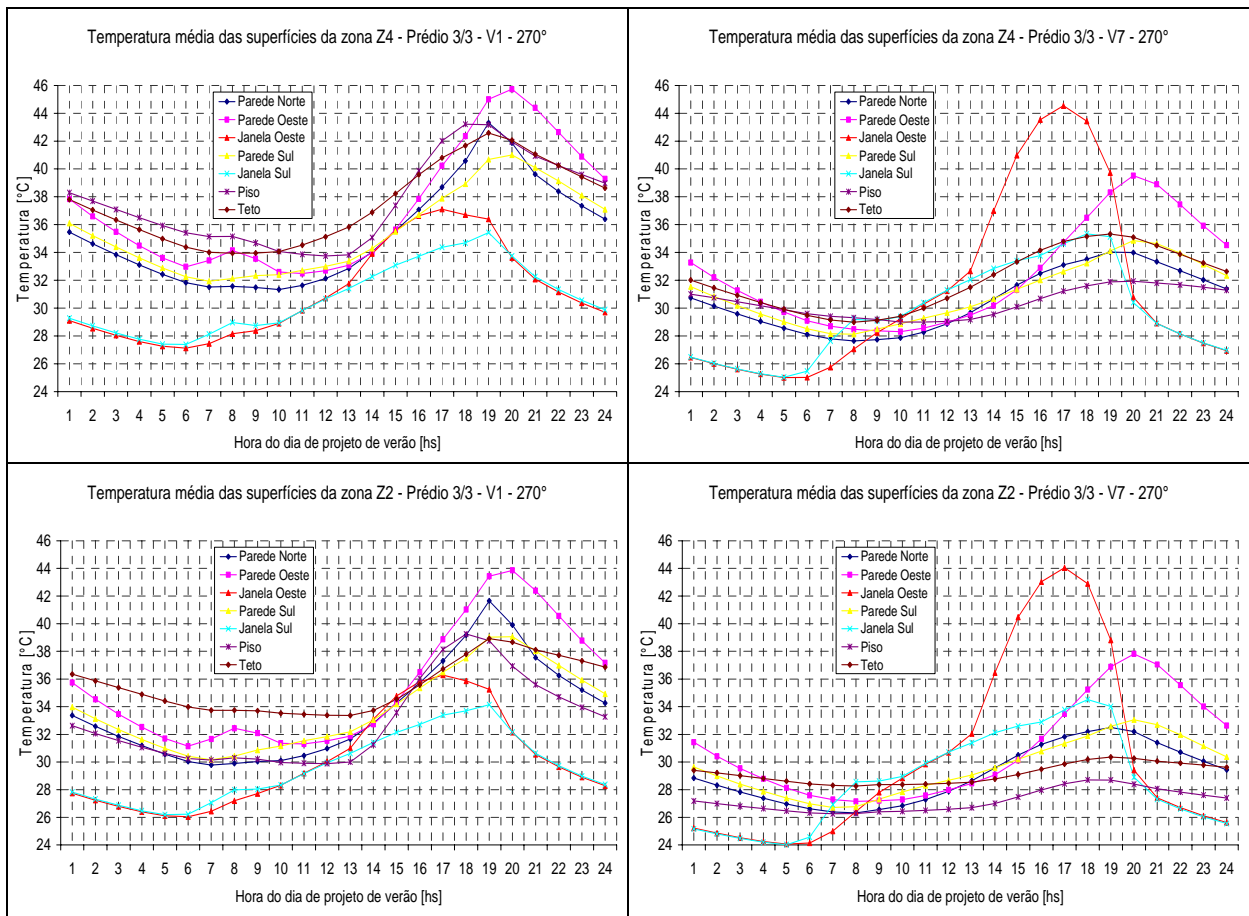


Figura 6.39. Prédio 3/3 – Temperatura média das superfícies internas das zonas Z2 e Z4.

Em contrapartida, o vidro V7 apresenta uma temperatura média maior que a do vidro V1, pois é mais escuro e conseqüentemente absorve mais calor. Isto faz com que a emissão de calor do vidro V7 para o interior das zonas térmicas seja maior do que aquela que ocorre no vidro V1, porém, quantitativamente, a Figura 6.39 mostra que esta emissão altera menos a temperatura média das superfícies do que a transmissão de radiação solar direta através do vidro.

A média das temperaturas médias de todas as superfícies de uma zona resulta na temperatura média radiante. A Figura 6.40 mostra a evolução desta temperatura nas quatro zonas térmicas, para o prédio 3/3 na orientação 270° e os vidros V1 (esquerda) e V7 (direita).

Na Figura 6.40, pode-se observar que a temperatura média radiante nas zonas Z2 e Z4 para o vidro V1 são consideravelmente maiores que para o vidro V7. Isto indica que o vidro V7 consegue controlar melhor este parâmetro que o vidro V1, porém às custas de um aumento na temperatura do vidro, como mostrado na Figura 6.39.

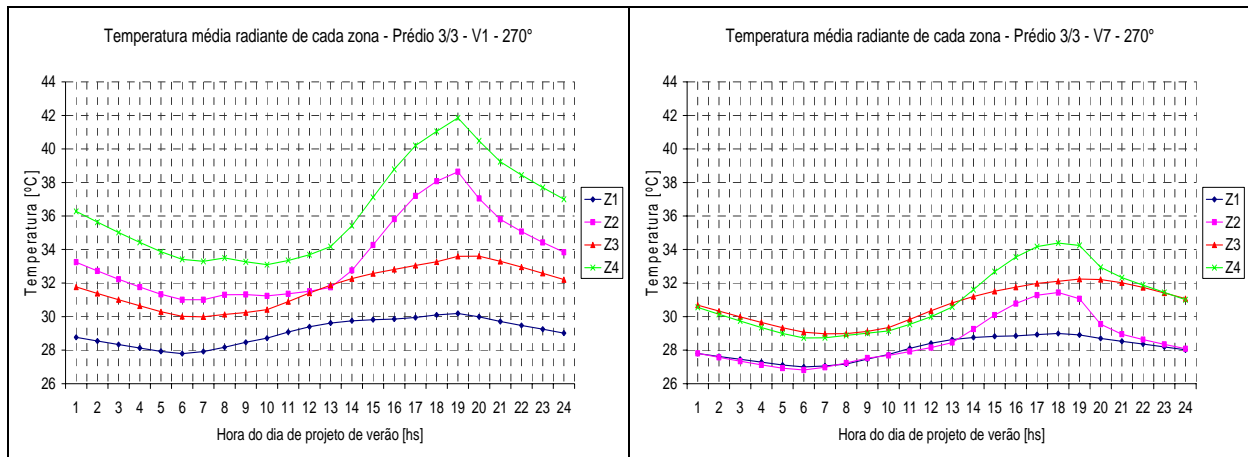


Figura 6.40. Prédio 3/3 – Comparação da temperatura média radiante das zonas térmicas.

A comparação feita para os dois tipos de vidros (V1 e V7) evidencia o potencial que as películas possuem de controlar a sensação térmica no interior de uma edificação. Entretanto, visto a diferença observada na evolução da temperatura da face interna dos dois tipos de vidros estudados, é interessante quantificar esta diferença para os tipos de vidros estudados, o que é feito na seção seguinte.

Para o dia de projeto de inverno, todos os gráficos de *PMV* mostraram que o conforto térmico é atingido ao longo de todo o dia.

6.5. Temperatura Superficial dos Vidros

Visto que o *EnergyPlus* considera as faces dos vidros como sendo isotérmicas, faz-se uma análise da evolução da temperatura média da face interna dos sete tipos de vidros em questão. Naturalmente os vidros que apresentam maiores diferenças de temperatura são mais propícios à falha por estresse térmico, porém não se pode concluir se este tipo de falha ocorrerá ou não. Um estudo aprofundado de estresse térmico exigiria uma pesquisa experimental.

Esta análise é feita para a cidade de Porto Alegre, considerando os mesmos parâmetros avaliados para conforto térmico: orientação 270° e dia 21 de dezembro. É avaliado apenas o prédio 3/3. O estudo é feito comparativamente a um caso em que são colocadas marquises horizontais opacas projetadas 2 m para fora das paredes onde há janelas.

Na Figura 6.41 são mostrados os dois casos estudados, sem e com marquises horizontais, onde a marquise é representada pela cor magenta e as janelas pela cor ciano. Como janelas na mesma parede possuem uma evolução da temperatura ao longo do dia bastante semelhante, são estudadas apenas três das seis janelas existentes na edificação, nomeadas na figura como J1, J2 e J3, sendo que as duas últimas estão localizadas na mesma parede.

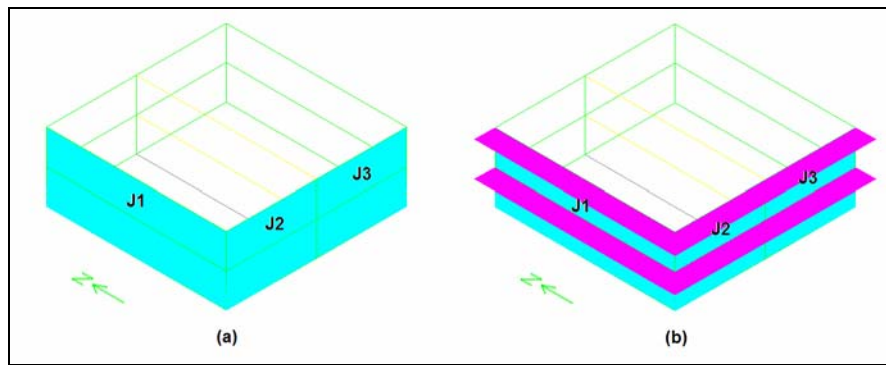


Figura 6.41. Casos da edificação avaliados: sem marquise (a) e com marquise (b).

Na Figura 6.42 é mostrada a evolução da temperatura média da face interna da janela J1, sem marquise (esquerda) e com marquise (direita), para os sete tipos de vidros.

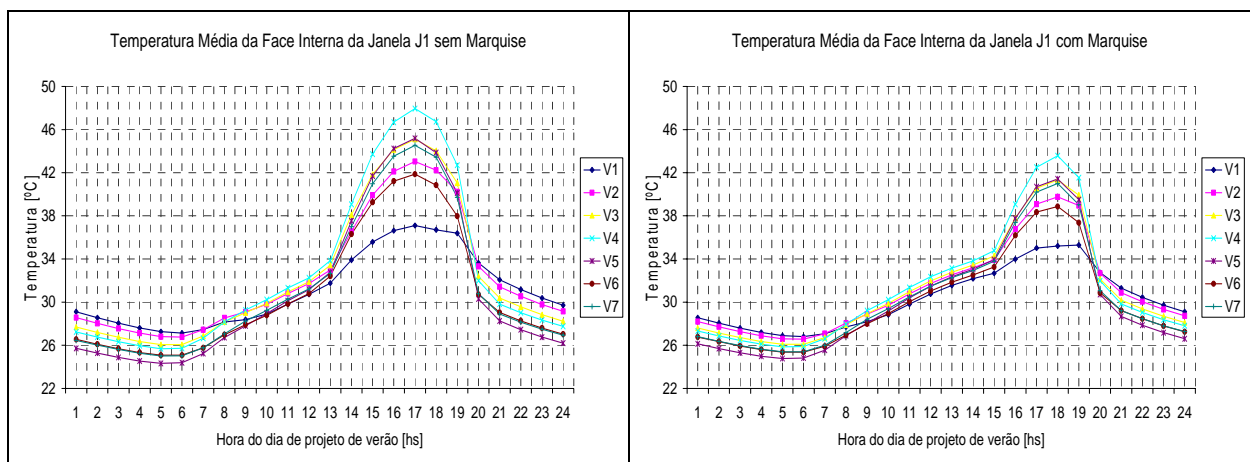


Figura 6.42. Temperatura média da janela J1: sem (esquerda) e com marquise (direita).

Observa-se, na Figura 6.42, que há uma relação entre a temperatura do vidro e a absorvância do mesmo, pois os vidros que possuem maior absorvância são os que atingem as maiores temperaturas. A absorvância (solar ou visível) pode ser calculada diminuindo da unidade o valor da refletância (solar ou visível) e o valor da transmitância (solar ou visível) da Tabela 5.6. Observa-se também que a colocação de marquise consegue diminuir significativamente a temperatura média desta janela no horário em que há a maior incidência de radiação solar (das 15 as 18 hs).

Na Figura 6.43 é mostrada a evolução da temperatura média da face interna da janela J2, sem marquise (esquerda) e com marquise (direita), para os sete tipos de vidros.

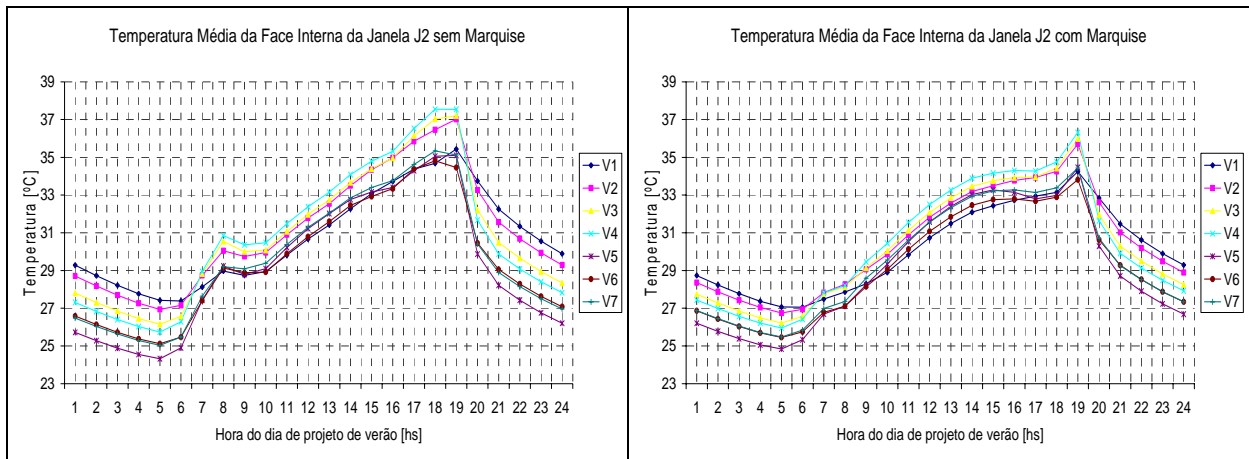


Figura 6.43. Temperatura média da janela J2: sem (esquerda) e com marquise (direita).

Observa-se, na Figura 6.43, que a marquise influi de maneira menos significativa na evolução da temperatura na janela J2 do que na janela J1. Isto ocorre porque a janela J2 está orientada para o sul, que no dia 21 de dezembro recebe radiação solar apenas no começo da manhã e no fim da tarde. No caso da edificação com marquise, o pico da temperatura ocorre as 19 hs porque o sistema de condicionamento de ar é desligado as 18 hs, mas neste dia de projeto a janela J2 recebe radiação solar entre as 18 e as 19 hs.

Na Figura 6.44 é mostrada a evolução da temperatura média da face interna da janela J3, sem marquise (esquerda) e com marquise (direita), para os sete tipos de vidros.

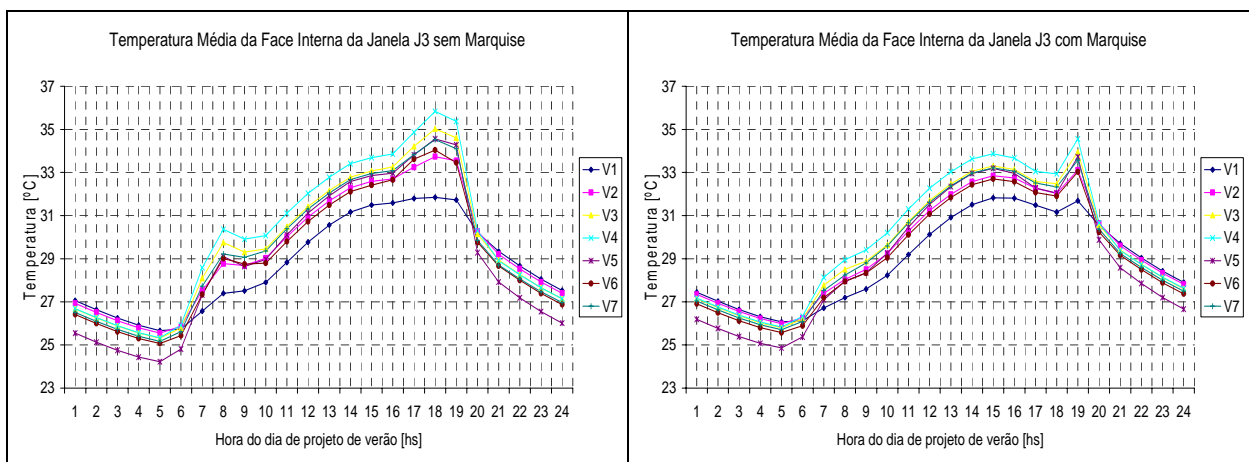


Figura 6.44. Temperatura média da janela J3: sem (esquerda) e com marquise (direita).

Na Figura 6.44, nota-se que para a janela J3 valem as mesmas observações feitas para a janela J2. Nota-se que o pico de temperatura da janela J3 é menor que o da janela J2. Isto ocorre porque a janela J2 sofre influência da radiação solar que incide na janela J1 no fim da tarde, visto que ambas possuem uma aresta em comum.

Também foram obtidos gráficos que mostram a temperatura média da superfície externa das janelas J1, J2 e J3. Eles não são mostrados porque são praticamente iguais aos gráficos mostrados acima. Isto ocorre porque além dos vidros possuírem uma condutividade térmica razoável, uma das hipóteses que o *EnergyPlus* supõe é que não há termos capacitivos nas equações de balanço energético dos vidros.

Como estes resultados representam a temperatura média de toda a área das janelas, apenas se pode afirmar que a probabilidade de ocorrer estresse térmico é maior nos tipos de vidros que apresentam maiores amplitudes de temperatura ao longo do dia. Uma maneira de visualizar a diferença de temperatura na vidraça de uma janela é dividi-la em tiras horizontais e graficar a evolução da temperatura média de cada tira, o que nada mais é do que uma aplicação rudimentar do método dos elementos finitos.

Dessa forma, analisa-se a janela J1 dividindo-a em quatro tiras horizontais de igual altura, tanto para o prédio com quanto para o prédio sem marquise. A divisão da janela é mostrada na Figura 6.45.

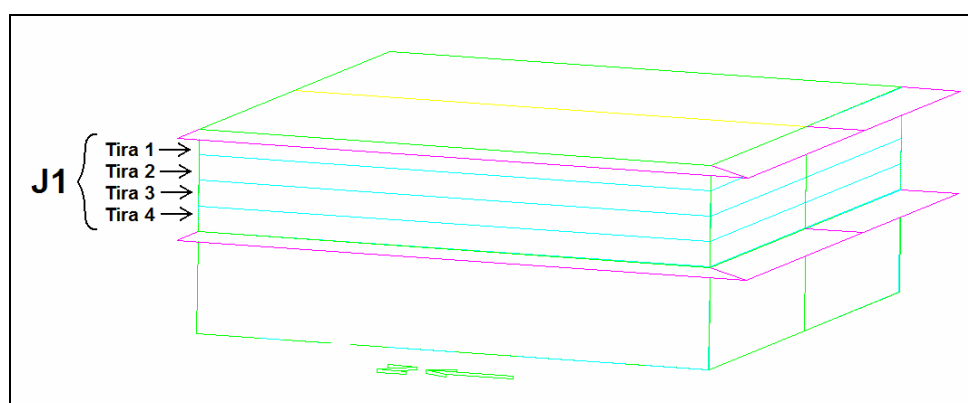


Figura 6.45. Divisão da janela J1 em quatro partes.

Esta configuração torna possível observar separadamente a temperatura média de cada uma das partes da janela J1. Como esta janela está orientada para o oeste, o sombreamento provocado pela marquise se move de forma a expor ao sol primeiro a tira 4 da janela J1 e por último a tira 1.

A Figura 6.46 mostra um comparativo entre a evolução da temperatura média da face interna de cada tira da janela J1, para o vidro V4 sem marquise (esquerda) e para o vidro V4 com marquise (direita). Este tipo de vidro foi escolhido porque, de acordo com as Figuras 6.42, 6.43 e 6.44, é o que apresenta a maior temperatura média de pico. Esta comparação é capaz de mostrar o potencial de controle solar da marquise.

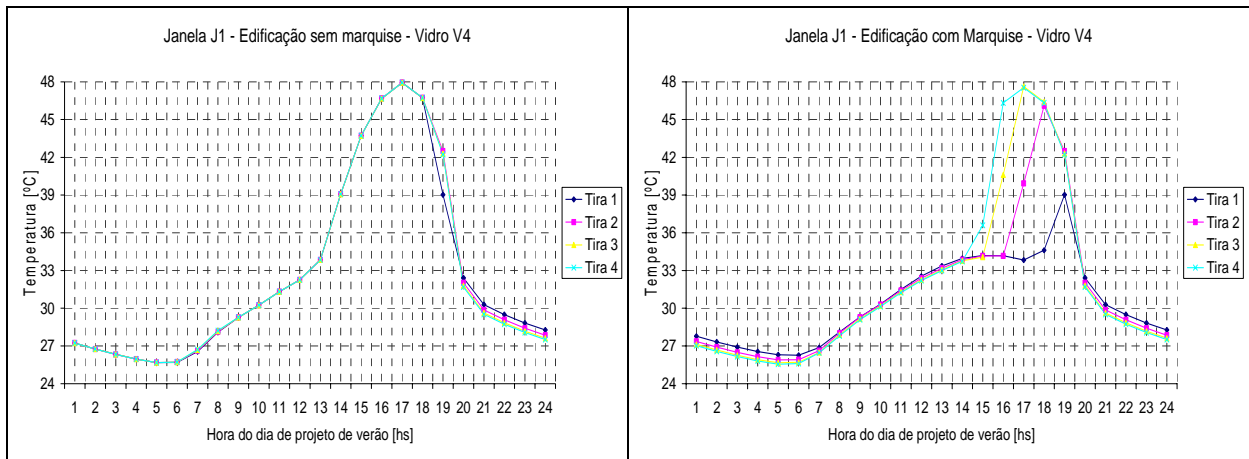


Figura 6.46. Comparação do vidro V4: sem marquise (esquerda) e com marquise (direita).

Pela Figura 6.46, tem-se que na edificação sem marquise a temperatura das quatro partes da janela J1 evoluem de maneira praticamente igual ao longo do dia. Já na edificação com marquise, o sombreamento que este dispositivo provoca influi na temperatura de cada uma das partes da janela J1, sendo que a maior diferença de temperatura observada é de cerca de 12°C e ocorre as 18 hs entre as tiras 1 e 2. A comparação dos dois gráficos permite apontar que a marquise funciona bem como elemento de controle solar na janela, porém a diferença de temperatura que ela provoca certamente contribui para uma eventual ocorrência de estresse térmico no vidro.

É interessante também, considerando o prédio com marquise, quantificar a diferença de temperatura entre o uso de diferentes tipos de vidros. A Figura 6.47 mostra um comparativo entre a evolução da temperatura média da face interna de cada tira da janela J1, para o vidro V1 (esquerda) e para o vidro V4 (direita), pois como mostrados nas Figuras 6.42, 6.43 e 6.44, são os tipos de vidros que apresentam maior diferença de temperatura média de pico.

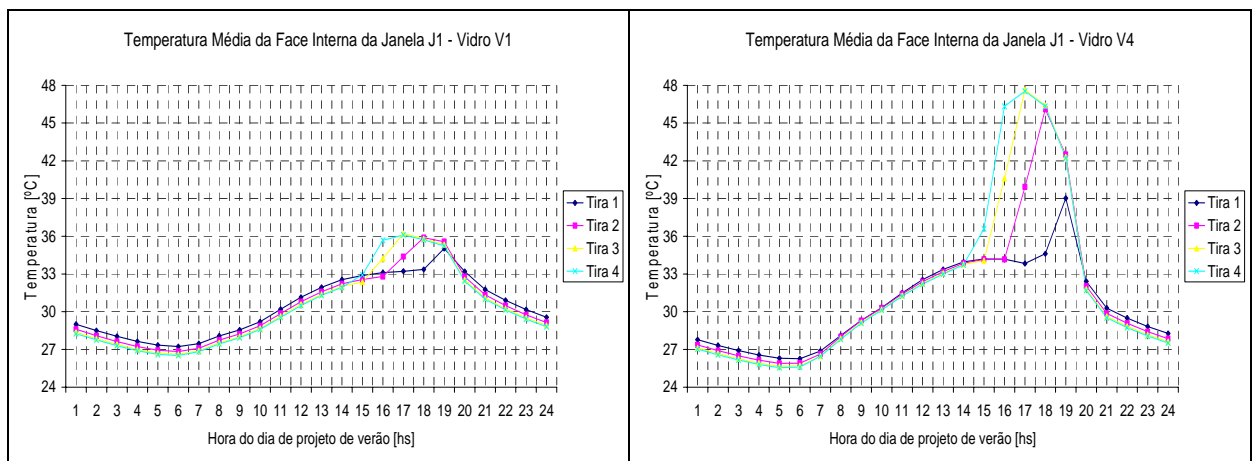


Figura 6.47. Comparação da edificação com marquise: V1 (esquerda) e V4 (direita).

Pela Figura 6.47, no caso do vidro V4, nota-se que nas horas da tarde, gradualmente as partes da janela vão sendo atingidas pela radiação solar direta, primeiro a tira 4 e por último a tira 1. Se observa que a diferença de temperatura média entre um tipo de vidro e outro é considerável, de modo que pode-se afirmar que, neste caso, um vidro sem película apresenta menor possibilidade de sofrer estresse térmico.

6.6. Carga Térmica da Edificação x Potência de Refrigeração

Considerando uma edificação no verão, a carga térmica de uma edificação (ou ganhos térmicos da edificação) pode ser definida pelo fluxo de calor total que entra neste ambiente ao longo do dia de projeto de verão. Já a potência de refrigeração (ou carga térmica de refrigeração) é a quantidade de calor que deve ser extraído da edificação para que a temperatura do ar no interior da mesma se mantenha dentro da zona de conforto térmico.

Muitas vezes considera-se que a potência de refrigeração e a carga térmica da edificação são termos sinônimos, o que não é verdade. A diferença se deve ao fato de que, em um ambiente, os ganhos de calor por radiação pelas janelas não são imediatamente convertidos em carga de refrigeração, pois grande parte da energia radiante que é transmitida pelo vidro é absorvida pelas superfícies internas que delimitam o ambiente e pelos objetos contidos no interior do mesmo, e depois uma parte desta energia é transferida por convecção para o interior do ambiente. O restante desta energia é armazenada nas paredes, teto, piso e objetos no interior do ambiente, e se manifesta na evolução da temperatura média radiante no interior deste ambiente. Esta capacidade que as edificações têm de armazenar energia nada mais é do que a inércia térmica, e devido a ela a potência de refrigeração e a carga térmica de verão da edificação têm comportamentos diferentes ao longo do dia.

Com o intuito de visualizar esta diferença, foram obtidos gráficos da potência de refrigeração e da carga térmica da edificação para o caso que apresentou a maior potência de refrigeração de pico na cidade de Porto Alegre, que é o caso do uso do vidro V1 no prédio 3/3. Na Figura 6.48 são mostrados gráficos da potência de refrigeração e da carga térmica da edificação para um dia de projeto de verão (21/12). À esquerda aparecem os resultados para o caso do uso do vidro V1, e à direita, para fins comparativos, aparecem os resultados para o caso do uso do vidro V7, que é o tipo de vidro que apresentou a menor potência de refrigeração de pico para esta orientação e área envidraçada.

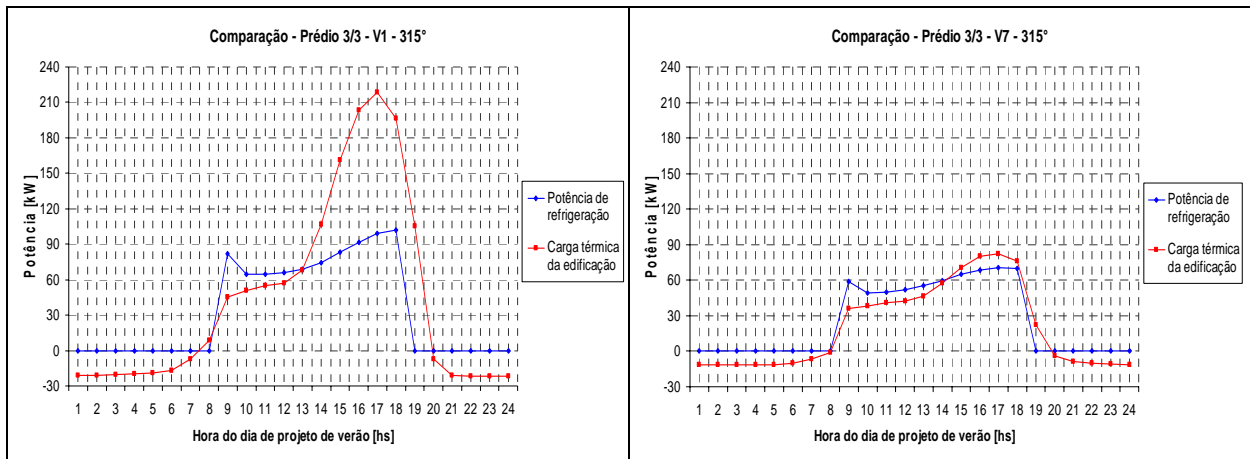


Figura 6.48. Comparação da potência de refrigeração e da carga térmica da edificação.

Nota-se, na Figura 6.48, que no caso do vidro V1 (à esquerda), ocorre um armazenamento de calor considerável entre as 13 e 19 hs, determinado pela diferença entre a carga térmica da edificação e a potência de refrigeração, o que não acontece no caso do vidro V7 (à direita). Isto determina que durante a noite (das 20 as 7 hs), no caso do vidro V1 há uma dissipação de calor da edificação para o ambiente externo consideravelmente maior do que no caso do vidro V7.

Na Figura 6.49, são mostradas as taxas de transferência de calor que compõem as cargas térmicas da edificação mostradas na Figura 6.48, para o caso do vidro V1 (à esquerda) e para o caso do vidro V7 (à direita). São mostradas as seguintes taxas: ganho de calor pelas janelas, transferência de calor por condução das superfícies opacas internas (paredes, piso e teto) para o interior da edificação, potência de lâmpadas (constante e igual a 12.100 W no horário comercial), dissipação de calor das pessoas (constante e igual a 9.000 W no horário comercial), a potência dos equipamentos no interior da edificação (constante e igual a 6.000 W no horário comercial), e as potências latente e sensível que o sistema de *HVAC* deve entregar ao ar de renovação (27 m³/h por pessoa) para que este seja insuflado para o ambiente interno da edificação.

Observa-se, na Figura 6.49, que no caso do vidro V1 as taxas de transferência de calor das superfícies opacas e das janelas são consideravelmente maiores que no caso do vidro V7, porém a curva descrita pelas superfícies opacas é composta, além da emissão de radiação na temperatura da parede, por duas taxas convectivas importantes: uma devido à condução de calor pelas paredes, teto e piso; e outra devido à absorção de radiação transmitida pelas janelas e refletida pelas superfícies internas. Durante a noite a edificação dissipa, pelas superfícies opacas externas e pelas janelas, boa parte do calor armazenado durante o dia.

Na Tabela 6.14, observa-se que para o vidro V7 e considerando todo o dia de projeto de verão, as superfícies opacas internas apresentam um valor negativo. Isto ocorre porque neste caso as taxas de calor das 24 horas do dia de projeto foram somadas, sendo esta soma dividida pela soma da carga térmica da edificação nestas 24 horas. Como durante a noite as superfícies opacas internas dissipam mais calor para o exterior (primeiro elas conduzem o calor até as superfícies opacas externas) do que a quantidade que elas dissipam para o interior durante o dia, este valor se torna negativo, o que indica que as superfícies opacas internas, para este tipo de vidro e nesta orientação, contribuem significativamente para a redução da carga térmica da edificação e conseqüentemente para a redução da potência de refrigeração necessária.

7. CONCLUSÕES

Lançando mão de simulações computacionais com o programa *EnergyPlus*, foi feito um estudo da influência que parâmetros físicos têm no comportamento termoenergético de uma edificação comercial com sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta.

Avaliando 7 tipos de vidro, 3 diferentes áreas envidraçadas das fachadas, 5 localizações geográficas e 8 orientações da edificação, foram obtidos resultados gráficos: da potência de refrigeração requerida pelo sistema de condicionamento de ar, da potência de aquecimento requerido pelo sistema de serpentina elétrica, do consumo elétrico anual do sistema de *HVAC*, do consumo elétrico anual das lâmpadas da edificação, do consumo elétrico anual dos equipamentos elétricos constantes no interior da edificação e do consumo elétrico anual total da edificação (soma dos três anteriores).

Visando reduzir o consumo elétrico das lâmpadas e dessa forma aumentar a eficiência energética da edificação, também foram simulados e comparados dois tipos de controle de potência das lâmpadas: um de iluminação contínua, que é definido pelo tradicional sistema de controle liga/desliga; e um de iluminação programada, que é definido por um sistema de controle automático da potência das lâmpadas, dependente da iluminância natural.

Os resultados para iluminação contínua mostram para:

- Porto Alegre: potencial de redução de até 32,7% na potência de refrigeração de pico, de até 26,0% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* e de até 11,5% no consumo elétrico anual total da edificação.
 - Belém: potencial de redução de até 29,4% na potência de refrigeração de pico, de até 17,3% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* e de até 10,3% no consumo elétrico anual total da edificação.
 - Brasília: potencial de redução de até 37,2% na potência de refrigeração de pico, de até 26,8% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* e de até 12,8% no consumo elétrico anual total da edificação.
 - Recife: potencial de redução de até 26,2% na potência de refrigeração de pico, de até 18,4% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* e de até 10,7% no consumo elétrico anual total da edificação.
 - São Paulo: potencial de redução de até 35,2% na potência de refrigeração de pico, de até 30,7% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC* e de até 13,1% no consumo elétrico anual total da edificação.
-

Para iluminação programada em Porto Alegre, os resultados mostram que o potencial de redução é de até 34,7% na potência de refrigeração de pico, de até 24,1% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC*, de até 92,8% no consumo elétrico anual das lâmpadas e de até 30,1% no consumo elétrico anual total da edificação.

Comparando os casos simulados de iluminação contínua com os de iluminação programada, ambos para Porto Alegre, para iluminação programada tem-se um potencial de redução em relação à iluminação contínua de até 12,5% na potência de refrigeração de pico, de até 15,2% no consumo elétrico anual do sistema de *HVAC*, de até 96,4% no consumo elétrico anual das lâmpadas e de até 43,3% no consumo elétrico anual total da edificação.

Visando avaliar se os custos de aplicação de película nos vidros e do uso do sistema de iluminação programada são viáveis economicamente, foi feita uma análise econômica de alguns casos simulados para a cidade de Porto Alegre. Foram determinados os casos simulados, tanto para iluminação contínua quanto para iluminação programada, em que ocorrem os maiores e os menores custos iniciais e operacionais anuais, para cada configuração de área envidraçada das fachadas. Uma comparação entre os dois sistemas de iluminação indica que o potencial de redução do custo inicial é de até 51,45% e de até 46,25% no custo operacional anual.

Foi feita uma análise econômica do caso simulado que apresenta o maior custo inicial, comparando-o ao caso que apresenta o menor custo inicial quando apenas o tipo de vidro é alterado, mantendo inalterados os demais parâmetros. Os resultados mostram que o potencial de redução do custo inicial é de 23,42% e do custo operacional anual é de 8,41%. Considerando potência ociosa, estes potenciais são, respectivamente, de 5,43% e de 6,72%.

Também foi feita uma análise econômica do caso simulado que apresenta o maior custo operacional anual, comparando-o ao caso que apresenta o menor custo operacional anual quando apenas o tipo de vidro é alterado, mantendo inalterados os demais parâmetros. Neste caso o potencial de redução do custo inicial é de 5,58% e do custo operacional anual é de 12,54%. Considerando potência ociosa, há um acréscimo no custo inicial de 20,57%, e o potencial de redução do custo operacional anual é de 10,68%. Através de uma análise econômica baseada no método do Valor Presente Líquido (VPL), esta redução no custo operacional consegue pagar o acréscimo no custo inicial a partir do quinto ano depois de feito o investimento.

Na análise de conforto térmico baseado no voto médio estimado de Fanger (*PMV*), estudaram-se as três configurações de área envidraçada das fachadas para Porto Alegre, e foram comparados apenas dois tipos de vidro: o mais e o menos transmissivo. Dos gráficos da evolução do *PMV* em cada zona ao longo de um dia de projeto de verão, observou-se, como esperado, que quanto maior a área envidraçada, maior é o valor atingido pelo *PMV*. Verificou-se também que,

apesar do sistema de condicionamento de ar conseguir manter a temperatura de projeto de verão ao longo do horário comercial, o *PMV* não é mantido dentro da faixa de conforto térmico para a maioria das zonas térmicas. Com o objetivo de identificar a causa deste comportamento, foram obtidos gráficos da evolução da temperatura média das superfícies internas de cada zona térmica, e também gráficos da evolução da temperatura média radiante de cada zona térmica. A análise destes gráficos revela que o vidro menos transmissivo, apesar de apresentar uma temperatura média maior que a do vidro mais transmissivo, consegue diminuir consideravelmente a temperatura média das superfícies das zonas térmicas, e conseqüentemente diminui a temperatura média radiante das zonas térmicas. Isto indica que quantitativamente, a transmissão de radiação solar para o interior de uma zona térmica altera de modo mais incisivo o *PMV* do que a emissão de radiação térmica de uma vidraça para o interior de uma zona térmica.

Na análise de estresse térmico nos vidros, considerando os sete tipos de vidros, estudaram-se comparativamente, para Porto Alegre, dois casos do prédio que possui maior área envidraçada das fachadas: sem marquise e com marquise. Foram obtidos gráficos da evolução da temperatura média de três das janelas das fachadas da edificação, que mostram que a marquise provoca uma redução na temperatura média da face interna das vidraças. Para verificar a diferença de temperatura ao longo da área de uma janela, dividiram-se as janelas avaliadas em quatro tiras horizontais de igual altura. Comparando, para um mesmo tipo de vidro, os resultados da evolução da temperatura média de cada uma destas tiras para uma edificação sem marquise com os mesmos resultados para uma edificação com marquise, nota-se que no primeiro caso a temperatura das tiras evolui de modo praticamente igual, enquanto no segundo caso pode-se quantificar a diferença de temperatura entre qualquer uma das tiras ao longo do dia. Considerando o prédio com marquise, também se quantificou a diferença de temperatura entre o uso de dois diferentes tipos de vidros, onde se observaram altas diferenças de temperatura no vidro com película, enquanto no vidro sem película estas diferenças são pequenas. Assim, vidros com película são mais propícios à falha por estresse térmico do que vidros sem película.

A análise comparativa entre a carga térmica da edificação e a carga térmica de refrigeração requerida pela edificação mostrou que na edificação avaliada a inércia térmica é sensivelmente alterada quando se altera o tipo de vidro.

Em ordem decrescente, os seguintes parâmetros mais influem na determinação da carga térmica de refrigeração: localização geográfica, área envidraçada das fachadas, tipo de vidro, orientação e iluminação programada. Já na determinação do consumo elétrico total anual da edificação, a ordem é: localização geográfica, iluminação programada, tipo de vidro, área envidraçada das fachadas e orientação.

8. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Para continuidade do trabalho, enumeram-se as seguintes sugestões:

- Um estudo mais aprofundado do estresse térmico em vidros, através da obtenção do campo bidimensional das temperaturas das faces dos vidros, observando a evolução deste campo de temperaturas ao longo do dia de projeto. Alguns casos interessantes de janelas podem ser avaliados: com uso de diferentes tipos de marquises ou brises, com uso de cortinas internas próximas às janelas, etc. Paralelamente seria interessante um estudo experimental do estresse térmico em vidros, o que possibilitaria uma validação empírica.
 - Implementar, nas simulações, outros conceitos e tecnologias de eficiência energética, tanto passivas (cortinas, marquises, brises, maior isolamento do envelope da edificação, redirecionadores de luz como clarabóias e vidros prismáticos, janelas com vidro duplo com camada de gás, etc) quanto ativas (coletores solares, painéis fotovoltaicos, iluminação por fibra ótica, refrigeração evaporativa, recuperadores de calor, etc).
 - Analisar separadamente as regiões da edificação próximas às janelas, definindo zonas térmicas distintas para estas áreas. Dessa forma, pode-se modelar um sistema de controle automático da potência das lâmpadas que leve em conta a estratificação da iluminância natural no interior da edificação, o que possivelmente irá incrementar ainda mais a economia no consumo elétrico anual das lâmpadas.
 - Realizar estudo do sistema de iluminação artificial, implementando tecnologias energeticamente mais eficientes. Dessa forma, pode-se obter uma redução ainda maior no consumo elétrico das lâmpadas.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alpena, 2004. **“Eventuais Causas de Quebra dos Vidros”**, Boletim Técnico TBF-31, Alpena do Brasil, Curitiba, Brasil. Disponível em: <www.alpena.com.br/ortec/tbf31.htm>. Acesso em: 21 jan. 2004.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2003. **Resolução RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Lex: Diário Oficial da União, Brasília, Brasil. Disponível em: <[e-legis.bvs.br/leisref/public/showAct.php?id=6958](http://legis.bvs.br/leisref/public/showAct.php?id=6958)> Acesso em: 03 dez. 2003.

ASHRAE, 1992. **“Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”**, ANSI/ASHRAE Standard 55, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2001. **“Chapter 8 – Thermal Comfort”**, ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

Beyer, P.O., 2001. **“Climatização”**, Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

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**, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=116&download>. Acesso em: 04 dez. 2004.

BRASIL, 2001. **Lei Nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=190&download>. Acesso em: 04 dez. 2004.

Bülow-Hübe, H., 1998. “The Effect of Glazing Type and Size on Annual Heating and Cooling Demand for Swedish Offices”, **Renewable Energy Technologies in Cold Climates '98 Conference**, Proceedings, Montreal, Canada, May 4-6, pp.188-193. Disponível em: <www.byggark.lth.se/shade/publications.htm>. Acesso em: 09 abr. 2005.

Carlo, J., Pereira, F., Lamberts, R., 2004. “Iluminação Natural para Redução do Consumo de Energia de Edificações de Escritório aplicando Propostas de Eficiência Energética para o Código de Obras do Recife”, **Entac’04 – X Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído e clCS’04 – I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável**, Anais em cd-rom, São Paulo, Brasil, 18 à 21 de julho, documento eletrônico.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica, 2005. Porto Alegre, Brasil. Disponível em: <www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1942>. Acesso em: 15 abr. 2005.

Chaiyapinunt, S., Phueakphongsuriya, B, Mongkornsaksit, K, Khomporn, N, 2004. “Performance Rating of Glass Windows and Glass Windows with Films in Aspect of Thermal Comfort and Heat Transmission”, **Energy and Buildings**, vol.37, issue 7, pp.725-738.

Cótica, M.S., 2003. “**Análise do Impacto da Retirada da Proteção Externa na Carga Térmica e no Consumo de Energia Elétrica de uma Edificação**”, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 23f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., 2001. “EnergyPlus: Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program”, **Energy and Buildings**, vol.33, iss.4, pp.319-331.

Driemeier, D.A., 2003. “**Dimensionamento de Sistema de Ar Condicionado visando Conforto Térmico em Ambiente Industrial**”, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 25f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Duer, K., Svendsen, S., Modensen, M.M., Laustsen, J.B., 2002. “Energy Labelling of Glazings and Windows in Denmark: Calculated and Measured Values”, **Solar Energy**, vol.73, issue 1, pp.23-31.

Eletrobrás Termonuclear S.A., 2004. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em:

<www.eletronuclear.gov.br/novo/sys/interna.asp?IdSecao=63&secao_mae=1>. Acesso em: 03 nov. 2004.

Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003. United States Department of Energy, USA. Disponível em: <www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weatherdata_int.cfm>. Acesso em: 22 set. 2003.

EnergyPlus Manual, 2003a. **“EnergyPlus Engineering Document – The Reference to EnergyPlus Calculations”**, Version 1.1.1, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

EnergyPlus Manual, 2003b. **“Getting Started with EnergyPlus – Everything You Need to Know about Running EnergyPlus”**, Version 1.1.1, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

EnergyPlus Manual, 2003c. **“Input Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output”**, Version 1.1.1, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

Fernandes, A.E.P., 1998. “A Influência do Vidro no Consumo de Energia em Edificações”, **Congresso Latino-Americano de Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios**, São Paulo, Brasil, 3 à 6 de novembro, pp.627-636.

Filho, N.C., Kopittke, B.H., 1994. **“Análise de Investimentos – Matemática Financeira, Engenharia Econômica, Tomada de Decisão, Estratégia Empresarial”**, Editora Atlas, 7ª edição, São Paulo, Brasil.

Flesch, J.B., 2003. “Avaliação do Conforto e Stress Térmico em uma Lavanderia Hospitalar”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 135f.

Foresti, R.L., 2003. **“Dimensionamento de um Sistema de Ar-Condicionado para Salas Cirúrgicas Classe I usando o EnergyPlus”**, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 24f. Disponível em:

<www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Geller, H.S., 1992. **“O Uso Eficiente da Eletricidade: uma Estratégia de Desenvolvimento para o Brasil”**, INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, Rio de Janeiro, Brasil.

Goulart, S., Lamberts, R., Firmino, S., 1997. **“Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras”**, Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, Florianópolis, Brasil.

Grings, E.T.O., 2003. **“Comparação entre Resultados Computacionais e Experimentais do Comportamento Térmico de um Ambiente”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 146f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Guyton, A.C., 1988. **“Fisiologia Humana”**, Editora Guanabara Koogan, 6ª edição, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 443.

Hayez, S., Dalibart, C., Guyon, G., Feburie, J., 2001. **“HVAC BESTEST: Clim2000 and CA-SIS Results”**, **Seventh International IBPSA Conference**, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp.1127-1133.

Henninger, R.H., Witte, M.J., 2003a. **“EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST)”**, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA. Disponível em: <www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.html>. Acesso em: 22 set. 2003.

Henninger, R.H., Witte, M.J., 2003b. **“EnergyPlus Testing with HVAC BESTEST Part 1 – Tests E100 to E200”**, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA. Disponível em: <www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.html>. Acesso em: 22 set. 2003.

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**,

vol.36, iss.8, pp.855-863.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. **Servidor de Mapas**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 06 dez. 2004.

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1998. “**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**”, Editora LTC, 4ª edição, Rio de Janeiro, Brasil.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2001. “**A Eficiência Energética e o Novo Modelo do Setor Energético**”, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <www.inee.org.br/downloadloads%5Cescos/NovoModelo.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2004.

Investopedia, 2005. Disponível em: <www.investopedia.com/terms/n/npv.asp> Acesso em: 15 abr. 2005.

Judkoff, R., Neymark, J., 1995. “**International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method**”, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report: NREL/TP-472-6231, Golden, USA.

Lamberts, R. Carlo, J., 2004. “Uma Discussão sobre a Regulamentação de Eficiência Energética em Edificações”, **Mercofrio 2004 – IV Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul**, Anais em cd-rom, Curitiba, Brasil, 14 a 17 de setembro, documento eletrônico.

Lee, A.S., Westphal, F.S., Lamberts, R., 2002. “Calibração de um Modelo de Simulação através de Medições de Curto Prazo: Estudo de Caso no Departamento de Engenharia Civil da UFSC”, **Entac’02 – IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Foz do Iguaçu, Brasil, 7 à 10 de maio, pp.277-286.

Maciel, A.A., Lamberts, R., 2002. “Edifício de Escritórios em Brasília, uma Análise Bioclimática”, **Entac’02 – IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Foz do Iguaçu, Brasil, 7 à 10 de maio, pp.145-152.

Mascarenhas, A., Nery, J. F., D’Alcântara, A., 1988. “**Conservação de Energia e**

Conforto Ambiental em Edificações Comerciais de Salvador”, Relatório COELBA/UFBA/PROCEL.

Mendes, N., Lamberts, R., Neto, J.A.B.C., 2001. “Building Simulation in Brazil”, **Seventh International IBPSA Conference**, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp.3-14.

Ministério de Minas e Energia, 2004a. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=1439&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Ministério de Minas e Energia, 2004b. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=1599&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Ministério de Minas e Energia, 2004c. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=1689&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Ministério de Minas e Energia, 2004d. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=1620&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Ministério de Minas e Energia, 2004e. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=1612&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Ministério de Minas e Energia, 2004f. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=1320&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Ministério de Minas e Energia, 2004g. **Balanco Energético Nacional 2004**, Brasília, Brasil. Disponível em: <www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=2015&download>. Acesso em: 05 dez. 2004.

Neto, A.G., 2002. **“Melhoramento das Condições Térmicas em uma Fábrica através de um Sistema de Ventilação”**, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 24f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Newton, A.W.N., Kitto, L., Buckleton, J.S., 2005. “A Study of the Performance and Utility of Annealing in Forensic Glass Analysis”, **Forensic Science International**.

Neymark, J., Judkoff, R., 2002. **“International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST)”**, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report: NREL/TP-550-30152, Golden, USA.

Neymark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le, H.T., Dürig, M., Glass, A., Zweifel, G., 2001. “HVAC BESTEST: A Procedure for Testing the Ability of Whole-Building Simulation Programs to Model Space Conditioning Equipment”, **Seventh International IBPSA Conference**, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp.369-376.

Neymark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le, H.T., Dürig, M., Glass, A., Zweifel, G., 2002. “Applying the Building Energy Simulation Test (BESTEST) Diagnostic Method to Verification of Space Conditioning Equipment Models used in whole-building Energy Simulation Programs”, **Energy and Buildings**, vol.34, iss.9, pp.917-931.

Nondestructive Testing Resource Center, 2005. Disponível em: <www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/lightresponse.htm>. Acesso em: 05 jan. 2005.

Olsen, E.L., Chen, Q.Y., 2003. “Energy Consumption and Comfort Analysis for Different Low-energy Cooling Systems in a Mild Climate“, **Energy and Buildings**, vol.35, iss.6, pp.561-571.

Pereira, F.L., 2002. **“Avaliação da Influência Termoenergética do Tipo de Vidro Utilizado na Envoltória de Edificações”**, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 25f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>.

Acesso em: 20 ago. 2004.

Pereira, F.L., Beyer, P.O., Schwieder, A.O., 2004. “Avaliação da Influência Termoenergética de Parâmetros Físicos em uma Edificação com Condicionamento de Ar”, **Mercofrio 2004 – IV Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul**, Anais em cd-rom, Curitiba, Brasil, 14 a 17 de setembro, documento eletrônico.

Pilkington, 2002a. “**Thermal Stress**”, ATS-123. Pilkington, Saint Helens, UK. Disponível em: <www.pilkington.com/resources/ats123swthermalstress200203.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2003.

Pilkington, 2002b. “**Pilkington Eclipse™ Reflective Glass Thermal Stress Guide**”, ATS-121. Pilkington, Saint Helens, UK. Disponível em: <www.pilkington.com/resources/ats121sweclipsethermalstress200203.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2003.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2005. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em : <www.eletronbras.gov.br/procel/>. Acesso em: 04 jan. 2005.

Provenza, F. 1976. “**Pro-Tec – Projetista de Máquinas**”, Escola Pro-Tec, 5ª edição, São Paulo, Brasil.

Ross, A., Polato, P., Nijnatten, P.A. van, Hutchins, M.G., Olive, F., Anderson, C., 2001. “Angular-Dependent Optical Properties of Low-E and Solar Control Windows – Simulations Versus Measurements”, **Solar Energy**, vol.69, suppl.6, pp.15-26.

Rubin, M., Powles, R., Rottkay, K. von, 1999. “Models for the Angle-Dependent Optical Properties of Coated Glazing Materials”, **Solar Energy**, vol.66, iss.4, pp.267-276.

Schwieder, A.O., 2004. “**Análise Termo Energética da Utilização de Película nos Vidros da Fachada de um Prédio Comercial Climatizado e sua Viabilidade Econômica**”, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 22f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 15 jan. 2005.

Siegel, R., Howell, J.R., 2002. **“Thermal Radiation Heat Transfer”**, Taylor & Francis, 4th edition, New York, USA.

Silva, C.J.C., 2003. **“Simulação Termoenergética de um Sistema de Ar Condicionado para Comparação dos Resultados Medidos e Simulados”**, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 24f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Verdi, R.E., 2003. **“Análise Termoenergética de um Prédio Comercial”**, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 26f. Disponível em: <www.mecanica.ufrgs.br/lafrig>. Acesso em: 20 ago. 2004.

Viracon, 2001. **“Thermal Stress Breakage”**, Tech Talk, Viracon Architectural Glass, Owatonna, USA. Disponível em: <www.viracon.com/whitePapers/VTT-011%20Thermal%20Stress.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2003.

Wallauer, M.D., 2003. **“Utilização do Programa EnergyPlus para a Simulação do Conforto Térmico em Edificações Populares em Quatro Capitais Brasileiras”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 105f.

Westphal, F.S., Lamberts, R., 2003. **“A Methodology to Analyse the Thermal Loads of Non-Residential Buildings Based on Simplified Weather Data”**, **Eighth International IBPSA Conference**, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, pp.1385-1392.

Winkelmann, F.C., 2001. **“Modeling Windows in EnergyPlus”**, **Seventh International IBPSA Conference**, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp.457-464.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

Barbosa, M.J., 1997. **“Uma Metodologia para Especificar e Avaliar o Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares”**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, PPGEP/UFSC, Florianópolis, Brasil, 307f. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/tese_barbosa.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2004.

Berdahl, P., 1995. “Building Energy Efficiency and Fire Safety Aspects of Reflective Coatings”, **Energy and Buildings**, vol.22, issue 3, pp.187-191.

Cardoso, J.C.M., 2002. **“Estratégias Visando Eficiência Energética e Conforto Térmico Incorporados aos Projetos de Edificações Residenciais em Maringá – PR”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC/UFSC, Florianópolis, Brasil, 164f. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/PECV0237.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2004.

Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. **“Solar Engineering of Thermal Processes”**, J. Wiley & Sons, 2nd edition, New York, USA.

Durrani, S.M.A., Khawaja, E.E., Al-Shukri, A.M., Al-Kuhaili, M.F., 2004. “Dielectric/Ag/Dielectric Coated Energy-Efficient Glass Windows for Warm Climates”, **Energy and Buildings**, vol.36, issue 9, pp.891-898.

Macagnan, M.H., s.d. **“Introdução à Radiação Solar”**, Apostila, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Mascaró, J.L., Mascaró, L., 1992. **“Incidência das Variáveis Projetivas e de Construção no Consumo Energético dos Edifícios”**, Relatório de Pesquisa, Sagra-DC Luzzatto Editores, 2^a Edição, Porto Alegre, Brasil.

Miyazaki, T., Akisawa, A., Kashiwagi, T., 2005. “Energy Savings of Office Buildings by the Use of Semi-transparent Solar Cells for Windows”, **Renewable Energy**, vol.30, issue 3, pp.281-304.

Papst, A.L., 1999. **“Uso de Inércia Térmica no Clima Subtropical. Estudo de Caso em Florianópolis – SC”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC/UFSC, Florianópolis, Brasil, 180f. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/dissertacao_papst.pdf. Acesso em: 25 jan. 2004.

Randell, J.E., 1978. **“Ambient Energy and Building Design”**, The Construction Press, 1st edition, Lancaster, England.

Rosa, L.P., Lomardo, L.L.B, 2004. “The Brazilian Energy Crisis and a Study to Support Building Efficiency Legislation”, **Energy and Buildings**, vol.36, issue 2, pp.89-95.

Santos, J.C.V. dos, 1986. **“Energia e Industrialização”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais, PPGEEMM/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 198f.

Sekhar, S.C., Toon, K.L.C., 1998. “On the Study of Energy Performance and Life Cycle Cost of Smart Window”, **Energy and Buildings**, vol.28, issue 3, pp.307-316.

Signor, R., 1999. **“Análise de Regressão do Consumo de Energia Elétrica frente a Variáveis Arquitetônicas para Edifícios Comerciais Climatizados em 14 Cidades Brasileiras”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC/UFSC, Florianópolis, Brasil, 314f. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/dissertacao_signor.pdf. Acesso em: 25 jan. 2004.

Smith, C.B., 1976. **“Efficient Electricity Use – A Practical Handbook for an Energy Constrained World”**, Pergamon Press, New York, USA.

Strand, R.K., Pedersen, C.O., 2001. “Modularization and Simulation Techniques for Heat Balance Based Energy and Load Calculation Programs: The Experience of the ASHRAE Loads Toolkit and EnergyPlus”, **Seventh International IBPSA Conference**, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, pp.43-50.

Twidell, J.W., Weir, A.D., 1986. **“Renewable Energy Resources”**, E. & F.N. Spon, 1st edition, London, England.

Westphal, F.S., 2002. **“Desenvolvimento de um Algoritmo para Estimativa do Consumo de Energia Elétrica de Edificações não Residenciais a partir de Dados Climáticos Simplificados”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC/UFSC, Florianópolis, Brasil, 108f. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/dissertacao_westphal.pdf. Acesso em: 25 jan. 2004.

Westphal, F.S., Lamberts, R., 2004. “Simulação Térmica e Energética de Edificações a partir de Dados Climáticos Simplificados: Validação através do Método BESTEST”, **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, Brasil, vol.4, n.3, pp.37-49.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Roteiro para Cálculo do *PMV* e do *PPD*

O voto médio estimado, ou *PMV* (*Predicted Mean Vote*) de Fanger, é uma das metodologias mais utilizadas para predição do conforto térmico. Como já dito no capítulo 3, o *PMV* “está relacionado ao desbalanço entre o fluxo de calor do corpo humano em um dado ambiente e o fluxo de calor requerido para otimizar o conforto em uma atividade específica” [ASHRAE, 2001]

Este método é fácil de usar porque foi desenvolvido em forma de tabela e em forma gráfica. Aqui é mostrado o roteiro para cálculo do *PMV* segundo o EnergyPlus Manual, 2003a. Também é mostrado o roteiro para cálculo da porcentagem estimada de insatisfeitos, ou *PPD* (*Predicted Percent Dissatisfied*), segundo a ASHRAE, 2001.

A.1. Dados de Entrada e Conversões de Unidades

Os dados de entrada mostrados na Tabela A.1, referentes ao ambiente térmico em estudo, são necessários para que se possa realizar o cálculo do *PMV*:

Tabela A.1. Dados de entrada necessários para o cálculo do *PMV*.

Dado [Unidade]	Descrição
M [met]	Taxa metabólica da pessoa [met]
I_{vest} [clo]	Resistência térmica da vestimenta [clo]
T_{bs} [°C]	Temperatura de bulbo seco [°C]
T_r [°C]	Temperatura média radiante [°C]
UR [%]	Umidade relativa do ar [%]
u [m/s]	Velocidade do ar [m/s]

As conversões mostradas na Tabela A.2 devem ser feitas, pois algumas equações utilizam unidades diferentes das unidades de alguns dados de entrada e de alguns dados calculados.

Tabela A.2. Conversões necessárias e equações onde são utilizadas.

Dado	Conversão	Resultado	Equações
T_{bs} [°C]	$T_{bs} [K] = T_{bs} [°C] + 273,15$	$T_{bs} [K]$	A.1, A.2, A.14, A.16, A.18
M [met]	$M [W/m^2] = M [met].58,2$	$M [W/m^2]$	A.5, A.6, A.7, A.10, A.11, A.21
I_{vest} [clo]	$I_{vest} [m^2 \cdot °C/W] = I_{vest} [clo].0,155$	$I_{vest} [m^2 \cdot °C/W]$	A.16, A.17
T_r [°C]	$T_r [K] = T_r [°C] + 273,15$	$T_r [K]$	A.15, A.16, A.19
p_w [Pa]	$p_w [Torr] = p_w [Pa].133,3224$	$p_w [Torr]$	A.10, A.13
$T_{vest,prov}$ [°C]	$T_{vest,prov} [K] = T_{vest,prov} [°C] + 273,15$	$T_{vest,prov} [K]$	A.14, A.15, A.16

A.2. Roteiro de Cálculo

A.2.1. Pressões e Vestimenta

Cálculo da pressão de saturação do vapor d'água, utilizando a equação A.1 ou A.2 (condicionais ao valor da T_{bs}), e da pressão parcial do vapor d'água pela equação A.3:

Se $273,15 \leq T_{bs} \leq 473,15K$:

$$p_{ws} = e^{\frac{-5800,2206}{T_{bs}} + 1,3914993 - 4,8640239 \cdot 10^{-2} \cdot T_{bs} + 4,1764768 \cdot 10^{-5} \cdot T_{bs}^2 - 1,4452093 \cdot 10^{-8} \cdot T_{bs}^3 + 6,5459673 \cdot \ln(T_{bs})} \quad (A.1)$$

Se $173,15 \leq T_{bs} < 273,15K$:

$$p_{ws} = e^{\frac{-5674,5359}{T_{bs}} + 6,3925247 - 9,677843 \cdot 10^{-3} \cdot T_{bs} + 6,2215701 \cdot 10^{-7} \cdot T_{bs}^2 + 2,0747825 \cdot 10^{-9} \cdot T_{bs}^3 - 9,484024 \cdot 10^{-13} \cdot T_{bs}^4 + 4,1635019 \cdot \ln(T_{bs})} \quad (A.2)$$

$$p_w = \frac{UR}{100} \cdot p_{ws} \quad (A.3)$$

onde: p_{ws} é a pressão de saturação do vapor d'água [Pa];

T_{bs} é a temperatura de bulbo seco [K].

p_w é a pressão parcial do vapor d'água [Pa];

UR é a umidade relativa do ar [%].

Cálculo do fator de vestimenta, através da equação A.4:

$$f_{vest} = \begin{cases} 1 + 0,2 \cdot I_{vest}, & \text{se } I_{vest} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 \cdot I_{vest}, & \text{se } I_{vest} > 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (A.4)$$

onde: f_{vest} é o fator de vestimenta [];

I_{vest} é a resistência térmica da vestimenta [clo].

A.2.2. Geração e Dissipação de Calor no Corpo Humano

Além da taxa metabólica, pode haver trabalho externo sendo realizado pela pessoa, que é dado pela intensidade do movimento da pessoa. Este trabalho é função da eficiência mecânica, que é dada pela equação A.5:

$$\mu = \begin{cases} 0,04368.M + 1,943, & \text{se } M \geq 70W/m^2 \\ 0, & \text{se } M < 70W/m^2 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

onde: μ é a eficiência mecânica [%];

M é a taxa metabólica [W/m²].

A taxa de trabalho externo e a taxa de geração interna de calor podem ser calculadas, respectivamente, pelas equações A.6 e A.7. Observe que, de acordo com a equação A.5, se a taxa metabólica é menor que 70 W/m² não há trabalho externo.

$$W_{ext} = \frac{\mu}{100}.M \quad (\text{A.6})$$

$$H = M - W_{ext} \quad (\text{A.7})$$

onde: W_{ext} é a taxa de trabalho externo realizado pela pessoa [W/m²];

μ é a eficiência mecânica [%];

M é a taxa metabólica [W/m²];

H é a taxa de geração interna de calor de uma pessoa [W/m²].

As dissipações de calor latente e sensível no corpo humano ocorrem de várias formas, que são mostradas na Tabela A.3.

Tabela A.3. Formas de dissipação de calor pelo corpo humano.

Respiração	Latente	Evaporação (E_{resp})
	Sensível	Convecção (C_{resp})
Pele	Latente	Transpiração (E_{transp})
		Difusão (E_{dif})
	Sensível	Convecção (C)
		Radiação (R)

Para calcular a taxa de dissipação de calor latente por difusão na pele, é necessário determinar a temperatura da pele para conforto térmico e a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da pele para conforto térmico, respectivamente dadas pelas equações A.8 e A.9:

$$T_{p,conf} = 35,7 - 0,028.H \quad (\text{A.8})$$

$$p_{sk} = 1,92.T_{p,conf} - 25,3 \quad (\text{A.9})$$

onde: $T_{p,conf}$ é a temperatura da pele para conforto [°C];

H é a taxa de geração interna de calor de uma pessoa [W/m²];

p_{sk} é a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da pele para conforto [Torr].

As equações A.10, A.11, A.12 e A.13 permitem, respectivamente, calcular as seguintes taxas de dissipação de calor: latente evaporativo na respiração, sensível convectivo na respiração, latente por transpiração na pele, e latente por difusão na pele.

$$E_{resp} = 0,0023.M.(44 - p_w) \quad (A.10)$$

$$C_{resp} = 0,0014.M.(34 - T_{bs}) \quad (A.11)$$

$$E_{transp} = \begin{cases} 0,42.(H - 58,15), & \text{se } H > 58,2W / m^2 \\ 0, & \text{se } H \leq 58,2W / m^2 \end{cases} \quad (A.12)$$

$$E_{dif} = 0,4148.(p_{sk} - p_w) \quad (A.13)$$

onde: E_{resp} é a taxa de dissipação de calor latente evaporativo na respiração [W/m²];

C_{resp} é a taxa de dissipação de calor sensível convectivo na respiração [W/m²];

E_{transp} é a taxa de dissipação de calor latente por transpiração na pele [W/m²];

E_{dif} é a taxa de dissipação de calor latente por difusão na pele [W/m²];

M é a taxa metabólica [W/m²];

p_w é a pressão parcial do vapor d'água [Torr];

p_{sk} é a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da pele para conforto [Torr];

T_{bs} é a temperatura de bulbo seco [°C];

H é a taxa de geração interna de calor de uma pessoa [W/m²].

Para calcular as taxas de dissipação de calor sensível pela pele, convectiva e radiante, é necessário se conhecer os coeficientes de transferência de calor por convecção e por radiação, além da temperatura da vestimenta da pessoa, que são dados, respectivamente, pelas equações A.14, A.15 e A.16:

$$h_c = \begin{cases} h_{cn} = 2,38.(T_{vest} - T_{bs})^{0,25}, & \text{se } 2,38.(T_{vest} - T_{bs})^{0,25} \geq 12,1.\sqrt{u} \\ h_{cf} = 12,1.\sqrt{u}, & \text{se } 2,38.(T_{vest} - T_{bs})^{0,25} < 12,1.\sqrt{u} \end{cases} \quad (A.14)$$

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot f_{acr} \cdot \left(\frac{T_{vest} + T_r}{2} \right)^3 \quad (A.15)$$

$$T_{vest} = T_{p,conf} - I_{vest} \cdot f_{vest} \cdot [h_c \cdot (T_{vest} - T_{bs}) + h_r \cdot (T_{vest} - T_r)] \quad (A.16)$$

onde: h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2 \cdot K$];

h_{cn} é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural [$W/m^2 \cdot K$];

h_{cf} é o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada [$W/m^2 \cdot K$];

h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação [$W/m^2 \cdot K$];

T_{vest} é a temperatura da vestimenta da pessoa [K];

T_{bs} é a temperatura de bulbo seco [K];

T_r é a temperatura média radiante [K];

f_{acr} é o fator de área corpórea radiante (o *EnergyPlus* utiliza o valor fixo de 0,72) [];

u é a velocidade do ar [m/s];

ε é a emissividade da pele (geralmente considera-se que $\varepsilon = 1$) [];

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$);

I_{vest} é a resistência térmica da vestimenta [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

f_{vest} é o fator de vestimenta [].

Observa-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção é condicional e que as três equações acima são funções de uma só incógnita: a temperatura da vestimenta. Portanto, deve-se utilizar um processo de solução iterativo. Este processo começa estimando-se uma temperatura provisória da vestimenta, através da equação A.17:

$$T_{vest,prov} = T_{p,conf} - I_{vest} \cdot [H - (E_{dif} + E_{transp} + E_{resp} + C_{resp})] \quad (A.17)$$

onde: $T_{vest,prov}$ é a temperatura provisória da vestimenta da pessoa [$^\circ C$];

$T_{p,conf}$ é a temperatura da pele para conforto [$^\circ C$];

I_{vest} é a resistência térmica da vestimenta [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

H é a taxa de geração interna de calor de uma pessoa [W/m^2];

E_{dif} é a taxa de dissipação de calor latente por difusão na pele [W/m^2];

E_{transp} é a taxa de dissipação de calor latente por transpiração na pele [W/m^2];

E_{resp} é a taxa de dissipação de calor latente evaporativo pela respiração [W/m^2];

C_{resp} é a taxa de dissipação de calor sensível convectivo pela respiração [W/m^2].

A seqüência dos passos para atingir a convergência é a seguinte:

1. Com esta $T_{vest,prov}$, calculam-se as equações A.14, A.15 e A.16 (tomando o cuidado de realizar o cálculo condicional de h_c), obtendo-se um novo valor para a $T_{p,conf}$.
2. Esta nova $T_{p,conf}$ deve ser comparada à $T_{p,conf}$ calculada pela equação A.8, usando um critério de convergência da diferença dessas duas temperaturas de pelo menos 10^{-3} .
3. Caso seja maior, a $T_{vest,prov}$ é maior que a T_{vest} , sendo necessário estimar uma nova $T_{vest,prov}$ menor, voltar ao passo 1 e refazer os cálculos até a convergência.
4. Caso seja menor, a $T_{vest,prov}$ é menor que a T_{vest} , sendo necessário estimar uma nova $T_{vest,prov}$ maior, voltar ao passo 1 e refazer os cálculos até a convergência.
5. Caso seja igual, a convergência foi atingida para os valores de T_{vest} , h_c e h_r .

Com a temperatura da vestimenta calculada, podem-se calcular as taxas de dissipação de calor sensível convectiva e radiativa na pele, respectivamente pelas equações A.18 e A.19, além da soma de todas as dissipações de calor pelo corpo humano, dada pela equação A.20.

$$C = f_{vest} \cdot h_c \cdot (T_{vest} - T_{bs}) \quad (A.18)$$

$$R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot f_{vest} \cdot f_{acr} \cdot (T_{vest}^4 - T_r^4) \quad (A.19)$$

$$L = E_{resp} + C_{resp} + E_{transp} + E_{dif} + C + R \quad (A.20)$$

onde: C é a taxa de dissipação de calor sensível convectiva na pele [W/m^2];

R é a taxa de dissipação de calor sensível radiante na pele [W/m^2];

f_{vest} é o fator de vestimenta [];

f_{acr} é o fator de área corpórea radiante (o *EnergyPlus* utiliza o valor fixo de 0,72) [];

h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$];

T_{vest} é a temperatura da vestimenta da pessoa [K];

T_{bs} é a temperatura de bulbo seco [K];

T_r é a temperatura média radiante [K];

ε é a emissividade da pele (geralmente considera-se que $\varepsilon = 1$) [];

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67.10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

L é a soma de todas as dissipações de calor pelo corpo humano [W/m^2];

E_{resp} é a taxa de dissipação de calor latente evaporativo pela respiração [W/m^2];

C_{resp} é a taxa de dissipação de calor sensível convectivo pela respiração [W/m^2];

E_{transp} é a taxa de dissipação de calor latente por transpiração na pele [W/m^2];

E_{dif} é a taxa de dissipação de calor latente por difusão na pele [W/m^2].

A.2.3. Cálculo do *PMV* e *PPD*

O *PMV* é um índice que correlaciona a taxa metabólica e o balanço de calor do corpo humano de acordo com a equação A.21 [EnergyPlus Manual, 2003a]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot (H - L) \quad (\text{A.21})$$

onde: *PMV* é o voto médio estimado [];

M é a taxa metabólica [W/m^2];

H é a taxa de geração interna de calor de uma pessoa [W/m^2];

L é a soma de todas as dissipações de calor pelo corpo humano [W/m^2].

Para determinar o grau de satisfação da pessoa com o ambiente térmico, o valor do *PMV* calculado é posicionado na escala de sensação térmica de sete pontos mostrada na Tabela A.4 [EnergyPlus Manual, 2003a].

Tabela A.4. Escala de sensação térmica de sete pontos.

PMV	Descrição
+3	Quente
+2	Morno
+1	Levemente morno
0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Gelado

Calculado teoricamente e localizado na Tabela A.4, geralmente se aceita que há conforto térmico quando o *PMV* possui um valor entre -1 e 1.

O *PMV* pode ser verificado experimentalmente entrevistando uma a uma as pessoas

expostas ao ambiente térmico em estudo e solicitando que indiquem sua sensação térmica nesta escala de sete pontos. Uma média aritmética da soma das respostas das pessoas deve estar bastante próxima do resultado obtido teoricamente.

Mesmo que o *PMV* indique uma classificação neutra de um ambiente, é praticamente impossível que o ambiente seja considerado satisfatório por todas as pessoas. A porcentagem estimada de insatisfeitos, ou *Predicted Percent Dissatisfied (PPD)*, é um índice em função do *PMV* que indica a porcentagem das pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico, e é dada pela equação A.22 [ASHRAE, 2001]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (\text{A.22})$$

onde: *PMV* é o voto médio estimado [];

PPD é a porcentagem estimada de insatisfeitos [%].

A Figura A.1 mostra um gráfico da porcentagem estimada de insatisfeitos em função do voto médio estimado. Observa-se que mesmo tendo $PMV = 0$, ou seja, sensação térmica neutra, ainda há cerca de 5% de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico. Isso ocorre devido a fatores já citados no capítulo 3, tais como aspectos biológicos, físicos e emocionais das pessoas.

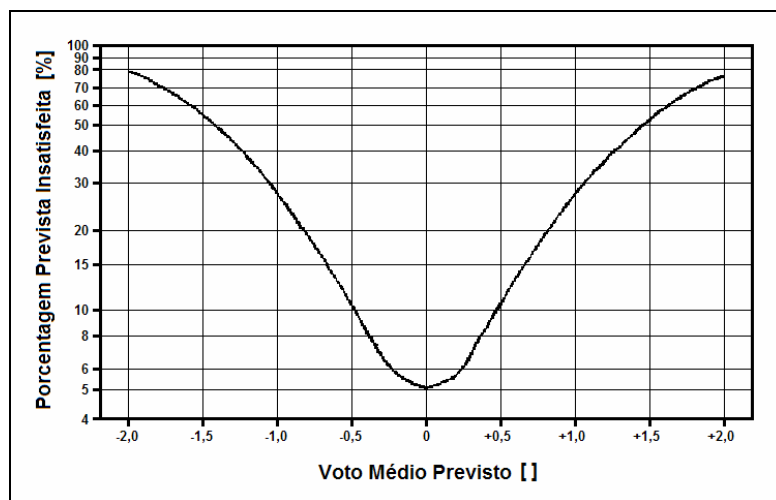


Figura A.1. Porcentagem estimada de insatisfeitos em função do voto médio estimado.

APÊNDICE B – Resposta Ótica do Olho Humano à Luz

A identificação das cores pelo olho humano pode ser entendida como uma resposta fisiológica deste órgão a um estímulo luminoso em um comprimento de onda ou em uma faixa de comprimentos de onda específicos. As cores são identificadas por dois tipos de fotorreceptores localizados na retina do olho humano: os bastonetes e os cones.

Os bastonetes são sensíveis à intensidade da luz, porém são capazes de distinguir uma pequena faixa de comprimentos de onda que compõem a luz visível. Eles são sensíveis à faixa azul-verde do espectro visível, com pico de sensibilidade no comprimento de onda de $0,498 \mu\text{m}$, e são usados sob condições de baixa iluminação.

Já os cones são as células que possibilitam a percepção de uma vasta gama de cores. Há três tipos de cones, referenciados como vermelhos, verdes e azuis, assim identificados por suas respectivas sensibilidades a faixas de comprimentos de onda associadas a estas cores. Os cones L (vermelhos) possuem pico de sensibilidade no comprimento de onda $0,564 \mu\text{m}$; os cones M (verdes) possuem pico em $0,533 \mu\text{m}$; e os cones S (azuis) possuem pico em $0,437 \mu\text{m}$. Estes fotorreceptores são usados sob condições normais ou de muita iluminação.

A resposta ótica do olho humano à luz é definida como uma curva normalizada em função da faixa visível do espectro de radiação eletromagnética, e determina qual fração da intensidade luminosa em cada comprimento de onda é efetivamente percebida pelos olhos. Devido à presença dos dois tipos de fotorreceptores descritos, a variação da intensidade de luz de um ambiente altera a sensibilidade do olho e desloca a curva da resposta ótica. Isto é mostrado na Figura B.1, adaptada da página virtual do Nondestructive Testing Resource Center, 2005.

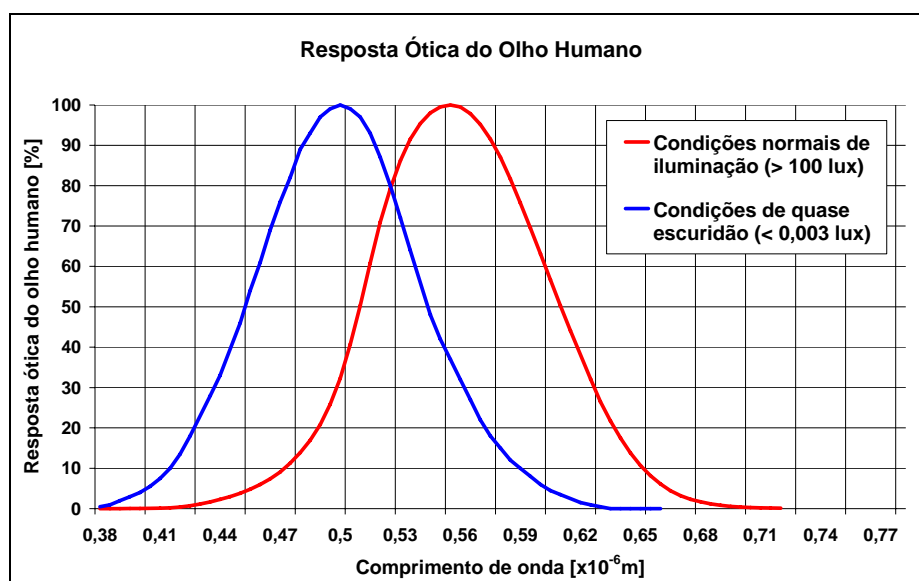


Figura B.1. Alteração da curva da resposta ótica do olho em função da iluminação.

Na Figura B.1, a curva da esquerda mostra a resposta ótica do olho humano em condições de quase escuridão (quando a iluminância é menor que 0,003 lux). Nestas condições, os bastonetes são altamente sensíveis à luz, mas são menos sensitivos às faixas de cores, pois abrangem apenas a faixa de comprimentos de onda do tom verde-azul. Isto resulta numa sensibilidade maior para as cores de tons azul e violeta, e menor para tons amarelo e vermelho.

Referente à curva da direita na Figura B.1, a Tabela B.1, adaptada do EnergyPlus Manual, 2003a, mostra a resposta ótica do olho sob condições normais de iluminação, quando os cones são mais ativos. Ela é também conhecida como resposta fotópica e é apresentada em função da faixa de comprimentos de onda visíveis (0,380 a 0,780 μm) em intervalos de 0,005 μm . Observa-se que o pico ocorre no comprimento de onda de 0,555 μm , onde toda a intensidade luminosa é captada pelos fotorreceptores, o que demonstra que o olho humano é mais sensível à um padrão de cor verde-amarelado.

Tabela B.1. Resposta ótica do olho humano à luz em condições normais de iluminação.

Cor	λ [μm]	$R_{ph}(\lambda)$ [%]	Cor	λ [μm]	$R_{ph}(\lambda)$ [%]	Cor	λ [μm]	$R_{ph}(\lambda)$ [%]
	0,380	0,00		0,515	60,82		0,650	10,70
	0,385	0,01		0,520	71,00		0,655	8,16
	0,390	0,01		0,525	79,32		0,660	6,10
	0,395	0,02		0,530	86,20		0,665	4,46
	0,400	0,04		0,535	91,49		0,670	3,20
	0,405	0,06		0,540	95,40		0,675	2,32
	0,410	0,12		0,545	98,03		0,680	1,70
	0,415	0,22		0,550	99,50		0,685	1,19
	0,420	0,40		0,555	100,00		0,690	0,82
	0,425	0,73		0,560	99,50		0,695	0,58
	0,430	1,16		0,565	97,86		0,700	0,41
	0,435	1,68		0,570	95,20		0,705	0,29
	0,440	2,30		0,575	91,54		0,710	0,21
	0,445	2,98		0,580	87,00		0,715	0,15
	0,450	3,80		0,585	81,63		0,720	0,10
	0,455	4,80		0,590	75,70		0,725	0,07
	0,460	6,00		0,595	69,49		0,730	0,05
	0,465	7,39		0,600	63,10		0,735	0,04
	0,470	9,10		0,605	56,68		0,740	0,02
	0,475	11,26		0,610	50,30		0,745	0,02
	0,480	13,90		0,615	44,12		0,750	0,01
	0,485	16,93		0,620	38,10		0,755	0,01
	0,490	20,80		0,625	32,10		0,760	0,01
	0,495	25,86		0,630	26,50		0,765	0,00
	0,500	32,30		0,635	21,70		0,770	0,00
	0,505	40,73		0,640	17,50		0,775	0,00
	0,510	50,30		0,645	13,82		0,780	0,00

APÊNDICE C – Resolvendo as Equações de Balanço Energético dos Vidros

As equações são resolvidas como segue [Winkelmann, 2001]:

1 – Linearizar as equações definindo $h_{r,i} = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^3$. Por exemplo, a equação 3.13 fica:

$$G_{out} \cdot \varepsilon_1 - h_{r,1} \cdot T_1 + k_1(T_2 - T_1) + h_{out}(T_{out} - T_1) + S_1 = 0 \quad (C.1)$$

2 – Escrever as equações na matriz $A.T = B$.

3 – Usar os valores anteriores dos “passos de tempo” (*time step*) de T_i para calcular os primeiros valores do $h_{r,i}$.

4 – Achar a solução $T = A^{-1} \cdot B$ por decomposição LU.

5 – Recalcular o $h_{r,i}$ usando o novo valor de T .

6 – Recalcular $T = A^{-1} \cdot B$ usando o novo valor de $h_{r,i}$. Repetir os passos 4, 5 e 6 até que a diferença ΔT_i entre os valores de T_i em iterações sucessivas seja menor que algum valor de tolerância. Geralmente este teste é:

$$\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} |\Delta T_i| < 0,01K \quad (C.2)$$

Este método converge de 6 à 8 iterações. A convergência em 2 à 4 iterações é obtida através de relaxamento no $h_{r,i}$, isto é:

$$(h_{r,i})_{novo} \rightarrow 0,5[(h_{r,i})_{novo} + (h_{r,i})_{anterior}] \quad (C.3)$$

O valor da temperatura da face interna, T_{2N} , determinada desta forma participa da solução do balanço energético da zona.

APÊNDICE D – Potência de Refrigeração de Pico por Zona

D.1. Iluminação Contínua

D.1.1. Porto Alegre – RS

	Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
			Potência de refrigeração de pico por zona [kW]								
Prédio comercial 1/3	V1	Z1	15,31	15,31	14,47	15,80	16,02	15,69	13,93	14,94	15,31
		Z2	17,65	17,61	18,40	19,10	17,19	17,90	18,45	18,98	17,65
		Z3	19,56	18,95	17,81	19,18	19,63	19,45	17,60	19,23	19,56
		Z4	21,73	21,12	22,69	23,54	21,45	22,70	23,35	23,34	21,73
	V2	Z1	15,00	15,10	14,39	15,74	16,00	15,65	13,84	14,71	15,00
		Z2	17,01	17,36	18,11	18,84	16,97	17,50	17,91	18,35	17,01
		Z3	19,21	18,70	17,70	19,03	19,45	19,24	17,44	18,96	19,21
		Z4	20,97	20,65	22,25	23,02	21,09	22,09	22,63	22,58	20,97
	V3	Z1	14,53	14,76	14,25	15,46	15,59	15,31	13,68	14,35	14,53
		Z2	15,82	16,50	17,24	17,83	16,19	16,62	16,67	16,99	15,82
		Z3	18,53	18,26	17,54	18,65	18,86	18,71	17,19	18,39	18,53
		Z4	19,60	19,71	21,04	21,76	20,11	20,78	21,14	21,04	19,60
	V4	Z1	14,20	14,54	14,14	15,30	15,41	15,15	13,57	14,10	14,20
		Z2	15,08	16,05	16,80	17,31	15,81	16,05	15,95	16,21	15,08
		Z3	18,11	17,97	17,41	18,42	18,55	18,47	17,01	18,06	18,11
		Z4	18,73	19,11	20,20	20,91	19,48	19,98	20,21	20,11	18,73
	V5	Z1	13,89	14,34	14,09	14,96	14,86	14,72	13,46	13,88	13,89
		Z2	14,05	15,19	15,77	16,22	15,10	15,26	14,76	15,01	14,05
		Z3	17,51	17,77	17,38	18,09	17,89	17,90	16,86	17,56	17,51
		Z4	17,64	18,13	19,03	19,66	18,59	18,82	18,86	18,89	17,64
	V6	Z1	13,87	14,36	14,10	14,86	14,56	14,51	13,51	13,86	13,87
		Z2	14,23	14,98	15,23	15,79	14,88	15,02	14,55	14,91	14,23
		Z3	17,43	17,80	17,34	18,00	17,57	17,72	16,95	17,47	17,43
		Z4	17,86	18,06	18,49	19,26	18,44	18,65	18,69	18,87	17,86
	V7	Z1	13,77	14,22	14,00	14,80	14,66	14,54	13,37	13,76	13,77
		Z2	13,77	14,77	15,34	15,75	14,70	14,86	14,42	14,67	13,77
		Z3	17,34	17,61	17,24	17,89	17,62	17,66	16,72	17,41	17,34
		Z4	17,34	17,61	18,45	19,06	18,04	18,44	18,44	18,49	17,34
Prédio comercial 2/3	V1	Z1	17,53	16,54	14,77	17,30	18,33	17,40	14,37	16,61	17,53
		Z2	22,13	20,80	23,09	24,13	20,32	21,87	23,65	24,23	22,13
		Z3	22,38	20,72	18,44	20,70	22,35	21,71	18,29	21,60	22,38
		Z4	26,55	24,53	27,52	28,63	24,65	27,37	29,16	28,98	26,55
	V2	Z1	17,02	16,03	14,63	17,15	18,12	17,31	14,22	16,26	17,02
		Z2	21,05	20,38	22,60	23,55	19,92	21,13	22,69	23,10	21,05
		Z3	21,70	20,22	17,94	20,42	21,98	21,38	18,00	21,08	21,70
		Z4	25,20	23,80	26,83	27,81	24,11	26,41	27,89	27,64	25,20
	V3	Z1	15,87	15,14	14,36	16,56	17,32	16,66	13,92	15,39	15,87
		Z2	18,89	18,97	20,98	21,84	18,52	19,10	20,34	20,53	18,89
		Z3	20,36	19,27	17,64	19,68	20,83	20,39	17,51	19,97	20,36
		Z4	22,67	22,08	24,65	25,55	22,41	24,07	25,11	24,76	22,67

		Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
				0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
				Potência de refrigeração de pico por zona [kW]								
Prédio comercial 2/3	V4	Z1	15,23	14,70	14,17	16,27	16,94	16,31	13,71	14,92	15,23	
		Z2	17,55	18,11	20,16	20,93	17,76	17,90	18,95	19,15	17,55	
		Z3	19,54	18,71	17,39	19,34	20,13	19,75	17,17	19,32	19,54	
		Z4	21,04	20,91	23,34	24,17	21,17	22,59	23,36	22,99	21,04	
	V5	Z1	14,15	14,32	14,05	15,59	15,92	15,53	13,49	14,08	14,15	
		Z2	15,57	16,45	18,07	18,58	16,19	16,09	16,63	16,95	15,57	
		Z3	18,36	18,02	17,34	18,60	18,94	18,80	16,88	18,33	18,36	
		Z4	18,90	19,30	21,07	21,77	19,65	20,39	20,77	20,60	18,90	
	V6	Z1	13,90	14,39	14,08	15,37	15,40	15,19	13,59	13,91	13,90	
		Z2	15,75	16,09	16,81	17,49	15,93	15,68	16,20	16,67	15,75	
		Z3	18,11	18,14	17,26	18,42	18,46	18,43	17,07	18,15	18,11	
		Z4	19,24	19,08	19,93	20,91	19,52	20,02	20,41	20,48	19,24	
	V7	Z1	13,86	14,10	13,87	15,28	15,51	15,21	13,32	13,84	13,86	
		Z2	14,96	15,65	17,20	17,68	15,47	15,43	15,95	16,27	14,96	
		Z3	18,02	17,78	17,05	18,21	18,42	18,35	16,62	18,02	18,02	
		Z4	18,17	18,30	20,05	20,69	18,69	19,64	19,93	19,77	18,17	
	Prédio comercial 3/3	V1	Z1	20,05	18,50	16,00	18,79	20,55	19,39	14,92	18,71	20,05
			Z2	26,29	23,64	27,16	28,52	23,00	25,56	28,52	29,06	26,29
			Z3	25,14	22,87	19,86	22,29	24,96	23,80	18,94	23,91	25,14
			Z4	30,85	27,95	31,57	32,98	27,33	31,33	33,68	33,67	30,85
		V2	Z1	19,28	17,75	15,32	18,60	20,18	19,09	14,61	18,12	19,28
			Z2	24,95	23,02	26,73	27,87	22,50	24,76	27,21	27,57	24,95
			Z3	24,15	21,98	19,04	21,93	24,36	23,29	18,52	23,16	24,15
			Z4	29,12	26,47	30,78	32,03	26,67	30,26	32,77	32,32	29,12
		V3	Z1	17,58	16,26	14,47	17,68	19,04	17,93	14,15	16,76	17,58
			Z2	21,91	21,21	24,41	25,47	20,73	22,01	23,88	23,99	21,91
			Z3	22,16	20,38	17,77	20,83	22,68	21,86	17,87	21,52	22,16
			Z4	25,74	24,27	27,91	28,99	24,47	27,12	28,90	28,29	25,74
V4		Z1	16,61	15,45	14,19	17,24	18,57	17,46	13,85	16,06	16,61	
		Z2	19,98	20,12	23,22	24,12	19,76	20,34	21,88	22,17	19,98	
		Z3	20,96	19,51	17,37	20,23	21,67	20,98	17,48	20,56	20,96	
		Z4	23,51	22,76	26,16	27,12	22,88	25,08	26,40	26,00	23,51	
V5		Z1	15,05	14,34	14,03	16,21	17,00	16,30	13,53	14,81	15,05	
		Z2	17,09	17,83	20,20	20,80	17,51	17,45	18,47	18,94	17,09	
		Z3	19,20	18,41	17,31	19,22	19,96	19,55	16,99	19,10	19,20	
		Z4	20,42	20,42	23,09	23,81	20,74	21,93	22,65	22,60	20,42	
V6		Z1	14,64	14,42	14,06	15,90	16,19	15,77	13,68	14,58	14,64	
		Z2	17,34	17,09	18,50	19,45	16,98	16,97	17,82	18,51	17,34	
		Z3	18,82	18,60	17,18	18,86	19,23	19,08	17,25	18,82	18,82	
		Z4	20,74	20,01	21,42	22,54	20,44	21,35	22,08	22,22	20,74	
V7		Z1	14,63	14,04	13,75	15,76	16,44	15,81	13,27	14,45	14,63	
		Z2	16,18	16,68	18,98	19,50	16,52	16,63	17,48	17,93	16,18	
		Z3	18,69	18,06	16,88	18,63	19,31	18,96	16,73	18,64	18,69	
		Z4	19,34	18,99	21,59	22,24	19,38	20,83	21,41	21,37	19,34	

D.1.2. Belém – PA

	Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
			Potência de refrigeração de pico por zona [kW]								
Prédio comercial 1/3	V1	Z1	18,71	18,10	17,62	18,25	18,36	18,47	18,16	18,32	18,71
		Z2	17,63	19,63	20,83	22,28	22,59	22,06	20,65	18,79	17,63
		Z3	20,98	20,27	19,65	20,78	20,39	20,29	20,16	20,48	20,98
		Z4	19,72	22,14	22,81	24,46	24,95	24,62	23,82	22,62	19,72
	V2	Z1	18,46	18,00	17,56	18,15	18,23	18,31	17,94	18,04	18,46
		Z2	17,34	19,34	20,61	21,95	22,09	21,46	20,06	18,32	17,34
		Z3	20,69	20,15	19,57	20,63	20,26	20,12	19,88	20,15	20,69
		Z4	19,32	21,77	22,52	24,05	24,41	23,89	23,06	21,98	19,32
	V3	Z1	18,11	17,85	17,46	17,86	17,81	17,80	17,51	17,63	18,11
		Z2	16,86	18,58	19,79	20,99	21,08	20,36	19,11	17,54	16,86
		Z3	20,26	19,95	19,45	20,25	19,77	19,58	19,39	19,65	20,26
		Z4	18,69	20,86	21,59	22,92	23,18	22,55	21,52	20,62	18,69
	V4	Z1	17,86	17,73	17,37	17,71	17,64	17,60	17,26	17,35	17,86
		Z2	16,49	18,16	19,39	20,42	20,46	19,66	18,44	17,00	16,49
		Z3	19,94	19,81	19,35	20,07	19,51	19,29	19,06	19,30	19,94
		Z4	18,21	20,29	21,02	22,18	22,37	21,69	20,60	19,81	18,21
	V5	Z1	17,66	17,69	17,37	17,37	17,17	17,07	16,91	17,09	17,66
		Z2	16,23	17,34	18,48	19,40	19,40	18,68	17,70	16,60	16,23
		Z3	19,70	19,75	19,36	19,72	19,00	18,85	18,68	18,99	19,70
		Z4	17,94	19,46	20,15	21,16	21,29	20,62	19,64	18,92	17,94
	V6	Z1	17,63	17,68	17,30	17,23	16,92	16,81	16,99	17,07	17,63
		Z2	16,10	17,05	17,95	18,93	19,24	18,38	17,71	16,59	16,10
		Z3	19,66	19,74	19,27	19,59	18,69	18,73	18,76	18,97	19,66
		Z4	17,76	19,14	19,61	20,70	21,16	20,33	19,63	18,89	17,76
	V7	Z1	17,53	17,57	17,26	17,21	16,98	16,87	16,77	16,97	17,53
		Z2	15,94	16,94	18,02	18,88	18,90	18,25	17,29	16,30	15,94
		Z3	19,53	19,61	19,21	19,52	18,77	18,65	18,49	18,83	19,53
		Z4	17,54	18,96	19,58	20,53	20,68	20,09	19,14	18,50	17,54
Prédio comercial 2/3	V1	Z1	19,64	18,45	17,82	19,74	20,38	20,75	19,68	19,41	19,64
		Z2	18,59	22,46	24,33	26,57	26,46	25,92	25,77	23,34	18,59
		Z3	22,75	20,93	19,86	22,33	22,70	22,73	21,81	22,68	22,75
		Z4	22,11	25,00	26,41	28,87	29,01	29,95	29,72	27,49	22,11
	V2	Z1	19,20	18,28	17,71	19,56	20,16	20,47	19,26	18,91	19,20
		Z2	18,17	22,14	24,07	26,10	25,76	24,81	24,76	22,42	18,17
		Z3	22,30	20,54	19,71	22,05	22,35	22,36	21,30	22,10	22,30
		Z4	21,61	24,55	25,98	28,20	28,13	28,64	28,51	26,38	21,61
	V3	Z1	18,53	17,98	17,53	18,96	19,35	19,55	18,50	18,13	18,53
		Z2	17,36	20,85	22,63	24,37	23,97	22,55	22,18	20,43	17,36
		Z3	21,22	20,07	19,49	21,38	21,42	21,34	20,38	20,81	21,22
		Z4	20,26	23,08	24,37	26,24	26,06	25,71	25,64	24,05	20,26
	V4	Z1	18,04	17,76	17,37	18,67	19,00	19,07	18,03	17,58	18,04
		Z2	16,71	20,10	22,01	23,54	22,88	21,28	20,68	19,37	16,71
		Z3	20,60	19,79	19,29	20,98	20,88	20,71	19,79	20,07	20,60
		Z4	19,41	22,07	23,36	24,99	24,65	23,88	23,90	22,76	19,41

		Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
				0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
				Potência de refrigeração de pico por zona [kW]								
Prédio comercial 2/3	V5	Z1	17,65	17,66	17,37	18,02	18,09	18,11	17,32	17,08	17,65	
		Z2	16,28	18,62	20,27	21,51	20,97	19,64	18,16	17,28	16,28	
		Z3	19,66	19,69	19,32	20,34	19,97	19,72	19,03	18,95	19,66	
		Z4	18,16	20,62	21,79	23,07	22,72	21,49	21,21	20,55	18,16	
	V6	Z1	17,59	17,65	17,24	17,74	17,68	17,64	17,45	17,05	17,59	
		Z2	16,02	18,11	19,28	20,62	20,72	19,03	18,04	16,96	16,02	
		Z3	19,57	19,66	19,15	20,02	19,45	19,26	19,20	18,91	19,57	
		Z4	17,73	20,08	20,79	22,22	22,51	20,82	20,94	20,25	17,73	
	V7	Z1	17,40	17,45	17,15	17,69	17,73	17,73	17,03	16,84	17,40	
		Z2	15,71	17,87	19,49	20,62	20,05	18,79	17,42	16,63	15,71	
		Z3	19,33	19,40	19,03	19,94	19,52	19,27	18,67	18,64	19,33	
		Z4	17,59	19,66	20,69	21,87	21,58	20,44	20,35	19,78	17,59	
Prédio comercial 3/3	V1	Z1	21,46	18,81	18,01	21,21	22,32	22,85	21,07	21,73	21,46	
		Z2	20,76	24,66	27,28	30,29	29,66	30,76	30,91	27,51	20,76	
		Z3	25,09	22,53	20,04	23,84	24,79	24,95	23,32	25,35	25,09	
		Z4	24,66	27,21	29,57	32,61	32,28	33,98	33,95	31,88	24,66	
	V2	Z1	20,96	18,52	17,87	20,89	22,02	22,46	20,51	21,01	20,96	
		Z2	20,36	24,49	27,12	29,82	28,92	29,36	29,62	26,62	20,36	
		Z3	24,45	21,89	19,85	23,44	24,32	24,40	22,61	24,50	24,45	
		Z4	24,10	26,85	29,01	31,87	31,31	33,41	33,58	30,68	24,10	
	V3	Z1	19,54	18,11	17,61	20,05	20,85	21,14	19,44	19,30	19,54	
		Z2	18,77	22,89	25,33	27,58	26,61	25,68	25,97	23,81	18,77	
		Z3	22,85	20,54	19,53	22,44	22,97	22,94	21,35	22,60	22,85	
		Z4	22,27	25,02	26,91	29,29	28,64	29,37	29,58	27,53	22,27	
	V4	Z1	18,77	17,78	17,38	19,62	20,32	20,56	18,76	18,35	18,77	
		Z2	17,82	22,01	24,46	26,38	25,22	23,42	23,83	22,29	17,82	
		Z3	21,94	19,76	19,25	21,84	22,21	22,09	20,51	21,49	21,94	
		Z4	21,10	23,72	25,59	27,64	26,75	26,79	27,11	25,71	21,10	
	V5	Z1	17,64	17,63	17,37	18,67	19,00	19,05	17,74	17,08	17,64	
		Z2	16,35	19,92	22,15	23,62	22,51	20,52	20,13	19,22	16,35	
		Z3	20,43	19,63	19,30	20,94	20,86	20,62	19,41	19,74	20,43	
		Z4	19,30	21,76	23,36	24,91	24,14	22,98	23,20	22,48	19,30	
	V6	Z1	17,54	17,62	17,18	18,25	18,36	18,44	17,89	17,03	17,54	
		Z2	15,93	19,10	20,65	22,30	22,06	19,65	19,66	18,74	15,93	
		Z3	20,02	19,58	19,03	20,51	20,13	20,00	19,63	19,36	20,02	
		Z4	18,65	20,93	21,97	23,70	23,73	22,19	22,76	22,02	18,65	
	V7	Z1	17,27	17,32	17,05	18,19	18,47	18,52	17,31	16,72	17,27	
		Z2	15,50	18,87	21,01	22,33	21,27	19,31	19,03	18,27	15,50	
		Z3	19,94	19,20	18,86	20,35	20,20	19,96	18,88	19,24	19,94	
		Z4	18,48	20,37	21,92	23,31	22,45	21,69	21,92	21,36	18,48	

D.1.3. Brasília – DF

	Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
			Potência de refrigeração de pico por zona [kW]								
Prédio comercial 1/3	V1	Z1	10,79	9,99	9,00	9,58	9,21	8,65	8,53	10,34	10,79
		Z2	11,56	11,37	9,85	10,19	11,02	13,85	13,88	13,76	11,56
		Z3	14,79	13,83	12,67	12,84	12,42	12,04	12,20	14,27	14,79
		Z4	15,03	14,74	13,38	14,10	15,11	18,26	18,26	17,47	15,03
	V2	Z1	10,55	9,85	8,92	9,42	9,05	8,55	8,39	10,11	10,55
		Z2	11,19	10,93	9,43	9,78	10,64	13,26	13,27	13,16	11,19
		Z3	14,48	13,66	12,58	12,65	12,22	11,84	12,02	13,97	14,48
		Z4	14,47	14,21	12,91	13,61	14,62	17,52	17,50	16,75	14,47
	V3	Z1	10,04	9,59	8,81	9,19	8,82	8,41	8,18	9,60	10,04
		Z2	10,39	10,08	8,77	9,15	9,98	12,03	11,99	11,93	10,39
		Z3	13,85	13,35	12,45	12,36	11,94	11,60	11,72	13,36	13,85
		Z4	13,50	13,19	12,20	12,88	13,81	16,08	15,99	15,33	13,50
	V4	Z1	9,74	9,43	8,74	9,03	8,66	8,31	8,04	9,32	9,74
		Z2	9,92	9,55	8,30	8,72	9,53	11,30	11,24	11,28	9,92
		Z3	13,47	13,15	12,35	12,16	11,73	11,43	11,52	13,00	13,47
		Z4	12,89	12,53	11,68	12,35	13,22	15,17	15,05	14,53	12,89
	V5	Z1	9,28	9,22	8,70	8,89	8,53	8,24	7,85	8,89	9,28
		Z2	9,24	8,89	7,92	8,34	9,01	10,25	10,11	10,26	9,24
		Z3	12,94	12,91	12,31	12,02	11,58	11,30	11,30	12,48	12,94
		Z4	12,14	11,78	11,27	11,95	12,65	14,00	13,79	13,41	12,14
	V6	Z1	9,16	9,27	8,68	8,92	8,54	8,25	8,02	8,76	9,16
		Z2	9,43	8,84	8,04	8,40	9,34	10,06	10,03	10,05	9,43
		Z3	12,82	12,98	12,28	12,04	11,58	11,31	11,50	12,38	12,82
		Z4	12,37	11,77	11,25	11,99	13,02	13,79	13,73	13,32	12,37
	V7	Z1	9,14	9,13	8,64	8,83	8,47	8,18	7,77	8,75	9,14
		Z2	8,97	8,63	7,71	8,15	8,79	9,91	9,76	9,90	8,97
		Z3	12,77	12,80	12,22	11,92	11,48	11,21	11,19	12,31	12,77
		Z4	11,78	11,44	11,00	11,66	12,33	13,56	13,34	13,00	11,78
Prédio comercial 2/3	V1	Z1	12,97	11,69	9,48	10,22	9,86	9,18	9,38	12,45	12,97
		Z2	14,66	14,16	12,06	12,33	12,94	18,19	18,81	18,34	14,66
		Z3	17,26	15,33	13,04	13,62	13,21	12,87	13,22	16,66	17,26
		Z4	18,34	17,84	15,31	16,11	17,32	23,03	23,64	22,42	18,34
	V2	Z1	12,48	11,22	9,23	9,91	9,56	8,90	9,13	11,98	12,48
		Z2	13,99	13,46	11,29	11,43	12,34	17,21	17,70	17,40	13,99
		Z3	16,64	14,88	12,87	13,24	12,83	12,50	12,87	16,06	16,64
		Z4	17,50	16,98	14,53	15,26	16,54	21,83	22,30	21,16	17,50
	V3	Z1	11,44	10,35	8,97	9,46	9,12	8,61	8,73	11,00	11,44
		Z2	12,46	11,91	10,03	10,17	11,20	14,97	15,31	15,29	12,46
		Z3	15,40	14,04	12,62	12,70	12,30	11,94	12,30	14,86	15,40
		Z4	15,72	15,19	13,27	13,89	15,14	19,23	19,50	18,74	15,72
	V4	Z1	10,91	9,96	8,83	9,15	8,81	8,41	8,45	10,54	10,91
		Z2	11,55	10,93	9,13	9,33	10,38	13,76	14,10	14,15	11,55
		Z3	14,66	13,62	12,43	12,31	11,91	11,58	11,90	14,14	14,66
		Z4	14,58	13,98	12,32	12,87	14,08	17,58	17,86	17,33	14,58

		Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
				0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
Potência de refrigeração de pico por zona [kW]	Prédio comercial 2/3	V5	Z1	10,01	9,47	8,74	8,90	8,55	8,26	8,09	9,68	10,01
			Z2	10,23	9,71	8,32	8,58	9,42	11,77	11,95	12,13	10,23
			Z3	13,60	13,16	12,36	12,05	11,62	11,34	11,48	13,15	13,60
			Z4	13,13	12,59	11,59	12,08	13,03	15,40	15,50	15,13	13,13
		V6	Z1	9,70	9,57	8,71	8,95	8,57	8,28	8,41	9,43	9,70
			Z2	10,64	9,59	8,58	8,67	10,04	11,28	11,67	11,67	10,64
			Z3	13,36	13,29	12,28	12,09	11,61	11,36	11,86	12,92	13,36
			Z4	13,57	12,47	11,49	12,12	13,71	14,89	15,26	14,71	13,57
		V7	Z1	9,71	9,29	8,63	8,77	8,42	8,15	7,93	9,40	9,71
			Z2	9,69	9,16	7,90	8,17	8,95	11,06	11,21	11,41	9,69
			Z3	13,26	12,93	12,18	11,86	11,42	11,16	11,27	12,80	13,26
			Z4	12,44	11,91	11,02	11,49	12,41	14,49	14,57	14,25	12,44
	Prédio comercial 3/3	V1	Z1	15,16	13,44	9,93	10,82	10,52	9,91	10,20	14,56	15,16
			Z2	17,50	16,60	14,72	15,43	14,70	21,99	23,36	22,61	17,50
			Z3	19,67	17,16	13,38	14,34	13,93	13,69	14,17	19,00	19,67
			Z4	21,37	20,36	17,02	18,57	19,14	27,10	28,47	26,90	21,37
		V2	Z1	14,42	12,75	9,57	10,38	10,06	9,45	9,86	13,84	14,42
			Z2	16,63	15,78	13,68	14,66	13,99	21,03	21,94	21,71	16,63
			Z3	18,76	16,34	13,14	13,80	13,40	13,11	13,68	18,11	18,76
			Z4	20,29	19,37	16,03	17,57	18,22	25,76	26,75	25,69	20,29
		V3	Z1	12,93	11,46	9,12	9,73	9,39	8,86	9,27	12,46	12,93
			Z2	14,47	13,70	11,60	12,53	12,48	18,08	18,83	18,68	14,47
			Z3	16,94	15,00	12,78	13,02	12,63	12,30	12,85	16,34	16,94
			Z4	17,83	17,00	14,29	14,88	16,40	22,39	23,10	22,27	17,83
		V4	Z1	12,21	10,80	8,91	9,27	8,94	8,56	8,86	11,77	12,21
			Z2	13,24	12,36	10,44	11,61	11,34	16,35	17,06	17,01	13,24
			Z3	15,92	14,20	12,50	12,46	12,07	11,73	12,27	15,42	15,92
			Z4	16,22	15,35	12,95	13,43	14,95	20,26	20,90	20,25	16,22
V5		Z1	10,86	9,79	8,78	8,91	8,57	8,34	8,33	10,48	10,86	
		Z2	11,40	10,59	8,76	9,13	9,95	13,43	13,87	13,98	11,40	
		Z3	14,39	13,40	12,40	12,07	11,65	11,38	11,66	13,96	14,39	
		Z4	14,12	13,37	11,89	12,35	13,48	17,10	17,45	17,01	14,12	
V6		Z1	10,40	9,87	8,82	8,98	8,59	8,36	8,81	10,10	10,40	
		Z2	12,01	10,41	9,16	9,00	10,87	12,68	13,45	13,32	12,01	
		Z3	13,93	13,59	12,29	12,13	11,64	11,40	12,25	13,60	13,93	
		Z4	14,74	13,17	11,73	12,38	14,49	16,31	17,07	16,39	14,74	
V7		Z1	10,42	9,52	8,62	8,71	8,38	8,16	8,09	10,05	10,42	
		Z2	10,58	9,79	8,09	8,27	9,27	12,38	12,78	12,94	10,58	
		Z3	13,85	13,06	12,14	11,79	11,36	11,11	11,34	13,44	13,85	
		Z4	13,12	12,39	11,06	11,47	12,52	15,76	16,09	15,73	13,12	

D.1.4. Recife – PE

	Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro									
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°	
Potência de refrigeração de pico por zona [kW]	Prédio comercial 1/3	V1	Z1	20,93	20,44	19,76	21,23	21,48	21,42	20,60	20,75	20,93
			Z2	20,58	23,64	24,50	25,77	25,12	24,49	22,81	21,66	20,58
			Z3	23,38	22,72	22,00	23,44	23,51	23,60	22,80	23,09	23,38
			Z4	22,77	25,87	26,79	28,20	27,70	27,26	25,56	24,01	22,77
		V2	Z1	20,69	20,32	19,70	21,09	21,21	21,18	20,41	20,50	20,69
			Z2	20,28	23,22	24,02	25,13	24,56	23,90	22,27	21,25	20,28
			Z3	23,09	22,58	21,92	23,24	23,25	23,30	22,54	22,79	23,09
			Z4	22,37	25,34	26,25	27,48	27,01	26,53	24,86	23,47	22,37
		V3	Z1	20,33	20,11	19,58	20,69	20,71	20,64	20,06	20,12	20,33
			Z2	19,74	22,23	23,04	23,98	23,45	22,74	21,33	20,51	19,74
			Z3	22,65	22,34	21,77	22,76	22,64	22,64	22,09	22,33	22,65
			Z4	21,71	24,18	25,01	26,06	25,70	25,16	23,71	22,58	21,71
		V4	Z1	20,08	19,97	19,50	20,44	20,44	20,36	19,82	19,86	20,08
			Z2	19,35	21,75	22,46	23,32	22,80	21,96	20,66	20,00	19,35
			Z3	22,33	22,18	21,64	22,46	22,28	22,22	21,79	22,01	22,33
			Z4	21,21	23,40	24,17	25,16	24,80	24,23	22,87	21,92	21,21
		V5	Z1	19,83	19,84	19,44	20,02	19,87	19,89	19,47	19,59	19,83
			Z2	18,93	20,71	21,36	22,09	21,59	20,94	19,87	19,48	18,93
			Z3	22,06	22,07	21,62	22,03	21,70	21,63	21,44	21,71	22,06
			Z4	20,82	22,34	23,09	23,92	23,66	23,14	22,04	21,39	20,82
		V6	Z1	19,82	19,85	19,39	19,96	19,63	19,75	19,65	19,58	19,82
			Z2	19,08	20,37	20,83	21,70	21,73	20,72	19,99	19,48	19,08
			Z3	22,03	22,08	21,55	21,89	21,48	21,49	21,66	21,70	22,03
			Z4	20,94	22,16	22,67	23,66	23,86	22,85	22,18	21,38	20,94
		V7	Z1	19,72	19,74	19,35	19,86	19,68	19,71	19,34	19,48	19,72
			Z2	18,68	20,31	20,91	21,60	21,15	20,53	19,53	19,19	18,68
			Z3	21,91	21,94	21,49	21,82	21,47	21,42	21,28	21,57	21,91
			Z4	20,46	21,87	22,58	23,35	23,07	22,62	21,59	21,01	20,46
Prédio comercial 2/3	V1	Z1	21,97	21,11	20,07	23,23	24,02	24,09	22,05	21,85	21,97	
		Z2	21,98	27,40	28,99	30,98	29,41	28,13	26,21	24,92	21,98	
		Z3	24,59	23,37	22,35	25,50	26,13	26,38	24,38	24,37	24,59	
		Z4	24,29	29,73	31,39	33,51	32,13	31,15	30,28	28,68	24,29	
	V2	Z1	21,55	20,83	19,97	22,86	23,59	23,59	21,70	21,41	21,55	
		Z2	21,54	26,78	28,32	30,08	28,50	27,18	25,06	23,94	21,54	
		Z3	24,06	23,08	22,20	25,07	25,58	25,80	23,89	23,82	24,06	
		Z4	23,68	28,93	30,46	32,36	31,01	30,00	28,86	27,53	23,68	
	V3	Z1	20,86	20,40	19,75	22,07	22,55	22,58	21,03	20,68	20,86	
		Z2	20,63	25,14	26,45	27,84	26,60	25,24	22,99	21,64	20,63	
		Z3	23,24	22,62	21,93	24,14	24,43	24,54	23,10	22,96	23,24	
		Z4	22,57	26,99	28,30	29,84	28,77	27,70	26,14	24,93	22,57	
	V4	Z1	20,38	20,13	19,60	21,62	22,09	22,01	20,57	20,19	20,38	
		Z2	19,94	24,17	25,40	26,58	25,39	23,90	21,82	20,53	19,94	
		Z3	22,63	22,30	21,73	23,56	23,69	23,74	22,54	22,34	22,63	
		Z4	21,69	25,69	26,95	28,26	27,22	26,02	24,49	23,54	21,69	

		Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
				0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
				Potência de refrigeração de pico por zona [kW]								
Prédio comercial 2/3	V5	Z1	19,90	19,88	19,49	20,82	20,99	20,94	19,90	19,67	19,90	
		Z2	19,19	22,38	23,40	24,27	23,34	22,13	20,44	19,62	19,19	
		Z3	22,12	22,10	21,66	22,76	22,65	22,64	21,84	21,77	22,12	
		Z4	21,05	23,86	24,96	26,00	25,15	24,17	22,51	21,48	21,05	
	V6	Z1	19,87	19,90	19,39	20,56	20,51	20,48	20,25	19,65	19,87	
		Z2	19,46	21,80	22,52	23,71	23,56	21,62	20,63	19,60	19,46	
		Z3	22,05	22,11	21,51	22,53	22,28	22,29	22,22	21,74	22,05	
		Z4	21,22	23,40	24,12	25,43	25,54	23,69	22,72	21,42	21,22	
	V7	Z1	19,69	19,69	19,31	20,49	20,69	20,58	19,64	19,46	19,69	
		Z2	18,69	21,63	22,58	23,38	22,51	21,39	19,77	19,08	18,69	
		Z3	21,82	21,84	21,40	22,35	22,23	22,22	21,52	21,50	21,82	
		Z4	20,35	22,98	23,99	24,93	24,14	23,15	21,62	20,72	20,35	
Prédio comercial 3/3	V1	Z1	22,91	21,74	20,37	25,13	26,45	26,54	23,41	22,86	22,91	
		Z2	23,02	30,47	32,98	35,05	33,08	30,89	31,03	29,36	23,02	
		Z3	25,80	24,08	22,69	27,46	28,59	28,91	25,84	25,52	25,80	
		Z4	26,18	32,80	35,26	37,36	35,85	34,02	34,17	33,32	26,18	
	V2	Z1	22,33	21,35	20,25	24,58	25,84	25,83	22,91	22,24	22,33	
		Z2	22,53	29,85	32,20	34,43	31,98	29,82	29,85	28,08	22,53	
		Z3	24,95	23,59	22,50	26,84	27,83	28,07	25,20	24,76	24,95	
		Z4	25,44	31,94	34,15	36,71	34,49	33,39	33,60	31,85	25,44	
	V3	Z1	21,36	20,66	19,93	23,45	24,36	24,36	21,95	21,22	21,36	
		Z2	21,40	27,72	29,60	31,37	29,43	27,34	26,42	25,10	21,40	
		Z3	23,78	22,85	22,12	25,50	26,15	26,30	24,05	23,55	23,78	
		Z4	23,38	29,48	31,30	33,27	31,52	29,80	30,06	28,45	23,38	
	V4	Z1	20,67	20,25	19,72	22,89	23,63	23,54	21,28	20,51	20,67	
		Z2	20,48	26,39	28,14	29,52	27,71	25,68	24,41	23,49	20,48	
		Z3	22,91	22,39	21,81	24,62	25,11	25,22	23,23	22,65	22,91	
		Z4	22,11	27,77	29,47	31,09	29,41	27,62	27,72	26,56	22,11	
	V5	Z1	19,98	19,90	19,55	21,67	22,06	21,92	20,30	19,76	19,98	
		Z2	19,46	23,89	25,27	26,28	24,92	23,22	20,99	20,37	19,46	
		Z3	22,18	22,13	21,72	23,43	23,58	23,58	22,23	21,85	22,18	
		Z4	21,28	25,27	26,68	27,91	26,62	25,08	23,98	23,29	21,28	
	V6	Z1	19,92	19,95	19,39	21,20	21,36	21,39	20,84	19,73	19,92	
		Z2	19,82	23,12	24,05	25,54	25,21	22,46	21,22	19,88	19,82	
		Z3	22,08	22,14	21,50	23,13	23,00	23,08	22,83	21,79	22,08	
		Z4	21,48	24,56	25,52	27,14	27,05	24,41	23,72	22,82	21,48	
	V7	Z1	19,67	19,63	19,29	21,19	21,56	21,39	19,95	19,45	19,67	
		Z2	18,73	22,83	24,12	25,03	23,76	22,13	20,02	19,40	18,73	
		Z3	21,74	21,74	21,34	22,86	23,00	22,97	21,77	21,43	21,74	
		Z4	20,26	24,01	25,30	26,37	25,20	23,69	22,71	22,15	20,26	

D.1.5. São Paulo – SP

	Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro									
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°	
Potência de refrigeração de pico por zona [kW]	Prédio comercial 1/3	V1	Z1	11,90	11,65	10,48	10,91	10,71	10,15	9,69	11,65	11,90
			Z2	13,86	13,12	11,99	12,89	11,70	14,93	15,10	15,28	13,86
			Z3	16,90	16,29	14,65	15,11	14,69	14,47	14,32	16,58	16,90
			Z4	18,16	17,35	16,64	17,66	16,75	20,36	20,40	19,97	18,16
		V2	Z1	11,64	11,47	10,29	10,75	10,56	10,04	9,63	11,47	11,64
			Z2	13,33	12,58	11,90	12,69	11,41	14,43	14,53	14,67	13,33
			Z3	16,53	16,06	14,56	14,92	14,50	14,30	14,20	16,29	16,53
			Z4	17,50	16,70	16,25	17,16	16,37	19,70	19,62	19,23	17,50
		V3	Z1	11,09	11,12	10,02	10,52	10,34	9,85	9,50	11,02	11,09
			Z2	12,31	11,60	11,05	11,78	10,87	13,27	13,30	13,42	12,31
			Z3	15,86	15,68	14,42	14,64	14,23	14,02	13,97	15,70	15,86
			Z4	16,30	15,58	15,07	15,92	15,68	18,32	18,11	17,77	16,30
		V4	Z1	10,78	10,90	9,90	10,37	10,19	9,74	9,41	10,78	10,78
			Z2	11,69	10,99	10,62	11,33	10,49	12,63	12,58	12,69	11,69
			Z3	15,44	15,42	14,32	14,46	14,04	13,84	13,81	15,35	15,44
			Z4	15,54	14,92	14,29	15,12	15,18	17,46	17,15	16,88	15,54
		V5	Z1	10,27	10,61	9,84	10,23	10,05	9,62	9,29	10,34	10,27
			Z2	10,83	10,26	9,74	10,26	9,98	11,63	11,43	11,61	10,83
			Z3	14,88	15,14	14,27	14,32	13,87	13,66	13,62	14,83	14,88
			Z4	14,58	14,16	13,58	14,22	14,60	16,26	15,85	15,69	14,58
		V6	Z1	10,15	10,65	9,89	10,27	10,07	9,64	9,36	10,24	10,15
			Z2	11,06	10,30	9,60	9,80	10,18	11,44	11,27	11,53	11,06
			Z3	14,76	15,21	14,24	14,35	13,88	13,68	13,73	14,73	14,76
			Z4	14,86	14,20	13,57	14,29	14,82	16,06	15,73	15,67	14,86
		V7	Z1	10,14	10,51	9,80	10,17	10,00	9,58	9,24	10,22	10,14
			Z2	10,58	10,03	9,29	9,79	9,80	11,33	11,10	11,29	10,58
			Z3	14,70	15,02	14,19	14,24	13,80	13,59	13,53	14,67	14,70
			Z4	14,25	13,85	13,33	13,98	14,33	15,86	15,42	15,29	14,25
	Prédio comercial 2/3	V1	Z1	14,27	13,27	11,20	11,61	11,59	11,18	10,32	13,68	14,27
			Z2	17,58	16,38	16,33	17,60	14,15	19,14	20,07	20,04	17,58
			Z3	19,55	17,82	15,25	15,89	16,14	15,68	15,17	18,95	19,55
			Z4	22,22	20,81	21,25	22,64	19,06	25,01	25,92	25,11	22,22
		V2	Z1	13,74	12,81	10,83	11,27	11,62	11,08	10,17	13,26	13,74
			Z2	16,61	15,48	15,99	17,07	13,92	18,32	19,03	19,13	16,61
			Z3	18,84	17,30	14,88	15,53	15,78	15,33	14,94	18,40	18,84
			Z4	21,05	19,74	20,59	21,75	18,45	23,97	24,56	23,80	21,05
		V3	Z1	12,63	11,95	10,30	10,82	10,92	10,41	9,89	12,36	12,63
			Z2	14,79	13,68	14,57	15,54	12,68	16,19	16,68	16,83	14,79
			Z3	17,51	16,47	14,62	14,99	14,69	14,39	14,51	17,23	17,51
			Z4	18,83	17,69	18,48	19,51	16,99	21,49	21,75	21,12	18,83
V4		Z1	12,00	11,53	10,00	10,52	10,60	10,11	9,70	11,87	12,00	
		Z2	13,68	12,54	13,91	14,73	12,00	14,91	15,26	15,54	13,68	
		Z3	16,69	15,98	14,42	14,62	14,19	14,03	14,20	16,54	16,69	
		Z4	17,38	16,30	17,25	18,15	16,09	19,91	19,94	19,65	17,38	

		Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
				0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
Potência de refrigeração de pico por zona [kW]	Prédio comercial 2/3	V5	Z1	11,02	10,94	9,87	10,24	10,04	9,66	9,46	11,06	11,02
			Z2	12,02	11,06	11,95	12,53	10,41	12,95	13,09	13,42	12,02
			Z3	15,58	15,41	14,31	14,35	13,87	13,69	13,82	15,52	15,58
			Z4	15,56	14,88	15,16	15,92	15,02	17,62	17,49	17,39	15,56
		V6	Z1	10,75	11,02	9,96	10,32	10,08	9,70	9,59	10,86	10,75
			Z2	12,40	11,08	10,60	11,44	10,77	12,58	12,69	13,14	12,40
			Z3	15,35	15,56	14,26	14,42	13,89	13,73	14,05	15,31	15,35
			Z4	16,07	14,93	13,96	15,05	15,44	17,21	17,17	17,13	16,07
		V7	Z1	10,74	10,76	9,79	10,13	9,95	9,56	9,34	10,81	10,74
			Z2	11,47	10,57	11,12	11,64	10,04	12,37	12,43	12,76	11,47
			Z3	15,24	15,18	14,16	14,19	13,72	13,54	13,64	15,20	15,24
			Z4	14,89	14,27	14,15	14,81	14,50	16,84	16,63	16,56	14,89
	Prédio comercial 3/3	V1	Z1	16,64	14,94	12,01	12,33	13,73	12,93	11,00	15,76	16,64
			Z2	20,96	19,26	20,25	21,92	16,92	22,79	24,73	24,77	20,96
			Z3	22,13	19,68	16,13	16,62	18,62	17,78	15,97	21,26	22,13
			Z4	25,82	23,84	25,20	26,95	21,79	28,94	30,89	29,83	25,82
		V2	Z1	15,83	14,27	11,46	12,12	13,55	12,83	10,78	15,13	15,83
			Z2	19,84	18,13	19,83	21,21	16,50	21,86	23,30	23,58	19,84
			Z3	21,10	18,85	15,48	16,11	18,05	17,26	15,65	20,46	21,10
			Z4	24,27	22,50	24,41	25,88	21,08	27,75	29,12	28,36	24,27
		V3	Z1	14,16	12,94	10,62	11,35	12,50	11,78	10,31	13,69	14,16
			Z2	17,27	15,63	17,83	18,98	14,86	18,95	19,95	20,27	17,27
			Z3	19,14	17,37	14,80	15,33	16,45	15,85	15,03	18,74	19,14
			Z4	21,34	19,69	21,62	22,82	18,82	24,43	25,20	24,66	21,34
		V4	Z1	13,31	12,25	10,09	10,96	12,21	11,41	10,00	13,03	13,31
			Z2	15,66	14,03	16,81	17,75	13,99	17,42	18,07	18,38	15,66
			Z3	18,00	16,59	14,51	14,78	15,53	14,99	14,59	17,77	18,00
			Z4	19,40	17,78	19,93	20,96	17,25	22,37	22,90	22,51	19,40
V5		Z1	11,89	11,27	9,91	10,25	10,79	10,18	9,63	11,81	11,89	
		Z2	13,22	11,89	13,99	14,65	11,79	14,50	14,95	15,23	13,22	
		Z3	16,39	15,69	14,35	14,38	13,90	13,71	14,03	16,32	16,39	
		Z4	16,78	15,58	17,07	17,83	15,43	19,19	19,41	19,21	16,78	
V6		Z1	11,46	11,39	10,04	10,36	10,08	9,77	9,84	11,52	11,46	
		Z2	13,79	11,86	12,25	13,28	11,42	13,86	14,29	14,80	13,79	
		Z3	15,97	15,91	14,27	14,48	13,89	13,77	14,35	16,00	15,97	
		Z4	17,44	15,62	15,36	16,56	16,01	18,52	18,88	18,81	17,44	
V7		Z1	11,47	11,00	9,78	10,09	10,18	9,69	9,46	11,44	11,47	
		Z2	12,41	11,15	12,81	13,39	10,83	13,59	13,99	14,26	12,41	
		Z3	15,86	15,34	14,13	14,14	13,64	13,49	13,76	15,84	15,86	
		Z4	15,74	14,68	15,62	16,31	14,67	18,00	18,14	17,99	15,74	

D.2. Iluminação Programada

D.2.1. Porto Alegre – RS

	Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro									
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°	
Potência de refrigeração de pico por zona [kW]	Prédio comercial 1/3	V1	Z1	13,55	13,55	12,73	13,58	13,78	13,47	12,14	13,18	13,55
			Z2	15,60	15,39	16,20	16,90	14,95	15,70	16,37	16,90	15,60
			Z3	17,33	16,93	15,97	16,85	17,33	17,16	15,64	17,02	17,33
			Z4	19,49	18,77	20,40	21,26	19,10	20,43	21,07	21,06	19,49
		V2	Z1	13,58	13,68	12,82	13,57	13,85	13,50	12,18	13,30	13,58
			Z2	14,97	15,14	15,90	16,65	14,72	15,28	15,84	16,27	14,97
			Z3	17,20	17,00	16,04	16,77	17,25	17,01	15,64	16,88	17,20
			Z4	18,73	18,28	19,94	20,72	18,75	19,82	20,35	20,30	18,73
		V3	Z1	13,37	13,61	13,13	13,38	13,53	13,27	12,49	13,22	13,37
			Z2	13,78	14,23	15,02	15,59	13,92	14,38	14,61	14,92	13,78
			Z3	16,89	16,91	16,35	16,53	16,77	16,65	15,82	16,70	16,89
			Z4	17,36	17,32	18,66	19,41	17,70	18,51	18,86	18,76	17,36
		V4	Z1	13,40	13,79	13,52	13,77	13,48	13,56	12,91	13,38	13,40
			Z2	13,10	13,76	14,64	15,25	13,58	13,80	13,95	14,21	13,10
			Z3	16,87	17,12	16,75	16,85	16,61	16,85	16,24	16,80	16,87
			Z4	16,51	16,69	17,99	18,73	17,10	17,74	18,00	17,92	16,51
		V5	Z1	13,25	13,76	13,62	13,78	13,29	13,32	12,97	13,31	13,25
			Z2	12,15	12,87	13,59	14,11	12,89	13,07	12,81	13,05	12,15
			Z3	16,72	17,15	16,89	16,91	16,37	16,50	16,29	16,72	16,72
			Z4	15,41	15,78	16,82	17,49	16,29	16,62	16,71	16,74	15,41
		V6	Z1	13,36	13,95	13,76	13,98	13,16	13,50	13,14	13,42	13,36
			Z2	12,48	12,77	13,17	13,77	12,80	13,17	13,05	13,22	12,48
			Z3	16,83	17,34	16,98	17,13	16,50	16,70	16,53	16,84	16,83
			Z4	15,77	15,91	16,40	17,21	16,33	16,57	16,65	16,82	15,77
	V7	Z1	13,39	13,93	13,75	14,18	13,50	13,82	13,11	13,44	13,39	
		Z2	12,53	13,24	13,36	13,85	13,12	13,56	12,99	13,11	12,53	
		Z3	16,84	17,28	16,98	17,26	16,69	16,93	16,42	16,86	16,84	
		Z4	15,79	16,17	16,51	17,14	16,43	16,65	16,51	16,56	15,79	
	Prédio comercial 2/3	V1	Z1	15,43	14,46	12,79	15,08	16,13	15,21	11,99	14,52	15,43
			Z2	20,12	18,75	21,10	22,14	18,25	19,85	21,62	22,19	20,12
			Z3	20,08	18,45	16,50	18,35	20,06	19,38	15,82	19,31	20,08
			Z4	24,37	22,37	25,44	26,57	22,51	25,17	26,93	26,77	24,37
		V2	Z1	14,95	13,98	12,68	14,98	15,95	15,12	12,15	14,21	14,95
			Z2	19,08	18,35	20,58	21,56	17,82	19,12	20,66	21,06	19,08
			Z3	19,44	17,97	16,08	18,09	19,73	19,10	15,63	18,82	19,44
			Z4	23,02	21,71	24,74	25,73	21,94	24,21	25,66	25,41	23,02
		V3	Z1	13,85	13,35	12,59	14,40	15,20	14,52	12,11	13,38	13,85
			Z2	16,93	16,86	18,95	19,84	16,39	17,08	18,31	18,48	16,93
			Z3	18,13	17,06	15,77	17,45	18,60	18,15	15,52	17,77	18,13
			Z4	20,48	19,86	22,48	23,39	20,17	21,85	22,88	22,53	20,48

		Vidro	Zona	Orientação da edificação em relação ao norte verdadeiro								
				0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
Potência de refrigeração de pico por zona [kW]	Prédio comercial 2/3	V4	Z1	13,33	13,50	13,01	14,23	14,93	14,32	12,48	13,17	13,33
			Z2	15,61	15,98	18,13	18,91	15,70	15,90	16,94	17,19	15,61
			Z3	17,46	16,75	16,15	17,23	18,04	17,67	15,75	17,27	17,46
			Z4	18,91	18,64	21,16	22,01	18,96	20,38	21,14	20,79	18,91
		V5	Z1	12,94	13,33	13,20	13,69	13,98	13,56	12,58	12,94	12,94
			Z2	13,60	14,16	15,93	16,45	14,02	13,94	14,57	14,96	13,60
			Z3	16,36	16,63	16,43	16,68	16,91	16,78	15,82	16,36	16,36
			Z4	16,70	16,84	18,83	19,53	17,26	18,11	18,48	18,38	16,70
		V6	Z1	13,08	13,62	13,44	13,78	13,47	13,54	12,91	13,12	13,08
			Z2	13,80	13,84	14,67	15,43	13,69	13,65	14,19	14,72	13,80
			Z3	16,48	16,94	16,58	16,83	16,52	16,75	16,29	16,49	16,48
			Z4	17,05	16,73	17,70	18,67	17,14	17,78	18,20	18,28	17,05
		V7	Z1	13,08	13,54	13,42	14,14	13,98	13,83	12,83	13,12	13,08
			Z2	13,07	13,43	15,23	15,74	13,40	13,52	14,07	14,43	13,07
	Z3		16,44	16,82	16,57	17,04	16,83	16,96	16,06	16,56	16,44	
	Z4		16,09	15,99	17,99	18,67	16,47	17,54	17,87	17,78	16,09	
	Prédio comercial 3/3	V1	Z1	17,95	16,42	14,00	16,61	18,41	17,22	12,60	16,62	17,95
			Z2	24,37	21,71	25,32	26,71	21,09	23,60	26,53	27,06	24,37
			Z3	22,84	20,59	17,63	20,00	22,74	21,53	16,53	21,62	22,84
			Z4	28,74	25,88	29,66	31,08	25,35	29,19	32,24	31,91	28,74
		V2	Z1	17,20	15,68	13,32	16,45	18,04	16,93	12,28	16,05	17,20
			Z2	23,03	21,10	24,91	26,05	20,56	22,79	25,22	25,57	23,03
			Z3	21,86	19,71	16,82	19,65	22,15	21,04	16,12	20,88	21,86
			Z4	27,05	24,46	28,85	30,11	24,66	28,11	30,60	30,15	27,05
		V3	Z1	15,52	14,22	12,51	15,53	16,91	15,80	12,07	14,71	15,52
			Z2	19,98	19,21	22,52	23,59	18,76	20,02	21,88	22,04	19,98
			Z3	19,90	18,14	15,83	18,55	20,46	19,61	15,60	19,26	19,90
			Z4	23,65	22,19	25,89	26,98	22,37	24,95	26,71	26,11	23,65
V4		Z1	14,66	13,55	12,80	15,19	16,63	15,48	12,18	14,12	14,66	
		Z2	18,07	18,16	21,32	22,23	17,79	18,38	19,90	20,24	18,07	
		Z3	18,82	17,38	16,08	18,08	19,63	18,90	15,68	18,43	18,82	
		Z4	21,43	20,62	24,12	25,10	20,75	22,93	24,24	23,89	21,43	
V5		Z1	13,21	13,16	12,94	14,18	15,13	14,35	12,39	12,94	13,21	
		Z2	15,14	15,63	18,14	18,77	15,37	15,43	16,43	16,95	15,14	
		Z3	17,11	16,41	16,17	17,11	17,94	17,53	15,56	17,05	17,11	
		Z4	18,24	18,05	20,89	21,62	18,43	19,66	20,37	20,38	18,24	
V6		Z1	12,98	13,45	13,27	13,96	14,24	13,84	12,83	12,99	12,98	
		Z2	15,41	14,93	16,46	17,45	14,89	14,98	15,82	16,56	15,41	
		Z3	16,82	16,87	16,45	16,88	17,24	17,12	16,20	16,86	16,82	
		Z4	18,63	17,74	19,26	20,40	18,15	19,15	19,88	20,08	18,63	
V7		Z1	12,91	13,30	13,20	14,20	14,58	14,23	12,68	12,91	12,91	
		Z2	14,31	14,62	17,02	17,59	14,47	14,70	15,61	16,10	14,31	
		Z3	16,82	16,77	16,39	17,06	17,43	17,33	15,97	16,84	16,82	
		Z4	17,29	16,76	19,58	20,26	17,23	18,70	19,32	19,37	17,29	

APÊNDICE E – O Método do Valor Presente Líquido

O método do Valor Presente Líquido (VPL) é definido, considerando uma proposta de investimento, como o valor presente das entradas de caixa desta proposta menos o valor presente das saídas de caixa desta proposta. Assim, uma análise econômica baseada no VPL compara o valor presente do capital com o valor desta mesma quantia de capital no futuro. Os critérios do VPL para verificar a atratividade de um investimento são os seguintes:

- $VPL < 0$: Não atrativo (valor presente das entradas é menor que o das saídas).
- $VPL = 0$: Atratividade nula (valor presente das entradas é igual ao das saídas).
- $VPL > 0$: Atrativo (valor presente das entradas é maior que o das saídas).

Este método é caracterizado por descontar os fluxos de caixa a uma taxa de retorno específica, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), assim definida por Filho e Kopittke, 1994: “ao se analisar uma proposta de investimento deve ser considerado o fato de se estar perdendo a oportunidade de auferir retornos pela aplicação do mesmo capital em outros projetos. A nova proposta para ser atrativa deve render, no mínimo, a taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes e de pouco risco. Esta é, portanto, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA)”.

Assim, a TMA pode ser interpretada como a taxa de retorno que alguém está disposto a aceitar em um investimento de risco para abrir mão de um retorno certo num investimento sem risco. Como se tem liberdade para determinar esta taxa, optou-se por trabalhar com uma TMA igual a 8,71%, que é a média de rendimento da poupança nos últimos 5 anos (de 2000 à 2004).

Além deste índice, os valores das entradas do fluxo de caixa devem ser corrigidos pela inflação a cada ano. A meta de inflação publicada pelo Banco Central do Brasil para o ano de 2005 é de 6,30%, que é a projeção do Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

A equação F.1 possibilita calcular o VPL [Investopedia, 2005]:

$$VPL = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (E.1)$$

onde: VPL é o valor presente líquido [R\$];

t é o número de períodos (*de 1 até T*) [anos];

C_t é o fluxo de caixa no período t [R\$];

C_0 é o custo inicial [R\$];

i é a taxa de desconto anual (TMA) [%].